



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Trabajo de Tesis Doctoral:

Desarrollo de nuevos productos deshidratados a partir de peras (var. Packham's Triumph) de la Norpatagonia argentina

Tesista: Silvia Beatriz Maidana

Directora: Dra. Daniela Salvatori

Codirector: Dr. Sergio Giner

Año 2017

El presente trabajo de Tesis Doctoral, para optar por el título de Doctor de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata, fue realizado en la Facultad de Ciencias y Tecnología de los Alimentos (FACTA) de la Universidad Nacional del Comahue (UNCo) y en el Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos, Biotecnología y Energías Alternativas (CONICET-UNCo), bajo la dirección de la Dra. Daniela Salvatori y co-dirección del Dr. Sergio Giner.

*A mi mamá,
a Oscar, Agustina y Valentino.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a la Vida y al Universo....

A mi directora Dra. Daniela M. Salvatori, por ser un pilar esencial en el desarrollo de mi trabajo de investigación y en la escritura de mi tesis, por su dedicación y fundamental aporte, por todas las horas compartidas, por su apoyo, comprensión y paciencia.

A mi codirector Dr. Sergio Giner, por su participación y su óptica profesional, que fueron muy importantes para lograr esta meta en mi carrera.

A la Universidad Nacional del Comahue y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica por haberme otorgado la beca que me permitió realizar este trabajo.

A la Facultad de Ciencias y Tecnología de los Alimentos de la Universidad Nacional del Comahue y al Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos, Biotecnología y Energías Alternativas (PROBIEN, CONICET-UNCo), por permitirme realizar el trabajo de investigación de mi doctorado en sus laboratorios y demás instalaciones.

A mi amor y compañero de vida, Oscar, que ha vivido junto a mí cada paso transitado durante esta hermosa y exigente experiencia, que en un momento decidí emprender. Gracias por tu amor, por tu paciencia, por alentarme, contenerme y apoyarme siempre en todas mis decisiones y proyectos. Gracias por estar a mi lado siempre, aunque a veces resulte difícil, y por ayudarme a cumplir este sueño.

A mis hijos, Agustina y Valentino, por su amor y ternura, por sus abrazos y sus besitos, que han sido fundamentales para poder seguir adelante, con fuerza y energía.

A mi mamá, que siempre ha sido mi guía y mi ejemplo para seguir luchando por mis sueños. Gracias por tu amor infinito y contención.

A mi papá, que forma parte de mi alma desde el momento cero de mi vida.

A mis hermanos, Claudia y Pablo, por todo lo que vivimos juntos, por acompañarme y alentarme en todo momento. Gracias por estar a mi lado de todas las maneras posibles y por ser parte, junto a sus familias, de este transitar en mi vida.

A mis amigas de la vida, Caro y Lore, con las que he compartido cada vivencia experimentada durante el transcurso de este camino elegido. Gracias por sus consejos, charlas y abrazos, por su incondicionalidad y su cariño.

A mis compañeras y amigas de la Facu, que de una u otra forma han sido testigos partícipes de cada una de las etapas que he experimentado. Gracias por su acompañamiento y por su cariño.

A la Ms. Nora Barda, que desde su grandeza desinteresada me ha brindado una ayuda muy valiosa para poder concretar parte de este sueño.

A Mabel, a Andrea y a Paula que han colaborado en diversas etapas de este trabajo y han sido un gran apoyo.

A mi grupete de amigos y amigas, que siempre han estado a mi lado, escuchándome y brindándome palabras de aliento.

A Adriana y a Gabriela, regalos de la vida, que me han ayudado a crecer y a poder ver y aceptar la verdadera esencia de las cosas. Gracias por brindarme su luz espiritual y por permitirme encontrar la mía.

Gracias a todos los que forman parte de mi vida, y que de alguna forma me han brindado su apoyo a lo largo de esta experiencia personal y profesional.

¡Simplemente GRACIAS!

... "No es necesario apresurarse. No es necesario brillar. No es necesario ser nadie más que uno mismo".....Virginia Woolf.

Lic. Maidana Silvia Beatriz

PUBLICACIONES QUE RESULTARON DEL PRESENTE TRABAJO DE TESIS

2009-Maidana, S. B. y Salvatori, D. "Deshidratación de peras por secado convectivo". Proceedings del XII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CYTAL). Concordia, Entre Ríos, Argentina. Publicado en CD ROM (2.17). ISBN 978-987-22165-3-5. Del 7 al 9 de Octubre.

2010-Maidana, Silvia B., Vullioud, M. y Salvatori, Daniela M. "Color of dried pears as affected by prior blanching and sugar infusion". Proceedings del Interim Meeting of the International Color Association (AIC 2010 "Color and Food"), Mar del Plata, Argentina. Publicado en CD ROM y en papel (Pág. 253-260). ISBN 978-987-24707-2-2. Del 12 al 15 de Octubre.

2011-Maidana, Silvia B., Vullioud, M. y Salvatori, Daniela M. "Efecto de pretratamientos de escaldado e infusión con azúcares sobre la cinética de deshidratación de peras". Proceedings del VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos, Ciudad de Lima, Perú. Publicado en CD ROM. Del 23 al 26 de Octubre.

2011-Maidana, Silvia B., Vullioud, M. y Salvatori, Daniela M. "Cambios Estructurales en peras (*Pyrus communis* var. Packham's Triumph) sometidas a osmodeshidratación y secado". XIII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CYTAL), organizado por la Asociación Argentina de Tecnólogos Alimentarios (AATA), Puerto Madero, Bs. As., Argentina. Publicado en CD ROM. Del 19 al 21 de Octubre. (Sesión 7). ISBN 978-987-22165-4-2.

2012-Maidana, Silvia B., Vullioud, M. y Salvatori, Daniela M. "Modificaciones microestructurales en peras (*Pyrus communis* var. Packham's Triumph) sometidas a deshidratación osmótica con diferentes humectantes". Resumen y póster del IV Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos Córdoba 2012 (CICyTAC 2012), "Desafíos para una producción sustentable y competitiva". Del 14 al 16 de Noviembre.

2014-Maidana, Silvia B., Vullioud, M., Schebor, Carolina y Salvatori, Daniela M. "Propiedades físicas de peras sometidas a pretratamientos combinados de deshidratación osmótica y secado". (CICyTAC 2014). Proceedings del V Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Córdoba, Argentina. Del 17 al 19 de Noviembre.

2014-Maidana, Silvia B., Vullioud, M. y Salvatori, Daniela M. "Golosina a Base de Frutas: Peras Deshidratadas mediante ósmosis y secado". III Congreso Nacional de Alimentación Segura y Saludable, Santa Fe, Argentina. Del 30 al 31 de Octubre.

2015-Maidana, Silvia B., Vullioud, M., Díaz, Andrea y Salvatori, Daniela M. "Capacidad de Rehidratación de peras (*Pyrus communis* var. Packham's Triumph) deshidratadas". XV Congreso

Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos, CYTAL, Buenos Aires, Argentina. Del 3 al 5 de Noviembre.

2016-Maidana, Silvia B., Vullioud, M., Díaz, A., y Salvatori, D. "Peras deshidratadas: efecto de pretratamientos osmóticos sobre las propiedades mecánicas" (CICyTAC 2016) VI Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Córdoba, Argentina. Del 02 al 04 de Noviembre.

RESUMEN



RESUMEN

La posibilidad de desarrollar productos deshidratados a partir de peras variedad Packham's Triumph radica no sólo en sus propiedades fisicoquímicas y organolépticas, sino también en que es la variedad de más larga conservación en frío, lo que permite que su industrialización pueda llevarse a cabo prácticamente todo el año. La deshidratación se presenta como una alternativa interesante para aprovechar los descartes de los galpones de empaque y desarrollar tecnologías innovadoras para la obtención de productos diferenciados en base a estas frutas. La técnica de infusión con azúcares constituye una manera sencilla de provocar una deshidratación parcial por ósmosis, pudiendo utilizarse como operación previa a procesos tradicionales de conservación. El objetivo principal de este trabajo fue la aplicación de procesos de secado convectivo con pretratamientos de infusión con azúcares y/o escaldado para obtener uno/varios productos de pera terminados de alta calidad y larga vida útil. Los pretratamientos fueron: escaldado (E), infusiones secas con sacarosa (ISs) y glucosa (ISg) a distintas actividades de agua (ISs1 = 0,83 y ISs2 = 0,94) y tratamientos combinados (E+IS). Se estudió la cinética de secado de las peras frescas y pretratadas y se abordaron aspectos de la transformación fisicoquímica y sensorial de modo de obtener productos terminados con la mejor calidad posible. Se estudiaron los cambios composicionales, estructurales, mecánicos y de color y se realizaron estudios sensoriales con consumidores. Se analizaron además las interacciones agua-estructura a través del análisis de las isotermas de sorción de agua, las transiciones vítreas, la movilidad molecular y la capacidad de rehidratación.

Los pretratamientos de infusión permitieron reducir la capacidad de sorción de agua, así como también la movilidad molecular, sobre todo en muestras con escaldado previo, sugiriendo que estos productos serían bastante resistentes a los cambios químicos y físicos deteriorativos si no permanecen por tiempos prolongados fuera de su envase. La aplicación de pretratamientos E-ISs2 condujo a productos de mayor aceptabilidad sensorial en cuanto a preferencia global, textura y sabor con un color aceptable, sugiriendo que este pretratamiento se presenta como una alternativa potencialmente aplicable para el desarrollo de productos deshidratados de características organolépticas más cercanas a las

de las peras frescas de partida. Las peras con pretratamiento E+ISs1 resultaron apropiadas para el desarrollo de un producto más azucarado destinado a la población infantil como un mix de cereales y frutas, dado que mostraron una baja capacidad de rehidratación a tiempos cortos, sugiriendo que, si se mezclan con un líquido podrán conservar las características de textura en el tiempo esperado de consumo de este producto.

Los estudios realizados permitieron definir la tecnología más adecuada para obtener peras deshidratadas que pueden ser consumidas en forma directa como snacks o ser utilizados en la elaboración de alimentos compuestos.

ÍNDICE



INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	MATERIA PRIMA.....	1
1.1.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PERA	1
1.1.1.1.	<i>Morfología y estructura</i>	1
1.1.1.2.	<i>Composición química y nutricional</i>	3
1.1.1.3.	<i>Cambios morfológicos durante la maduración</i>	5
1.1.2.	IMPORTANCIA MUNDIAL, NACIONAL Y REGIONAL DE LA PERA.....	6
1.1.2.1.	<i>Distribución, superficie y volumen</i>	6
1.1.2.2.	<i>Producción y Comercio de la fruta</i>	7
1.1.3.	INDUSTRIALIZACIÓN DE LA PERA EN ARGENTINA.....	9
1.2.	DESHIDRATACIÓN DE FRUTAS.....	10
1.2.1.	IMPORTANCIA NUTRICIONAL Y COMERCIAL DE LAS FRUTAS DESHIDRATADAS.....	10
1.2.2.	OPERACIONES DE DESHIDRATACIÓN.....	12
1.2.2.1.	<i>Secado convectivo</i>	12
1.2.2.2.	<i>Deshidratación Osmótica (DO)</i>	16
1.2.3.	PRETRATAMIENTOS.....	19
1.2.3.1.	<i>Escaldado</i>	19
1.2.3.2.	<i>Tecnologías combinadas de procesamiento mínimo</i>	20
1.3.	CALIDAD DE PRODUCTOS DESHIDRATADOS.....	21
1.3.1.	COLOR.....	21
1.3.2.	TEXTURA Y SU RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA.....	25
1.3.2.1.	Determinación instrumental de las propiedades mecánicas.....	26
1.3.2.2.	Influencia del Tejido Vegetal: composición y estructura.....	27
1.3.2.3.	Examen de la estructura y la ultraestructura celular de frutas.....	31
1.3.2.4.	El agua, componente principal de los sistemas celulares.....	33

1.3.3. PROPIEDADES FÍSICAS RELACIONADAS CON LA ESTABILIDAD.....	34
1.3.3.1. <i>Isotermas de Sorción</i>	34
1.3.3.2. <i>Transiciones de Fase</i>	35
1.3.3.4. <i>Movilidad molecular del agua y de los sólidos</i>	37
1.4. EVALUACIÓN SENSORIAL.....	39
1.4.1. PRUEBAS SENSORIALES.....	40
2. OBJETIVOS	42
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	42
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	42
3. MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1. MATERIA PRIMA.....	43
3.2. AGENTES OSMÓTICOS.....	43
3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	43
3.3.1 <i>PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS</i>	43
3.3.2. <i>PRETRATAMIENTOS</i>	44
3.3.2.1 <i>Infusión Seca con azúcares (IS)</i>	45
3.3.2.2. <i>Escaldado</i>	47
3.3.3. <i>PROCESO DE SECADO CONVECTIVO</i>	48
3.4. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LAS MUESTRAS: FRESCAS Y PROCESADAS.....	50
3.4.1. <i>CONTENIDO DE HUMEDAD</i>	50
3.4.2. <i>CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES REFRACTOMÉTRICOS</i>	52
3.4.3. <i>DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ACUOSA</i>	53
3.4.4. <i>ENCOGIMIENTO</i>	54
3.5. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	55
3.5.1. <i>ENSAYO DE PENETRACIÓN</i>	55

3.6. PROPIEDADES FÍSICAS RELACIONADAS CON LAS ESTABILIDAD DURANTE EL ALMACENAMIENTO.....	57
3.6.1. ISOTERMAS DE SORCIÓN DE AGUA.....	57
3.6.2. TRANSICIONES DE FASE.....	58
3.6.3. ESTIMACIÓN DE LA MOVILIDAD MOLECULAR DEL AGUA Y DE LOS SÓLIDOS.....	59
3.7. COLOR SUPERFICIAL.....	60
3.8. CAPACIDAD DE REHIDRATACIÓN.....	62
3.9. ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA.....	63
3.10. ANÁLISIS SENSORIAL.....	66
3.11. MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS.....	71
3.11.1. <i>Proceso de secado</i>	72
3.11.2. <i>Cinética de rehidratación</i>	74
3.11.3. <i>Isotermas de sorción</i>	75
3.12. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	78

CAPÍTULO I: “Secado convectivo de peras: Influencia de los pretratamientos de ósmosis y de escaldado”

I.1. INTRODUCCIÓN.....	79
I.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	82
I.3. CONCLUSIONES.....	97

CAPÍTULO II: “Caracterización estructural y ultraestructural de los tejidos de pera frescos y pretratados”

II.1. INTRODUCCIÓN.....	99
II.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	101
II.3. CONCLUSIONES.....	119

CAPÍTULO III: “Comportamiento mecánico de peras deshidratadas y su relación con la estructura”

III.1. INTRODUCCIÓN.....	121
III.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	122
III.3. CONCLUSIONES.....	132

CAPÍTULO IV: “Capacidad de rehidratación de peras deshidratadas”

IV.1. INTRODUCCIÓN.....	135
IV.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	137
IV.3. CONCLUSIONES.....	150

CAPÍTULO V: “Influencia de los pretratamientos sobre el color superficial de peras deshidratadas”

V.1. INTRODUCCIÓN.....	151
V.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	152
V.3. CONCLUSIONES.....	161

CAPÍTULO VI: “Isotermas de sorción, transición vítrea y movilidad molecular del agua y de los sólidos de peras deshidratadas”

VI.1. INTRODUCCIÓN.....	162
VI.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	164
VI.3. CONCLUSIONES.....	175

CAPÍTULO VII: “Análisis Sensorial de los productos obtenidos”

VII.1. INTRODUCCIÓN.....	176
VII.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	177
VII.3. CONCLUSIONES.....	186

CONCLUSIONES.....187

NOMENCLATURA.....190

BIBLIOGRAFÍA.....192

INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

1.1. MATERIA PRIMA

1.1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PERA

1.1.1.1. Morfología y estructura

El peral es un frutal de pepita que pertenece a la familia de las *Rosáceas* y dentro del género *Pyrus*, la especie más común es *Pyrus communis* (**Figura 1.1-1**). Es un árbol piramidal de tronco alto y grueso, con hojas alternas y simples, generalmente ovaladas, flores blancas con largos cabillos que forman corimbos umbeliformes en la terminación de las ramillas y fruto en pomo, estrechado en la base; ésta puede ser redondeada o atenuada y prolongada en el pedúnculo. El cultivo prospera bien en climas templados y algo húmedos, siendo más resistente al frío que al calor, necesita de suelos limosos y silíceo arcillosos, sanos y permeables.



Figura 1.1-1 Perales en floración.

El 45% de las variedades de pera cultivadas en Argentina corresponde a la variedad William's y el 30% a Packham's Triumph. Le siguen la Beurre D'Anjou con el 10%, Red Bartlett con 6% y Abate Fetel con el 2% del volumen producido. El porcentaje

restante incluye variedades como Beurre Bosc, Beurre Giffard, Clapps Favourite y Red Beurre D'Anjou (Dirección Nac. de Transformación y Comercialización de Productos Agrícolas y Forestales, Informe Sectorial, MinAgri 2010). La cantidad de nuevas variedades de peras es sensiblemente menor a las manzanas y los programas de mejoramiento buscan producir peras bicolors o híbridos entre peras asiáticas y europeas (Toranzo, 2016).

La pera Packham's Triumph, como hemos visto, es la segunda variedad en importancia de producción entre las peras argentinas (**Figura 1.1-2**). Es autoincompatible y su hábito de floración temprana exige una buena elección de polinizadoras; entre otras puede ser polinizada por Beurré D' Anjou y Abate Fetel. En el Norte de la Patagonia florece entre el 18 y el 22 de Septiembre. Su peso medio ronda los 270-280 gr, con altura y calibre medio de 95 y 75 mm, respectivamente. El pedúnculo es largo, leñoso, y de inserción vertical, con la cavidad peduncular apenas definida. La epidermis es de color verde claro, cambiando a amarillo a la madurez, con numerosas lenticelas oscuras; la superficie externa se encuentra cubierta de numerosas protuberancias. La pulpa es blanco-cremosa, consistente y de textura fina, dulce ligeramente acidulada y de muy buena calidad organoléptica (Benítez, 2001). En los Valles de Río Negro y Neuquén madura hacia fines de la primera semana de febrero, cuando el fruto cuenta en promedio con un desarrollo de 138 días desde el momento de plena floración. Son bastante resistentes al manipuleo y toleran muy bien el almacenamiento, aunque son susceptibles a la escaldadura superficial y a la deshidratación del pedúnculo.



Figura 1.1-2 Pera var. *Packham's Triumph*.

1.1.1.2. *Composición química y nutricional*

La pera tiene un alto contenido en agua. El porcentaje medio de este elemento oscila entre valores de 78-90%, según el estado de desarrollo y la variedad. El agua permite englobar en solución otras sustancias, como azúcares, taninos, pigmentos, sales minerales, ácidos y otras. La **Tabla 1.1-1** muestra la composición nutricional general de la pera fresca.

Nutricionalmente las peras se consideran una buena fuente de fibra, su pulpa es rica en fibra insoluble y soluble. De las recomendaciones diarias, cada 100 g aportan un 17 % de fibra insoluble y un 9,4% de fibra soluble, constituyéndose como uno de los principales aportes nutricionales. Una gran cantidad de la fibra soluble se halla en forma de pectinas, que principalmente se encuentran en la piel de dicha fruta, y en la pulpa. La pectina tiene la capacidad de formar un gel cuando se combina con el azúcar o con los ácidos, dando una consistencia espesa, similar a la que se produce en la elaboración de mermeladas. Esta fruta por tener grandes cantidades de fibra soluble (pectinas), magnesio y zinc que estimulan la producción de insulina y las epicatequinas con propiedades hipoglucémicas, constituyen un alimento adecuado para personas diabéticas (Barroca y col., 2006). Se ha demostrado que las pectinas ayudan a rebajar el nivel de colesterol, al formar un gel en el intestino que atrapa este tipo de grasa y lo expulsa del organismo a través de las heces, además de tener la capacidad para absorber las toxinas del intestino e impedir que éstas pasen a la sangre o ataquen la pared intestinal. Los constituyentes pécticos dependen de la especie, la etapa de maduración, y de las condiciones de almacenaje. Durante la maduración, la protopectina se hidroliza en pectina soluble, y esta conversión es el principal factor que condiciona el ablandamiento de la pera.

Los azúcares reductores, de los cuales la fructosa es el mayor componente, constituyen el 80% del total de los azúcares presentes en la pera. Esta fruta también contiene maltosa, galactosa, xilosa y probablemente arabinosa. Otros carbohidratos presentes son el almidón y la celulosa. Durante la maduración, el almidón de la fruta se convierte en azúcar. La alta calidad en cuanto al sabor de las peras está asociada al alto contenido en azúcares, de los cuales el que incide más directamente sobre la propiedad organoléptica del sabor del fruto es la sacarosa, cuya máxima presencia se sitúa en el momento de plena madurez fisiológica. Los valores de azúcares totales en peras

cultivadas varían de 8 a 11% por unidad de peso de pulpa comestible (Kadam y col., 1995).

En cuanto a los minerales, contiene mayormente potasio que es un mineral necesario para la transmisión y generación del impulso nervioso y para la actividad muscular normal, e interviene en el equilibrio de agua dentro y fuera de la célula. Además contiene ácido cafeico y ácido pantoténico, que poseen propiedades anticolesterolémicas.

TABLA 1.1-1 Composición Nutricional de la pera fresca (100 g de base comestible)

PERA	
NUTRIENTES	Cantidad Aproximada
Agua (g)	83,71
Energía (kcal)	58
Lípidos (mg)	120
Proteína (mg)	380
Hidratos de carbono (g)	15,46
Fibra (g)	3,1
Potasio (mg)	119
Sodio (mg)	1
Fosforo (mg)	11
Calcio (mg)	9
Cobre (mg)	0,82
Magnesio (mg)	7
Manganeso (mg)	0,08
Hierro (mg)	0,17
Zinc (mg)	0,10
Vitamina C (mg)	4,2
Vitamina B1 (Tiamina) (mg)	0,3
Vitamina B2 (Riboflavina) (µg)	25
Vitamina B3 (µg)	157
Vitamina B5 (µg)	48
Vitamina B6 (µg)	28
Vitamina A (mg)	23 IU
Vitamina E (µg)	0,12
Vitamina K (µg)	4,5

Fuente: www.alimentosnutricion.com/la-pera

El potasio junto con el calcio intervienen directamente, en el proceso de formación ósea, así como en la regulación de líquidos en el cuerpo y el buen estado del sistema nervioso (Chen y col., 2007). Los taninos le confieren propiedades antibacterianas. La

pera también es rica en ácidos grasos poliinsaturados y en aminoácidos, algunos de ellos esenciales como la leucina, necesaria para el óptimo crecimiento en los infantes o para la regeneración de los tejidos. Los aminoácidos más abundantes en las proteínas de las peras son la lisina, fenilalanina, y leucina, especialmente durante la maduración.

Su contenido de vitaminas no es destacable. Según puede observarse en la **Tabla 1.1-1**, las vitaminas que se encuentran en mayor cantidad son la C y la A. La diferencia en vitamina C es más evidente al final de la maduración. Su concentración oscila entre 0,5 mg de vitamina C por cada 100 g de fruto al principio de la maduración y 23 mg al final de ésta. La concentración de ácido ascórbico es mucho mayor en la piel que en la pulpa. Los principales ácidos orgánicos presentes son el málico y el cítrico.

Las enzimas presentes son la amilasa, catalasa, peroxidasa, pectingalacturonasa, protopectinasa y pectasa. La polifenoloxidasa se considera la responsable del pardeamiento de las peras luego del cortado, siendo los ácidos clorogénicos los sustratos principales (Kadam y col., 1995).

En la determinación del sabor son importantes aspectos como la dulzura, acidez, astringencia y amargor. En peras de consumo directo, en general no son deseables un amargor y astringencia intensos. La astringencia y el amargor se asocian a veces con la piel de algunas variedades. Ambos son atribuidos a la presencia de sustancias polifenólicas y fenólicas, particularmente los taninos. Muchos compuestos de este tipo están presentes en la pera (Luckwill y Pollard, 1963). Las sustancias polifenólicas de alto peso molecular tienden a ser más astringentes, mientras que las de bajo peso molecular tienden a ser amargas (Williams y col., 1978). Los compuestos volátiles aromáticos definen los diversos aromas distintivos de la fruta. Los principales compuestos volátiles en peras completamente maduras son el etil, propil, butil y hexil acetato, que suponen el 70,6% del total de los compuestos volátiles (Shiota, 1990).

1.1.1.3. *Cambios morfológicos durante la maduración*

La mayoría de los frutos se ablandan durante la maduración y esto es un atributo principal en la calidad que a menudo determina el período de conservación. El ablandamiento de los frutos puede derivar de tres mecanismos: pérdida de turgor; degradación del almidón y ruptura de las paredes celulares del fruto. La pérdida de turgor es en gran parte un proceso no fisiológico asociado con la deshidratación durante

la postrecolección del fruto, y como tal puede tomar importancia comercial durante el almacenamiento. La pérdida de agua equivalente al 5-10% del peso en fresco de la fruta puede ser causa de una inaceptación comercial.

En general se piensa que el cambio en la textura durante la maduración de la mayoría de los frutos es en gran parte resultado de la degradación de la pared celular. Estos cambios normalmente consisten en una disolución aparente de la región de la laminilla media rica en pectina de la pared celular. Durante la maduración hay una pérdida de azúcares neutros, en la mayoría de los frutos predominantemente es la galactosa, pero también hay pérdida de arabinosa (Tucker y Grierson, 1987). Estos dos azúcares son los componentes principales de la pectina neutral de la pared.

1.1.2. IMPORTANCIA MUNDIAL, NACIONAL Y REGIONAL DE LA PERA

1.1.2.1. *Distribución, superficie y volumen*

Esta fruta es originaria de regiones de Europa Oriental y de Asia Occidental, donde su cultivo se viene realizando desde épocas muy remotas. Los griegos y los romanos conocieron el cultivo del peral y fueron estos últimos los que lo introdujeron en la Cuenca del Ebro. China y España son los principales países productores en la actualidad. El origen de los perales se remonta a 2000 o 3000 años A.C. Deriva de la selección de las razas silvestres de peral especie europea *Pyrus communis* (var. *Pyraster*) hibridadas con otras especies asiáticas: *Pyrus nivalis*, *Pyrus pyrifolia*, *Pyrus spinosa*, etc. Con el descubrimiento de América fueron los españoles en América del Sur junto con los ingleses y franceses en América del Norte los que introdujeron este árbol en el continente americano. Los mayores productores de esta fruta son China, Italia, Estados Unidos, España y Argentina. En los últimos años la producción de pera en Argentina rondó los 0,8 millones de toneladas. El consumo anual promedio por habitante es de aproximadamente 3 kg de pera. La producción está fuertemente concentrada en la región de los valles norpatagónicos (provincias de Río Negro y Neuquén), que representa entre un 80% y un 90% del total producido y tiene a Río Negro como la principal provincia productora. El resto de la producción se realiza en la provincia de Mendoza (**Figura 1.1-3**).



Figura 1.1-3 Áreas de producción del cultivo de *Pyrus communis* L. en Argentina.

1.1.2.2. Producción y Comercio de la fruta

Argentina destina más de medio millón de hectáreas al cultivo de frutales distribuidas a lo largo de todo su territorio.

La producción argentina de frutas sufrió un gran impulso a partir del 2002. En 1998 las exportaciones no superaban las 864.300 toneladas mientras que en la actualidad las mismas aumentaron a casi el doble de dicho valor (1.528.053 tn).

Los frutales de pepita representan cerca del 16% de la producción mundial de frutas. El peral común o europeo, presenta amplias superficies de cultivo a nivel mundial, siendo China el principal productor, con alrededor del 63% de la producción total.

La Argentina posee una larga tradición exportadora de frutas de pepita. Debido a las excelentes características de sus regiones productivas, a la adecuación tecnológica y

a una regularidad en la oferta de variedades, que gozan de buena aceptación y reconocida calidad, ha logrado en los últimos años posicionarse como el primer exportador mundial. Alrededor del 65-70% de la producción se destina al comercio internacional (incluyendo los jugos concentrados), fundamentalmente de la variedad William's, principalmente para el mercado europeo y el de Estados Unidos en contraestación, y en menores volúmenes a otros países del continente americano especialmente del Mercosur. Cuenta aproximadamente con 600.000 hectáreas ocupadas por frutales. Cerca de 30.000 corresponden a distintas variedades de pera, que se comercializan en fresco, tanto para el mercado interno como para el externo, o procesadas. Esta superficie se concentra principalmente en el Alto Valle del Río Negro y Neuquén, Valle Medio del Río Negro (**Figura 1.1-4**) y en el oasis Sur y Valle de Uco en Mendoza. Otras zonas de menor relevancia son 25 de Mayo en La Pampa y el Valle del Tulum en San Juan. En 2015, la producción en Argentina fue de 854.492 toneladas de pera.

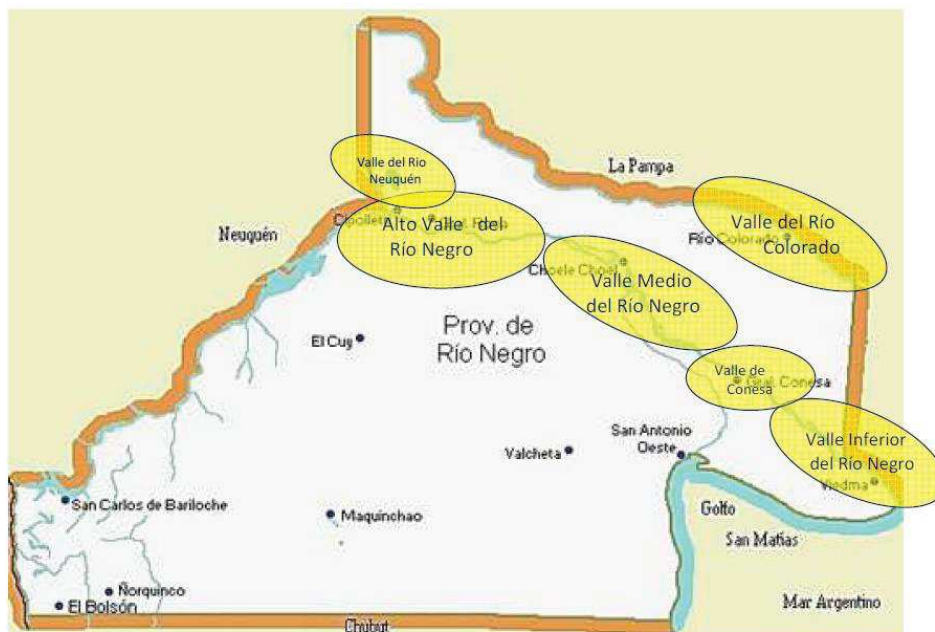


Figura 1.1-4 Zonas Productoras de frutales de pepita (MinAgri, 2010).

El sector frutícola argentino en general presenta antecedentes de operar de manera eficiente en cuanto a producción, logística, procesamiento y comercialización tanto interna como externa (Ministerio de Ciencia y Técnica de la Nación Argentina, 2014).

1.1.3. INDUSTRIALIZACIÓN DE LA PERA EN ARGENTINA

La fruticultura es la principal actividad económica de la región del Alto Valle de Río Negro y Neuquén, donde tiene una larga tradición y contribuye significativamente a la generación de valor agregado, con una alta absorción de mano de obra. La cadena de valor de pera comprende la producción primaria, el empaque y la conservación en frío para su consumo en fresco y la industrialización de la fruta de menor calidad (descarte de productores primarios y empaques). Los productos procesados representan en pera cerca del 28% (**Figura 1.1-5**) El principal producto elaborado es el jugo concentrado (67,8%) seguido por el caldo de sidra (17,6%) y, en menor medida, se elaboran otros subproductos como deshidratados, conservas, pulpas y licores (Toranzo, 2016).

En promedio, entre el año 2004 y 2013, un 27% de la pera y un 43% de la manzana se enviaron para ser procesadas en la industria con destino a la elaboración de jugos.



Figura 1.1-5 Principales destinos de la producción de Pera (Fuente: elaboración propia con base en FUNBAPA 2009-2013, provincias de Río Negro y Neuquén).

Si bien el mercado de la fruta deshidratada es considerablemente más reducido, éste puede llegar a ser muy atractivo tanto para productores como para los consumidores. La fruta deshidratada es una alternativa para conservar la producción de los fruticultores. Se calcula que cerca del 40% de las cosechas se arruinan por las condiciones climáticas o por pérdidas durante el transporte. Sin embargo escasean las agroindustrias elaboradoras de alimentos que utilicen no solo los excedentes de la comercialización en fresco, sino aquellas frutas que sólo poseen destino industrial. Esto

compromete la rentabilidad del sector ya que en muchos casos, los productores terminan vendiendo la fruta a un precio muy por debajo del costo de producción, con la consecuente pérdida económica. De hecho en el año 2012 se puso en marcha el “Programa de Diversificación Industrial” que se enmarca dentro del “Plan Frutícola Integral (PFI)” redactado por varias instituciones de la zona: INTI Neuquén; INTA del Alto Valle; Universidad Nacional del Comahue y Facultad de Agronomía, Cámara patronal de empresas jugueras de la Argentina (CINEX), Cámara Argentina de Fruticultores Integrados (CAFI) y Consejo de Planificación y Acción para el Desarrollo, Neuquén (COPADE). Este plan tuvo como objetivo promover emprendimientos que incorporen valor agregado a las frutas de pepita y carozo, así como la innovación en procesos de industrialización, haciendo hincapié fundamentalmente en la necesidad de diversificar la producción industrial a través de la elaboración de nuevos productos obtenidos a partir de pera, habiéndose sugerido fundamentalmente productos deshidratados y trozos en almíbar, en respuesta a la enorme demanda existente por parte de las empresas en hallar nuevas alternativas de industrialización a esta fruta que tiene grandes excedentes en la zona norpatagónica. La deshidratación se presenta entonces como una alternativa interesante para aprovechar los remanentes de la cosecha y desarrollar tecnologías innovadoras para la obtención de productos diferenciados en base a estas matrices vegetales.

Las frutas deshidratadas de excelente calidad satisfacen a los mercados más exigentes y su utilización como insumo es variada: repostería, cereales para el desayuno, productos snack, servicios de comida e industria láctea, entre otros.

1.2. DESHIDRATACIÓN DE FRUTAS

1.2.1. IMPORTANCIA NUTRICIONAL Y COMERCIAL DE LAS FRUTAS DESHIDRATADAS

Existe un nicho de mercado interesado en frutas y vegetales deshidratados ya sea para su consumo en forma directa o para ser utilizados por la industria alimenticia como materia prima para elaborar otros alimentos. Hoy en día, muchas frutas deshidratadas sirven de base para el desarrollo y formulación de nuevos productos, ya que estos al ser fuentes de compuestos bioactivos son considerados como componentes o

ingredientes de alimentos funcionales. Una ventaja que destaca a los alimentos deshidratados es su versatilidad en cuanto a que su incorporación en productos lácteos (leche, postres, yogurt, helados), galletas, pasteles, sopas instantáneas y en platos preparados, resulta fácil, práctica y conveniente (Vega y Lemus, 2006).

Por otro lado, la fruta deshidratada es una alternativa para que el ama de casa introduzca el consumo de fruta en niños y jóvenes a través de snacks nutritivos que aporten los requerimientos nutricionales adecuados para este grupo de consumidores jóvenes. Los snacks de frutas deshidratadas se pueden posicionar como una alternativa saludable a la confitería o snacks convencionales (como papas fritas y galletitas), o utilizarse para aportar interés y variedad al mercado de la comida sana.

Los adolescentes conocen lo que es un snack saludable y generalmente lo identifican con frutas frescas, hallando como barreras para su consumo las características sensoriales del producto, el precio, el tamaño de la porción, la accesibilidad y la disponibilidad de snack saludables sabrosos (Crofton y col., 2014).

Josa (2005) señala ciertas características que impulsan a que el consumo de fruta deshidratada pueda llegar a ser cada día mayor:

*Pueden consumirse directamente en la mayoría de los casos, con la comodidad y rapidez que la vida actual impone.

*Son alimentos naturales disponibles todo el tiempo, excelentes para la salud y de fácil y satisfactorio consumo. Sus múltiples aplicaciones los hacen muy útiles en nuestras dietas alimentarias, solos o mezclados entre sí o con otros productos.

*Presentan una fácil y larga conservación, con bajo costo, en un lugar fresco y seco.

*Presentan una relación calidad/precio adecuada.

*Ciertas dietas naturistas y macrobióticas las incorporan y recomiendan.

Los frutos que se han secado tradicionalmente son esencialmente uvas, higos, ciruelas, damascos y duraznos, pero algunas otras especies han ganado recientemente una mayor importancia, como manzanas, ananá, banana, peras y frutas finas. Es interesante notar que en Estados Unidos y muchos países europeos existe una gran variedad de productos deshidratados obtenidos a partir de distintas frutas disponibles en el mercado para su consumo directo como snacks. En nuestro país, si bien el consumo de este tipo de alimentos está creciendo, aún no se ha generalizado.

1.2.2. OPERACIONES DE DESHIDRATACIÓN

Existe una amplia variedad de métodos de secado, entre ellos, secado al sol, liofilización, atomización, aire caliente, microondas, deshidratación osmótica. Estos métodos se pueden aplicar por separado o también como una combinación de varias técnicas (Vega y Lemus, 2006, Vega-Galvez y col., 2012). Es importante destacar que en el empleo de estos métodos de conservación debe minimizarse la pérdida de calidad.

Una ventaja de la deshidratación es que aumenta la disponibilidad de los productos estacionales como las frutas, pudiendo utilizarse durante todo el año (Vega-Galvez y col., 2012).

1.2.2.1. *Secado convectivo*

El secado es una de las formas más antiguas de conservación de alimentos. El principal objetivo de este proceso es inhibir el deterioro microbiano y las reacciones químicas de deterioro mediante la reducción de la actividad de agua. Otro objetivo importante es la disminución de peso y volumen de los alimentos con el fin de reducir costos de transporte y almacenamiento. La amplia variedad de alimentos deshidratados que se observan en el mercado hoy en día, así como el interés de la industria por el cumplimiento de las especificaciones de calidad y la conservación de la energía, requieren una profunda comprensión del proceso de secado (Krokida y col., 2003; Vega y col., 2007)

El secado convectivo es uno de los más empleados en la deshidratación de alimentos. Es muy versátil, pudiendo emplearse tanto en alimentos sólidos como líquidos y también en papillas y suspensiones (Aguado Alonso, 2002).

El secado de alimentos por aire caliente es un proceso de transferencia simultánea de masa y calor que no sólo afecta al contenido acuoso sino también a las características físicas y químicas del producto (Treybal, 1995; Geankoplis, 1998; Menges y Ertekin, 2006; Sacilik y col., 2006; Vega y col., 2007; Togrul, 2010). Comprende la eliminación de parte del agua del producto mediante la exposición del mismo a una corriente de aire previamente calentado (60-80 °C) (**Figura 1.2-1**). Los cambios físicos más importantes que tienen impacto sobre la calidad son el encogimiento causado por el colapso celular, el endurecimiento y la termoplasticidad provocando cambios en la forma del producto. Los cambios químicos influyen en aspectos de calidad como el sabor, el color (por

pardeamiento) y la viscosidad, principalmente. Además, puede ocurrir la degradación de nutrientes, como vitaminas y antioxidantes y pérdida de aromas (Mayor y col., 2005; Timoumi y col., 2007).

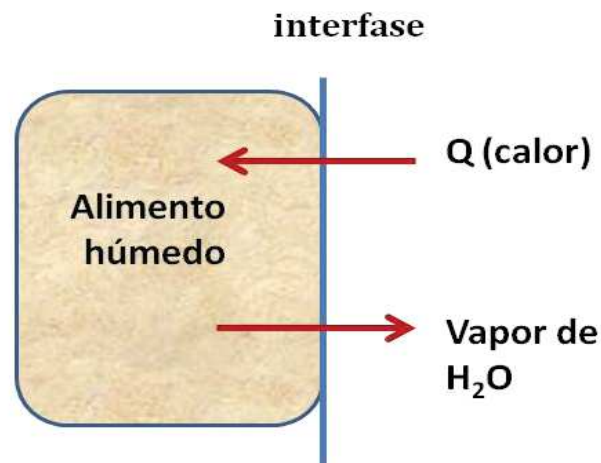


Figura 1.2-1. Esquema del proceso de transferencia de calor y materia durante el secado convectivo.

A medida que progresa el secado, el agua se mueve hacia la superficie (arrastrando sólidos solubles) a una velocidad de difusión menor que la velocidad de evaporación del agua superficial. Por esta razón, las capas externas se secan más rápidamente dando lugar a la formación de una “costra superficial” y al consecuente encogimiento. Estos dos factores (costra y encogimiento) constituyen una resistencia al transporte de materia (dificultan el transporte de agua) y a la transferencia de calor debido a la baja conductividad térmica de la costra formada (Feng & Tang, 1998; Nijhuis y col., 1998).

Para reducir los largos tiempos de proceso, más aún cuando se buscan valores bajos de actividad de agua, se hacen necesarias temperaturas altas (60-80 °C) lo que en frutas y vegetales conlleva a problemas de calidad. Diferentes autores han sugerido la realización de pretratamientos a los alimentos sólidos para otorgarles mayor calidad al producto final y/o reducir el contenido de agua a separar durante el secado posterior. Las modificaciones indeseables del color y la apariencia pueden ser disminuidos por la aplicación de pretratamientos apropiados tales como: un tratamiento térmico para destruir enzimas y una deshidratación parcial previa por inmersión en soluciones concentradas de sal y/o azúcares u otros solutos (Bonazzi y col. 1996; Torreggiani, 1993; Rodrigues y Fernandes, 2006; Khoiy y Hesari, 2007; Tarhan, 2007; Lombard y col., 2008; Kaleta y Górnicki, 2010; Monnerat y col., 2010).

La magnitud de los cambios que pueden producirse en los productos deshidratados dependerá de las características del material (datos físicos, humedad, temperatura máxima que puede soportar), de las etapas de procesado previas a la deshidratación y del proceso de deshidratación en sí (Khin y col., 2005; Sablani, 2006). Se ha comprobado que en materiales sensibles al calor, como las frutas y los vegetales, el efecto de las variables operativas utilizadas sobre la calidad del producto, fundamentalmente la retención de nutrientes, color y textura, es un factor crítico en la selección del método de secado y de los pretratamientos más adecuados (Torregiani y col., 1998; Aguado-Alonso y col., 2002; Marques y col., 2006).

Cuando el secado se realiza en corriente de aire bajo condiciones operativas (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire) constantes, se distinguen generalmente dos fases: un período de velocidad de secado constante y uno o más períodos de velocidad decreciente. Los datos obtenidos durante la deshidratación de un material se presentan en general representando gráficamente el contenido de humedad promedio, \bar{X} , o la velocidad de secado, $d\bar{X}/dt$, en función del tiempo, t (**Figura 1.2-2**).

En el período de velocidad de secado constante, el agua que se evapora de la superficie del producto es agua libre que es renovada rápidamente por el flujo capilar de agua libre interna a través de los poros del material. La resistencia a la transferencia de masa está controlada por la etapa de difusión del vapor de agua desde la superficie del sólido húmedo hacia el seno del aire a través de la película externa.

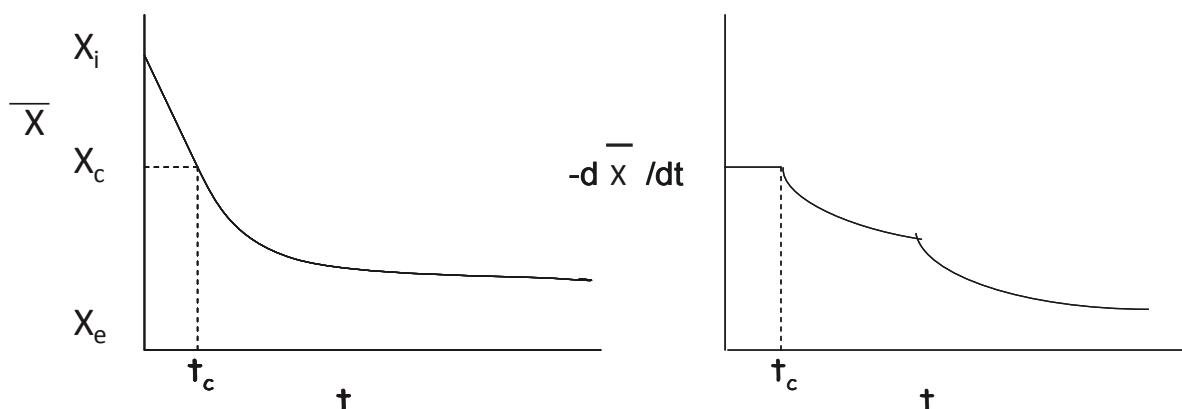


Figura 1.2-2. Representación de los periodos de secado bajo condiciones de temperatura y humedad constantes. Fuente: Karel, 1975.

La superficie del producto tiene un contenido de humedad tal que la presión de vapor de agua en la superficie del alimento es igual a la presión de vapor del agua pura ($p = p_0$) a la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}). La velocidad de secado durante este período se mantiene constante siempre que la relación entre los coeficientes de transferencia de calor y masa y el área expuesta al medio no varíen durante el proceso.

Este período se extiende hasta que el contenido de humedad promedio del alimento llega a un valor conocido como contenido de humedad crítica (X_c). A partir de este punto la migración del agua dentro del alimento es insuficiente para saturar la superficie. Los valores de X_c son característicos de cada alimento pero además dependen de otros factores, tales como la relación de velocidad del movimiento interno/externo del agua, el espesor de la pieza y las condiciones del aire (temperatura de bulbo seco, T_{bs} ; porcentaje de humedad relativa, %HR; y velocidad del aire, v). Los valores de X_c son muy cercanos al contenido de humedad inicial. Por lo tanto en muchos alimentos este período no es observado experimentalmente o es insignificante.

El período de velocidad de secado constante es seguido por el primer período de velocidad de secado decreciente. En este período, a diferencia del anterior, la velocidad de secado disminuye a medida que la presión de vapor de la humedad remanente en el producto se aproxima a la presión de vapor de equilibrio con el aire circundante. El fenómeno que limita la velocidad de secado es la transferencia de agua o de vapor desde el interior a la superficie del producto. Se postula que el primer período de velocidad de secado decreciente finaliza cuando se alcanza el máximo contenido de humedad higroscópico (presión de vapor del agua en el alimento igual a la presión de vapor del agua pura) en el centro de la muestra, el cual marca la transición entre el agua ligada y el agua libre en el alimento. A partir de este momento la velocidad de secado disminuye aun más rápidamente, comenzando el segundo período de velocidad de secado decreciente.

Los materiales higroscópicos, como son los alimentos, nunca se secan hasta un contenido de humedad cero.

Aún con el desarrollo de nuevas técnicas de secado (al vacío, en microondas, etc.) o de la existencia de la liofilización que permite obtener productos de alta calidad, muchas frutas y vegetales seguirán siendo procesados por el método tradicional de deshidratación en corriente de aire por ser ésta una operación simple y económica.

1.2.2.2. *Deshidratación Osmótica (DO)*

En los últimos años, la deshidratación osmótica, conocida también como “impregnación con solutos” o “infusión con solutos” se ha utilizado como tratamiento previo a muchos procesos, permitiendo disminuir los tiempos de secado y mejorando las propiedades nutricionales, sensoriales y funcionales de los alimentos procesados, sin alterar su integridad. El creciente interés por alimentos de aspecto fresco ha hecho que la deshidratación osmótica, utilizada tanto como como operación unitaria o como pretratamiento, sea una opción interesante para la conservación de frutas.

La DO se basa en un fenómeno natural y no destructivo de ósmosis a través de las membranas celulares o de la piel de productos frutihortícolas (Torreggiani, 1993). Es una técnica de deshidratación parcial de alimentos que consiste en la inmersión de los mismos en soluciones acuosas de solutos (azúcares y/o sales) de alta presión osmótica (Rastogi y col., 2002). La fuerza impulsora requerida para el flujo del agua es la diferencia de potencial químico entre la disolución y el fluido intracelular. Si la membrana celular es perfectamente semipermeable, el soluto es incapaz de difundir hacia el interior de las células. Sin embargo, en los alimentos es difícil tener membranas perfectamente semipermeables, debido a su compleja estructura interna, y entonces, siempre se produce alguna difusión del soluto al alimento, y viceversa, una lixiviación de los componentes del alimento hacia la solución. Por consiguiente, el fenómeno presenta dos procesos simultáneos en contracorriente: el movimiento de agua desde el alimento hacia la solución hipertónica, en el que se pueden arrastrar algunos componentes disueltos del alimento junto con el agua extraída y, la impregnación del alimento con los solutos que provienen de la solución. Dicho proceso se caracteriza por presentar dos etapas: una dinámica y otra de equilibrio. En la etapa dinámica las velocidades de transferencia de materia disminuyen hasta que se alcanza el equilibrio (**Figura 1.2-3**) y el proceso finaliza.

El agua se elimina principalmente por difusión y flujo capilar, mientras que la impregnación del alimento con los solutos y la lixiviación de los componentes del alimento se producen solamente por difusión. Tanto la magnitud de este fenómeno como la pérdida de agua dependen de: 1) las características del producto alimenticio como forma, tamaño, estructura, composición y tratamiento previo (pelado, escaldado, tratamiento de la superficie); 2) de la solución: tipos de solutos, concentración de los

mismos y 3) de las condiciones de proceso: temperatura, grado de agitación de la solución, presión de trabajo y relación masa de solución-masa de producto.

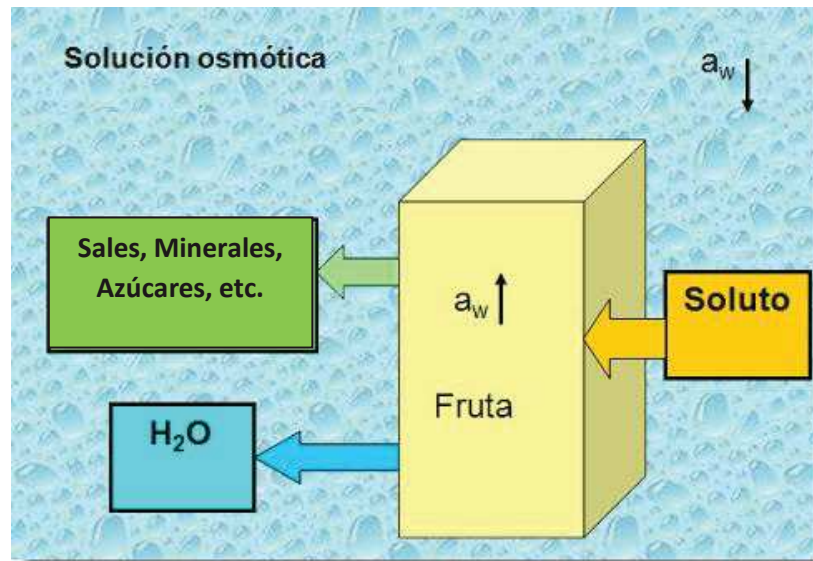


Figura 1.2-3. Esquema de los procesos de transferencia de masa durante la DO.

Los medios de deshidratación son generalmente soluciones acuosas concentradas de un azúcar o una sal o mezclas de diversos azúcares y/o sales. También se pueden usar mezclas secas de solutos. Asimismo, cuando no es deseable apreciar dulzor en el alimento, como en el caso de la mayoría de los vegetales, se emplean alcoholes de alto peso molecular para reemplazar los azúcares o la mezcla de sal y azúcar u otros edulcorantes para enmascarar a estos últimos.

Una característica distintiva de la DO es el desarrollo de una “costra” de solutos de 2 ó 3 mm de espesor, que juega un rol importante en el control de la transferencia de materia a nivel superficial: promueve la salida de agua y se opone tanto a la incorporación de nuevos sólidos desde la solución osmótica como a la salida de sólidos solubles del producto hacia el medio (Saurel y col., 1994). Asimismo, puede influir en el comportamiento del alimento durante su almacenamiento o durante un secado posterior (Karathanos y col., 1995).

La absorción de azúcar durante la deshidratación osmótica de la fruta puede modificar la composición (relación de azúcar/ácido) y el sabor del producto final deshidratado. Este efecto es a veces deseable, ya que mejora el sabor y la aceptabilidad del producto final. Sin embargo, en la mayoría de los casos, una amplia absorción de

solutos es indeseable debido a su impacto negativo sobre el perfil nutricional de las frutas osmotizadas (Azuara y Beristain, 2002).

Sin embargo, más allá del grado de deshidratación, la DO no permite obtener un producto seguro microbiológicamente, ya que la actividad acuosa alcanzada no es lo suficientemente baja como para inhibir la proliferación de microorganismos. Esto define a la deshidratación osmótica como un método de deshidratación parcial y plantea la necesidad de sumar un proceso adicional - por ejemplo secado por aire caliente - para conseguir un producto estable a largo plazo (Rastogi y col., 2002).

Mediante esta técnica usada como pretratamiento, es posible obtener luego del secado un producto final de buena calidad organoléptica provocando mínimos daños por calor y menor pardeamiento de las frutas, incrementando la retención de volátiles y pigmentos, mejorando la calidad textural de los productos rehidratados y reduciendo la carga de agua en los procesos de conservación subsiguientes (Le Maguer y Yao, 1995; Chiralt y Talens, 2005; Rahman y Mujumdar, 2007; Azuara y col., 2009; Castelló y col., 2010; Sagar y Kumar, 2010; Oliver y col., 2012; Nieto y col., 2013). Como en los procesos de DO normalmente no se utilizan temperaturas elevadas, no se producen cambios de fase del agua y se reducen al mínimo los cambios en los atributos sensoriales (Moraga y col., 2006; Chottamom y col., 2012; Kucner y col., 2013). La aplicación potencial de la deshidratación osmótica puede observarse en la **Figura 1.2-4**.

Diversos autores reportaron que los alimentos tratados con DO previo al secado, respecto de los que sólo fueron secados, presentaron menor pérdida de color, menor encogimiento, menor colapso estructural (menor cuanto mayor es la incorporación de sólidos), mantuvieron mejor su firmeza, exhibieron mejores características de rehidratación y conservaron en mayor medida sus nutrientes. Además, bajo ciertas condiciones, la aplicación de una etapa previa de DO permitió reducir, en algunos casos, los tiempos de secado necesarios para obtener un producto de humedad deseada (Lerici y col., 1985; Kim y Toledo, 1987; Torreggiani, 1993; Monsalve-González y col., 1993; Bolin y Huxsoll, 1993; Alvarez y col., 1995; Lenart, 1996; Sankat y col., 1996; Ramaswamy y Nsonzi, 1998; Reppa y col., 1999; Sereno y col., 2001; Lewicki y col., 2001; Mandala y col., 2005; Riva y col., 2005; Giraldo y col., 2006).

Se han llevado a cabo estudios sobre secado por aire caliente con pretratamiento osmótico en productos como: tomate (Telis y col., 2001), pimiento rojo (Vega y col., 2001), remolacha (Vaccareza y col., 1974), zanahorias (Flink, 1980 y Mazza, 1983),

papas (Islam y Flink, 1982), piña (Uddin y Hawlader, 1990), manzana (Simal y col., 1997; Alzamora y col., 1998), fresas y cerezas (Lewicki y Lenart, 1997), que han reflejado cambios importantes en las propiedades de transporte de masa durante el secado posterior.

Aunque la deshidratación es una técnica antigua y muy estudiada, los continuos avances tecnológicos en diferentes áreas han permitido mejorar la calidad de productos existentes mediante esta técnica, y aún más, desarrollar nuevos productos siempre con el fin de satisfacer la creciente demanda de productos novedosos y de características más similares a las materias primas de partida.

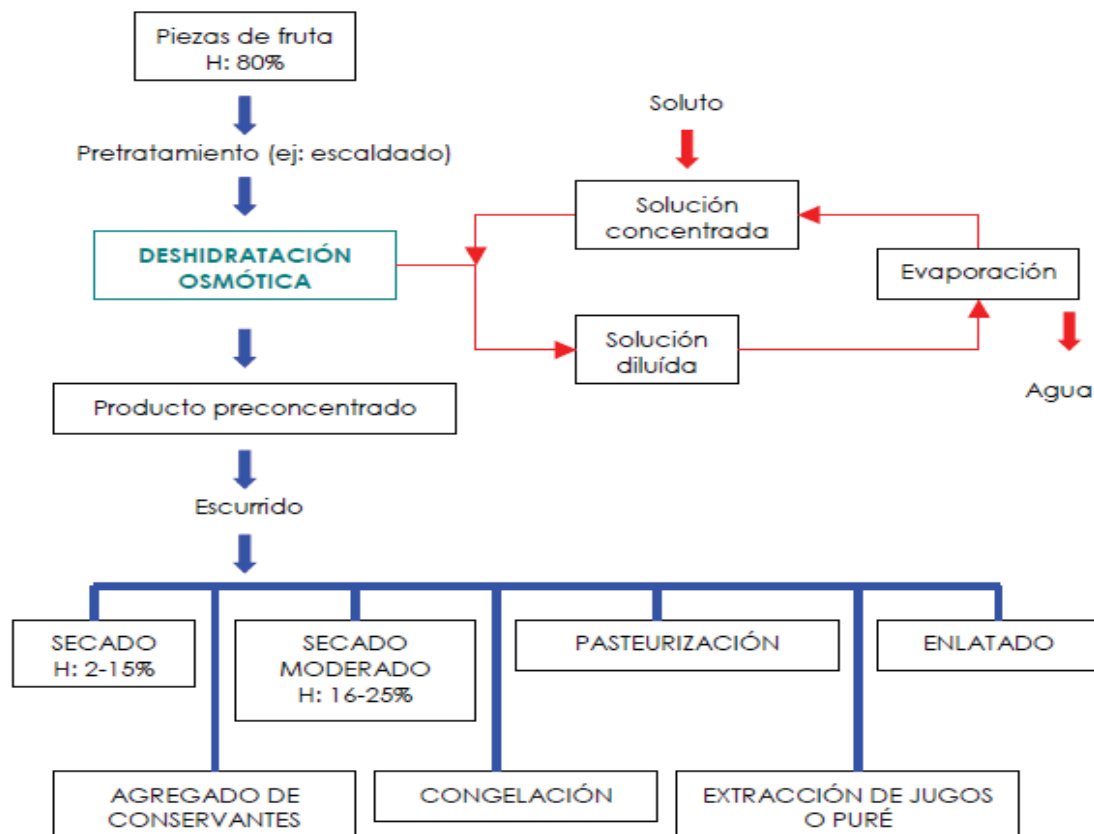


Figura 1.2-4. Aplicaciones Industriales del Proceso Osmótico en Frutas y Verduras.

1.2.3. PRETRATAMIENTOS

1.2.3.1. Escaldado

El escaldado como pretratamiento de los procesos de congelado, deshidratación y esterilización de frutas y vegetales es usualmente llevado a cabo para prevenir la

formación de aromas y sabores desagradables y cambios de color debido a reacciones enzimáticas durante el procesamiento y almacenamiento posterior. En las tecnologías de procesamiento mínimo, como por ejemplo las tecnologías de barreras para obtener frutas mínimamente procesadas, no sólo se aplica para inactivar enzimas sino para destruir o para dañar por calor a los microorganismos presentes (entre otros hongos y levaduras), reduciendo la carga microbiana inicial o sensibilizando a los organismos sobrevivientes ante otros factores de estrés (Alvarez y col., 1995).

1.2.3.2. *Tecnologías combinadas de procesamiento mínimo*

El concepto de “procesamiento mínimo”, ha ido evolucionando a lo largo del tiempo y actualmente incluye un amplio rango de métodos y tecnologías que pueden utilizarse o bien para preservar productos de corta vida útil minimizando los cambios en sus características de “frescura”, o para mejorar la calidad de productos de larga vida útil, es decir, en ambos casos implica realizar el menor tratamiento posible (Alzamora y Salvatori, 2006). En este trabajo se hizo uso de este último concepto, proponiendo en las peras la aplicación de la técnica de infusión con azúcares como etapa previa y fundamental dentro de diferentes tecnologías combinadas que incluyen tres etapas: escaldado, infusión con azúcares y posterior secado convectivo.

La técnica de infusión con azúcares es muy simple y permite el control del a_w por deshidratación osmótica. Esta se puede realizar por: a) Infusión húmeda: inmersión en soluciones de azúcares y otros aditivos; b) Infusión seca: agregado directo de humectantes y aditivos. A través de este proceso se logra reducir la actividad de agua hasta un rango 0,83–0,94. También se pueden incorporar aditivos que cumplirán diferentes funciones como agentes antimicrobianos, antipardeamiento y mejoradores de la textura, entre otros (Sette y col. 2015).

Los alimentos formulados bajo el concepto de procesamiento mínimo son estables sin refrigeración y presentan una mayor retención de las características de frescura en comparación con deshidratados convencionales (Alzamora y col., 1996; Alzamora y col., 2000; Leistner, 2000; Welti-Chanes y col., 2000).

Es importante tener en cuenta que, aunque la combinación de factores tales como a_w y la incorporación de diferentes solutos y aditivos en la conservación de frutas juegan un papel crucial en la mejora de la vida útil de los productos frescos y procesados, éstos

pueden afectar las características sensoriales de algunas frutas. Por lo que en este trabajo se ha hecho incapié en aquellos parámetros de calidad que juegan un papel fundamental en la industria debido a su influencia en la aceptación final de los consumidores como textura, color y estabilidad durante el almacenamiento.

1.3. CALIDAD DE PRODUCTOS DESHIDRATADOS

En esta sección se analizan algunos atributos de las frutas que se pueden afectar durante procesos de infusión con azúcares y de secado en corriente de aire, con consecuencias sobre la calidad sensorial y estructural de los productos obtenidos.

1.3.1. COLOR

El color de los alimentos es un atributo importante de calidad, pues constituye el primer paso en la evaluación del producto por parte del consumidor y, por lo tanto, condiciona su elección. En términos generales, es deseable que el color de la fruta remita al de su estado fresco como sinónimo de un procesamiento mínimo y, en consecuencia, de una mayor retención de sus propiedades nutricionales y sensoriales.

La sensación del color de un producto es un fenómeno psicofísico complejo, y constituye sólo una parte de la percepción visual total de la información detectada por el ojo e interpretada por el cerebro. Dicha percepción es producto de la interacción de diversos factores, entre los cuales se destacan la distribución de la energía espectral de la fuente de luz que ilumina al objeto (solar, lámpara de tungsteno, etc.), las condiciones bajo las cuales el color es visualizado (ángulo de visión, color de contorno, nivel de iluminación, etc.), la sensibilidad del observador y la naturaleza del material observado. La sensibilidad del ojo humano a la radiación electromagnética se encuentra en el rango comprendido entre los 380 a 770 nm (llamada comúnmente luz). El sistema visual humano se encuentra formado por células especializadas llamadas conos y bastones, ubicadas en la retina que poseen la capacidad de discriminar entre radiaciones de distinta longitud de onda determinando su color. Los bastones perciben un atributo de claridad, y los conos dos atributos cromáticos. Por tales motivos, la percepción del color es una respuesta triestímulo. Existen tres conjuntos de conos, uno sensible al rojo, otro al verde y otro al azul, y la respuesta total es la combinación de las distintas señales en el cerebro.

Los principios fundamentales de la colorimetría están basados en las leyes de Grassman. La principal de ellas establece que cualquier color puede ser igualado por la suma de tres colores primarios en cantidades convenientes. Estos colores primarios deben ser elegidos de forma tal que sean independientes entre sí, es decir, ninguno puede ser obtenido por combinación de los otros dos. En la práctica, los colores primarios a utilizar en forma aditiva son tres: rojo, verde y azul. La suma de todos ellos produce la sensación de luz blanca o acromática (Lozano, 1978).

Existen diferentes formas de evaluar el color de un objeto. La determinación visual humana es uno de ellos aunque es una inspección altamente subjetiva y variable de un observador a otro. Para realizar un análisis visual más objetivo se requiere del uso de estándares de color como material de referencia. Por otro lado, existen variados métodos objetivos de evaluación que permiten una adecuada caracterización de los colores, los cuales se basan en el análisis de su espectro visible, por transmisión o reflexión, obtenido con un espectrofotómetro. Se han desarrollado sistemas de medida que emplean espacios y/o coordenadas de color lo cual permite la especificación en un espacio tridimensional. De los sistemas propuestos el más difundido universalmente es el de la CIE (Comisión Internationale de L'Éclairage), en el cual el color es indicado por tres variables X, Y, Z, conocidas como los valores triestímulo y que representan a tres colores primarios imaginarios relacionados con el verde, el rojo y el azul (Lozano, 1978). Este modelo permite explicar cómo el ojo humano percibe el color mediante el uso de tres parámetros que se ubican en tres ejes cartesianos (**Figura 1.3-1**). A partir de estas coordenadas es posible definir las magnitudes colorimétricas tono y saturación o croma (Hunt, 1998). Los parámetros colorimétricos del espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ son (Gilabert, 1992):

✓ L^* representa la luminosidad del material, atributo según el cual una superficie parece emitir más o menos luz. Para superficies reflectoras o transmisoras se reserva el término de “claridad”, por la que un cuerpo parece reflejar (o transmitir) por difusión una fracción mayor o menor de la luz incidente. Puede tomar valores entre 0 (negro absoluto) y 100 (blanco absoluto).

✓ a^* define la desviación del punto acromático correspondiente a la claridad, varía de rojo a verde, hacia el rojo si $a^* > 0$ y hacia el verde si $a^* < 0$.

✓ b^* define la desviación del punto acromático correspondiente a la claridad, varía de amarillo a azul, hacia el amarillo si $b^* > 0$ y hacia el azul si $b^* < 0$.

✓ C^*_{ab} identificado como “saturación” o “croma”, es el atributo que permite estimar la proporción de color cromático puro contenido en la sensación total. Este concepto representa, por lo tanto, la pureza o intensidad relativa de un color. Numéricamente corresponde en el plano cromático a^*-b^* a la distancia desde el centro de la esfera de color al punto en cuestión.

✓ h^*_{ab} corresponde al tono. Numéricamente, también en el plano cromático a^*-b^* , es una medida angular y corresponde al ángulo de matiz definido desde el eje positivo de la coordenada a^* , que varía entre 0 y 360°.

Por otro lado puede calcularse también la diferencia de color global (ΔE^*_{ab}) de una muestra que ha sufrido un tratamiento respecto a un testigo y el índice de pardeamiento (IP) o índice de browning (IB). Estos índices han demostrado ampliamente ser versátiles para describir los cambios de color y proveer información útil para el control de calidad en frutas y productos derivados tales como jarabe de uvas (Skedre, 1985), pasas de uva sultanas (Aguilera y col., 1987), pulpa concentrada de fruta (Lozano y Ibarz, 1997), rodajas de manzana (Feng y Tang, 1998), puré de pera (Ibarz y col., 1999) y banana (Maskan, 2000a).

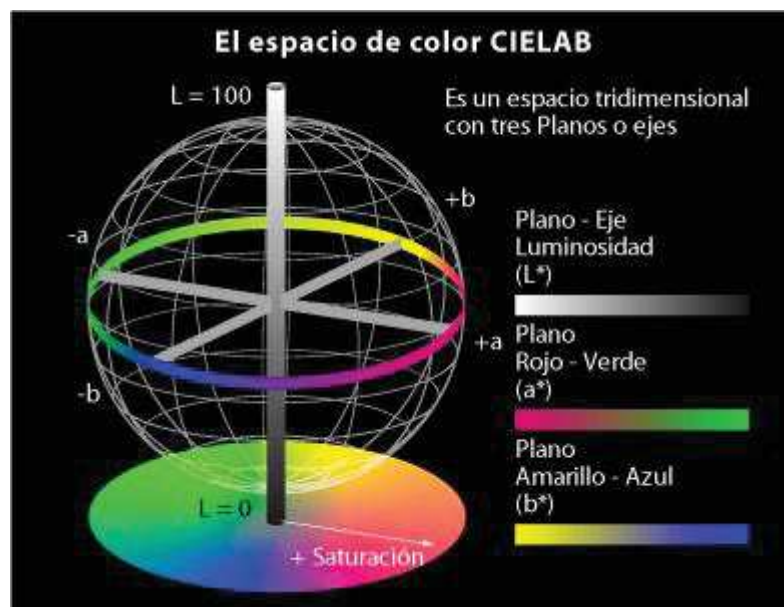


Figura 1.3-1. Espacio de color CIELAB.

Las frutas deshidratadas se consideran altamente estables, sin embargo, sufren importantes modificaciones en las características cromáticas durante los procesos de secado, humidificación y almacenamiento (Uddin y col., 2002). La alteración del color de

los productos frutícolas está fundamentalmente relacionada con el pardeamiento. El cambio de color en frutas claras puede ser medido y usado indirectamente para estimar el grado de avance de estas reacciones (Maskan, 2000a).

En la **Tabla 1.3-1** se muestran los principales factores que aportan a los cambios de color durante la deshidratación: el contenido de pigmentos, las reacciones de Maillard y el pardeamiento enzimático (Hii y Law, 2010).

TABLA 1.3-1. Factores que contribuyen a cambios de color durante el secado (Hii y Law, 2010)

Componente	Compuestos	Efecto de la deshidratación
Pigmentos Naturales	Clorofila	Cambia del color verde al amarillo o rojo
	Carotenoides	Oxidación de los pigmentos
	Antocianinas	Estable a bajos valores pH
	Betalainas	Se degradan a compuestos marrones a pH neutro
Reacciones		
Maillard	Azúcares reductores, aminoácidos, proteínas	Formación de pigmentos de color marrón o negro, melanoidinas y compuestos aromáticos
Pardeamiento enzimático	Compuestos fenólicos	Transformación de compuestos fenólicos a polímeros de color marrón o negro

Como ya se ha comentado, el color está relacionado con la distribución espectral de la luz. Desde el punto de vista físico, la luz puede ser absorbida por un material, y la fracción no absorbida puede reflejarse o bien transmitirse a través del material. Tanto la reflexión como la transmisión pueden darse en forma regular (especular) o difusa, y puede darse también cualquier combinación intermedia. Esto da origen a las distintas sensaciones visuales: transparencia, translucencia, brillo especular y apariencia mate, con distintos grados de luminosidad, y las formas combinadas o intermedias (Caivano, 1991). En materiales que presentan características de translucidez la medición directa de reflectancia (realizada para alimentos opacos) no es satisfactoria debido a la gran cantidad de interacciones que ocurren entre este tipo de materiales y la luz (Little, 1964). La medición directa de una capa delgada de un material translúcido sobre un

fondo blanco es suficiente para separar las muestras en el espacio de color y coincide con la apreciación visual.

Durante el procesado y almacenamiento de muchos productos alimenticios ocurren cambios estructurales, los cuales generan variaciones en el color, el brillo, la transparencia y la luminosidad. Los cambios de color que se producen en los alimentos deshidratados son indicativos de la gravedad de las condiciones de secado, y se relacionan con la composición de pigmentos, como ya se ha mencionado anteriormente. Algunos estudios han propuesto el uso de pretratamientos (químicos y no químicos) para conservar el color durante el secado de frutas (Sosa y col., 2012, Pirone y col., 2014).

1.3.2. TEXTURA Y SU RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA

La textura es uno de los más importantes pero menos entendidos atributos de calidad en frutas y vegetales. La complejidad de este atributo deriva de dos aspectos. Por un lado, la textura de un alimento tiene que ver con la percepción humana, tal como se deduce de la definición del estándar internacional ISO 5492 del año 1992: "...La textura está dada por todos los atributos mecánicos, geométricos y de superficie de un producto que se perciben por medio de receptores mecánicos, táctiles, y cuando corresponde, auditivos y visuales...". Por otro lado, las características texturales y mecánicas son una manifestación de la estructura de los materiales alimenticios, esto es, del ordenamiento espacial de los distintos elementos estructurales y de sus interacciones. Cualquier modificación de estos elementos afectará las propiedades mecánicas del tejido. Sin embargo, la estructura ha sido una variable poco tenida en cuenta en la tecnología/ingeniería de alimentos. Si bien el análisis estructural de alimentos ha avanzado rápidamente en los últimos 30 años no existen muchos estudios sobre la relación entre la estructura y la textura de tejidos vegetales procesados. Los estudios estructurales juegan un rol importantísimo en la elucidación de las relaciones entre los atributos sensoriales de los alimentos, incluyendo la textura y el color, y la estructura de los mismos, las cuales tendrán un alto impacto en el diseño de nuevas tecnologías y en su optimización (Alzamora y col., 2000; Peleg, 2002; Aguilera y Lillford, 2008).

Los cambios observados en la textura de un tejido vegetal durante el secado están ampliamente determinados por los cambios estructurales y reológicos. En general, los

cambios generados conducen a un alimento cada vez más viscoso, percibiéndose gomoso a humedades intermedias, hasta tornarse más rígido y quebradizo a bajas humedades. Por otra parte, las tensiones internas generadas por variaciones localizadas en el contenido de agua durante el proceso de secado dan lugar a roturas y compresiones que provocan distorsiones permanentes en las células otorgando al alimento un aspecto arrugado.

1.3.2.1. *Determinación instrumental de las propiedades mecánicas*

La evaluación instrumental de la textura en alimentos sólidos se suele realizar mediante ensayos reológicos a grandes deformaciones. Los más comúnmente utilizados son: ensayo de compresión uniaxial, ensayo de punción o penetración, ensayo de extrusión y análisis del perfil de textura. Uno de los ensayos más utilizados para evaluar las propiedades mecánicas de las frutas deshidratadas es el ensayo de punción, el cual está basado en la medida de la resistencia que opone un alimento a que una pieza determinada penetre en él. La técnica involucra la compresión y el corte de la muestra. Es un test empírico que intenta muchas veces imitar la mordida de un alimento en la boca. En la mayoría de los casos la muestra de alimento se presenta en forma de cilindro o de cubo y se somete a la acción de un émbolo que se desplaza verticalmente a una velocidad prefijada. El ensayo depende del tamaño y las dimensiones de la pieza a introducir y su geometría, del número de piezas, del tipo de alimento y de la velocidad del cabezal de carga del equipo.

En el caso de frutas se utiliza un punzón cilíndrico con punta plana ó parcialmente hemisférica que se introduce en la pieza hasta una distancia determinada ó hasta atravesarla por completo. Se registra el valor de fuerza en función de la deformación. La información a adquirir de la curva fuerza-distancia puede ser dividida, generalmente, en tres partes en el caso de un tejido vegetal:

1) Primer tramo: la relación entre la fuerza y la deformación es lineal, y podría decirse que se cumple la teoría de la elasticidad. De la pendiente en esta porción lineal de la curva ascendente deriva el módulo de deformabilidad, el cual es una medida de la resistencia del material a la deformación. Cuanto mayor sea su valor más rígido será el material estudiado. Al retirar la carga en este tramo, el material recuperaría su forma

original; en el caso de alimentos, debido a que no son verdaderamente elásticos, a menudo no se recuperan totalmente incluso bajo muy bajas deformaciones.

2) Segundo tramo: la relación entre la fuerza y la deformación se desvía de la linealidad y por lo tanto ya no es válida la teoría de la elasticidad. En este trayecto, al retirar la carga, el material recupera su forma sólo parcialmente. A medida que la deformación se incrementa también lo hace la fuerza hasta un punto en donde ya no se observa aumento o se ve una interrupción abrupta de la curva.

3) Tercer tramo: la relación entre la fuerza y la deformación puede tornarse irregular y zigzagueante, o puede incrementarse levemente hasta un punto de fuerza máxima para luego tornarse irregular o directamente puede seguir incrementándose hasta un punto de fuerza máxima a partir del cual se observa una caída abrupta de la fuerza hasta la penetración total de la muestra. El punto máximo de tensión observado se lo denomina fuerza máxima de ruptura ($F_{m\acute{a}x}$), y se refiere a la fuerza máxima que un objeto soportará antes de romperse. No debe confundirse con la rigidez, debido a que esta última es una medida de la resistencia de un material a deformarse.

Integrando el área bajo la curva encerrada desde el punto inicial hasta el punto de $F_{m\acute{a}x}$, se obtiene la resistencia a la ruptura o trabajo de ruptura que equivale a la energía necesaria para romper el material.

1.3.2.2. *Influencia del Tejido Vegetal: composición y estructura*

La parte comestible de la mayoría de las frutas está constituido por tejido parenquimático. Sus células pueden ser esféricas, considerablemente alargadas a variadamente ovaladas. Según el arreglo espacial y tamaño relativo de las células, el tejido tiene cantidades significativas de espacios intercelulares a veces llenos de aire que tienen un impacto considerable en las propiedades mecánicas (Jackman y Stanley, 1995). Las células parenquimáticas pueden impartir fuerza y soporte al tejido cuando son túrgidas (Jewel, 1979).

Las células eucarióticas son las unidades constitutivas del tejido parenquimático vegetal. Una representación esquemática de la célula vegetal eucariótica se observa en la **Figura 1.3-2**. Este esquema de la célula muestra desde afuera hacia adentro la laminilla media cementando células vecinas, la pared celular primaria atravesada por plasmodesmos (puentes citoplasmáticos que atraviesan la pared por orificios

estableciendo el contacto célula-célula), la membrana plasmática o plasmalema, el citoplasma que contiene diferentes organelas (mitocondria, esferosomas, plástidos, cloroplastos, retículo endoplasmático, núcleo, etc.) y una vacuola rodeada por otra membrana llamada tonoplasto. La **Figura 1.3-3** muestra la estructura de la pared celular.

Una de las suposiciones que normalmente se hacen para simplificar el estudio de las relaciones agua-vegetal es considerar que una célula vegetal típica consta de una pared celular porosa y delgada, constituida por microfibrillas de celulosa embebida en una matriz integrada por hemicelulosa y pectina, que rodea un citoplasma delimitado por la membrana plasmática y una gran vacuola central, rodeada del tonoplasto que la separa del citoplasma.

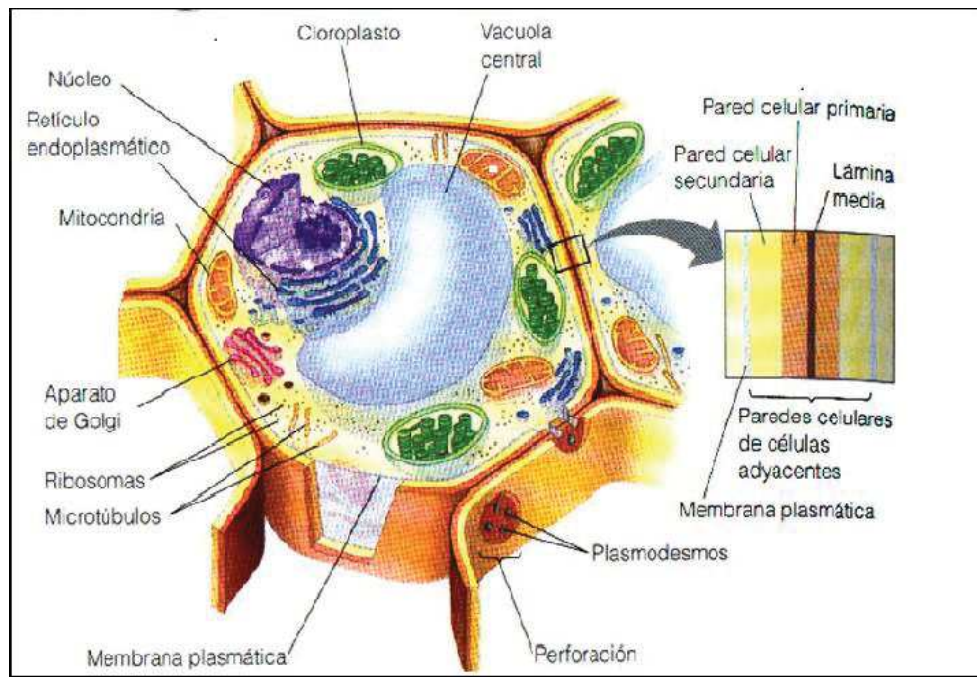


Figura 1.3-2. Esquema de una célula eucariota vegetal.

A nivel celular y del tejido los tres factores estructurales más importantes y que contribuyen a las propiedades texturales de los alimentos vegetales son: el turgor que es la fuerza ejercida por el fluido intracelular sobre la membrana celular, la rigidez de la pared celular y la adhesión célula-célula determinada por la integridad de la laminilla media y los plasmodesmos (Waldron y col. 1997; Jackman y col. 1992). Además de estos elementos estructurales también son importantes: el porcentaje relativo de los diferentes tejidos, el tamaño y la forma de las células, relación citoplasma-vacuolas,

volumen de espacios intracelulares (que pueden contener tanto fluidos como aire intersticial), tipo de solutos presentes y la presencia de almidón y su estado (Alzamora y col., 2000).

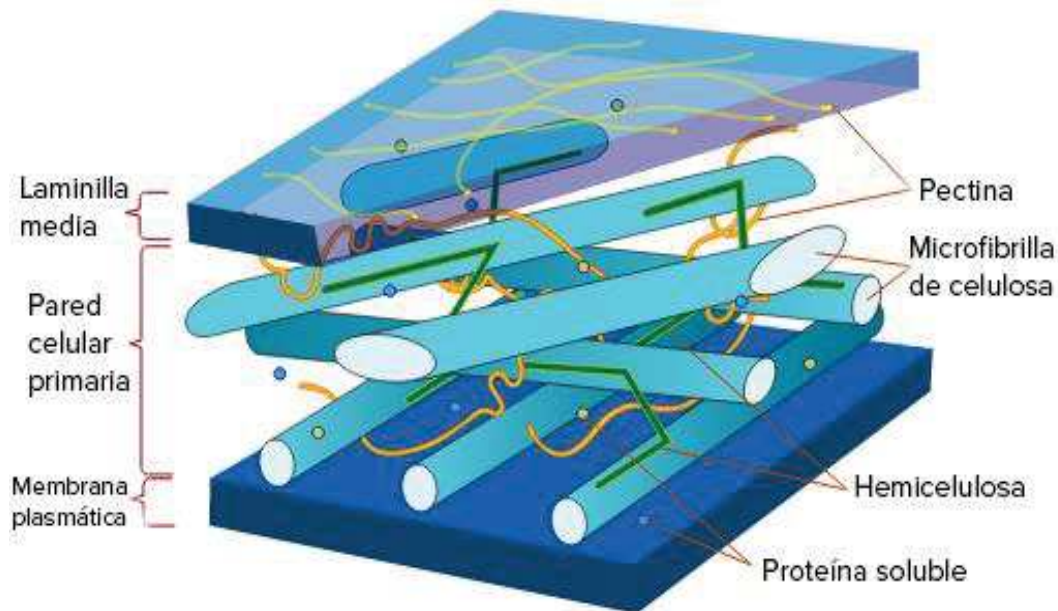


Figura 1.3-3. Esquema de la pared celular vegetal (Porto, 2015).

La pared celular otorga rigidez y protección a la célula. Actúa como límite resistente que impide la exagerada distensión (y la posible ruptura) de la membrana plasmática debido a una entrada excesiva de agua. No presenta funciones de selectividad como la membrana plasmática y el tonoplasto que controlan el paso de sustancias de un compartimiento a otro. La vacuola, que generalmente cumple funciones de almacenamiento, contiene solución acuosa de iones inorgánicos, ácidos orgánicos, azúcares y otras sustancias y puede ocupar hasta el 90% del volumen de una célula madura. Mientras la elasticidad de la pared celular es el principal responsable de la elasticidad del tejido, la savia vacuolar es responsable de ejercer la presión de turgor sobre la pared celular, manteniéndola en un estado de “stress elástico”. Los efectos del turgor hacen que las vacuolas se agranden y presionen unas contra otras impartiendo turgencia, rigidez y frescura al tejido celular (Aguilera y Stanley, 1990; Le Maguer, 1998).

Los métodos de procesamiento de alimentos destruyen la integridad del plasmalema y la capacidad de la célula para mantener su turgencia. El procesamiento

por calor también dará como resultado cambios en la pared celular, particularmente en la lámina media (la degradación de las pectinas conduce a la separación celular), así como otros cambios dependientes de la composición del producto como puede ser la gelatinización del almidón en el caso de que esté presente. En particular, en procesos de deshidratación, la pérdida de agua y la exposición a altas temperaturas durante el proceso provocan el encogimiento celular y por consiguiente cambios en la textura de los productos obtenidos. Por lo tanto, la textura final dependerá de la importancia relativa de cada factor que contribuye a su textura y al grado con que ese factor ha cambiado mediante el método de procesado utilizado (Rosenthal, 2001).

Además la gran variabilidad observada entre las distintas frutas frente a los procesos está en su mayor parte relacionada con la diferente compactación del tejido (Giangiacomo y col., 1987), el contenido inicial de sólidos solubles e insolubles (Lenart y Flink, 1984 a y b), los espacios intercelulares, la presencia de gas, la relación entre las diferentes fracciones pécticas (pectina soluble en agua y protopectina) (Forni y col., 1986), el nivel de gelificación de pectina (Moy y col., 1978) y la actividad enzimática (Giangiacomo y col., 1987).

La rigidez de los tejidos se debe, en parte, a las microfibrillas cristalinas de celulosa presentes en las paredes de las distintas células, en particular de las de tejidos vasculares de soporte y protección. La turgencia, que confiere a las frutas su firmeza y succulencia, depende del agua retenida por ósmosis en las células. La ósmosis resulta de fuertes concentraciones intracelulares de sustancias solubles de bajo peso molecular. Sin embargo, la hinchazón por absorción del agua está, como hemos dicho, limitada por la resistencia mecánica de la pared celular. La permeabilidad de las membranas celulares y, por consiguiente, las propiedades mecánicas, se modifican por la maduración, el almacenamiento y por los tratamientos tecnológicos. Asimismo, la conducta reológica también está influenciada por los geles de almidón y de pectinas de la laminilla media, la que asegura la ligazón entre paredes celulares vecinas. La cohesión de estos geles puede reducirse por las actividades amilolíticas y pectinolíticas, que intervienen durante la maduración, así como después de la cosecha (Cheftel & Cheftel, 1999). Los compuestos pécticos contribuyen a dar consistencia a las frutas y su presencia es importante en algunas tecnologías, como por ejemplo en la elaboración de mermeladas.

La presencia de heterogeneidades en la estructura tales como canales aéreos y tejido vascular en manzanas y peras son de importancia primordial en la caracterización de las propiedades mecánicas (Vincent, 1991). La forma y contacto entre células adyacentes genera espacios intercelulares que pueden llegar a ser grandes, como en el caso de la manzana, dando apariencia de tejidos aireados. Estos espacios intercelulares poseen una cantidad significativa de aire (1-25 %) y pueden tener una considerable influencia sobre la textura (Jackman & Stanley, 1995).

1.3.2.3. *Examen de la estructura y la ultraestructura celular de frutas*

La observación microscópica de los tejidos vegetales revela parámetros directamente relacionados con la textura, a pesar de que no pueden ser convertidos en valores numéricos para su análisis estadístico. Como ya se ha comentado, la textura es consecuencia directa de la microestructura del sistema, la cual a su vez está influenciada por la composición química y las fuerzas que actúan sobre la misma (Stanley y Tung, 1976).

Además de la evaluación sensorial por medio del sentido de la vista, las técnicas microscópicas permiten una magnificación de la microestructura de los alimentos para el análisis de los cambios texturales (Kaláb y col. 1995). La microscopía óptica (MO), la microscopía electrónica de transmisión (MET), la microscopía electrónica de barrido (MEB) y otras técnicas de imagen (como por ejemplo, resonancia magnética) van a generar datos de análisis en forma de imagen. Estas técnicas varían en el método por el cual producen la imagen, la resolución y el tipo de nivel de estructura detectado que es único para cada caso. Permiten además, por aplicaciones especiales en cada caso, la localización de sustancias dentro de la estructura del tejido.

Es importante remarcar que el valor de las técnicas microscópicas en la tecnología de los alimentos tiene un carácter auxiliar y no pretende remplazar las determinaciones instrumentales y físicas, siendo más bien de carácter complementario. Todos aquellos que pretenden describir, predecir y controlar el comportamiento de los alimentos observan la importancia de conocer la forma en la cual los componentes están organizados. En un principio las células eran consideradas sólo compartimientos que albergaban las enzimas y los sustratos necesarios para el metabolismo, y los alimentos como una matriz homogénea de nutrientes químicos. Pero los alimentos, ya sea de

origen animal o vegetal, son altamente heterogéneos a nivel estructural y ultraestructural (Aguilera y Stanley, 1990). Según Lewis (1986), la interpretación de las imágenes que se obtienen por métodos microscópicos debe estar basada en las siguientes características para evitar conclusiones erróneas:

- todas las interpretaciones deben tener en cuenta el proceso de preparación de las muestras
- la interpretación debe estar basada sobre las diferencias existentes entre una muestra control y otra procesada, cuando sea posible
- se debe utilizar un número suficiente de preparaciones obtenidas aleatoriamente a partir de muestras representativas para cada tratamiento y el control
- las observaciones por microscopía deben estar relacionadas con observaciones químicas, físicas y tecnológicas
- las observaciones fundamentales deben ser chequeadas con más de una técnica microscópica

La obtención de la información estructural resultará de la habilidad del científico para interpretar adecuadamente las imágenes microscópicas.

En el presente trabajo las observaciones serán realizadas mediante la técnica microscópica MO, MET y MEB. Actualmente, la microscopía óptica (MO) es una técnica ampliamente utilizada para el estudio de la microestructura de los alimentos y con múltiples aplicaciones en la Ingeniería y Procesamiento de Alimentos en todas sus variantes. El microscopio electrónico de transmisión (MET) es el único instrumento que permite conocer directamente la ultraestructura biológica. Posee un poder de resolución mucho mayor que el MO. Cada una de estas técnicas microscópicas posee su metodología propia de preparación de muestra. En casi todos los casos, por distintos métodos y adición de sustancias, se realiza a partir del corte del tejido la fijación química seguida por una deshidratación y la inclusión en alguna sustancia que actúe como soporte. Esto resulta en un bloque que contiene el material a partir del cual se pueden cortar finas secciones. Luego son teñidas y montadas para su observación. Con el microscopio electrónico de barrido (MEB) se obtienen imágenes tridimensionales. No es necesario cortar en secciones finas y pueden examinarse detalles topográficos de superficies internas y externas según el tipo de corte (**Tabla 1.3-2**).

TABLA 1.3-2 Resumen comparativo de los tipos de microscopios. (MO: microscopio óptico, MEB microscopio electrónico de barrido, MET: microscopio electrónico de transmisión)

Característica	MO	MEB	MET
Portátil	si	no	no
Aumento	x 2500	x 20000	x 500000
Tamaño mínimo observable	120 nm	10 nm	1 nm
Fotografía	B/N y color	B/N	B/N
Observación in vivo	si	no	no

1.3.2.4. *El agua, componente principal de los sistemas celulares*

En la mayoría de los sistemas celulares, el agua es la molécula más importante, ocupando entre el 60 y el 90 % de la masa celular. En los alimentos está presente en todo sistema e ingrediente, tanto en el azúcar cristalino (0,04% base húmeda), como en los tejidos vegetales (90% de agua), y tanto su contenido como su estado y las interacciones que presenta con el resto de los componentes del sistema, es crítica y determinante del comportamiento del mismo, pues influye en su estabilidad físicoquímica, seguridad microbiológica, percepción sensorial, propiedades mecánicas y comportamiento durante el procesamiento (Slade y Levine, 1991).

Debido al importante rol del agua en los alimentos, no sólo una disminución o aumento del contenido acuoso, sino también los diferentes procesamientos, el almacenamiento y el transporte pueden afectar drásticamente la calidad del alimento y disminuir su estabilidad debido a la migración y a la redistribución del agua en la matriz del producto. Por tal motivo muchos procesos requieren del conocimiento de qué ocurre con el agua y cómo ocurre, para poder diseñar y controlarlos. Por ejemplo, en el caso de productos vegetales frescos se intenta mantener el contenido de humedad para preservar la calidad original, pero si se desea extender la vida útil lo más común es disminuir la humedad inicial a pesar de que la pérdida de turgor origina una pérdida de la crujencia de estos productos frescos. De modo contrario, la absorción de agua durante

el almacenamiento de un producto vegetal deshidratado, que supone ser consumido crujiente, puede tornar al producto gomoso. Por lo tanto, las propiedades físicas del agua tienen un fuerte impacto en el manejo, procesamiento y almacenamiento de los alimentos. Se ha observado que alimentos con el mismo contenido de agua difieren significativamente en sus propiedades físicoquímicas y en su estabilidad microbiológica. Esta diferencia es atribuible a las diferencias de intensidad con la que el agua se asocia con los componentes no acuosos (Fennema, 1996). El término actividad de agua (a_w) ha sido desarrollado considerando este aspecto, el cual está basado firmemente en el equilibrio termodinámico.

1.3.3. PROPIEDADES FÍSICAS-RELACIONADAS CON LA ESTABILIDAD

1.3.3.1. *Isotermas de Sorción*

La presencia de agua y sus interacciones con otros componentes son factores importantes a tener en cuenta en el control de proceso, estabilidad y calidad de alimentos. En un mismo alimento hay moléculas de agua que presentan diferencias de intensidad con la que se asocian con los constituyentes no acuosos. Las moléculas de agua presentes en los alimentos deshidratados se encuentran unidas fuertemente a la matriz y no están disponibles para que pueda darse el crecimiento de microorganismos o las reacciones químicas hidrolíticas.

La sorción de agua de los alimentos es un proceso donde las moléculas de agua se combinan progresivamente y reversiblemente con los alimentos vía quimisorción, adsorción física y condensación en multicapas.

Una isoterma de adsorción (o de desorción) es la curva que indica, en el equilibrio y para una temperatura determinada, la cantidad de agua retenida por un alimento en función de la humedad relativa de la atmósfera que lo rodea. Se representa la actividad de agua de un alimento frente a su contenido acuoso.

En materiales alimenticios las isotermas de sorción de agua presentan habitualmente una forma que esta basada en su composición química y generalmente corresponde a una S invertida. Brunauer y col. (1940) clasificaron las isotermas de sorción en 5 tipos basados en la adsorción por las fuerzas de van der Waals de gases no polares adsorbidos en diversos sustratos sólidos no porosos, siendo los tipos I, II y III (**Figura 1.3-4**) los más observados en los productos alimenticios.

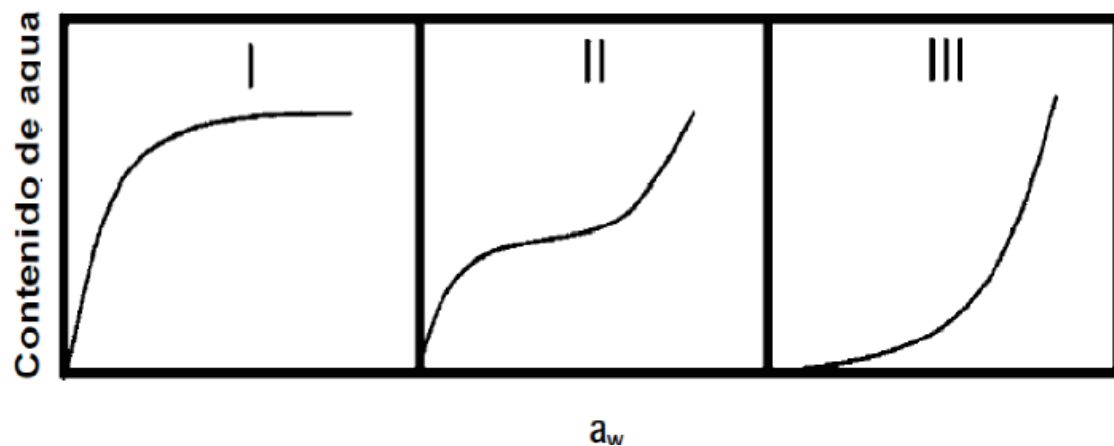


Figura 1.3-4. Tipos de Isotermas de Sorción de agua más frecuentes en alimentos (Brunauer y col., 1940).

Las isotermas de sorción de agua son extremadamente importantes en el diseño del proceso de alimentos, formulación de nuevos alimentos, selección del material de embalaje adecuado, predicción de las condiciones óptimas de almacenamiento, y la determinación de la estabilidad del producto. (Arevalo-Pinedo y col., 2004; Yanniotis y Blahovec, 2009). Brindan información sobre el grado de cristalinidad y la movilidad del agua, siendo significativamente diferentes en sistemas cristalinos y amorfos (Fennema, 1996). En el sistema amorfo, las moléculas se encuentran en un ordenamiento al azar, y están relativamente más libres para interactuar con el agua.

La composición química de los alimentos y las temperaturas de procesamiento y almacenamiento tienen una influencia sustancial en las características de sorción de los productos de fruta deshidratada (Kaya y col., 2002; Gabas y col., 2007).

1.3.3.2. Transiciones de Fase

Los alimentos son sistemas multicomponente, y en la mayoría de los casos multifásicos. Sus componentes pueden experimentar cambios de fase en el intervalo de temperaturas o presiones en que son procesados, almacenados o consumidos. Estos cambios afectan de manera importante a su calidad y estabilidad, y pueden ser determinantes de las condiciones de procesado.

Cuando un producto se deshidrata y se alcanza el límite de solubilidad de los solutos la separación de éstos en forma de cristales no es frecuente por problemas cinéticos. En esta situación el sistema queda en estado amorfo que puede ser vítreo o

gomoso (líquido sobreenfriado) dependiendo de la temperatura y de la humedad. Se trata de estados que no están en equilibrio termodinámico sino que pueden alcanzar estados de equilibrio metaestable. La estabilidad de algunas propiedades de los alimentos estaría gobernada cinéticamente en condiciones de metaestabilidad (Franks, 1994). El cambio entre estos dos estados, vítreo y sobreenfriado, se conoce como transición vítrea. (**Figura 1.3-5**)

La temperatura de transición vítrea (T_g) es característica de cada material. A temperaturas inferiores a la T_g , el material es un vidrio (sólido amorfo) de una viscosidad muy alta. En los vidrios, la movilidad molecular está limitada a vibraciones y movimientos rotacionales de rango corto (Sperling, 1986), y solamente ocurren cambios muy lentos relacionados con el “envejecimiento físico” (Roos y col., 1996). Cuando el sistema pasa del estado vítreo al de líquido sobreenfriado, se produce una disminución muy importante de la viscosidad (Sperling, 1986), lo cual se traduce en un aumento de la movilidad molecular y de los movimientos traslacionales. Por lo tanto, al ocurrir la transición vítrea, los materiales son más susceptibles a la ocurrencia de cambios físicos o químicos.

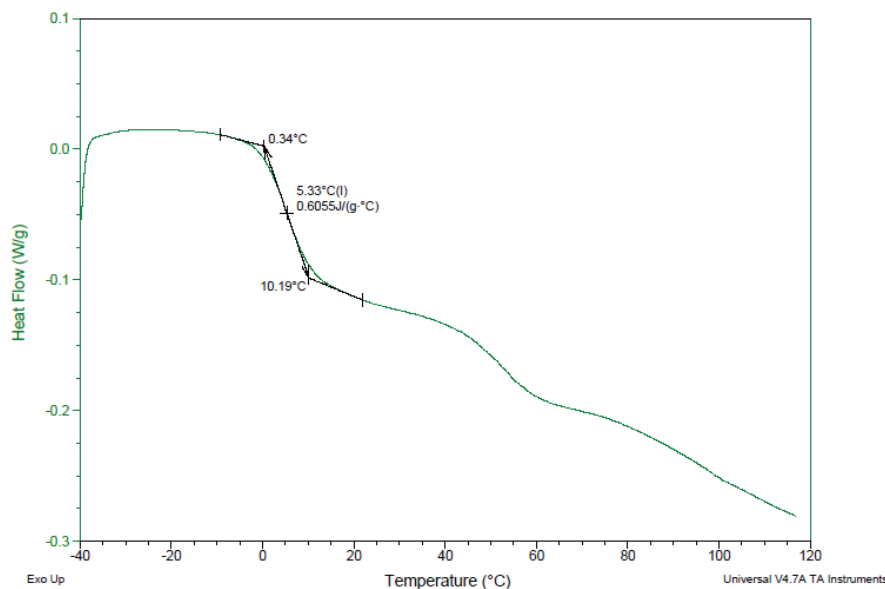


Figura 1.3-5. Termograma de una muestra de pera escaldada y secada.

El agregado de compuestos de bajo peso molecular que actúan como plastificantes tiene un efecto sobre la T_g . En los sistemas biológicos el plastificante más relevante es el

agua. A medida que aumenta el contenido de agua se produce una disminución de la T_g (Roos, 1992).

El valor de la T_g de un sustrato amorfo depende básicamente del tamaño molecular promedio de los componentes presentes, pues el valor de la T_g de componentes de alimentos anhidros normalmente disminuye cuando disminuye el peso molecular. Los solutos de bajo peso molecular como los monosacáridos, dan lugar a bajos valores de T_g , mientras que los compuestos macromoleculares conllevan a altos valores de T_g que se buscan para mantener al sustrato amorfo en estado vítreo.

En productos formulados la selección adecuada de los componentes de la mezcla, con la incorporación de compuestos de alto peso molecular (polisacáridos, proteínas) permite manipular la T_g del sistema y aumentarla para aumentar la estabilidad del producto final. No obstante, los cambios en la composición de productos biológicos como las frutas no se producen sin alterar su estructura característica. (Martínez y col., 2000)

La evaporación de agua durante la fase final del proceso de secado puede dar lugar a transiciones vítreas debido a la concentración de los componentes. Además, las cadenas de los biopolímeros pueden acercarse considerablemente y cambiar de una conformación amorfa a un estado cristalino. Sin embargo, la viscosidad de la solución concentrada puede ser tan alta que la cristalización de las moléculas de bajo peso molecular no es posible, y se forma entonces un estado vítreo. Por lo tanto, en un tejido vegetal deshidratado pueden encontrarse dominios cristalinos y vítreos que le otorgan resistencia mecánica al material (Rao, 2003; Roos y Karel, 1991; Slade y Levine, 1991). La formación de estos estados y la relación entre ellos dependen del tipo de material y su composición química, así como de la velocidad de secado y del contenido de humedad final.

1.3.3.4. *Movilidad molecular del agua y de los sólidos*

La movilidad molecular no es un parámetro termodinámico sino cinético que depende tanto de la temperatura como de la viscosidad. Está relacionada con la cantidad de agua necesaria para disolver y movilizar el sustrato. Por lo tanto tiene una influencia sobre las velocidades de las reacciones químicas y del crecimiento microbiano.

Una de las técnicas más exitosas utilizadas para demostrar el comportamiento dinámico del agua en los sistemas alimentarios es la Resonancia Magnética Nuclear pulsada (RMN) (Le Meste y col., 1991; Hills y Remigereau, 1997; Haque y col., 2010). Es una técnica basada en el registro de la radiofrecuencia de resonancia de los núcleos atómicos colocados bajo la influencia de un campo magnético externo, al exponerse a un segundo campo magnético oscilante. La movilidad molecular se puede estimar mediante los tiempos de relajación de la magnetización nuclear (^1H RMN).

Este análisis puede permitir tener un esquema completo del comportamiento del agua en los alimentos (Schmidt, 2004). Los límites de las diferentes etapas de sorción de agua se han descrito empíricamente pero no están bien definidos. Aún más, se ha cuestionado las referencias a "agua unida", "monocapa", "multicapa" y "libre" para indicar el grado y la intensidad de las interacciones agua-sólido (Fennema, 1999). La definición de zonas según la movilidad del protón podría dar una descripción más apropiada. La técnica de resonancia magnética nuclear (RMN) se puede emplear para caracterizar la movilidad molecular en los sistemas alimentarios y podría servir como referencia reemplazando o complementando el concepto de isoterma de sorción de agua. Es importante notar que la movilidad molecular se afecta al atravesar la temperatura de transición vítrea, ya sea por aumento de la temperatura de almacenamiento o del contenido de agua.

El estudio de la movilidad molecular del agua y de los sólidos presentes en las frutas puede ayudar en la comprensión de los cambios de las características de textura causados por la plastificación de agua. El movimiento más lento del agua en muestras de baja humedad refleja fuertes interacciones sólido-agua a través de enlaces de hidrógeno (Chen y col. 1997; Sosa y col., 2012). Los tejidos vegetales de alta humedad son generalmente viscoelásticos, mientras que durante el secado se vuelven cada vez más viscosos, disminuyendo la movilidad y difusividad de las moléculas, tornándose plásticos hasta tornarse rígidos, frágiles y quebradizos a bajos contenidos de agua, adquiriendo una importante resistencia a la deformación.

La movilidad molecular del agua y los sólidos tiene amplias aplicaciones en las predicciones de estabilidad de alimentos (Le Meste y col., 1991). Se han realizado estudios en diferentes materiales como almidón (Richardson y col., 1987), sistemas modelo de sacarosa y almidón (Kou y col., 1999), concentrado de proteína de leche

(Haque y col., 2010) y pescado (Pitombo y Lima, 2003). En el caso de frutas, se realizaron estudios en manzana, melon y pera (Agudelo-Laverde, 2014).

1.4. EVALUACIÓN SENSORIAL

El análisis sensorial es una disciplina científica que se encarga de medir, analizar e interpretar los juicios que se hacen en base a reacciones ante las características de los alimentos que se perciben a través de los sentidos: vista, olfato, gusto, tacto y oído. Por lo que se considera una ciencia que abarca una relación con la psicología, la química, la fisiología y la estadística. Dichas reacciones son producto de las señales que todos los órganos de los sentidos transmiten al cerebro, por medio de sensores localizados en la piel, nariz, lengua, músculos, ojos y oídos (Restrepo y col., 2008).

Es una disciplina que nos permite calificar la calidad de un producto en base a la percepción de sus atributos, ya que mide y cuantifica las características de los alimentos. Así la calidad puede estar considerada por los atributos de apariencia, olor, gusto y textura, los cuales fueron estudiados por primera vez en Francia en 1979 (Montenegro, 2008) (Figura 1.4-1).

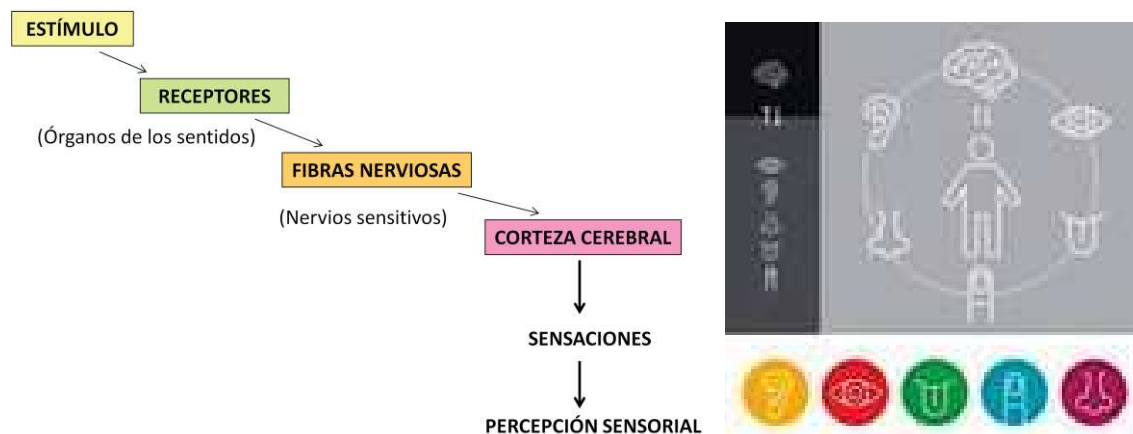


Figura 1.4-1. Representación del mecanismo de percepción sensorial.

La necesidad de adaptarse a los gustos del consumidor obliga a que, de una forma u otra, se intente conocer cuál será el juicio crítico del consumidor en la valoración sensorial que realizará del producto alimentario, ya que estos juicios tienen un comienzo en el lugar de venta de los alimentos, los cuales se seleccionan por los

sentidos. Para conocer entonces los gustos, preferencias y requisitos para la aceptabilidad de un producto se hace uso del análisis sensorial. La medición de las propiedades sensoriales se emplea para el desarrollo de nuevos productos, reformulación de productos ya existentes, cambios ocasionados durante el procesamiento, almacenamiento, uso de nuevos ingredientes y mantenimiento de las normas de control de calidad (Watts y col., 1995).

Si bien los instrumentos son efectivos en muchos casos, no pueden medir ni reemplazar la percepción sensorial. Por ejemplo, hay ingredientes y procesos que tienen efecto sinérgico que no pueden medirse con un instrumento. En el momento que una porción de alimento se contempla, se huele y se introduce en la boca se desencadenan una serie de efectos que están relacionados entre sí y que dependen de la intensidad y calidad del estímulo que provoca, de las características de los receptores sensoriales y de la atención y conocimientos básicos del individuo a la sensación percibida. Cuando la producción de un alimento está bien definida, tanto en términos instrumentales como sensoriales, la calidad del producto es más completa, tendiendo a los modernos conceptos de la calidad total (Carter y Risky, 1990).

1.4.1. PRUEBAS SENSORIALES

En el análisis sensorial existen tres tipos de pruebas: las pruebas afectivas, las discriminativas y las descriptivas (Meilgaard y col., 1999; Lawless, y col. 1998).

Pruebas Afectivas

Son aquellas en las cuales el juez expresa su reacción subjetiva ante el producto, indicando si le gusta o disgusta, si lo acepta o lo rechaza, si prefiere uno u otro. Normalmente se emplean al menos 30 jueces y la realizan los propios consumidores, por lo que son apreciaciones personales. Dentro de este tipo de pruebas se consideran dos grandes grupos: CUALITATIVOS (Grupos Focales “FOCUS” y Entrevistas) y CUANTITATIVOS: de Preferencia (Comparación de Pares y Ordenamiento) y de Aceptabilidad (Escala Hedónica y Escala LO JUSTO “JAR”).

La escala hedónica de 9 puntos es fácil de entender, es balanceada ya que presenta un punto medio y es muy usada.

La escala LO JUSTO es utilizada para relacionar la opinión del consumidor directamente con la optimización del producto. Tiene un componente analítico y otro afectivo, que reflejan tanto la intensidad del atributo como el nivel del ideal, o sea del preferido. Es una escala bipolar, con un punto central: LO JUSTO (este punto sería el ideal para cada individuo). (Resurrección, 1998; ISO/DIS 11136, 2014)

Pruebas Discriminativas

Son aquellas que detectan si hay diferencias o semejanzas sensoriales entre dos productos. En este tipo de pruebas no interesa conocer la sensación que produce un alimento sino determinar si hay diferencia entre dos o más muestras y generalmente no interesa cuantificar ni identificar esas diferencias. Si el resultado es positivo nos indica que podemos seguir adelante con otros tipos de pruebas (Noble 1993a). Se pueden clasificar en los siguientes tipos: triangulares, comparación por pares, diferencia de un control y clasificación por ordenamiento.

La diferencia de un control (DFC) tiene por objetivo determinar si existe una diferencia entre una serie de muestras y el control. En esta prueba se presenta una muestra "control" más una o más muestras (no más de 6). Los evaluadores deben indicar el grado de la diferencia entre la muestra control y las incógnitas utilizando una escala apropiada para tal fin. Se les debe comunicar que una muestra puede ser igual que el control.

Pruebas Descriptivas

Son aquellas que describen atributos y miden su intensidad.

OBJETIVOS



2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo fue modificar procesos tradicionales de conservación para diseñar varios productos deshidratados en base a frutos de pera. Se aplicaron tecnologías combinadas de secado con distintos pretratamientos con el objeto de mejorar la calidad sensorial y organoléptica de los productos obtenidos.

2.2. Objetivos específicos

- a) Realizar una descripción matemática de los procesos de deshidratación.
- b) Estudiar los cambios estructurales en los tejidos luego de las distintas etapas de procesamiento.
- c) Evaluar las modificaciones en los aspectos sensoriales, de color y reológicos, así como la capacidad de rehidratación de los productos obtenidos.
- d) Estudiar algunas propiedades físicas relacionadas con la estabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS



3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIA PRIMA

Se trabajó con peras frescas (85,14 % b.h. de humedad, $a_w = 0,97$ y 14 °Brix, acidez 2,5-3 %AM) de tercera calidad variedad Packham's Triumph provistas por empresas frutícolas de exportación de la zona del Alto Valle de Río Negro, Argentina (Teorema S.R.L y Moño Azul S.A.). Las frutas fueron almacenadas (de 1 a 5 días) a 4 °C hasta el momento de su utilización. Podrán ser frescas o provenir de cámaras de atmósfera controlada o convencional.

3.2. AGENTES OSMÓTICOS

Para la preparación de las soluciones osmóticas se utilizaron dos tipos de humectantes: sacarosa y glucosa. Se agregaron aditivos autorizados como preservadores: sorbato de potasio, agente antifúngico, y bisulfito de sodio, como inhibidor del pardeamiento enzimático (CAA cap. XVIII art. 1398). Todos los reactivos utilizados fueron de calidad alimentaria (Saporiti S.A., Buenos Aires, Argentina) a excepción de la sacarosa (azúcar común tipo A marca Ledesma, Argentina).

3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.3.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las peras fueron lavadas y cortadas en forma paralela al eje axial del fruto, formando placas de $0,60 \pm 0,02$ cm de espesor con una cortadora manual. Las placas se obtuvieron de la zona de tejido parenquimático, descartando las zonas centrales donde existe mayor cantidad de tejido vascular con propiedades diferentes del resto del tejido. A partir de las placas, y usando un sacabocado de 3 cm de diámetro y acero inoxidable, se obtuvieron "discos", que mantuvieron el espesor de las placas. La **Figura 3.1** muestra un esquema del procedimiento de obtención de las muestras.

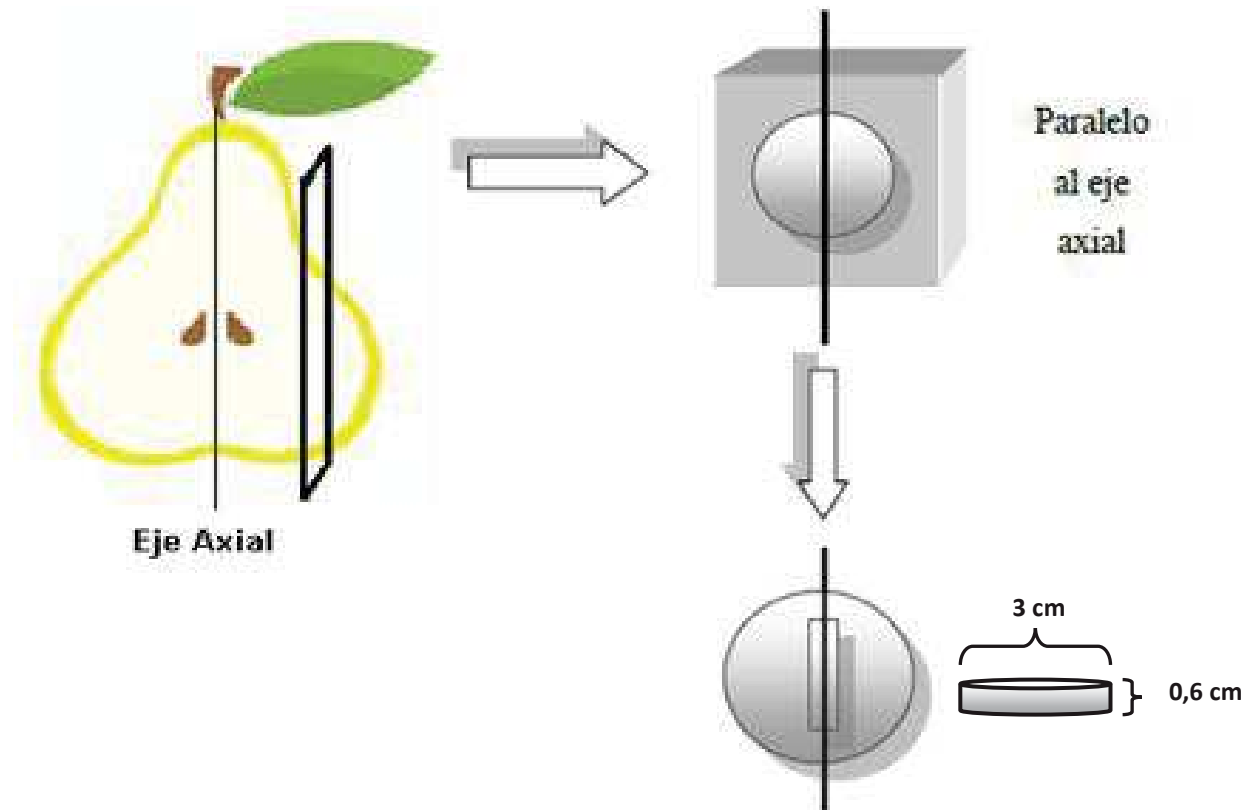


Figura 3.1. Esquema del procedimiento utilizado para la obtención de las muestras

3.3.2. PRETRATAMIENTOS

Las muestras de pera fueron sometidas a distintos procesos utilizados como pretratamientos al proceso de secado convectivo con el objeto de obtener productos deshidratados de pera de características mejoradas. Los pretratamientos incluyeron una deshidratación osmótica (también llamada “infusión con azúcares”), con y sin escaldado previo, con el objeto de analizar el impacto de cada uno de ellos sobre la cinética de secado y sobre las propiedades fisicoquímicas de los productos deshidratados obtenidos.

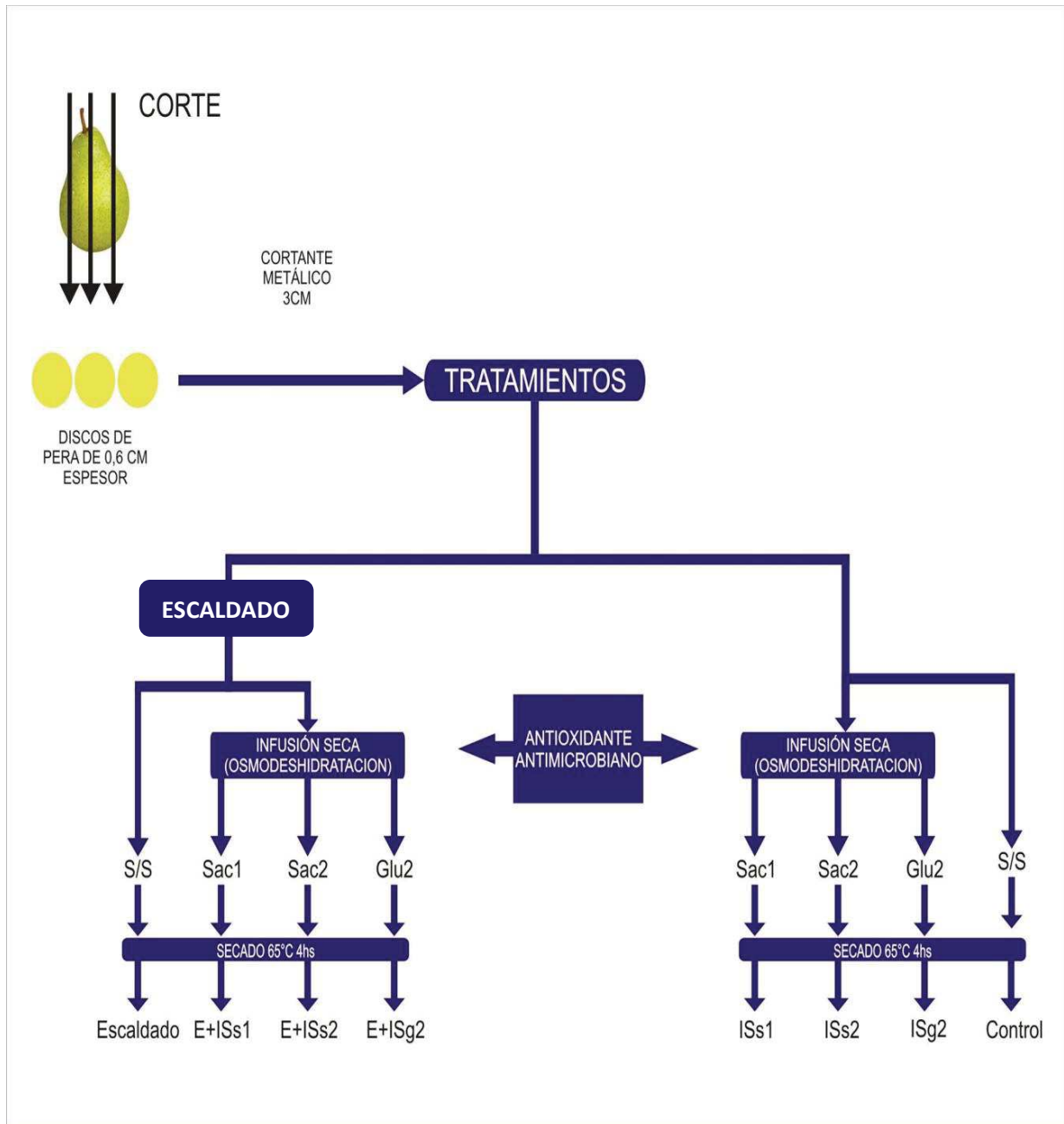


Figura 3.2. Diagrama de los pretratamientos aplicados a las placas de pera.

3.3.2.1 Infusión Seca con azúcares (IS)

Los discos de pera fueron expuestos a distintos procesos de infusión con azúcares en recipientes de plástico (7 cm x 29 cm). Estos se llevaron a cabo por inmersión de las muestras en una mezcla seca del humectante (sacarosa o glucosa en estado sólido) con los aditivos. Las cantidades de azúcar y de agentes químicos fueron establecidas en relación a la masa de la fruta y los niveles finales de actividad de agua requeridos para la

estabilización del producto. Los sistemas se prepararon para alcanzar luego de la equilibración (igualdad de a_w entre la fruta y el jarabe) distintas actividades de agua: 0,83 y 0,93. Estos valores se definieron con el objeto de obtener frutos parcialmente deshidratados de diferente composición y características fisicoquímicas.

Las preparaciones se agitaron suavemente dos veces por día hasta verificar la equilibración del sistema (igualdad de a_w entre la fruta y el jarabe generado). Alcanzado el mismo (≈ 7 a 10 días), se retiraron los discos del jarabe generado y se secaron superficialmente con papel absorbente para eliminar el jarabe residual. El anexo I muestra una secuencia de imágenes de preparación de los sistemas.

Formulación de los distintos sistemas de infusión

La concentración del humectante en la mezcla se calculó utilizando la ecuación de Ross para alcanzar en el equilibrio el valor de a_w deseado en las distintas condiciones experimentales (0,83 y 0,94) tanto en la fruta como en el jarabe (Alzamora y col., 1993; Tapia de Daza y col., 1996):

$$a_{w \text{ equilibrio}} = (a_w^0)_{\text{fruta}} \times (a_w^0)_{\text{humectante}} \quad (1)$$

Donde:

$(a_w^0)_{\text{fruta}}$ = actividad de agua de la fruta fresca

$(a_w^0)_{\text{humectante}}$ = actividad de agua del humectante

La actividad acuosa de la fruta es aproximadamente igual a 1 ($\approx 0,99$) y la a_w de las soluciones acuosas de azúcares puede predecirse con exactitud utilizando la ecuación de Norrish (Chirife y col., 1980):

$$a_{w \text{ humectante}} = x_w * \exp(-k * x_s^2) \quad (2)$$

Donde:

x_s = Fracción molar del humectante o del soluto orgánico

x_w = Fracción molar del agua

k = constante de correlación. El valor de k para la sacarosa es 6,47 y para la glucosa es 2,25.

Los sistemas preparados fueron los siguientes:

- a) C: sin pretratamiento
- b) ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$),
- c) ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$),
- d) ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$)

En todos los casos se agregaron 100 ppm de sorbato de potasio y 100 ppm de bisulfito de sodio.

3.3.2.2. Escaldado

Con el fin de inactivar las enzimas responsables del pardeamiento enzimático las placas fueron sometidas a vapor de agua ($T = 100\text{ }^\circ\text{C}$) durante 1,5 minutos y un posterior enfriamiento en agua a $4\text{ }^\circ\text{C}$ durante 1,5 minutos, Finalmente las placas se colocaron sobre papel absorbente para retirar el exceso de agua.

Los tratamientos que incluyeron un escaldado previo fueron:

- a) E: escaldado
- b) E + ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$),
- c) E + ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$),
- d) E + ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

3.3.3. PROCESO DE SECADO CONVECTIVO

La deshidratación final de las placas de pera, con y sin pretratamientos, se llevó a cabo por secado en corriente de aire en monocapa. Se utilizó un secador piloto (**Figura 3.3**) equipado con: un soplador de aire cuya velocidad fue controlada y variada mediante un regulador de tipo toroidal, un humectador cuyo propósito era establecer y controlar la humedad relativa (mediante soluciones saturadas de sales) del aire de

secado y una fuente calefactora constituida por cuatro resistencias controladas por una PC mediante un software diseñado para tal fin, que además registraba la temperatura del ensayo en forma continua. Los ensayos duraron 4 hs con aire a $65 \pm 0,5$ °C, con una velocidad de 2 m/s, medida con un Termo Anemómetro modelo 407117 Mini Vane CFM (Extech Instruments, Taipei, Taiwán) y a una humedad relativa de 6 % controlada con un higrómetro marca Hygropalm Rotronic. Se utilizó una canasta metálica con una sección de pasaje de flujo de aire de 490 cm^2 en la cual se colocaron las placas de fruta que eran retiradas a diferentes intervalos de tiempo para ser pesadas en una balanza analítica digital OHAUS, modelo Explorer, Capacidad: 210g, Resolución: 0,0001g.

Las experiencias de secado, en cada condición de procesado, se realizaron por triplicado, expresando los resultados en contenido de agua residual relativa (X/X_0), siendo X_0 el contenido de agua de la fruta al inicio del secado y X el contenido de agua en base seca al tiempo (t) de secado. Estos datos fueron graficados en función del tiempo para construir las curvas de secado de los diferentes materiales obtenidos.

La **Figura 3.4** muestra un esquema de la metodología propuesta en el caso de un tratamiento combinado de secado con pretratamientos de infusión seca y escaldado.

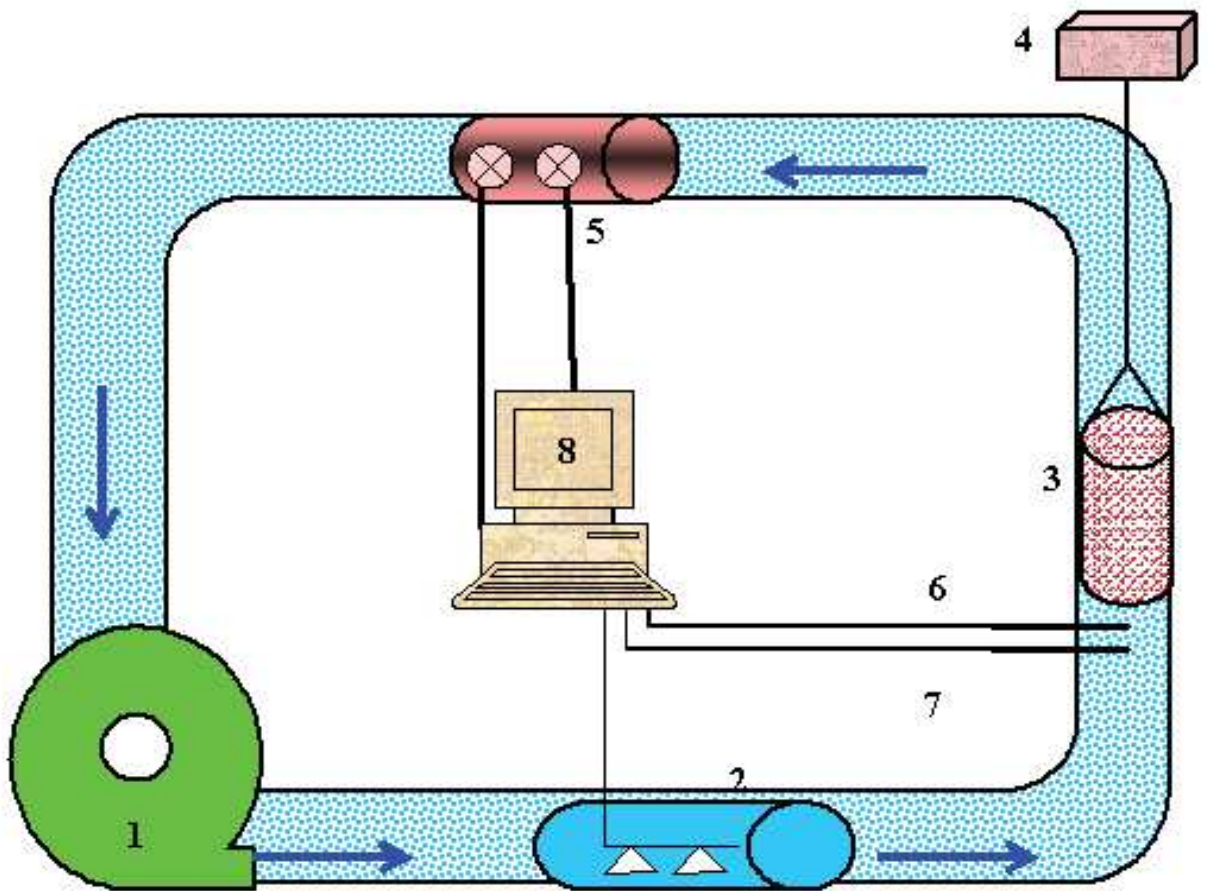


Figura 3.3. Esquema del equipo experimental de secado. 1: Ventilador; 2: estación de humectación del aire; 3: cámara de secado; 4: balanza; 5: calefactor eléctrico del aire; 6: sensor de temperatura de bulbo seco del aire; 7: sensor de humedad relativa del aire; 8: controlador automático de la temperatura del aire de secado.

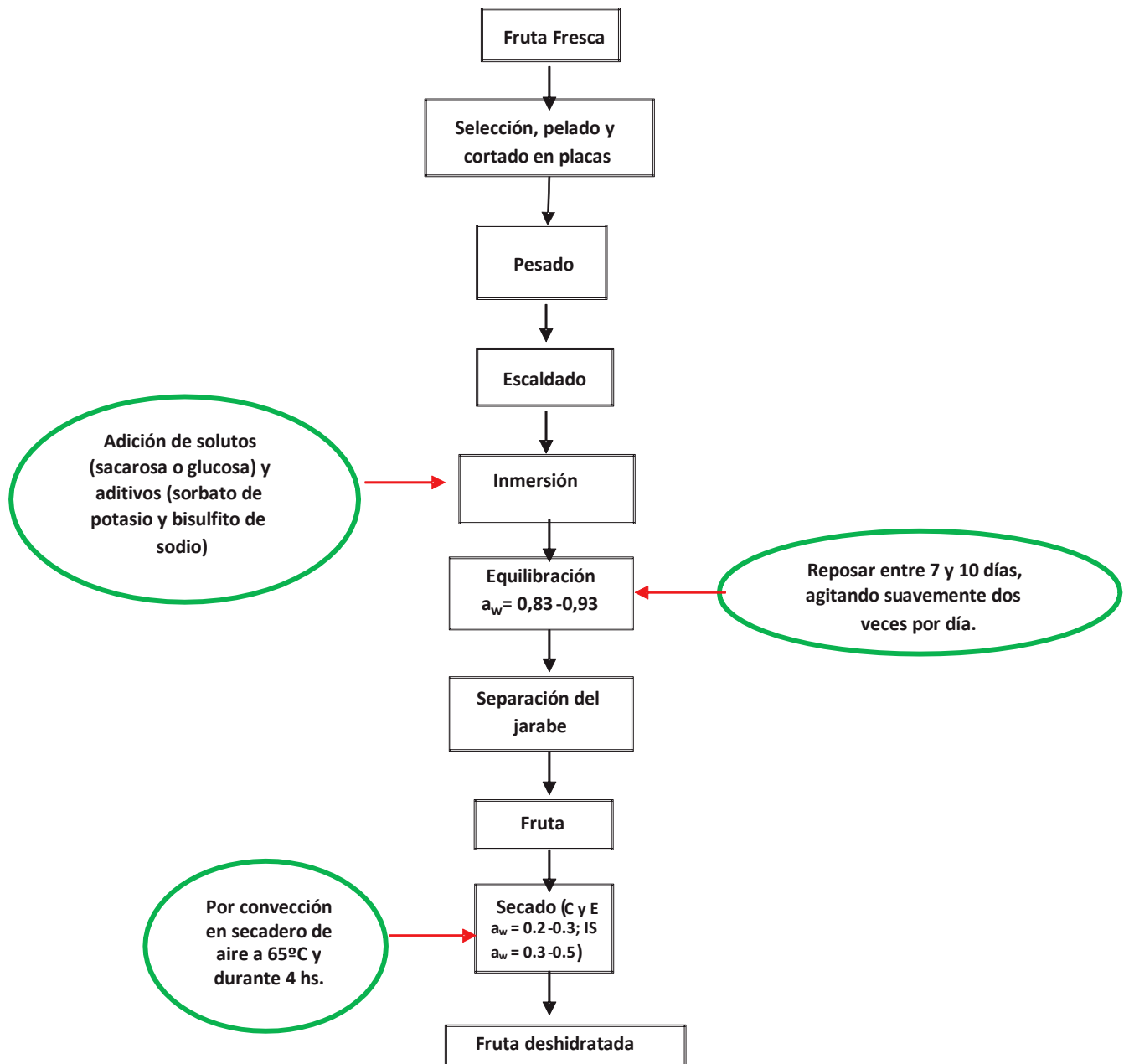


Figura 3.4. Esquema de Procesamiento

3.4. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LAS MUESTRAS: FRESCAS Y PROCESADAS

3.4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

La humedad de las placas de pera frescas, osmotizadas y deshidratadas se determinó por gravimetría según método 925.09 (AOAC, 1990) calculando la diferencia de peso antes y después de secar las muestras en una estufa de vacío (Dalmau VCV 204, Argentina) con bomba (Pascal, m³/h: 5, RPM: 1044,4 KW) (Figura 3.5.) a una temperatura de 60 °C y con una presión de 93,33 hPa hasta pesada constante, en presencia de sílica gel. La variación de peso se midió en una balanza analítica digital de precisión OHAUS, modelo Explorer, Capacidad: 210g, Resolución: 0,0001g.



Figura 3.5. Estufa de Vacío.

Para caracterizar la materia prima el contenido de agua se expresó en base húmeda (b.h.) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$H(\%) = \frac{(P_{mh} - P_{md})}{P_{mh}} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

H (%) = contenido de agua (g agua/100 g fruta)

P_{mh} = masa de la muestra húmeda

P_{md} = masa de la muestra luego del secado en estufa (masa seca)

En las peras deshidratadas el contenido de agua se expresó en base seca de acuerdo a la siguiente expresión:

$$X = \frac{(P_{mh} - P_{md})}{P_{md}} \quad (4)$$

Donde:

X = g de agua/ g de masa seca (b.s.)

Esta determinación se realizó por triplicado pesando dos placas de pera cortadas en pequeños trozos (≈ 2 g) y luego colocadas en pequeñas cajas de petri.

3.4.2. *CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES REFRACTOMÉTRICOS*

Se midieron los sólidos solubles (ss) refractométricos según el método oficial 932-12 (AOAC 1990) utilizándose un refractómetro ABBE modelo DR A1 (ATAGO, Tokyo, Japón) (**Figura 3.6**) a 25°C con una sensibilidad de 0,01 °Brix. En las peras frescas el procedimiento realizado fue el siguiente: se colocó sobre el prisma del equipo, el jugo obtenido de la trituración de 10 placas de fruta fresca, seleccionadas al azar, y se midieron los sólidos solubles con el refractómetro mencionado. En el caso de las placas osmotizadas, dicha determinación se realizó sobre seis placas de pera. En las infusiones: ISs1, E+ISs1 y E+ISs2 fue necesario realizar una dilución 1:2 de las placas para poder extraerles jugo, ya que las mismas estaban muy deshidratadas. Para efectuar dicha dilución se pesó cada placa y se mezcló con el doble de su peso en agua. Esta mezcla se trituró durante 1 minuto utilizándose un mortero de porcelana. Luego se colocó la pasta resultante de la maceración sobre un trozo de tul, para poder separar los sólidos del jugo obtenido, al cual se le realizó la medición. En el resto de las peras osmotizadas se realizó una medida directa de dicho parámetro. En peras secadas, se realizó una dilución 1:2 de fruta en agua destilada. Las medidas se realizaron por triplicado. Los resultados se expresaron luego en porcentaje de fracción másica total (Xs%) (g ss/g muestra).



Figura 3.6. Refractómetro de Abbe.

3.4.3. DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ACUOSA

Se utilizó el método oficial (AOAC, 1990). Las determinaciones de a_w se realizaron a $25 \pm 3^\circ\text{C}$, usando un higrómetro de punto de rocío modelo 3TE (Aqualab, Decagon Devices Inc., EEUU) (**Figura 3.7**), con sensibilidad de $\pm 0,003$, el cual se había calibrado previamente con soluciones salinas saturadas. Los frutos fueron cortados en pequeños trozos y dispuestos en monocapa en las cajas porta-muestras de plástico provistas por el fabricante utilizarse con el equipo. Las medidas se realizaron por triplicado.



Figura 3.7. Aqualab.

3.4.4. ENCOGIMIENTO

El volumen de las frutas se determinó por triplicado por picnometría líquida con agua destilada en el caso de muestras frescas y osmotizadas (Salvatori y col., 1998) y con tolueno en el caso de muestras deshidratadas (Yan y col., 2008), utilizando un picnómetro de boca ancha para muestras sólidas. Dicho parámetro se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V = \frac{(M_m + M_{p+s} - M_{p+s+m})}{\rho_s} \quad (5)$$

Donde:

V=volumen de la muestra (ml)

M_m = peso de la muestra (g)

M_{p+s} = peso del picnómetro con solvente (g)

M_{p+s+m} = peso del picnómetro con solvente y muestra (g)

ρ_s = densidad del solvente, corregida por la temperatura (g/ml)

El encogimiento volumétrico (Enc%) de las muestras, resultante de los distintos tratamientos se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Enc}\% = \left(\frac{V_i - V_f}{V_i} \right) \times 100 \quad (6)$$

Donde:

V_f = volumen final (ml) (fruta osmotizada o deshidratada)

V_i = volumen inicial (ml) (fruta fresca)

3.5. PROPIEDADES MECÁNICAS

3.5.1. ENSAYO DE PENETRACIÓN

Se estudió el comportamiento mecánico de los materiales deshidratados obtenidos mediante ensayos de punción o penetración utilizando una máquina de ensayos universales modelo 3344 (INSTRON Corporation, Canton, MA, USA) conectada por medio de una computadora al software INSTRON Bluehill Material Testing Software. Se utilizó para el ensayo una punta de penetración cilíndrica de 3 mm de diámetro. Antes del ensayo las muestras eran pesadas (0,5-1 g) y medidas (altura y diámetro); posteriormente eran colocadas en posición horizontal utilizando el dispositivo mostrado en la **Figura 3.8**. Este dispositivo cilíndrico fue diseñado para sostener las muestras durante el ensayo y evitar el posible movimiento que pudiera generarse debido a las irregularidades que normalmente presentan las frutas deshidratadas. El dispositivo (de acrílico) poseía un orificio central y un sistema a rosca que permitía sostener la muestra mientras la punta penetraba el centro de la placa de fruta, dándose por finalizada la prueba una vez que dicha la punta atravesaba completamente (**Figura 3.9**).



Figura 3.8. *Dispositivo utilizado para sostener las placas de pera durante el ensayo de penetración.*



Figura 3.9. Máquina de ensayos universales *INSTRON Testing Machine 3344*.

Las condiciones de trabajo utilizadas fueron:

- Velocidad de cabezal: 20 mm/min.
- Intervalo de tiempo (captura de datos): 100 ms
- Rango de carga: 50 N

A partir de los ensayos se obtuvieron curvas de fuerza (F) versus distancia (d) o deformación. Como el área de contacto de la punta con la muestra fue la misma en todos

los materiales estudiados, por cuestiones prácticas y a modo comparativo en lo que respecta a esta tesis, se utilizó directamente el valor de F sin corregir por el área.

A partir de las curvas obtenidas del tipo de la mostrada en la **Figura 3.10**, se evaluaron los siguientes parámetros:

- Fuerza máxima ($F_{\text{máx}}$)
- Desplazamiento correspondiente a la fuerza máxima ($\Delta_{F_{\text{máx}}}$)
- Trabajo: área bajo la curva (W)
- Pendiente máxima (S_i)

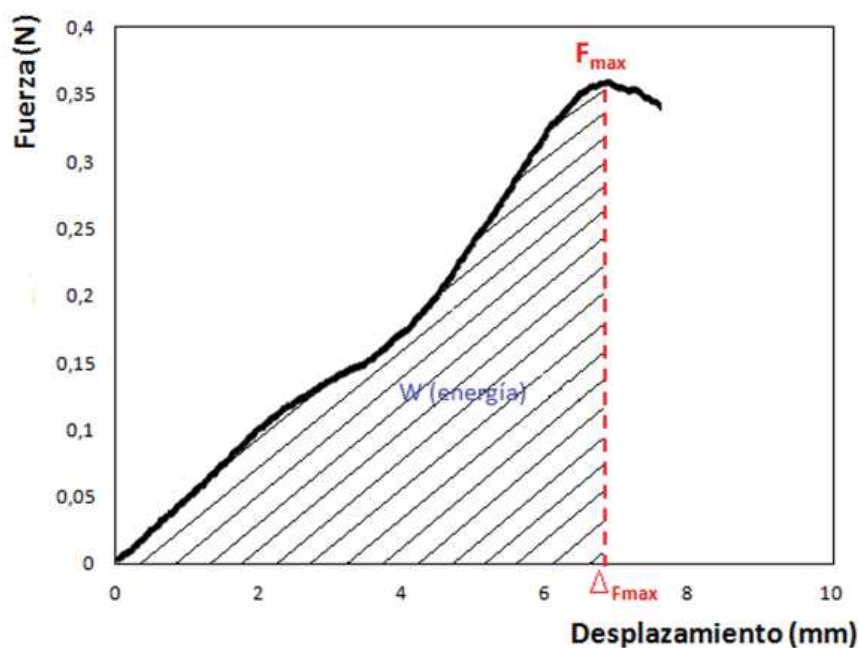


Figura 3.10. Curva típica de fuerza-desplazamiento identificando las variables evaluadas para la caracterización de las propiedades mecánicas mediante el ensayo de punción.

3.6. PROPIEDADES FÍSICAS RELACIONADAS CON LAS ESTABILIDAD DURANTE EL ALMACENAMIENTO

3.6.1. ISOTERMAS DE SORCIÓN DE AGUA

Humidificación

Luego del secado las muestras se almacenaron en desecadores a 20°C a diversas humedades relativas (HR) hasta alcanzar peso constante, empleando soluciones saturadas de las siguientes sales: cloruro de litio, acetato de potasio, cloruro de

magnesio, carbonato de potasio, nitrato de magnesio, bromuro de sodio, cloruro de sodio, bromuro de potasio, cloruro de potasio y cloruro de bario logrando HR del orden de 11%, 22%, 33%, 43%, 52%, 58%, 75%, 80%, 84% y 90% respectivamente (Greenspan, 1977).

Determinación de los contenidos de agua

La determinación del contenido de agua se realizó sobre las muestras previamente equilibradas a diferentes humedades relativas. Se determinó el contenido de agua como se explicó anteriormente (**sección 3.4.1**).

3.6.2. TRANSICIONES DE FASE

Luego de la humidificación de las muestras deshidratadas se determinó la temperatura de transición vítrea (T_g) utilizando un calorímetro diferencial de barrido (DSC) Mettler Toledo modelo 822 (Mettler Toledo AG, Suiza). Las curvas se estudiaron con el programa para análisis térmico STARE Thermal Analysis System version 3,1 software (Mettler Toledo AG). Se empleó un método dinámico para obtener la temperatura de transición vítrea. Con este fin se pesó entre 2 y 25 mg de muestra en cápsulas de aluminio de 40 μ L (Mettler), selladas herméticamente y se midieron utilizando como referencia una cápsula de aluminio vacía con un orificio, utilizando nitrógeno gaseoso como purga (para evitar condensaciones en el sensor del equipo). Las mediciones se realizaron en el rango de temperatura de -130 a 70°C, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min. El intervalo de confianza para los valores de temperatura fue de 1°C. El equipo se calibró por un compuesto de referencia estándar (indio) que posee punto y calor de fusión bien definido.

Las determinaciones de T_g se realizaron a partir de las discontinuidades detectadas en las curvas de flujo de calor versus temperatura. La T_g se consideró como la temperatura a la cual comienza el cambio en el calor específico (valor onset) que se detecta en el termograma como un corrimiento endotérmico en la línea de base (**Figura 3.11**).

El ΔC_p corresponde a la magnitud del cambio en la línea de base debido a la diferencia en capacidad calorífica específica entre el inicio y el final de la transición.

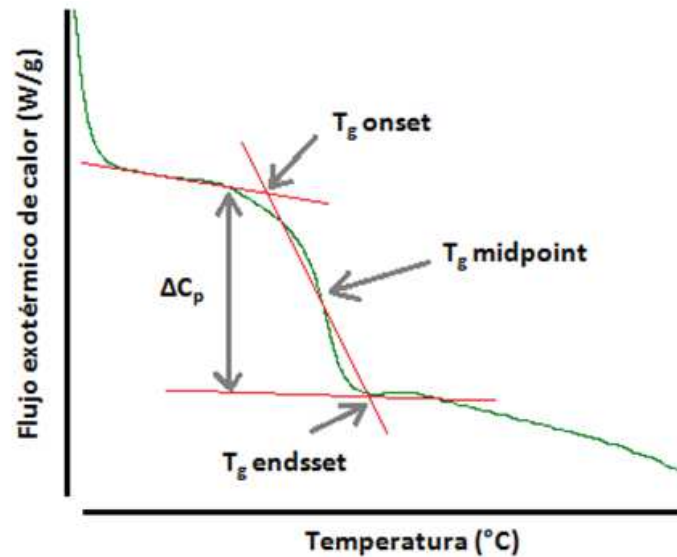


Figura 3.11. Termograma obtenido por calorimetría diferencial de barrido donde se muestra la temperatura de transición vítrea.

3.6.3. ESTIMACIÓN DE LA MOVILIDAD MOLECULAR DEL AGUA Y DE LOS SÓLIDOS

Se utilizó la técnica de resonancia magnética nuclear (¹H-NMR) resuelta en el tiempo para estimar la movilidad molecular de los sólidos y del agua de las muestras. Se empleó un equipo Bruker Minispec mq20 (20 MHz) (Bruker Biospin GmbH, Alemania) de resonancia magnética nuclear (RMN) pulsada, con un campo magnético de 0,47 T que opera a una frecuencia de resonancia de 20 MHz.

Las muestras se colocaron en tubos de vidrio de 10 mm de diámetro hasta una altura de 5 cm y luego se equilibraron a 25°C en un baño de agua termostático (Haake Phoenix II C35P, Alemania) antes de realizar la medición. Las mediciones se realizaron a 20°C. El tiempo de relajación (T₂) se estimó mediante el método de libre decaimiento de la inducción (FID) que consiste en la aplicación de un pulso de 90° y la medición del decaimiento exponencial de la señal. El RMN se calibró para las determinaciones de T₂ para el método FID con patrones provistos por Bruker. Las curvas de decaimiento se ajustaron con un modelo mono-exponencial según la siguiente ecuación:

$$I = A \exp\left(\frac{-t}{T_2}\right) \quad (7)$$

Donde:

I = señal de intensidad de los protones,

T₂ = protones de las cadenas poliméricas de la muestra y

A = señal de intensidad de los protones en el estado T₂.

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

3.7. COLOR SUPERFICIAL

El color de las peras deshidratadas fue medido con un fotocolorímetro Minolta Modelo CR400 (Konica Minolta Sensing Inc., Japón) (**Figura 3.12**), utilizando 2° de ángulo de observador e iluminante C. La medición se realizó en el punto central de ambas superficies de las muestras. Para su calibración se utilizó una placa cerámica blanca (L= 95,55; a= -0,10 y b=+2,69) proporcionada por el fabricante. Los cambios de color de las muestras fueron evaluados a través de los parámetros L*, a*, b* del espacio CIELAB, donde L* indica luminosidad, a* cromaticidad sobre un eje que va del verde (-) al rojo (+) y b* cromaticidad sobre un eje que va del azul (-) al amarillo (+). Estos valores numéricos se convirtieron luego en funciones de color: ángulo de tono (h_{ab}) y croma (C*_{ab}), índice de pardeamiento (IB) y opacidad.

El croma (C*_{ab}) se calculó según la siguiente ecuación:

$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (8)$$

El ángulo de tono (h_{ab}) se calculó según la siguiente ecuación:

$$h_{ab} = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (9)$$

La opacidad se calculó como el cociente entre la luminosidad (L) medida sobre fondo negro (FN) y la luminosidad medida sobre fondo blanco (FB):

$$Opacidad = \frac{L_{FN}}{L_{FB}} \quad (10)$$

El cambio de luminosidad se calculó considerando la luminosidad de la pera fresca (L_0^*) según la siguiente ecuación:

$$\Delta L = (L_0^* - L^*) \quad (11)$$

El índice de pardeamiento (“browning”) se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación (Gómez y col., 2010):

$$IB = \frac{[100 - (x - 0,31)]}{0,172} \quad (12)$$

Donde:

$$x = \frac{X}{(X + Y + Z)} \quad (13)$$



Figura 3.12. Fotocolorímetro Minolta.

3.8. CAPACIDAD DE REHIDRATACIÓN

Procedimiento de rehidratación

La capacidad de rehidratación se determinó sumergiendo la muestra deshidratada (1 placa de pera) en un recipiente de vidrio conteniendo agua destilada, y registrando el incremento de peso de la misma a lo largo del tiempo. Se utilizó 1 g de muestra en 20 ml

de agua destilada y los estudios se realizaron a 2 temperaturas de rehidratación: $25 \pm 1^\circ\text{C}$ y $80 \pm 1^\circ\text{C}$, usando un baño de agua termostatzado Thermo Fisher Scientific NESLAB RTE7 (New Inngton NH03801, U.S.A.). En cada intervalo de tiempo (0, 5, 10, 30, 60, y 120 min) se realizó un drenado del agua superficial que consistió en colocar la muestra sobre papel de filtro depositado en un embudo de Büchner conectado a un quitasato al cual se le aplicó vacío durante 1 min. Luego, las muestras fueron pesadas usando una balanza analítica para el registro del peso alcanzado. Cada cinética se realizó por triplicado.

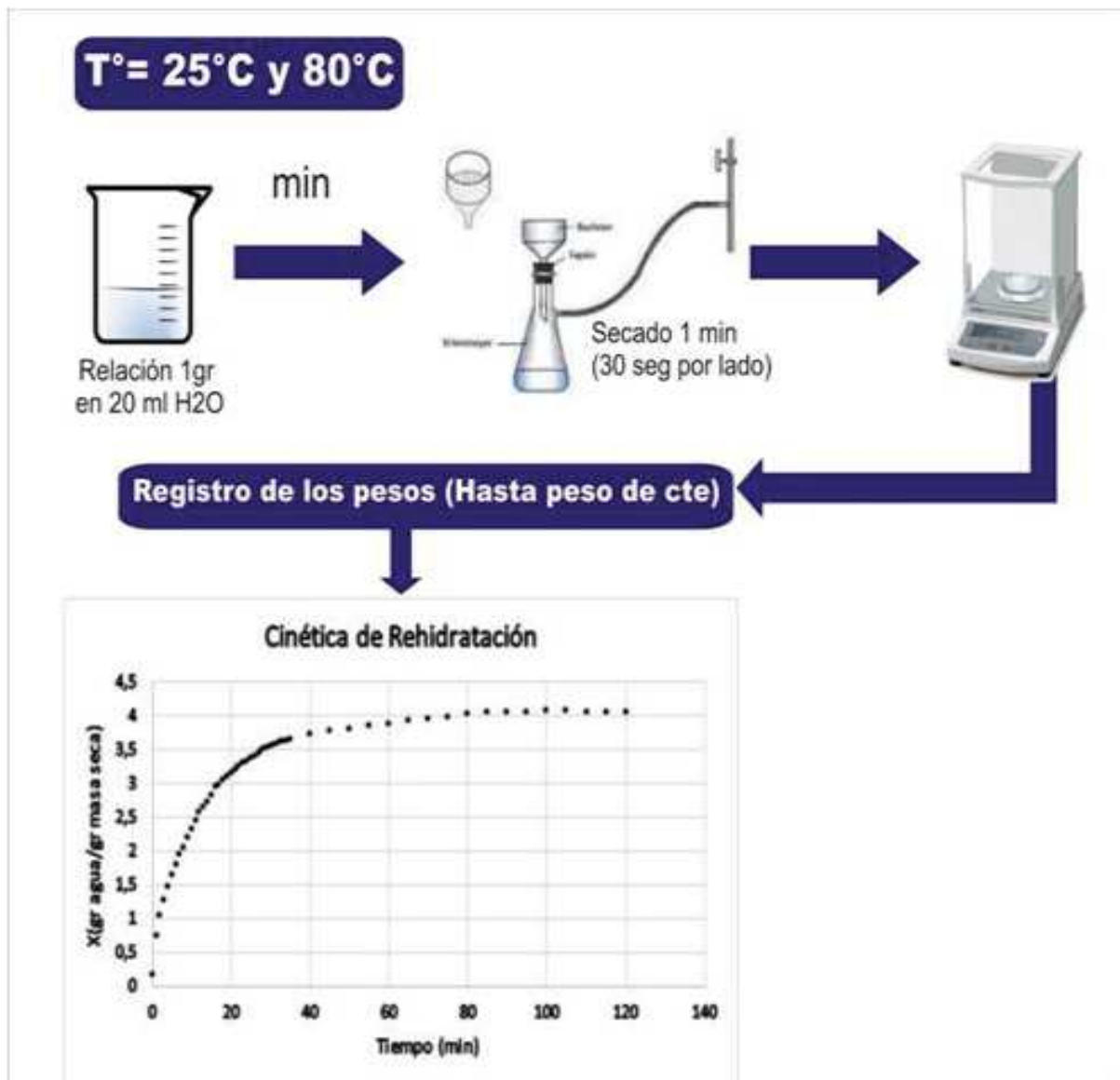


Figura 3.13. Secuencia de pasos para la rehidratación de las placas de pera.

Los ensayos de rehidratación se realizaron con peras frescas correspondientes a un período de cosecha diferente en relación a las frutas utilizadas en los estudios de cinética de secado. Ello se tradujo en un secado más intenso razón por la cual las curvas de rehidratación obtenidas partieron de humedades iniciales levemente inferiores.

Índice de calidad

El índice más comúnmente empleado para expresar los resultados obtenidos en los experimentos de rehidratación de diversos tejidos vegetales deshidratados es la capacidad de rehidratación CR, definida como se expresa en la siguiente ecuación (Levi y col., 1988):

$$CR = \left(\frac{m_r}{m_d} \right) \times 100 \quad (14)$$

Donde:

m_r = masa (g) de la muestra rehidratada

m_d = masa (g) de la muestra deshidratada

Higroscopicidad

Se evaluó la higroscopicidad de las peras deshidratadas por exposición de las mismas a una atmosfera saturada a 75% HR a 20°C durante el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio. Para ello se utilizó un desecador provisto de una solución sobresaturada de cloruro de sodio para generar 75% de humedad relativa ambiente. Las muestras se pesaron y se introdujeron en el interior del desecador, el cual se almacenó en una incubadora con control frio-calor programada a 20°C. Se registró el incremento de peso a lo largo del tiempo (absorción de agua) por triplicado y se expresó el % de higroscopicidad (H_i) como el promedio de diez registros de contenido de agua consecutivo en la zona del equilibrio.

3.9. ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA

Las características microestructurales de las placas de pera se analizaron mediante distintos tipos de microscopía. En peras osmotizadas y/o escaldadas se utilizó microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de transmisión (TEM). Las peras deshidratadas fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

Microscopía Óptica (MO): la **Figura 3.14** muestra el esquema de corte para la obtención de muestras para microscopía MO y TEM. Estas muestras se fijaron en una solución de glutaraldehído 3 % (v/v) preparada en buffer fosfato de potasio (20 mM), pH 7 a 4-5 °C durante 12 h. Luego fueron lavadas con solución buffer fosfato de potasio (0,1 M), pH 7,4 y fijadas nuevamente en solución acuosa de OsO₄ 1,5% (p/v) a 20 °C durante 2 h. Posteriormente fueron deshidratadas con una serie de soluciones sucesivas de concentración ascendente de acetona y embebidas en resina Spurr de baja viscosidad (Sorrivas y Morales, 1983). Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico (Merck Química Argentina S.A, Argentina). A partir de las muestras incluídas en resina Spurr, se obtuvieron secciones de 1 µm de espesor que fueron teñidas con azul de toluidina y examinadas en un microscopio Nikon Eclipse 80i (Tokio, Japón).

Microscopía Electrónica de Transmisión (MET): para realizar las observaciones en el microscopio electrónico de transmisión, las muestras embebidas en resina Spurr se cortaron en secciones ultrafinas con una cuchilla de vidrio utilizando un ultramicrotomo (Sorvall MT2B Ultracut, USA) y se montaron en grillas de cobre. Luego se colorearon con una solución de acetato de uranilo (5 % p/p) por 45 minutos y posteriormente con citrato de sodio y nitrato de plomo (solución de Reynolds) y fueron examinadas con un microscopio JEOL modelo JSM-100 CXII, utilizando una aceleración de voltaje de 80 kv.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB): Las muestras de pera fresca fueron fijadas con solución fijadora de glutaraldehído al 4% en tampón cacodilato de sodio 0.1 M (pH 7,2). Las piezas de tejido se cortaron en forma transversal y longitudinal, por el centro de la placa con una hoja de afeitar en cubos de 2mm de lado y se colocó inmediatamente en el fijador. Se dejó de 4 a 5 horas a temperatura ambiente y luego a 4 °C toda la noche. Se cambiaron las piezas a una solución tampón cacodilato de sodio 0.1 M (pH 7,2). Se deshidrataron en pasos de 30 minutos con acetona 30%, 50%, 75% y 100% tres veces. Se secaron por punto crítico en un equipo POLARON (Inglaterra). Como fluido intermediario se usó CO₂. Las muestras frescas fueron observadas en el

mismo microscopio en modo de presión variable a un potencial de 25 KV. Se cortaron los cubos por la mitad y se observó la sección cortada para evitar las zonas de manipulación y roce de los trozos de tejido. Se evaporó oro en una evaporadora en plasma de Argón SPI. Las muestras se observaron en un Microscopio de Barrido de presión variable marca LEO, modelo EVO 40 (Cambridge. England. 2004) a un potencial de aceleración de 5 KV. Las peras deshidratadas fueron observadas directamente al microscopio

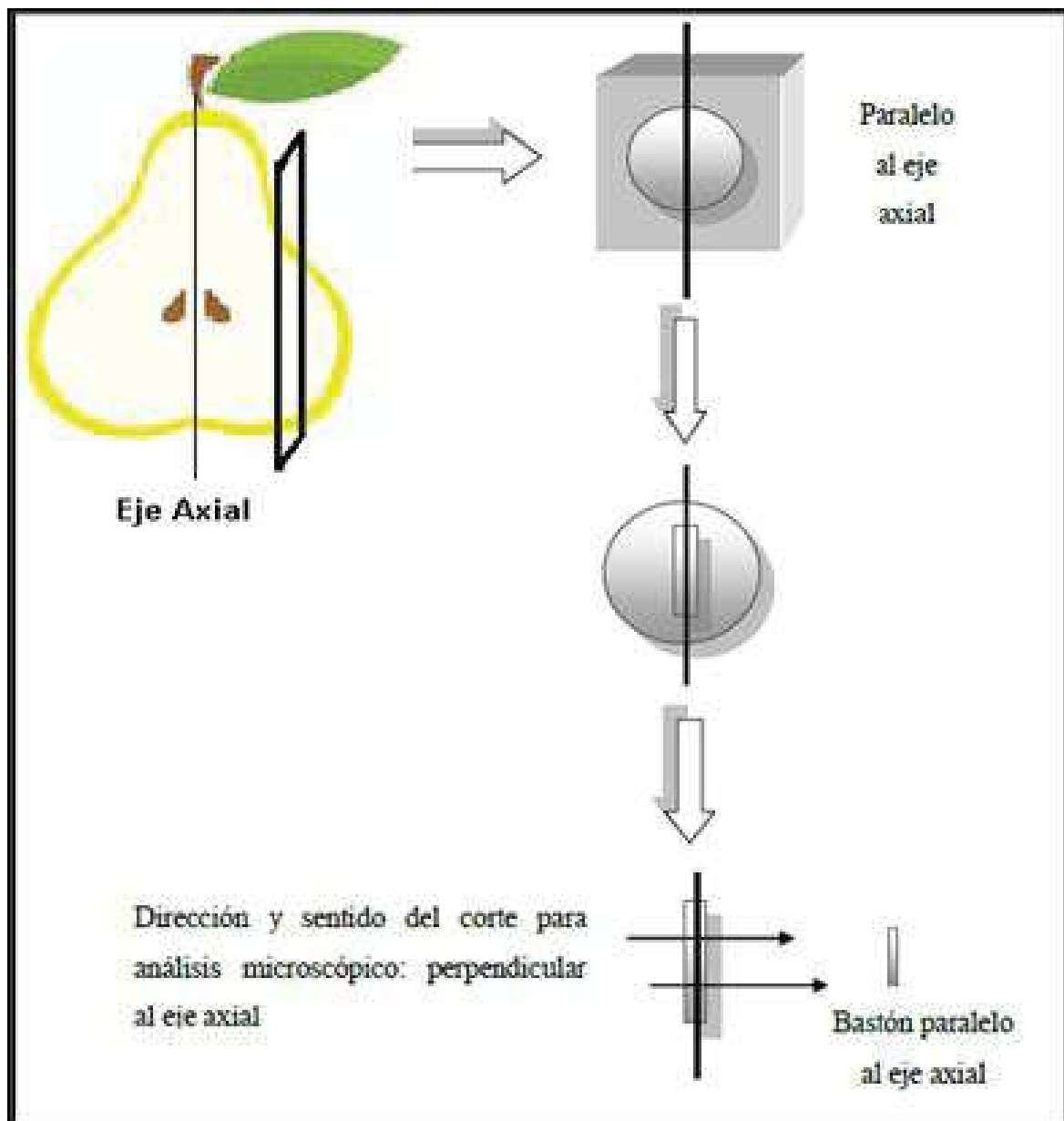


Figura 3.14. Esquema de corte de las muestras para las observaciones microscópicas.

3.10. ANÁLISIS SENSORIAL

El análisis sensorial se realizó en dos etapas: en la primera se trabajó con un panel de evaluadores y en la segunda, con la colaboración de consumidores.

Área de prueba y presentación de las muestras

Se seleccionó una habitación con luz natural, temperatura agradable y libre de posibles distracciones, la cual fue dividida en dos sectores: zona de análisis y zona de preparación de las muestras. Para que los juicios fuesen independientes, el sector de análisis fue dividido en seis cubículos blancos. Cada uno de ellos fue provisto de una jarra con agua inodora, insípida e incolora, una jarra con embudo destinada al enjuague de la boca entre degustaciones de muestra y una servilleta.

Las muestras fueron presentadas de manera idéntica en todas sus propiedades, respecto al recipiente en las que se entregaban y el acondicionamiento del área de evaluación, con el propósito de evitar que los evaluadores y/o consumidores fueran influenciados por características irrelevantes de las mismas. Se sirvieron a la temperatura de consumo (25°C) y se acompañaba al proceso evaluativo con un vaso de agua. En cada caso, entre 3 y 4 discos de peras fueron suficientes para que los sujetos emitieran su juicio. Sin embargo, si el participante lo requería, se le entregaba una mayor cantidad de muestra.

En ambas etapas todas las muestras se entregaron bajo clave de tres cifras elegidas al azar, con el objeto de no dar indicios sobre los tratamientos evaluados. Dicha clave fue distinta para cada sujeto. El orden de presentación fue al azar pero balanceado. La distribución de los distintos grupos de muestras entre los sujetos también fue al azar.

Elección de la Metodología usada

Las muestras fueron analizadas sensorialmente en primer lugar por un grupo de 9 evaluadores familiarizados con los atributos sensoriales de los productos y luego, por un grupo de 40 consumidores a los que se les presentaron los productos desarrollados a

base de peras osmodeshidratadas usando como soluto sacarosa. En la primera parte, se realizó un Test de diferencia de control (DFC) que consistió primero en evaluar a la muestra control respecto a sabor y aroma, y luego evaluar de la misma forma a cuatro muestras, indicando en la planilla correspondiente (**Planilla N°1**) las diferencias encontradas respecto a la control. En una segunda etapa, se realizó una prueba de consumidores para evaluar de esas cuatro muestras cuál o cuáles eran las más aceptadas, según la evaluación de los distintos atributos presentados.

Formularios

Los formularios de respuesta se redactaron en base a modelos ya normalizados, en un estilo claro y conciso, sin la menor ambigüedad, para evitar toda duda o discrepancia en su comprensión (Lawless y Heymann, 1999). Los mismos incluyeron instrucciones para la evaluación sensorial y además escalas y términos para expresar el juicio emitido por cada sujeto. Se incluyó el apartado “observaciones” para que los participantes expresaran su opinión proporcionando además cierta información no suministrada por la estadística.

Como consumidores se invitaron a participar a estudiantes y docentes universitarios, cuyas edades oscilaron entre los 20 y 60 años.

Planilla N°1: Test de Diferencia de Control

- 1.- Usted recibe 5 muestras, una etiquetada como Control (C) y otras 4 con un número de 3 dígitos cada una.
- 2.- Evalúe el control primero (por sabor y aroma). Memorice sus características sensoriales.
- 3.- Evalúe de la misma forma las muestras.
- 4.- Indique con una cruz en el formulario en cuanto difieren las características de las muestras respecto del control.

	MUESTRAS							
1) No diferencia								
2) Diferencia apenas detectable								
3) Diferencia pequeña								
4) Diferencia pequeña a moderada								
5) Diferencia moderada								
6) Diferencia moderada a grande								
7) Diferencia muy grande								
8) Diferencia muy grande a extrema								
9) Diferencia extrema								
más dulce	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
más sabor a pera	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
más fácil de masticar	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
más brillo	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
menos dura	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
menos húmeda	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)

Planilla N°2: Prueba de Consumidores

ESCALA HEDÓNICA

1. Usted recibe 4 muestras en recipientes rotulados. Evalúe la aceptabilidad global de las mismas y marque con una cruz la opción que mejor representa su juicio.

Muestra N°

Me disgusta mucho								Me gusta mucho
1	2	3	4	5	6	7	8	9

2. Usted recibe 4 muestras en recipientes rotulados. Evalúe los siguientes atributos de cada una y marque con una cruz la opción que mejor representa su juicio.

Muestra N°

APARIENCIA

Me disgusta mucho								Me gusta mucho
1	2	3	4	5	6	7	8	9

TEXTURA

Me disgusta mucho								Me gusta mucho
1	2	3	4	5	6	7	8	9

SABOR

Me disgusta mucho								Me gusta mucho
1	2	3	4	5	6	7	8	9

ESCALA "LO JUSTO" (JUST ABOUT RIGHT- JAR) Se basa en relacionar la opinión del consumidor directamente con la optimización del producto.

Para los siguientes atributos, indique su juicio colocando una cruz en el casillero correspondiente.

Muestra N°

Atributo: DULZOR

Muy bajo		Justo		Muy dulce
1	2	3	4	5

Atributo: **COLOR**

Muy claro		Justo		Muy oscuro
1	2	3	4	5

Test de Aceptabilidad

Se realizó un test de aceptabilidad con consumidores con el objeto de evaluar la impresión global respecto de algunas características de las peras.

En la prueba de consumidores (**Planilla N°2, punto 1**) se empleó una escala hedónica de 9 puntos balanceados, con extremos desde “me disgusta mucho” a “me gusta mucho”. Se incluyeron en la planilla otras tres preguntas relacionadas con la evaluación de características de las peras (apariencia, textura y sabor) a través de escalas de punto adecuado de 9 puntos, con el objetivo de analizar si el atributo se encontraba con la adecuada intensidad (**Planilla N°2, punto 2**). Se evaluó también el dulzor y el color por medio de la escala “lo justo” a partir de una escala de 5 puntos con extremos “muy bajo” y “muy dulce” para evaluar el dulzor, y con extremos “muy claro” y “muy oscuro” para evaluar el color (**Planilla N°2, punto 3**).

A cada consumidor se le entregó además un cuestionario poblacional en el que debía completar: sexo, edad y frecuencia de consumo, para tener un registro de las características generales de los consumidores que participaron en la evaluación y ver la preferencia global.

Para la realización de este test de campo cada juez dispuso de cuatro muestras diferentes, cada una codificada con 3 números al azar. Todos los participantes recibieron las mismas muestras con diferente codificación y fueron advertidos de que dichas muestras correspondían a productos de peras deshidratadas. Se analizó la información brindada por los consumidores calculando el promedio del puntaje otorgado en cada prueba y la correspondiente desviación estándar. Se calculó el porcentaje de respuestas de cada categoría otorgado en cada prueba.

CUESTIONARIO POBLACIONAL

Responda las siguientes preguntas marcando con una cruz el casillero correspondiente.

SEXO	MASCULINO	FEMENINO

EDAD	
MENOR DE 20	
ENTRE 21 Y 29	
ENTRE 30 Y 39	
ENTRE 40 Y 49	
MAS DE 50	

FRECUENCIA DE CONSUMO	
MÁS DE UNA VEZ POR SEMANA	
1 VEZ POR SEMANA	
MENOS DE 1 VEZ POR SEMANA	

3.11. MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS

En este trabajo se plantearon modelos matemáticos teóricos y empíricos con el objeto de explicar distintos fenómenos como la velocidad de transporte de agua durante el secado en corriente de aire, la velocidad de incorporación de agua durante el proceso de rehidratación de los productos deshidratados obtenidos, así como el fenómeno de sorción de agua.

3.11.1. PROCESO DE SECADO

Para describir matemáticamente la transferencia de materia durante el secado convectivo se utilizaron tres modelos empíricos y el modelo teórico basado en la segunda ley de Fick.

Modelos empíricos: se utilizó el modelo de Page, el Logarítmico y el modelo de Henderson y Pabis Modificado. Si bien son modelos semiteóricos que no parten de un mecanismo propuesto para la migración interna de agua en el alimento durante el proceso de secado y sus parámetros, por consecuencia, no tienen un significado físico, han sido ampliamente utilizados en alimentos y materiales biológicos (Jasna y col., 2001; Doymaz, 2004; Akpınar, 2006; Kingsly y col., 2007; Xanthopoulos y col., 2007; Khazaei y col., 2008; Vega-Gálvez y col., 2008, Doymaz e Ismail, 2010; Doymaz, 2012; Onwude y col., 2016). Estos modelos incluyen el parámetro adimensional X^* que corresponde al contenido de agua adimensional. Debido a que los valores de X_e son relativamente pequeños comparados con X y X_0 para períodos largos de tiempo, el contenido de agua adimensional $X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e}$ fue simplificado a $X^* = \frac{X}{X_0}$ (Akgun y Doymaz, 2005; Thakor y col., 1999). Donde:

X = contenido de agua a cada tiempo t (kg agua/kg m. s.)

X_0 = contenido de agua inicial (kg agua/kg m. s.)

X_e = contenido de agua de equilibrio (kg agua/kg m. s.)

Modelo de Page

$$X^* = \frac{X}{X_0} = \exp(-kt^n) \quad (15)$$

Donde:

k = constante cinética (s^{-n})

Modelo Logarítmico

$$X^* = \frac{X}{X_0} = a \exp(-kt) + c \quad (16)$$

Modelo de Henderson and Pabis Modificado

$$X^* = \frac{X}{X_0} = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht) \quad (17)$$

Donde:

t = tiempo (s)

k, g y h = constantes cinéticas (s⁻¹)

a, b, c y n = parámetros empíricos adimensionales

Modelo difusional: se estimaron los coeficientes de difusión efectiva del agua a partir de la solución analítica de la segunda ley de Fick para una lámina infinita y utilizando 10 términos de la serie, considerando las siguientes restricciones:

- El flujo es unidireccional y resulta de un gradiente de humedad en la placa de fruta
- La placa de pera se supone homogénea e isotrópica
- La concentración de agua inicial (X_0) es uniforme en todo el volumen de la placa de fruta
- El cambio de volumen de la placa durante el secado es despreciable
- Existe una condición de simetría en el centro de la placa
- Resistencia externa despreciable a la transferencia de masa
- Proceso isotérmico
- Coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}) independiente de la humedad

Con estas suposiciones, la solución analítica de la segunda ley de Fick expresada en términos de series infinitas es:

$$X^* = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2} \right] \quad (18)$$

Donde:

D_{eff} = difusividad efectiva de agua (m²/s)

L = semiespesor de la placa (m)

t = tiempo (s)

n = número de la serie de Fourier

Si bien el modelo surge de un enfoque teórico que considera las propiedades de transporte del alimento y del medio de secado, es sabido que debido a la gran cantidad de componentes y a la estructura compleja de muchos alimentos, en particular las frutas, el transporte de agua durante el secado convectivo no ocurre solamente por difusión molecular (que es lo que propone la ley de Fick). Debido a que se encuentren involucrados otros mecanismos de transporte y a que las soluciones de la Ley de Fick se obtienen con diverso nivel de rigor matemático, los resultados experimentales ajustados al modelo permiten obtener un parámetro cinético (D_{eff}) que depende del método empleado en su determinación.

3.11.2. CINÉTICA DE REHIDRATACIÓN

Para describir matemáticamente el comportamiento del tejido durante la rehidratación en agua se utilizaron dos modelos empíricos: el modelo de Peleg y el modelo Probabilístico de Weibull.

Modelo de Peleg

$$X = X_0 + \frac{t}{(k_1 + k_2 t)} \quad (19)$$

Donde

X = humedad del producto a un tiempo t (kg agua/kg m. s.)

X_0 = humedad inicial del producto (kg agua/kg m. s.)

t = tiempo del proceso (min)

k_1 = constante de velocidad de Peleg (kg m.s./kg agua min)

k_2 = constante de capacidad de Peleg (kg agua/kg m.s.)⁻¹

La constante k_1 es una constante cinética y la constante k_2 es un parámetro adimensional relacionado con el máximo grado de rehidratación.

A $t = 0$ $dX/dt = 1/k_1$

A $t \rightarrow \infty$ $X_e = X_0 + 1/k_2$

Modelo Probabilístico de Weibull

$$X_t = X_e + (X_0 - X_e) \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (20)$$

Donde:

β es un parámetro de velocidad (min^{-1})

α es un parámetro de forma (adimensional)

Análogamente a la constante k_1 del modelo de Peleg, el parámetro β corresponden a la inversa de la constante de velocidad del proceso, es decir cuanto menor es el valor mayor es la velocidad de incorporación de agua al principio del proceso cuando todavía los capilares y las cavidades cercanas a la superficie se llenan muy rápido (García-Pascual y col., 2006; Marques y col., 2009) y α el parámetro de forma estaría relacionado con los diferentes mecanismos de transporte que pueden tener lugar como los difusivos, los convectivos y los mecanismos de relajación de la matriz del tejido (Saguy y col., 2005).

3.11.3. ISOTERMAS DE SORCIÓN

Se han propuesto varios modelos matemáticos para describir las isotermas de sorción. Algunos de ellos fueron desarrollados con una base teórica para describir los mecanismos de adsorción (Rockland y Stewart, 1981; Brunauer y col., 1938) mientras que otros son sólo empíricos o una simplificación de los modelos más elaborados. En algunos rangos de actividad de agua, las isotermas de sorción se pueden aproximar a ecuaciones lineales (Yan y col., 2008). En este trabajo se utilizó el modelo de GAB (Van den Berg, 1985), el modelo de Peleg (Peleg, 1993), el de Halsey (Park y col., 2001) y el de Oswin (Oswin, 1946; Labuza y col., 1972)

Modelo de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB): es un modelo de tres parámetros que ha sido ampliamente utilizado en los últimos años, aunque es aplicable a valores de a_w de hasta aproximadamente 0,9. Por encima de este valor, dicho modelo generalmente predice menor contenido de agua que el medido experimentalmente. Asume sorción homogénea con la formación inicial de una capa monomolecular de agua, mientras que

el agua adicional forma una multicapa. En este modelo, el agua en la multicapa no se encuentra en el mismo estado que en el agua líquida y se supone que es adsorbida con una menor fuerza que en la monocapa. Se representa mediante la siguiente ecuación (Maroulis y col., 1988):

$$X = \frac{X_m (CKa_w)}{((1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w))} \quad (21)$$

Donde:

X= contenido de agua en el equilibrio (kg agua/ kg m.s.)

X_m =contenido de agua límite de hidratación cinética relacionada con la adsorción en la primera capa (kg agua/ kg b.s.)

a_w = actividad de agua

C= constante de Guggenheim, relacionada con el calor de sorción del agua a la primera capa de sitios activos del sólido.

K= factor que corrige las propiedades de las moléculas de agua de la multicapa respecto del agua libre

Modelo de PELEG: es una ecuación puramente empírica sin una base teórica que puede tener la misma o incluso mayor precisión que el modelo de GAB.

$$X = k_1 a_w^{n_1} + k_2 a_w^{n_2} \quad (22)$$

Donde:

X= contenido de agua en el equilibrio (kg agua/kg b.s.)

a_w = actividad de agua

k_1, k_2, n_1 y n_2 son parámetros del modelo siendo $n_1 < 1, n_2 > 1$

Modelo de OSWIN: es un modelo empírico que consiste en un desarrollo en serie de curvas sigmoides y fue desarrollado por Oswin (1946). Se ha utilizado para relacionar el contenido de humedad de productos como leche en polvo sin grasa y té liofilizado hasta una actividad de agua de 0,5 , así como para diversos alimentos entre ellos manzana

fresca y secada, ajo, batata, pulpas de banana y mango, etc. (Andrade y col., 2011). Se describe mediante la siguiente ecuación:

$$X = C_1 \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)^{C_2} \quad (23)$$

Donde:

a_w = actividad de agua

C_1 y C_2 = parámetros del modelo

Modelo de HALSEY: Este modelo proporciona una expresión para la condensación de multicapas a una distancia relativamente grande de la superficie, suponiendo que la energía potencial de una molécula varía como la inversa n-ésima potencia de su distancia desde la superficie. Esta ecuación es una buena representación de los datos de adsorción con respecto a las isotermas tipo I, II o III. (Park y col., 2001)

$$X = \left(\frac{-C}{\ln a_w} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (24)$$

Donde:

a_w = actividad de agua

C y n = parámetros del modelo

3.12. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el software INFOSTAT/L- STATISTICAL SOFTWARE versión 2016 y el Statgraphics Plus 5.1.

El diseño experimental fue un diseño completamente al azar. Los resultados se expresaron mediante la media y el desvío estándar asociado a la media (DE). El análisis de la varianza (ANOVA) se llevó a cabo para establecer la presencia o ausencia de

diferencias significativas entre los tratamientos de acuerdo con los factores estudiados. Para los estudios de rehidratación se consideraron los factores "tipo de soluto", "escaldado" y "tiempo" y para el resto de los análisis estadísticos se consideraron los factores "tipo de soluto" y "escaldado". Se utilizó un test de comparaciones múltiples (test de Tukey) con un nivel de significación de $p < 0,05$. Al aplicar este modelo con estructura cruzada de los factores (ANOVA factorial), la atención se fijó en dos aspectos: (1) la interacción (el comportamiento de la variable en estudio según varían los niveles de un factor a través de los niveles del otro u otros), y (2) los efectos principales (el comportamiento de dicha variable producido por cada uno de los factores en forma independiente). Es decir, los ensayos factoriales permitieron extraer información sobre la independencia o dependencia de los factores utilizados en las distintas situaciones (Underwood, 1997). En caso de detectar interacciones significativas entre los factores, la prueba de Tukey se realizó sólo para la interacción, evaluando el efecto de todos contra todos. En caso contrario, se realizó la prueba de Tukey para los efectos principales de cada factor.

El ajuste de los modelos matemáticos a los datos de los distintos estudios se realizó mediante regresión no lineal utilizando el software estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1. Las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los parámetros de los distintos modelos fueron también analizadas mediante un ANOVA y el test de Tukey.

CAPÍTULO I

Secado convectivo de peras: Influencia de los pretratamientos de ósmosis y de escaldado



I.1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante del estudio del secado de alimentos es el modelado matemático del proceso y la selección de equipos de secado adecuados. El propósito es elegir las condiciones operativas más adecuadas, estimar el tiempo de proceso y así definir las dimensiones del equipo de secado para cumplir con las condiciones de funcionamiento deseadas. El modelado se basa en obtener un conjunto de ecuaciones matemáticas que permitan describir adecuadamente el sistema. La solución de estas ecuaciones posibilita la predicción de los parámetros del proceso como una función del tiempo en cualquier punto dentro del secadero, partiendo de las condiciones iniciales (Gunhan y col., 2005; Hawlander y col., 1997). Por lo tanto el uso de un modelo adecuado de simulación constituye una herramienta valiosa para la predicción de las variables relevantes de los sistemas de secado. (Bennamoun y Belhamri, 2008)

La cinética de secado de los materiales en general puede ser descrita considerando las propiedades de transporte del medio de secado y del producto en sí, tales como conductividad y difusividad térmica, los coeficientes convectivos de transferencia de calor y de materia y la difusividad del agua o constante cinética equivalente (Sokhansanj y col., 1984; Vagenas y Karathanos, 1993; Karathanos y Belessiotis, 1999). Sin embargo en ocasiones, las ecuaciones diferenciales que representan los fenómenos de transporte de materia y de calor involucrados en un proceso de secado resultan ser matemáticamente complejas de resolver, por lo que tecnológicamente suelen buscarse simplificaciones razonables que reduzcan el número de incógnitas en el sistema. El modelado matemático de los procesos de secado en alimentos, es particularmente complejo en frutas y vegetales debido no sólo a la elevada humedad de estas materias primas, sino también al encogimiento que los tejidos experimentan durante el secado (Kaleta y Górnicki, 2010). Los modelos matemáticos más aplicados en deshidratación de alimentos según la literatura han sido en general ecuaciones de tipo exponencial con pocos parámetros (Wang y col., 2007; Sander y col., 2010).

En general, los modelos pueden clasificarse como teóricos o empíricos. Los modelos teóricos usan ecuaciones de transferencia simultánea de calor y de materia, considerando propiedades físicas tales como la geometría de las partículas y el coeficiente de difusión del agua en el alimento. Estos modelos, que explican los cambios físicos producidos durante el proceso cuantificando las resistencias externas e internas,

suelen ser expresados por ecuaciones diferenciales parciales no estacionarias y acopladas cuya solución analítica suele no ser posible por lo que deben resolverse de manera numérica. En cambio los modelos empíricos son ecuaciones integrales cuyos coeficientes se determinan mediante ajustes estadísticos a los datos y pueden proporcionar una representación adecuada de los resultados experimentales como la humedad y el tiempo del proceso. No obstante, si bien los modelos empíricos, por su condición de tales, no explican los cambios físicos originados por los fenómenos de transporte que ocurren durante el secado, suelen resultar prácticos debido a su sencillez matemática y a que pueden ajustarse a datos de cualquier tipo de geometría y condiciones de proceso. Sin embargo debe tenerse en cuenta que con frecuencia no permiten la simulación de experimentos llevados a cabo bajo condiciones diferentes a las utilizadas para determinar los coeficientes del modelo (Menges y Ertekin, 2006; Akbulut y Durmus, 2009; Kaleta y Górnicki, 2010; Togrul, 2010).

La segunda ley de Fick ha sido muy utilizada para describir los mecanismos de transferencia de masa asumiendo que ésta es controlada por fenómenos difusionales (Crank, 1975). El modelo difusional o modelo teórico que surge de la integración de la ecuación diferencial de Fick, asume determinadas hipótesis de partida; en concreto que la humedad inicial del producto es homogénea y constante a lo largo de todo su volumen, que el alimento es isotrópico, que la difusividad es constante a lo largo del proceso y que éste es isotérmico. Cada simplificación supone una modificación de la realidad en lo que se refiere a los fenómenos que tienen lugar durante el secado de alimentos; no se tienen en cuenta por ejemplo los cambios en la estructura celular y en el volumen (encogimiento) que sufre el producto a medida que se deshidrata. Aún así, la complejidad del uso de las ecuaciones diferenciales obtenidas que consideran, como ya se ha comentado, las propiedades de transporte del alimento y del medio de secado hace que diversos autores hayan preferido emplear los modelos empíricos o semi-empíricos. Las ecuaciones correspondientes a estos modelos, si bien suelen incluir parámetros sin significado físico, pueden igualmente describir con fidelidad las curvas de secado obtenidas bajo determinadas condiciones operativas (Doymaz y Pala, 2003; Simal y col., 2005). Entre los modelos empíricos de secado en monocapa se encuentran el modelo de Page, el Logarítmico y el de Henderson y Pabis, entre otros. Estos modelos, que fueron los utilizados en este trabajo, fueron descritos en la sección 3.11 de Materiales y Métodos. El modelo de Page es un modelo exponencial simple que incluye un parámetro

cinético k (constante de velocidad) e introduce un segundo parámetro de secado (n) que supone una modificación empírica en el término del tiempo (Morey y Li, 1984; Karathanos y Belessiotis, 1999; Simal y col., 2005; Azzouz y col., 2002). El modelo logarítmico y el de Henderson-Pabis modificado incluyen un mayor número de parámetros. Estos modelos empíricos, que simplifican y modifican la solución analítica de la segunda ley de Fick, constituyen relaciones entre el contenido de humedad promedio del producto y el tiempo instantáneo durante el secado y han sido ampliamente utilizados para caracterizar la cinética de secado de una gran variedad de productos como papa (Akpinar y col., 2003), arroz (Iguaz y col., 2003), alubias verdes y arvejas (Senadeera y col., 2003), zanahorias (Doymaz, 2004), kiwis (Simal y col., 2005), tomates cherry (Azoubel y Murr, 2004), pasas de corinto, higos y ciruelas (Karathanos y Belesiotis, 1999; Jazini y Hatamipour col., 2010), zarzamoras (Adabi y col., 2013), uvas (Adiletta y col., 2016), guinda (Doymaz, 2007), frutilla (Doymaz, 2008), cerezas (Doymaz e Ismail, 2011; Mabellini y col., 2010; Pirone y col., 2014) y manzana (Mandala y col., 2005), etc.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que cualquier pretratamiento realizado podría causar cambios en las cinéticas de transferencia de materia y en algunas propiedades fisicoquímicas del producto tratado, principalmente asociado a los cambios en la estructura del producto y a las variaciones en su composición, afectando la cinética de secado de los materiales. Por lo tanto para la optimización del proceso de secado en términos de calidad del producto se hace necesaria la predicción de la velocidad de secado con la ayuda de modelos adecuados.

De acuerdo a lo expuesto el objetivo de este capítulo fue evaluar: 1) el efecto de pretratamientos de escaldado e infusión seca con diferentes azúcares (sacarosa y glucosa), sobre la velocidad de secado con aire de discos de pera, 2) simular mediante ecuaciones empíricas la cinética de secado por aire caliente de las frutas con y sin pretratamiento, además de obtener el coeficiente de difusión efectivo de agua, con el fin de poder estimar el tiempo mínimo de secado para obtener productos deshidratados de calidad comercial y 3) evaluar la posible implementación de una tecnología combinada de procesamiento mínimo de acuerdo a las composiciones de los distintos productos obtenidos.

I.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las rodajas de pera sometidas a procesos de infusión con azúcares y posteriormente deshidratadas por secado se pueden apreciar en la **Figura I.1**. La **Tabla I.1** muestra la caracterización de estas frutas en términos de los cambios experimentados en humedad y contenido de sólidos solubles (expresados en base húmeda) y en el encogimiento sufrido luego de cada etapa de procesamiento, es decir luego de la etapa de infusión y luego de la etapa de secado convectivo.

Durante la etapa de infusión tiene lugar no sólo una reducción de la actividad de agua, sino también cambios importantes tanto en la composición final como en las características estructurales de la fruta. Cuando el tejido celular se sumerge en una solución hipertónica queda expuesto a gradientes de potencial químico que provoca un flujo de salida de agua de las células hacia la solución circundante y, en menor medida, ocurre la transferencia de solutos hacia el interior del tejido celular de manera que las células comienzan a contraerse. La estructura abierta del tejido de las frutas y la semipermeabilidad de las membranas celulares permiten la difusión de los solutos desde la solución osmótica hacia la fase del líquido extracelular y el flujo de entrada de solución osmótica por fuerzas capilares (Chiralt y Talens, 2005). Mientras transcurre la deshidratación osmótica, las capas de células ubicadas en distintas posiciones experimentan distintas condiciones de pérdida de agua, ganancia de sólidos, y de contracción del tejido (Salvatori y col., 1998). Además la intensidad de estos fenómenos depende de las fuerzas impulsoras que establecen las condiciones del proceso.

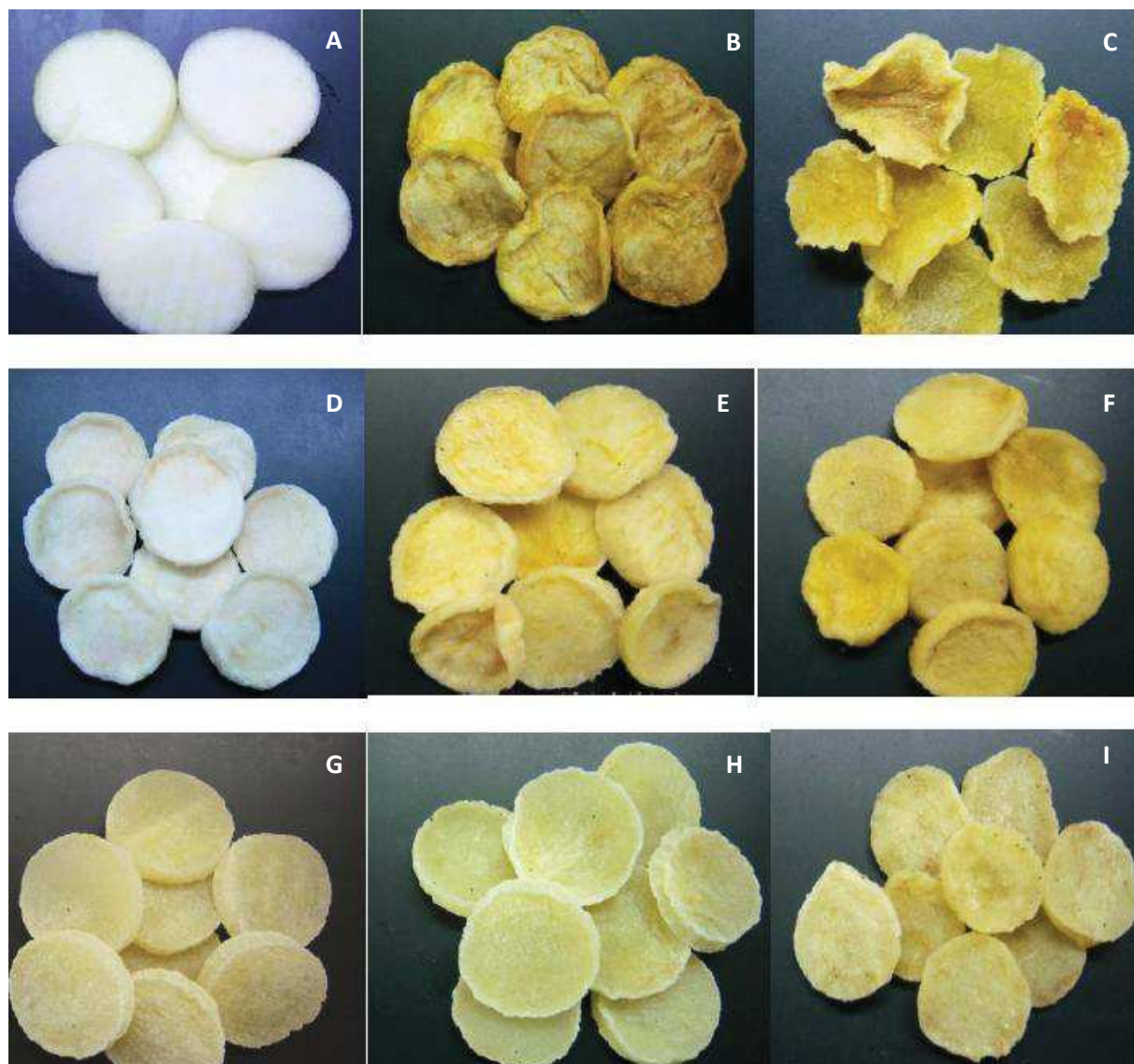


FIGURA I.1. Fotografías de fruta fresca y deshidratada con y sin pretratamientos. A: Fresca; B-I: deshidratadas. B: control (sin pretratamiento), C: sólo escaldada, D: ISs1 (infusión con sacarosa $a_w = 0,83$), E: ISs2 (infusión con sacarosa $a_w = 0,94$), F: ISg2 (infusión con glucosa $a_w = 0,94$), G: E+ISs1 (escaldado y posterior infusión ISs1), H: E+ISs2 (escaldado y posterior infusión ISs2), I: E+ISg2 (escaldado y posterior infusión ISg2).

La **Tabla I.1** muestra que el pretratamiento de infusión ($a_w = 0,83$) provocó una significativa deshidratación por ósmosis de las frutas, lo que implicó una variación de humedad $\approx 90\%$ (base seca) en peras con sacarosa incorporada (ISs1), mientras que con infusiones de $a_w = 0,94$ (ISs2) se logró una reducción del $\approx 70\%$ (base seca). Por otro lado el tipo y concentración de humectante también afectó la composición final de las muestras debido a un comportamiento diferente de los solutos utilizados en términos de

intercambio de agua y sólidos durante la ósmosis. La utilización de glucosa (de menor peso molecular que la sacarosa) condujo finalmente a una mayor humedad luego de la infusión y a un menor contenido de sólidos, lo que puede constatarse en la **Tabla I.1** en muestras ISg2 en comparación con las ISs2. Mandala y col. (2005) en sus estudios de secado de manzana con pretratamientos de deshidratación osmótica utilizando soluciones al 30 y 40 %, observaron una mayor ganancia de azúcares luego de la ósmosis utilizando glucosa como humectante en comparación con sacarosa.

TABLA I.1. Contenido de agua (X_w), contenido de sólidos solubles (X_s), actividad acuosa (a_w) y encogimiento volumétrico (%Enc) de las rodajas de pera luego de cada etapa de procesamiento.

PRETRAT	ETAPA INFUSIÓN				ETAPA SECADO			
	X_w (%bh)	X_s (%bh)	a_w	Enc (%)	X_w (%bh)	X_s (%bh)	a_w	Enc (%)
C	85,1 ^f ±0,6	12,1±0,7	0,97±0,01	-----	13,8±0,05	43,7±0,6	0,16±0,01	84,3 ^{d,e} ±0,009
E	88,1 ^g ±0,2	10,4±0,6	0,98±0,01	-3,9 ^a ±1,2	8,3±0,05	36,03±2,2	0,33±0,01	90,1 ^f ±0,010
ISs1	32,5 ^a ±0,3	67,5±1,2	0,83±0,01	62,4 ^f ±0,7	21,9±0,01	90,05±0,9	0,43±0,01	87,2 ^{e,f} ±0,015
E+ISs1	33,2 ^a ±0,2	67,3±1,1	0,83±0,01	55,1 ^e ±0,9	27,01±0,02	86,4±2	0,36±0,01	67,5 ^a ±0,02
ISs2	60,98 ^c ±0,17	29,5±0,2	0,94±0,01	21,4 ^c ±2	25,4±0,02	75,6±2	0,52±0,01	88,7 ^f ±0,017
E+ISs2	57,67 ^b ±0,13	30,0±0,3	0,94±0,01	13,7 ^b ±1,9	28,1±0,02	81,8±1,6	0,33±0,01	83,4 ^d ±0,007
ISg2	74,5 ^e ±0,3	21,5±0,6	0,94±0,01	33,4 ^d ±0,3	21,9±0,02	73,4±0,4	0,42±0,01	79,6 ^c ±0,007
E+ISg2	72,3 ^d ±0,3	22,8±0,3	0,94±0,01	22,6 ^c ±2	23,7±0,04	77,8±2	0,28±0,01	75,1 ^b ±0,03

La deformación sufrida por las rodajas durante la etapa de infusión resultó también muy dependiente del tipo de soluto y del pretratamiento realizado. Las peras osmotizadas ISs1 presentaron un encogimiento importante debido a la mayor pérdida de agua. Las de mayor a_w (ISs2 e ISg2) sufrieron un menor cambio de volumen, independientemente del humectante utilizado, con una incorporación de solutos igualmente considerable. Las muestras sometidas a infusión con glucosa (ISg2) presentaron un encogimiento mayor que las ISs2 a pesar de la mayor retención de agua. Un escaldado previo condujo a una mejor preservación del volumen durante la ósmosis, sin cambios considerables en el contenido de agua. Nieto y col. (1998) observaron en placas de manzana osmotizadas un menor encogimiento en aquellas muestras que

habían sido también escaldadas ($\approx 35\%$ vs 44%), comportamiento también reportado por Marcotte y Le Maguer (1991) en tejido de papa equilibrado en medios osmóticos de sacarosa al 10-40% (p/p). Estos autores atribuyeron este comportamiento a un aumento del volumen extracelular (paredes celulares y espacios intercelulares) simultáneamente con una disminución del volumen celular.

Transcurrido el secado posterior de los discos, se pudo observar que las muestras sólo escaldadas (E) experimentaron una mayor contracción del volumen en comparación con las muestras control y que entre las muestras osmotizadas el encogimiento fue importante en la mayoría de los casos (entre 67-80%) siendo las muestras E+ISs1 las que menos se encogieron (**Tabla I.1**). No resulta llamativo que en muestras sometidas a pretratamientos combinados de escaldado y ósmosis, se observe nuevamente una mayor preservación del volumen luego del secado final en comparación con las muestras sin escaldado previo, fundamentalmente en las E+ISs1, que sólo sufren un encogimiento del 67 % con respecto a la fruta fresca. Comparando el efecto de ambos solutos (ISs2 e ISg2) se observó un encogimiento levemente menor luego del secado en muestras con glucosa incorporada.

Las curvas de secado con aire se construyeron a partir del contenido inicial de agua de las muestras (X_0) luego de los pretratamientos y de las pérdidas de peso experimentadas por las mismas durante 4 h de secado. El valor X_0 se corresponde con el valor de humedad de la pera fresca en el caso de las muestras control y con la humedad final alcanzada luego de la infusión en el caso de muestras pretratadas. Asumiendo que la disminución de peso era debida únicamente a la pérdida de agua, se pudo calcular la humedad de las mismas en cada instante del proceso (X). Este valor de humedad, expresado en base seca (kg agua/kg materia seca), representado frente al tiempo de proceso dio lugar a las curvas de secado correspondientes a cada una de las condiciones de proceso estudiadas (**Figura I.2**). En la **Figura I.2A** se observa que el comportamiento durante el secado fue marcadamente diferente en las muestras pretratadas en comparación con las muestras control y solo escaldadas, que presentaron una disminución muy marcada en la humedad (hasta $\approx 60-70$ min), seguido de una etapa más lenta, para llegar finalmente a una etapa donde las variaciones de X fueron muy escasas. Las placas sometidas a los pretratamientos mostraron un contenido de humedad menor antes del secado (**Tabla I.1**) y una velocidad de secado mucho más baja que las muestras control debido a la deshidratación parcial que sufrieron las muestras

luego de la infusión (**Figura 1.2B**). Si bien los procesos de infusión dieron lugar a una deshidratación parcial de las frutas, los tiempos de secado necesarios para alcanzar por ejemplo, una humedad de $X = 0,3$ (kg agua/kg ms) fueron significativamente más largos que en la muestra control (**Tabla I.2**).

TABLA I.2. Humedad inicial y luego del proceso de infusión (X_0 , kg agua/kg ms) y tiempo de secado necesario para alcanzar en el producto deshidratado una humedad residual en base seca de $X=0,3$ kg agua/kg ms.

Pretrat.	X_0	X	t (min)
C	5,74	0,3	114
E	7,43	0,3	85,6
ISs1	0,60	0,3	120
E+ISs1	0,54	0,37	240
ISs2	1,72	0,34	240
E+ISs2	1,52	0,4	240
ISg2	2,58	0,3	210
E+ISg2	2,52	0,3	240

Para una mejor visualización del comportamiento del secado, las velocidades de secado se calcularon como una función de la humedad (X) tal como se muestra en la **Figura I.3**. Las curvas presentan una forma sigmoidea y el secado tuvo lugar en dos períodos de velocidad de secado decreciente, comportamiento también observado en pera Blanquilla (*Pyrus communis* L.) (González-Martínez y col., 2006) y en otras frutas (Lenart y Lewicki, 1998; Simal y col., 1997; Puente-Díaz y col., 2013).

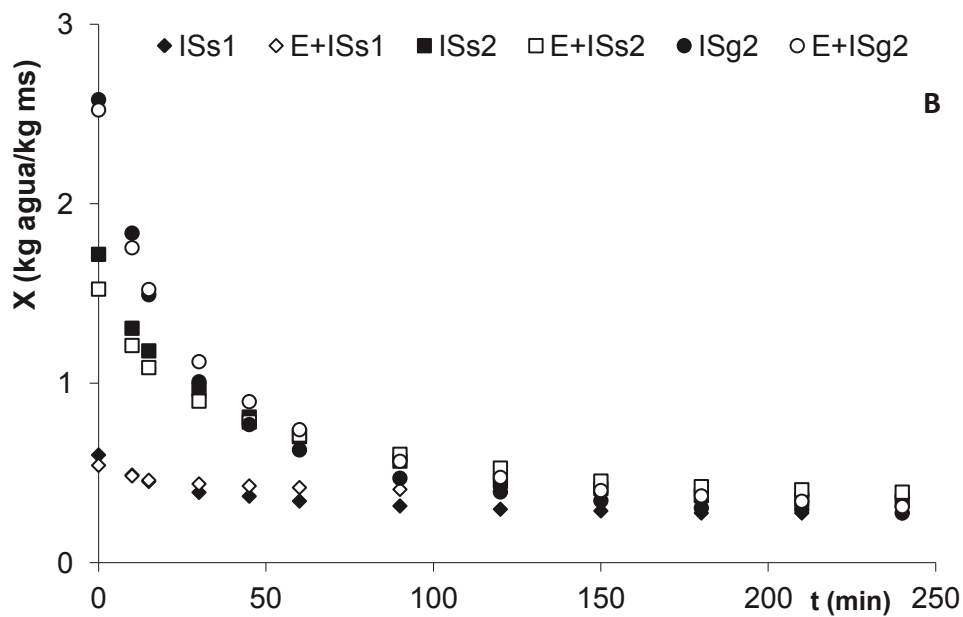
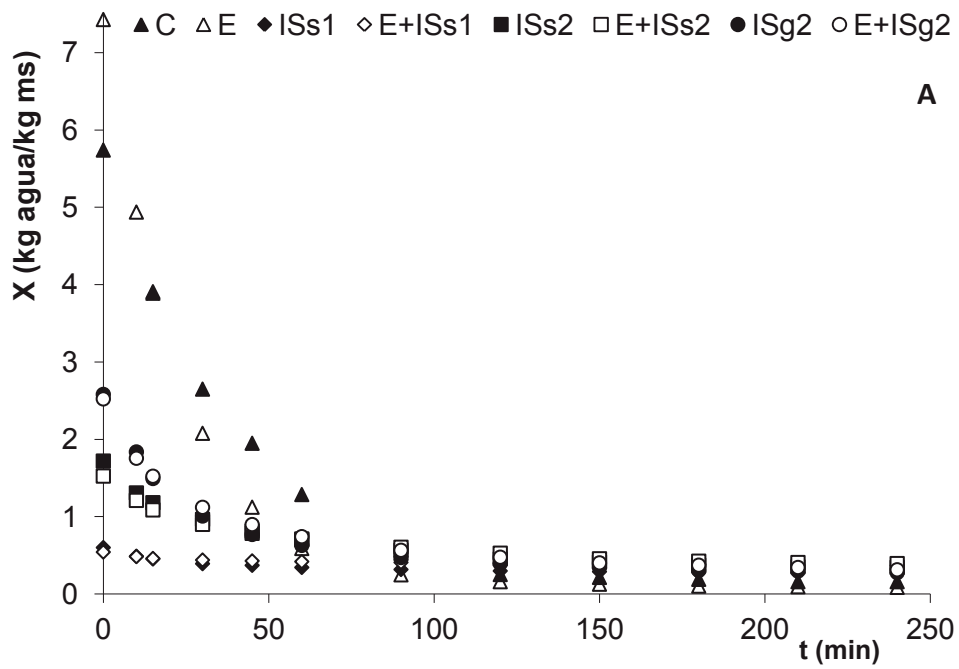


FIGURA I.2. Curvas de secado experimental obtidas de discos de pera submetidos a diferentes pré-tratamentos. A: amostras controle e pré-tratadas e B: somente pré-tratadas. ms: massa seca. Pré-tratamentos: C: sem pré-tratamento, E: escaldado, ISs1: infusão com sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusão com sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusão com glicose ($a_w = 0,94$), E + ISs1: escaldado e posterior infusão com sacarosa ($a_w = 0,83$), E + ISs2: escaldado e posterior infusão com sacarosa ($a_w = 0,94$), E + ISg2: escaldado e posterior infusão com glicose ($a_w = 0,94$).

En las peras de este trabajo no se detectó un período de velocidad de secado constante lo que indica que la transferencia de materia está gobernada por las características intrínsecas del producto y la resistencia que éste ofrece a la difusión interna de agua hacia la superficie de la muestra en contacto con la corriente de aire donde es finalmente evaporada. Como era de esperar, el escaldado (**Figura I.3A**) afectó significativamente la velocidad de secado, llegando más rápidamente que la muestra control a una humedad de $X = 0,3$ (kg agua /kg ms) (**Tabla I.2**), mientras que el efecto combinado E+IS no resultó eficiente. Puede observarse que las peras tratadas osmóticamente, en las que el rango de variación de humedad durante el secado es menor, mostraron una velocidad de secado notablemente reducida en comparación con las peras control y las sólo escaldadas, sobre todo las pretratadas a menor a_w (muestras ISs1 y E-ISs1) (**Figura I.3B**). En las muestras osmotizadas hasta una a_w de 0,94 (**Figura I.3C**) los dos períodos de la curva no fueron tan marcados. Luego de 4 h de secado se alcanzó en general una humedad final en base seca de $X = 0,16$ kg agua/kg ms para la fresca, de 0,09 kg agua/kg ms para la escaldada y de $\approx 0,3$ kg agua/kg ms para las muestras con IS. En muestras con pretratamiento combinado de infusión y escaldado se alcanzó una humedad final mayor ($X \approx 0,4$ kg agua/kg ms) con una a_w final entre 0,35 y 0,38 en comparación con las muestras con IS sin escaldado (a_w entre 0,2 y 0,3) (**Figura I.2B** y **Tabla I.1**).

La disminución de la velocidad de secado al aplicar pretratamientos de deshidratación osmótica ha sido observada por otros autores en papaya (El Aouar y col., 2003), en pera var. Blanquilla (González-Martínez y col., 2006) y en manzana (Simal y col, 1997). Por un lado tuvo lugar una reducción de la fuerza impulsora inicial contribuyendo a la disminución de la velocidad de transporte de agua. Por otro lado la presencia de una capa superficial de células colapsadas en la fruta por efecto del tratamiento osmótico produce normalmente un aumento de la resistencia al transporte de masa cerca de la interfase durante el secado posterior. Esta resistencia también puede verse afectada por la entrada de solutos durante las ósmosis principalmente en los espacios intercelulares del tejido donde tienen lugar en mayor grado los mecanismos difusivos (Lenart y Cerkowniak, 1996; Nieto y col., 1998; Lazarides y col., 1999), dando lugar al desarrollo de una capa superficial concentrada en sólidos (costra) a lo largo del secado. Todos estos efectos fueron más notables en muestras ISs1, caso en el que se obtuvieron los niveles de mayor deshidratación y de ganancia de solutos y de encogimiento de las muestras

luego de la ósmosis (**Tabla I.1**). Resulta evidente que en estas condiciones ha tenido lugar un significativo cambio estructural como consecuencia de los efectos mencionados, dando lugar a una velocidad de secado por debajo de 0,012 kg agua/kg masa seca min, mucho más baja que el resto de los tratamientos.

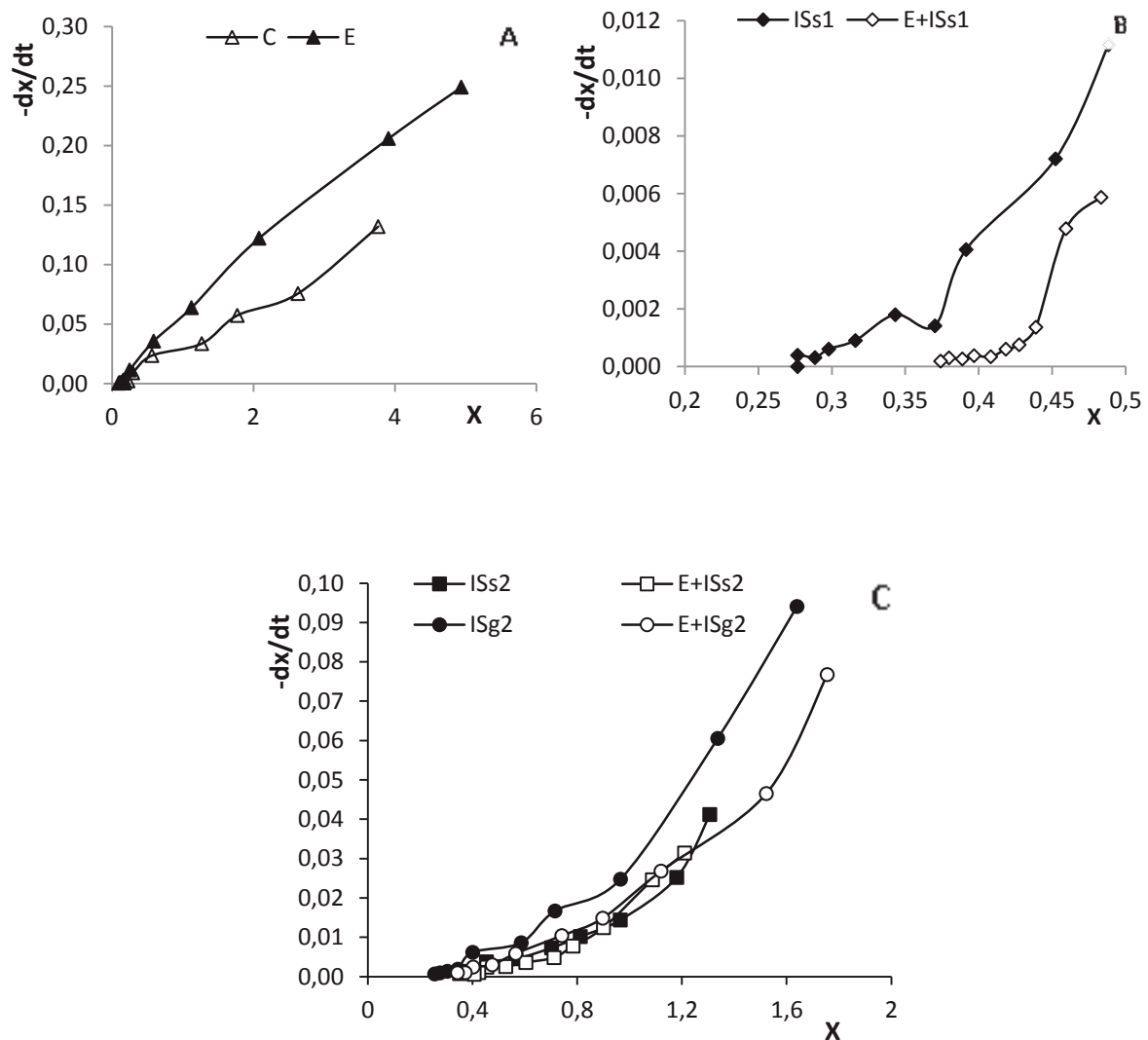


Figura I.3. Curvas de velocidad de secado en función del contenido de humedad reducida. **A:** muestras control y escaldadas; **B-C:** muestras pretratadas osmóticamente con y sin escaldado. **C:** sin pretratamiento, **E:** escaldado, **ISs1:** infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), **ISs2:** infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), **ISg2:** infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), **E + ISs1:** escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), **E + ISs2:** escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), **E + ISg2:** escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

Se destaca que en peras osmotizadas hasta una a_w de 0,83 (ISs1) un escaldado previo (E+ISs1) provocó una disminución en la velocidad de secado y la humedad final alcanzada fue significativamente mayor que en las muestras control o sólo escaldadas, probablemente debido a la combinación de dos efectos opuestos (**Figura I.3B**). Por un lado la alteración de algún componente del tejido a nivel de la microestructura como membranas o paredes celulares por efecto térmico, así como la posible pérdida de material soluble durante la etapa de infusión, podrían ser responsables del aumento observado en la velocidad de secado. Por otro lado, la disminución en la porosidad del tejido debido a la incorporación de solutos y/o la formación de una capa superficial de azúcares, incrementaría en gran medida la resistencia al transporte de agua (Karathanos y col., 1995; Colligan y col., 1992). En estas muestras es posible que la gran concentración de azúcares en la matriz, que pueden haberse cristalizado en algunas zonas externas de la fruta, y el encogimiento producido, estén enmascarando el efecto del calor, provocando entonces una disminución en la velocidad de secado. Las osmotizadas utilizando glucosa como humectante (ISg2) partieron de una humedad mayor antes del secado y se deshidrataron más rápidamente que las tratadas con sacarosa, llegando al final del secado a una humedad similar. Probablemente la mayor penetración de este soluto en el tejido durante el pretratamiento contribuiría durante el secado posterior a la formación de una capa superficial de menor concentración con menor probabilidad de cristalización, disminuyendo la resistencia al transporte de agua (Riva y col., 2005).

En las **Figuras I.4, I.5 y I.6** se representan los valores experimentales de las curvas de secado conjuntamente con los valores predichos por los distintos modelos empíricos utilizados. En la Tabla I.3, puede observarse que los modelos resultaron en general apropiados ($R^2 > 0,99$) para predecir el comportamiento de las peras a lo largo de todo el proceso de secado en la mayoría de las condiciones experimentales utilizadas. Los modelos de Page y Logarítmico resultaron menos adecuados para describir las cinéticas de secado de las muestras pretratadas con infusión con azúcares. Se observa que el modelo de Page predice valores más altos en los primeros períodos de secado y valores más bajos en los estadios finales. Por el contrario, el modelo Logarítmico predice valores más bajos tanto al comienzo del secado como al final. Sin embargo con el modelo de Henderson and Pabis modificado se obtuvieron los mejores valores de R^2 y los valores más bajos de RMSE y χ^2 , tanto en las muestras pretratadas como en las muestras control,

por lo que este modelo podría seleccionarse para representar las características de secado de placas de pera con y sin pretratamiento. Resultados similares fueron observados por otros autores durante el secado en aire caliente de duraznos (Doymaz, 2004a; Togrul y Pehlivan, 2002) y de rosa mosqueta (Erenturk y col., 2004).

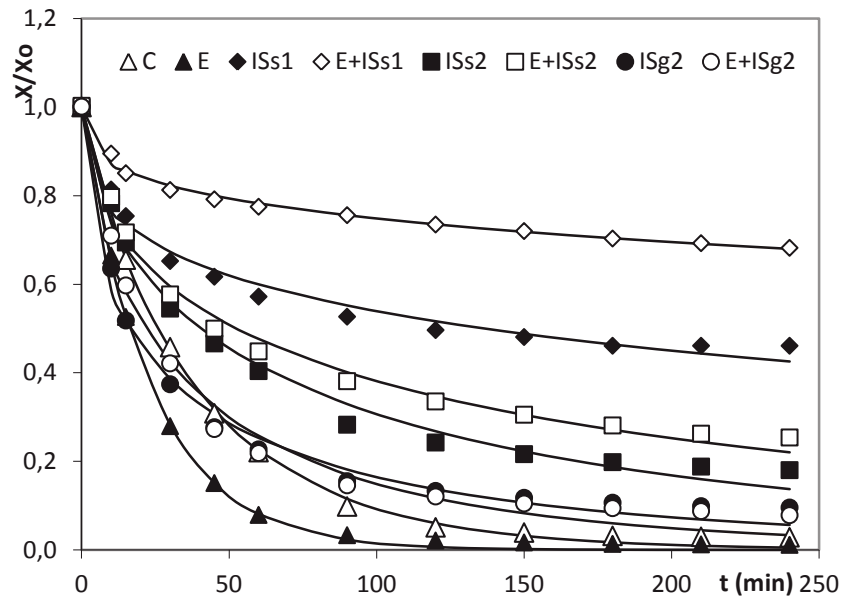


Figura I.4. Curvas de secado experimental y predichas mediante el modelo de Page.

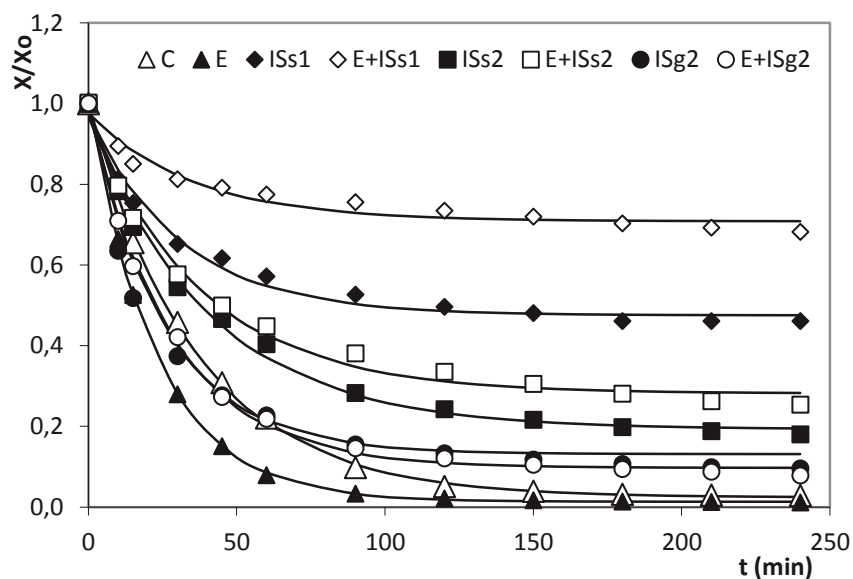


Figura I.5. Curvas de secado experimental y predichas mediante el modelo Logarítmico.

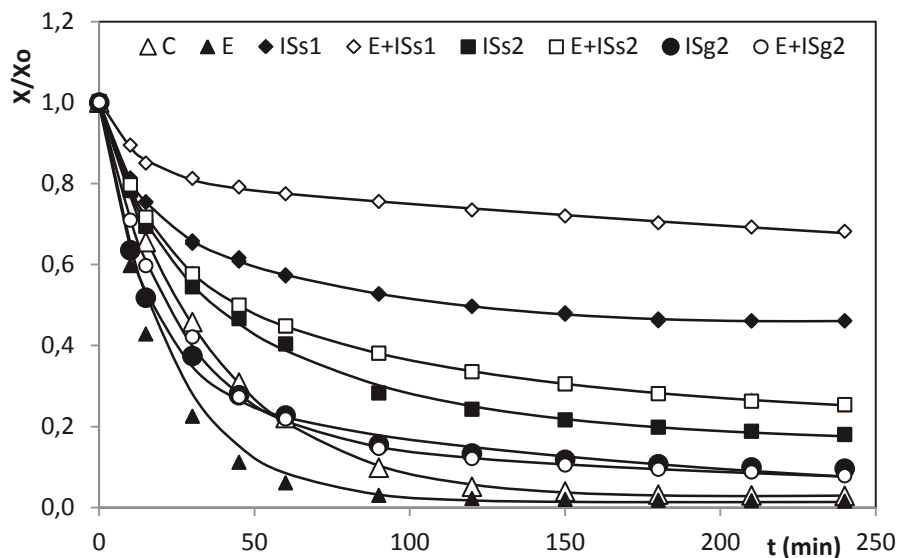


Figura I.6. Curvas de secado experimentales y predichas mediante el modelo de Henderson y Pabis modificado.

Algunos autores, al utilizar el modelo de Page en curvas de secado de kiwi (Simal y col., 2005), papa y arvejas (Senadeera y col., 2003), y uvas (Azzouz y col., 2002) a distintas temperaturas observaron que el valor de n se mantenía constante pero k (relacionado con la velocidad de difusión de agua) aumentaba al elevarse la temperatura. Como puede observarse en la **Tabla I.3**, en las peras estudiadas en este trabajo, el parámetro n resultó mayor en las muestras control y en las sólo escaldadas que en las tratadas con infusión seca previo al secado a 65 °C. Karathanos y Belessiotis (1999) obtuvieron valores más elevados de este parámetro en distintas frutas deshidratadas (entre 1,02 y 1,79 dependiendo del tipo de producto). De acuerdo a estos autores, los valores de n aumentan en presencia de una corteza o piel en el producto seco, siendo n mayor con el aumento del espesor de esta corteza. En este trabajo las peras no presentaban piel observándose que el valor de n disminuyó considerablemente en muestras ISs1 y E+ISs1, por lo que este valor sería función del contenido de humedad inicial de las muestras y podría estar relacionado con el desarrollo de una capa externa de mayor o menor dureza durante el secado. El valor de k , en cambio, no parece seguir un comportamiento relacionado con la variación en el tiempo de la humedad reducida.

Tabla I.3. *Parámetros y estadísticos utilizados para evaluar la bondad del ajuste con los distintos modelos semiempíricos*

	C	E	ISs1	E+ISs1	ISs2	E+ISs2	ISg2	E+ISg2
Modelo de Page								
K(s ⁻ⁿ)	0,0006 (9,8E-06)	0,0007 (1,2E-05)	0,0019 (3,1E-05)	0,0011 (1,8E-05)	0,0015 (2,5E-05)	0,0014 (2,4E-05)	0,0026 (4,3E-05)	0,0020 (3,4E-05)
n	0,92 (0,03)	0,99 (0,03)	0,37 (0,03)	0,33 (0,015)	0,55 (0,02)	0,52 (0,02)	0,53 (0,03)	0,55 (0,03)
R ²	0,998	0,999	0,989	0,992	0,994	0,993	0,991	0,992
RMSE	0,014	0,011	0,025	0,009	0,021	0,022	0,028	0,026
χ ²	0,0002	0,0002	0,0006	0,00011	0,0006	0,0006	0,0012	0,0010
Modelo Logarítmico								
a	0,972 (8,00E-03)	0,991 (5,00E-03)	0,500 (2,00E-02)	0,287 (1,60E-02)	0,775 (2,00E-02)	0,681 (1,60E-02)	0,854 (2,00E-02)	0,889 (1,40E-02)
K(s ⁻¹)	0,027 (7,60E-06)	0,044 (1,20E-05)	0,032 (8,90E-06)	0,024 (6,70E-06)	0,025 (6,80E-06)	0,024 (7,20E-06)	0,039 (1,10E-05)	0,035 (9,80E-06)
c	0,024 (4,00E-03)	0,013 (2,00E-03)	0,480 (1,10E-02)	0,700 (1,00E-02)	0,193 (1,20E-02)	0,280 (1,00E-02)	0,131 (9,00E-03)	0,097 (7,00E-03)
R ²	0,999	0,999	0,985	0,974	0,994	0,990	0,995	0,998
RMSE	0,008	0,005	0,023	0,018	0,023	0,026	0,021	0,015
χ ²	0,00012	0,00006	0,0012	0,0004	0,0006	0,0007	0,0007	0,0005
Modelo de Henderson y Pabis modificado								
a	0,995 (1,46E-02)	0,993 (8,35E-03)	0,276 (4,38E-02)	0,192 (3,04E-02)	0,22 (3,4E-02)	0,371 (5,9E-02)	0,638 (3,04E-01)	0,818 (3,11E-02)
K	0,027 (1,0E-04)	0,043 (8,10E-04)	0,084 (1,28E-02)	0,082 (1,43E-02)	0,12 (1,97E-02)	0,061 (6,3E-03)	0,056 (1,42E-02)	0,041 (2,53E-03)
b	0,0020 (1,06E-02)	0,0054 (7,64E-03)	0,413 (1,64E-01)	0,404 (1,21E-01)	0,61 (3,3E-02)	0,382 (1,02E-01)	0,245 (1,34E-01)	0,089 (3,20E-02)
g	-0,0078 (2,42E-02)	-0,001 (8,69E-03)	0,009 (5,87E-03)	1,63E-03 (7,17E-02)	1,6E-02 (2,5E-03)	1,14E-02 (6,17E-03)	0,014 (3,55E-02)	3,50E-03 (2,43E-03)
c	0,0020 (1,63E-09)	0,0054 (9,00E-10)	0,311 (2,02E-01)	0,408 (1,21E-01)	0,17 (5,6E-02)	0,251 (1,55E-01)	0,120 (3,61E-01)	0,089 (3,96E-10)
h	-0,0078 (4,14E-09)	-0,001 (9,90E-09)	-0,001 (2,22E-03)	4,03E-05 (3,47E-05)	-4,0E-04 (1,4E-04)	4,04E-04 (2,11E-04)	8,2E-04 (1,14E-05)	3,50E-03 (2,84E-09)
R ²	0,999	0,999	0,999	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999
RMSE	0,014	0,006	0,005	0,005	0,013	0,003	0,009	0,012
χ ²	0,00014	0,000098	0,0003	0,00006	0,000112	0,00003	0,0003	0,0002

Los valores que están entre paréntesis corresponden a los errores estándar de la media.

La **Figura I.7** muestra el ajuste con el modelo de Fick evaluado en el primer período de velocidad de secado decreciente (hasta 1 h de proceso). Se observa un aumento del coeficiente de difusión efectiva (D_{eff}) con respecto al control en muestras sólo escaldadas, debido a la disrupción general del tejido por efecto térmico (**Tabla I.4**). Este comportamiento fue también observado por Gonzalez-Fesler y col. (2008) durante el secado de cilindros de manzana y por Alvarez y col. (1995) en frutillas escaldadas. En peras previamente osmotizadas, con o sin escaldado previo, los valores disminuyeron

debido al aumento de la resistencia interna al transporte de agua por incorporación de solutos durante la infusión. La disminución en la porosidad del tejido debido a la incorporación de solutos y/o a la formación de una capa superficial de azúcares (costra), incrementaría en gran medida, la resistencia al transporte de agua (Karathanos y col., 1995; Colligan y col., 1992; Nieto y col., 1998; Falade y col., 2014), según se observa en la menor velocidad de secado ya registrada (**Figura I.3**).

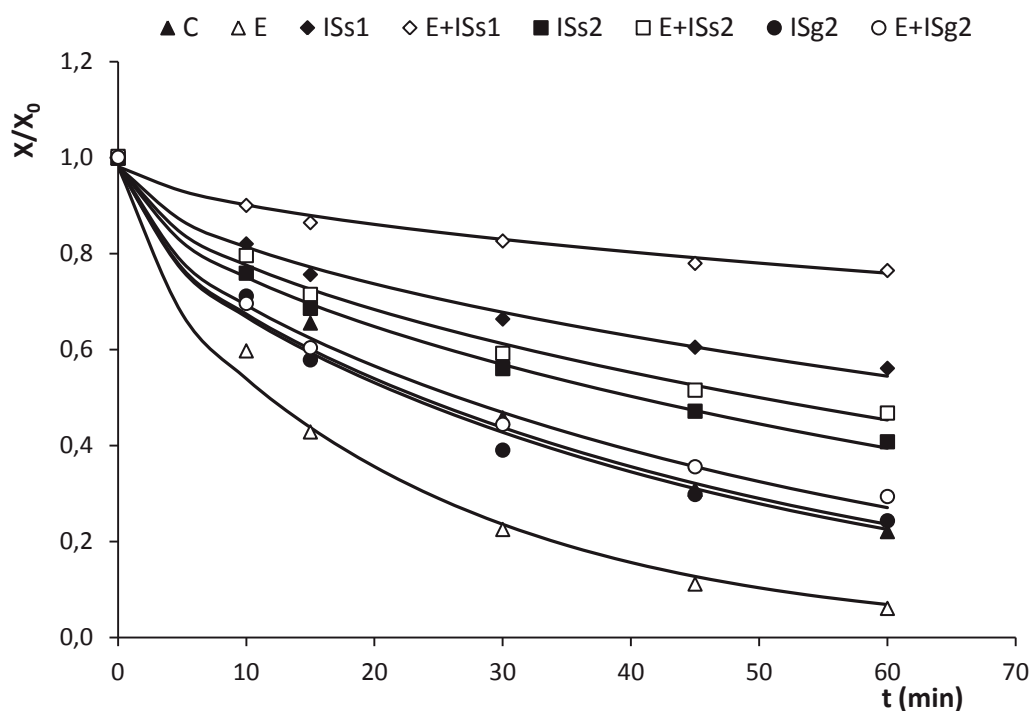


Figura I.7. Curvas de secado experimentales y predichas mediante el modelo de Fick.

Tabla I.4. Coeficientes de difusión efectiva (m^2/s) de agua en pera fresca y con infusión previa, con y sin escaldado.

Pretrat.	D_{eff}	$ES_{D_{eff}}$	R^2	RMSE	χ^2
C	12,5E-10	7,5E-11	0,991	3,15E-02	0,0013
E	22,4E-10	1,4E-10	0,993	2,90E-02	0,0014
ISs1	9,9E-10	4,2E-11	0,991	1,50E-02	0,0003
E+ISs1	0,7E-10	5,0E-12	0,982	1,15E-02	0,0003
ISs2	4,7E-10	1,6E-11	0,997	1,20E-02	0,0003
E+ISs2	3,3E-10	1,4E-11	0,991	1,80E-02	0,0004
ISg2	4,7E-10	2,7E-11	0,99	2,90E-02	0,0009
E+ISg2	8,4E-10	4,0E-11	0,994	1,90E-02	0,0005

Si bien la disminución de D_{eff} debido a pretratamientos de ósmosis ha sido informada para distintos productos frutihortícolas (Nieto y col., 1998; Nieto y col., 2001; Srikiatden y Roberts, 2006; Aktas y col., 2007; Rastogi, y col., 2004), la utilización combinada de pretratamientos de escaldado y ósmosis no siempre ha conducido al mismo comportamiento durante el secado en términos de coeficientes D_{eff} .

La difusividad obtenida mediante el ajuste del modelo difusional de Fick a los datos experimentales, engloba una gran complejidad y por tanto se considera un coeficiente efectivo (D_{eff}), debido a que algunas de las suposiciones realizadas para la obtención de la solución de la ecuación de Fick no se han cumplido, fundamentalmente la consideración de dimensiones constantes durante el secado. Park y col. (2003) observaron durante el secado de peras que tanto la contracción de la muestra como el endurecimiento superficial, producto del secado a altas temperaturas, dificultaban la transferencia de agua dentro de la muestra, introduciendo una resistencia adicional y conduciendo a valores más bajos de D_{eff} . De acuerdo a estos autores, estos efectos específicos deberían ser considerados al resolver la segunda ley de Fick y podrían también ser tratados como contribuciones de resistencias adicionales a los fenómenos de transporte. Se verifica que en las condiciones de secado utilizadas en este trabajo, la difusividad efectiva aumenta a medida que se incrementa la concentración inicial de agua y disminuye la concentración de azúcar (muestras C y E). Los valores disminuyeron considerablemente en muestras con IS, lo que ocurre sobre todo en presencia de sacarosa a altas concentraciones y escaldado previo (E+ISs1). En estas condiciones probablemente exista una distribución más homogénea de los azúcares introducidos en el tejido durante la ósmosis lo que estaría conduciendo a una menor velocidad de transporte de agua durante la primera hora de secado, alcanzando humedades reducidas (X/X_0) más altas en comparación con las muestras ISs1 y con el resto de las muestras (**Figura I.7**). Nieto y col. (1998) observaron el mismo comportamiento en manzana impregnada con glucosa previamente escaldada y basaron su análisis en los estudios realizados por Sterling y Chichester (1959) sobre la distribución de glucosa radioactiva en duraznos luego del calentamiento en jarabes al 30 %. El análisis realizado por estos autores se comenta en el capítulo siguiente.

Por otro lado puede observarse en la **Figura I.8**, al comparar los valores experimentales de X/X_0 con los predichos, que el modelo difusional de Fick permitió reproducir adecuadamente las curvas del primer período de secado en la mayoría de las

condiciones experimentales, salvo en las muestras control y escaldadas en zonas de X/X_0 intermedias, lo que puede deberse al elevado encogimiento que tiene lugar en estas muestras durante el proceso y a la consideración de determinadas hipótesis para llegar a la solución adoptada, tales como que el alimento es isotrópico y que la difusividad es constante a lo largo del proceso.

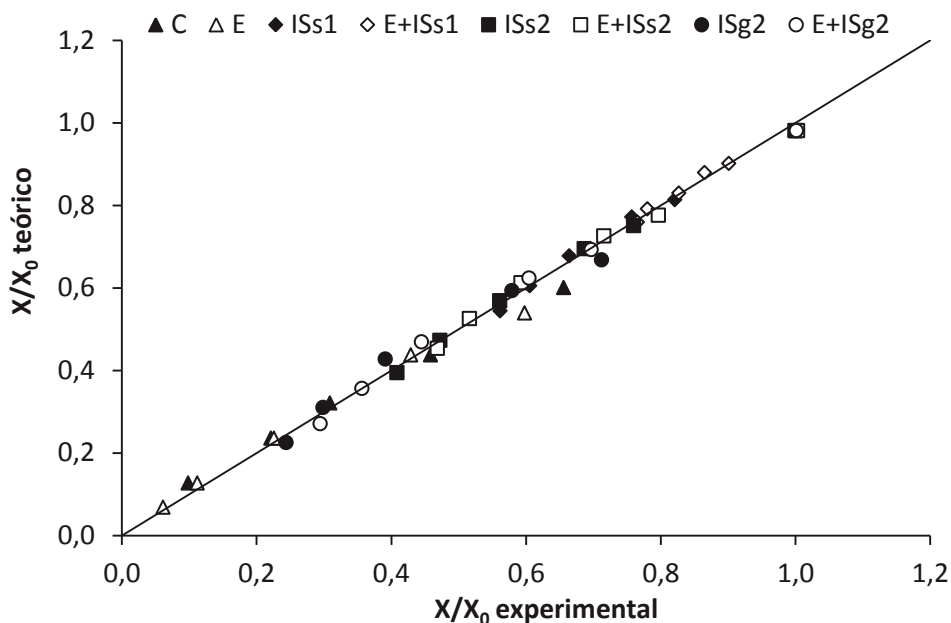


Figura I.8. Valores de contenido de humedad experimentales y teóricos considerando el modelo de Fick.

Karathanos y col. (1995) reportaron en muestras de manzana valores de D_{eff} entre 4 y $21 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ y Nsonzi y Ramaswamy (1998) obtuvieron valores del mismo orden de magnitud en arándanos deshidratados a temperaturas entre 37-60 °C (2 a $5,1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Sin embargo Kingsly y col. (2007), obtuvieron valores de difusividad de agua durante el secado ($T= 45\text{-}55 \text{ }^\circ\text{C}$) de duraznos entre 3 y $4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Park y col. (2001) que trabajaron con placas de pera en condiciones de difusión unidireccional, obtuvieron valores de D_{eff} que variaban entre 0,56 y $1,37 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que González-Martínez y col. (2006) obtuvieron valores entre $6,5 \times 10^{-12}$ y $5,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ durante el secado de pera (var. Blanquilla) a temperaturas entre 45-65°C, valores cercanos a los coeficientes obtenidos en este trabajo y que son considerados por otros autores dentro

de los valores típicos para el secado de productos agrícolas (Dissa y col., 2008; Ruiz-López, y col., 2007).

I.3. CONCLUSIONES

Tanto las curvas de secado como los parámetros obtenidos a partir del modelado matemático del proceso permitieron analizar la influencia de los pretratamientos de escaldado y deshidratación osmótica sobre el secado convectivo posterior. Entre los fenómenos que tienen lugar durante los pretratamientos pueden citarse el encogimiento del tejido, los cambios estructurales internos y el intercambio de agua y azúcares. Los pretratamientos de infusión u osmóticos disminuyeron la velocidad de secado convectivo posterior debido al aumento de la resistencia interna al transporte de materia, fundamentalmente a altas concentraciones de azúcar, por lo que podría pensarse en futuros estudios en analizar el comportamiento de las muestras a una temperatura de secado mayor, de manera de obtener tiempos de procesamiento aceptables sin un deterioro significativo de la calidad.

El modelo de Henderson y Pabis permitió reproducir con adecuada precisión la evolución de la humedad reducida del producto con el tiempo de secado, obteniéndose menores errores estadísticos, incluso en comparación con el modelo difusional de Fick. Esto valida la confiabilidad del modelo empírico, el cual permite además simular todo el proceso de secado de rodajas de pera (con y sin pretratamiento) a 65°C, con una velocidad de circulación de aire de 2 m/s y 6% de HR, lo que resulta de gran utilidad a la hora de optimizar las condiciones de secado.

De acuerdo a los resultados analizados, se puede concluir que un control adecuado de los tratamientos de escaldado e infusión previos al proceso de secado puede ser utilizado como una herramienta para desarrollar peras deshidratadas o peras de humedad intermedia de distintas características organolépticas. Análisis sensoriales preliminares llevados a cabo en esta instancia mostraron diferencias importantes en cuanto al color, el sabor y la textura, pudiendo vislumbrarse aplicaciones muy variadas de las tecnologías propuestas. La evaluación de estos parámetros de calidad se detalla en los capítulos siguientes. Adicionalmente resulta necesario llevar a cabo estudios de

transiciones de fase con el objeto de caracterizar el estado amorfo de los distintos materiales. El análisis conjunto de las propiedades mecánicas, de sorción y la temperatura de transición vítrea permitirá predecir la estabilidad de los distintos productos en diferentes condiciones de procesado y almacenamiento.

CAPÍTULO II

Caracterización estructural y ultraestructural de los tejidos de pera frescos y pretratados



II.1. INTRODUCCIÓN

La estructura del alimento ha sido una variable poco tenida en cuenta en la tecnología/ ingeniería de alimentos. Los estudios estructurales juegan un rol central en la elucidación de las relaciones entre los atributos sensoriales de los alimentos, incluyendo la textura, el color y la estructura. Por otro lado constituyen una herramienta útil para la comprensión de los fenómenos de transporte involucrados en los procesos de conservación. Por consiguiente, un análisis microscópico que permita evaluar los cambios micro y ultraestructurales producidos y su influencia potencial en la velocidad de los procesos y las propiedades físicas de los alimentos puede tener impacto en el diseño de nuevas tecnologías y en su optimización (Alzamora y col., 2000; Peleg, 2002; Aguilera y Lillford, 2008).

La estructura de frutas y vegetales a escala micro o macro juega un papel importante en los fenómenos de transferencia de materia que tienen lugar durante la deshidratación (Aguilera, 2005). En los estudios existentes sobre el efecto de las condiciones de secado sobre la microestructura de este tipo de matrices se ha observado que hay algunos fenómenos claves a nivel microestructural que pueden afectar la macroestructura. El más importante de estos fenómenos es el encogimiento celular, que causa la principal modificación en la estructura global del producto y está directamente relacionado con la pérdida de agua durante el secado (Lewicki y Pawlak, 2003; Ramos y col., 2004; Roca y col., 2008). Particularmente en frutas de pepita como la manzana se ha demostrado que la contracción de las células y los espacios intercelulares durante el secado está directamente relacionado con el tamaño y contenido de humedad final alcanzado (Mayor y col., 2005; Ramos y col., 2004). Sin embargo, también es importante considerar los cambios estructurales inducidos por tratamientos previos de la materia prima y cómo tales cambios pueden influir en la cinética de secado (Yong y col., 2006). Por ejemplo es sabido que el escaldado de frutas y vegetales causa desunión celular (Andersson y col., 1994) y disrupción de membranas y paredes celulares que afectan la velocidad de transferencia de materia durante la etapa de secado posterior (González-Fesler y col., 2008). Cuando los alimentos son deshidratados osmóticamente, el efecto sobre las características estructurales ha sido diverso, dependiente de la matriz vegetal y las condiciones del proceso osmótico. En experiencias de ósmosis de larga duración, como el de este trabajo, algunos autores (Lazarides y Mavroudis, 1996; Barat y col.

1998), han encontrado que ocurren cambios en el volumen y la porosidad que promueven la acción de fuerzas impulsoras no difusivas, tales como gradientes de presión generados por la relajación del tejido celular deformado. Además, reportaron que la disminución de volumen asociada no siempre tiene una relación lineal con el contenido de humedad y depende de las características de cada alimento, de las propiedades viscoelásticas de los tejidos y por ende, de los cambios asociados a nivel estructural.

La deshidratación, a menos que el material haya sido sometido a pretratamientos que destruyan la estructura celular a nivel de las membranas, implica la deshidratación de tejidos celulares “vivos”. A medida que avanza la deshidratación, las células evolucionan desde una estructura en equilibrio altamente organizada hasta un conjunto desordenado de los constituyentes fundamentales, debido fundamentalmente a la pérdida de agua y a la deformación del material. El cambio en las dimensiones globales estará fuertemente influenciado por la naturaleza propia del tejido (estructura, contenido de humedad, propiedades viscoelásticas), la temperatura del secado y las fuerzas impulsoras a las que es sometido durante los procesos. Diferentes cambios reportados a nivel microestructural, asociados a la operación de deshidratación, fueron mencionados por Alzamora y col. (1997):

- modificación de la cristalinidad de la pared celular, desorganización de las microfibrillas de celulosa y ruptura de la laminilla media,
- pérdida de la funcionalidad de la membrana plasmática con pérdida de turgor,
- incapacidad del protoplasto para expandirse y recuperar su volumen original
- encogimiento del tejido,
- ruptura de membranas y formación de vesículas durante la rehidratación,

El objetivo de esta parte del trabajo fue evaluar mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de transmisión (MET) los cambios estructurales producidos en los tejidos de pera luego de los pretratamientos y con ello comprender mejor el transporte de agua durante el secado posterior. A través de la observación de la estructura celular en las distintas etapas de procesamiento se pretende analizar la influencia de los distintos tratamientos en los fenómenos de transporte y en la conducta mecánica de los tejidos, sentando las bases para la optimización de los procesos.

II.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fotomicrografías de las **Figuras II.1 a II.6** muestran las características histológicas (observadas con MO) y la ultraestructura de la pared celular (observada con MET) de tejido parenquimático de pera, luego de ser sometido a los diferentes pretratamientos.

Descripción de la fruta fresca

El tejido fresco mostró células parenquimáticas más o menos isodiamétricas y turgentes de distinto tamaño. Se observaron pocos espacios intercelulares y grandes áreas de contacto célula-célula (**Figura II.1A**). Los espacios intercelulares se generan principalmente por la conjunción de tres o cuatro células y son de menor tamaño que los que presentan otros tejidos como manzana, los cuales están rodeados por un mayor número de células (8, 10 o 12) (Quiles y col., 2007; Alandes y col., 2009). En manzanas, la separación de las células ocurre durante el crecimiento del fruto y hasta un 25% del volumen de la fruta madura está constituido por espacios intercelulares llenos de aire. Las áreas de contacto célula-célula son bajas, lo cual contribuye a la fragilidad de la célula (Dennis, 1986; Knee, 1993). Salvatori y col. (1998) observaron valores de densidad aparente (que tiene en cuenta los espacios intercelulares) y porosidad mucho más bajos en pera (var. Blanquilla de Valencia, España) en relación a manzana var. Granny Smith (5 % en pera y 24 % en manzana), lo que confirma la mayor densidad de los tejidos de pera. A mayores aumentos (**Figura II.1B**) la membrana plasmática y el tonoplasto se observan íntegros y en general el citoplasma se halla en posición parietal contenido entre ambas. El adelgazamiento de la pared primaria (flechas en **Figura II.1B.**) corresponde a la presencia de plasmodesmos que se pueden apreciar en distintas zonas de la pared de contacto entre células adyacentes. La incipiente plasmólisis posiblemente haya sido generada por la deshidratación durante la técnica de inclusión.

En MET (**Figura II.4A-C**), las paredes celulares intactas se observan electrónicamente densas con una organización ultra estructural de las microfibrillas compacta. En la región central, la laminilla media con alta densidad electrónica cementa

las paredes celulares de dos células adyacentes (**Figura II.4B**). Puede apreciarse que la membrana plasmática presenta numerosas invaginaciones.

Muchas variedades de peras, particularmente las llamadas "peras de invierno" como las que se cultivan en la zona del Alto Valle de Río Negro, se caracterizan por la presencia abundante de un tipo de células denominadas "células pétreas" que se forman entre las células de la pulpa durante el normal desarrollo y/o la maduración poscosecha. Este tipo de células constituyen un tipo de esclereida braquial, que contienen abundante lignina (Schroeder, 1982; Qiao y col., 2005; Tao y col., 2009). La presencia de tales esclereidas, particularmente en nidos o grupos estrechamente ligados, transmite una textura arenosa pronunciada a la pulpa de la pera, siendo el factor más importante la variabilidad genética (Qiao, y col., 2005), por lo que constituye uno de los determinantes clave en la calidad de la fruta. Son células isodiamétricas formadas por la deposición de una pared secundaria rica en lignina por debajo de las paredes primarias de las células del parénquima. Tienen un lumen muy pequeño y suelen estar muertas a la madurez, aunque presentan abundantes plasmodesmos. La **Figura II.1G** muestra un grupo de este tipo de células pétreas y puede observarse que las células parenquimáticas se alargan en las inmediaciones de las mismas.

Efecto del escaldado

En las **Figuras II.1D-G** y **II.4D-F** (fotomicrografías con MO y MET, respectivamente) se observa la estructura de las células parenquimáticas de pera sometidas al tratamiento de escaldado (E).

Si bien se observan células levemente deformadas y un mayor contacto célula-célula no se apreciaron grandes diferencias en el patrón de comportamiento del tejido. La pared celular no se observa muy afectada como consecuencia del calentamiento (**Figura II.1E**). Se observa que el escaldado impide en general visualizar la laminilla media pero las paredes celulares no pierden densidad electrónica en comparación con la muestra fresca (**Figuras II.4D-F**). Todo ello sumado a la resistencia que le otorga al tejido la presencia de células pétreas, permite que la célula no colapse y mantengan su forma con pequeñas diferencias. En cambio, se observó un gran daño en las membranas celulares, las cuales aparecieron con interrupciones frecuentes, aunque se mantuvieron

adheridas a la pared celular como puede apreciarse a mayores aumentos tanto bajo MO (**Figura II.1E**), así como también con MET (**Figura II.4D**). La abundante presencia de vesículas translúcidas y cuerpos irregulares electrónicamente densos confirman las frecuentes interrupciones de las membranas (tonoplasto y plasmalema); sin embargo ello no provoca una desorganización importante del citoplasma. La región de campos de puntuaciones primarias atravesados por plasmodesmos se observa con una coloración oscura, lo que implica que en estas zonas la pared ha mantenido la integridad estructural aún durante el calentamiento.

Este comportamiento de las peras escaldadas en este trabajo no coincide con resultados obtenidos en manzana por González-Fesler y col. (2008) quienes observaron un gran daño en las paredes celulares y una compactación del tejido con una deformación global del 17 % luego de un escaldado en vapor de agua a 100 °C. En cambio las peras de este trabajo no presentaron deformación global de la muestra, experimentando en cambio, un leve aumento de volumen (ver **Tabla I.1** del **Capítulo I**).

Efecto del proceso de infusión

Sin escaldado

Durante el proceso de ósmosis de una célula colocada en un medio hipertónico extremo, como lo es una infusión seca, se produce una salida de agua que la célula no puede retener. Primero fluye el agua de los espacios intercelulares y luego la propia célula empieza un proceso de encogimiento (visible por la separación del plasmalema de la pared celular) cediendo la vacuola su contenido de agua. Este proceso se denomina plasmólisis y conlleva una pérdida de turgencia, la cual puede tener diferente intensidad, en función de la salida de agua hasta el extremo de provocar el colapso de las membranas. Puede apreciarse en las **Figura II.2A y B** que el tratamiento de infusión ISS1 provocó la compresión y deformación de las células con pérdida de redondez y una importante plasmólisis de la membrana plasmática (**Figura II.2A**). El tejido mostró un colapso general y las paredes celulares mostraron plegamientos. Se observó un incremento en el contacto célula-célula con reducción de los espacios celulares y

paredes celulares uniformemente teñidas como consecuencia del mayor empaquetamiento del tejido (**Figura II.2B**).

Puede apreciarse en MET que las paredes celulares presentan una mayor densidad electrónica en comparación con las muestras de tejido fresco (**Figura II.5A**). Las microfibrillas se disponen densamente empaquetadas y la laminilla media llega a visualizarse en algunas zonas. La organización ultraestructural de la pared a nivel de los campos de puntuación primaria atravesados por plasmodesmos se observa electrónicamente muy densa (**Figura II.5B**).

La retracción del citoplasma fue menos pronunciada en el caso de muestras que sufrieron una menor deshidratación, es decir las ISs2 (ver flechas en **Figura II.2C-D**). En muestras ISg2 (**Figura II.2E-F**), si bien las células presentaron una plasmólisis importante, el encogimiento fue levemente menor y se mantuvo mejor la forma y el arreglo celular. A mayores aumentos en MO las paredes celulares se observaron menos teñidas (**Figuras II.2D y II.2F**) y en MET (**Figura II.5C-F**) se observaron intactas pero con menor densidad óptica en comparación a los tejidos de muestras ISs1, manteniéndose más similares a los de la fruta fresca. La laminilla media en general está ausente o poco definida. A nivel macroscópico estas muestras presentaron un encogimiento global mucho menor que las muestras ISs1 (ver **Tabla I.1 del Capítulo I**).

El comportamiento del tejido en muestras ISg2 es similar a lo observado por Salvatori y Alzamora (2000) y Nieto y col. (2004), quienes realizaron estudios microscópicos en rodajas de manzana durante la deshidratación osmótica con glucosa al 25 %. Al comienzo de la deshidratación estos autores observaron la estructura celular claramente afectada por la plasmólisis. El tejido mostró un colapso general y las paredes celulares mostraban plegamientos, se deformaban permaneciendo unidas al plasmalema durante el encogimiento del tejido causado por la pérdida de agua de las células. Pero luego de tiempos largos de ósmosis (3,5 h), tenía lugar la recuperación de la redondez de las células y la forma típica de las paredes y espacios intercelulares, manteniendo en gran medida el arreglo celular original del tejido. Es decir las células recuperaron turgencia. El plasmalema aparentó estar íntegro en algunas células, aunque la plasmólisis se mantuvo. La pared celular se observó intacta pero con menor densidad electrónica. Los autores resaltaron que la permeabilidad de la membrana era un factor importante ya que no se observaba el mismo comportamiento del tejido cuando las muestras habían sido previamente escaldadas. En un intento por explicar la

recuperación de la forma de las células a tiempos largos de ósmosis, Nieto y col. (2004) estudiaron la viabilidad celular en las mismas condiciones de tratamiento, aplicando técnicas de detección de muerte celular mediante microscopía óptica. Estos autores observaron que hasta 55 min se detectaban células viables pero luego de 90 minutos a pesar de que las células con plasmólisis exhibían membranas que aparentemente mantenían su integridad, la funcionalidad de las mismas se había perdido, lo que estaría indicando que la osmorregulación solo explicaría la recuperación de la forma de las células al comienzo del proceso de ósmosis. En condiciones de infusión ISs1, que se corresponden con una mayor deshidratación, el grado al cual las células plasmolizaron pudo haber sido letal desde los comienzos de la ósmosis.

Con escaldado

El efecto combinado de IS y escaldado (E) produjo en los tejidos un comportamiento estructural notablemente diferente con respecto a las frutas sólo osmotizadas. En MO (**Figura II.3**) se observó que la mayoría de las células presentaron mayor tamaño, forma más elíptica, con grandes áreas de contacto entre sí, manteniendo los contornos redondeados. Las membranas celulares, si bien presentan interrupciones (ver flechas), se mantienen adheridas a las paredes celulares y se observan más íntegras en comparación con muestras sólo escaldadas. En MET (**Figura II.6**) las paredes celulares presentaron una disminución marcada de la densidad óptica en muestras E+ISs1 (**Figura II.6A-B**) en comparación con las muestras sólo sometidas a procesos de infusión (ISs1). Se observa un teñido más irregular con una laminilla media ausente en algunas zonas u ocupando una banda central bastante dispersa en otras. Las regiones de puntuaciones primarias atravesados por plasmodesmos si bien se observan más delgadas, se ven electrónicamente densas. En muestras con un menor contenido de azúcares (**Figuras II.6C-F**) las paredes mantuvieron mejor su estructura ya que mostraron buena densidad electrónica, con el material fibrilar más densamente empaquetado y uniforme. La laminilla media en general está ausente en algunas zonas y en otras se observa levemente teñida o poco visible, discontinua.

Varios mecanismos (en serie y/o en paralelo) que actúan en diferentes períodos del proceso de ósmosis podrían ser los responsables de la recuperación de los tejidos en muestras osmotizadas con escaldado previo. Una explicación razonable es considerar la

ósmosis como un proceso de difusión multicomponente a través de un medio poroso (Keurentjes y col., 1992). El agua es inicialmente transportada a alta velocidad hacia la solución osmótica. Este flujo de agua y la mayor resistencia ofrecida por el tejido a la difusión de soluto se opone a la penetración del mismo. Una vez que una cantidad suficiente de glucosa o sacarosa ha sido transportada al tejido, el flujo de agua se revierte. A nivel celular, cuando las células han acumulado más soluto, absorben agua y su turgor se incrementa. En muestras con escaldado previo, la ruptura de membranas celulares por efecto del calor implica para la célula la pérdida de su regulación osmótica y por ello el equilibrio final alcanzado con el medio es más rápido y el efecto de la presión sobre la pared intacta pudo provocar la recuperación de la forma y la redondez en las células (**Figura II.3**), lo que se traduciría en una mayor conservación del volumen a nivel macroscópico como puede observarse en la **Tabla I.1** del **Capítulo I**.

Por otro lado la recuperación significativa del arreglo tridimensional del tejido podría deberse a las características reológicas de los tejidos de fruta. Es sabido que las paredes celulares se comportan como sólidos viscoelásticos (Pitt, 1992), de manera que al avanzar el proceso osmótico puede tener lugar la relajación de las paredes celulares encogidas en los primeros estadios de la ósmosis, reduciendo el exceso de energía libre asociada a la matriz encogida, dando lugar a tiempos más largos a una mayor esfericidad de las células. La relajación estructural de tejidos de frutas y vegetales ha sido también reportada por Nieto y col. (2004) y Barat y col. (1998) para explicar la recuperación de volumen observada para tiempos largos de inmersión de cilindros de manzana en soluciones de sacarosa y en productos tales como duraznos enlatados en jarabe estudiados por otros autores (Hughes y col., 1958; Adambounou y col., 1983). Los mismos observaron un período de encogimiento inicial (debido a la importante pérdida de agua) a tiempos cortos de tratamiento osmótico y una recuperación de volumen a tiempos mayores. Aún cuando el equilibrio composicional había sido alcanzado por todos los componentes, a partir de un determinado momento tenía lugar un flujo de solución osmótica dentro del tejido debido a la relajación de la energía mecánica acumulada en la estructura celular deformada. Como consecuencia de esto la masa total de las muestras y su volumen aumentaban, pero sin cambio alguno en la composición de la fase líquida. A nivel microscópico las observaciones por CRIÓ-SEM realizadas en tejido de manzana por Barat y col. (1998) a lo largo del tiempo de ósmosis daban apoyo a la idea de que la relajación de la matriz producía un aumento en el volumen total de las

células. Como consecuencia de ello, el líquido exterior fluye dentro del espacio generado entre la pared celular y la vacuola.

En las peras con pretratamientos combinados de escaldado e infusión del presente trabajo, las cuales mostraron una mayor integridad de las paredes celulares en comparación con las peras sólo osmotizadas, la recuperación de la estructura observada podría deberse a la entrada de solución osmótica al interior de la célula luego de la relajación de las paredes celulares intactas.

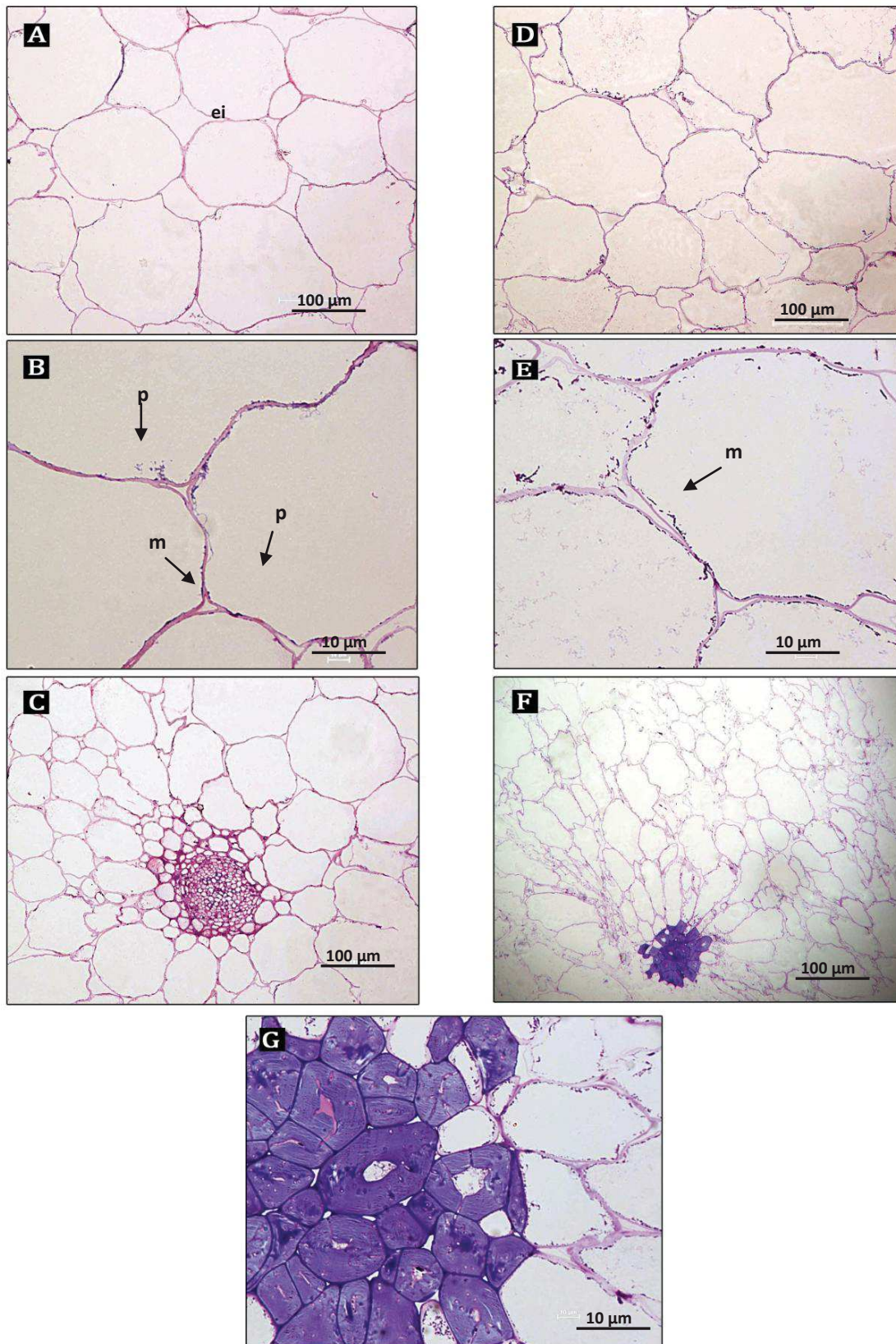


Figura II.1. Caracteres estructurales de pera en corte transversal. Fotomicrografías con MO. A-C: fruta fresca; D-E: fruta escaldada; F-G: esclereida; ei: espacio intercelular; m: membrana plasmática; p: plasmodesmo.

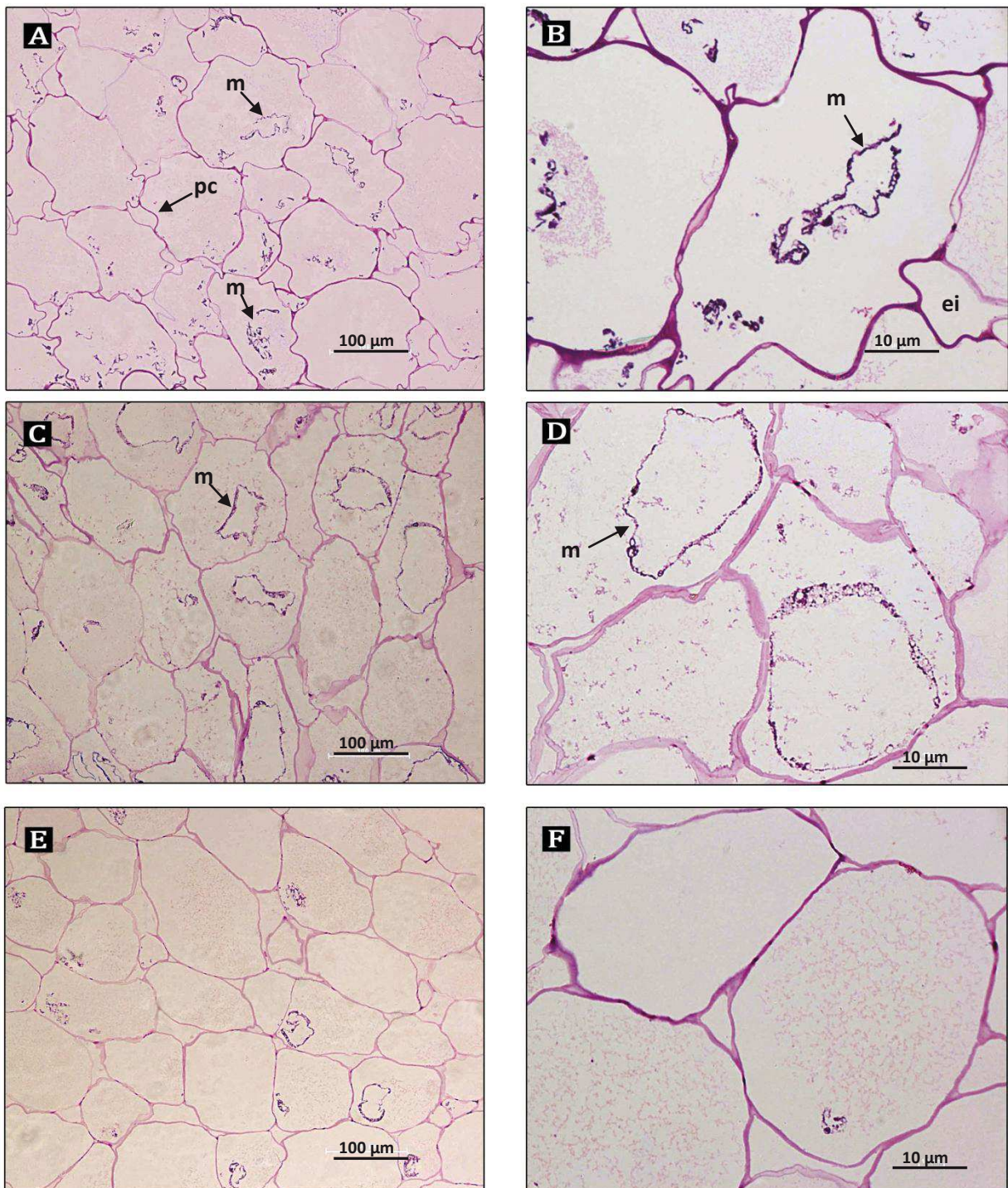


Figura II.2. Caracteres estructurales de pera con tratamientos de infusión en corte transversal. Fotomicrografías con MO. A-B: con ISS1; C-D: con ISS2; E-F: con ISg2; m: membrana plasmática; pc: pared celular; ei: espacio intercelular.

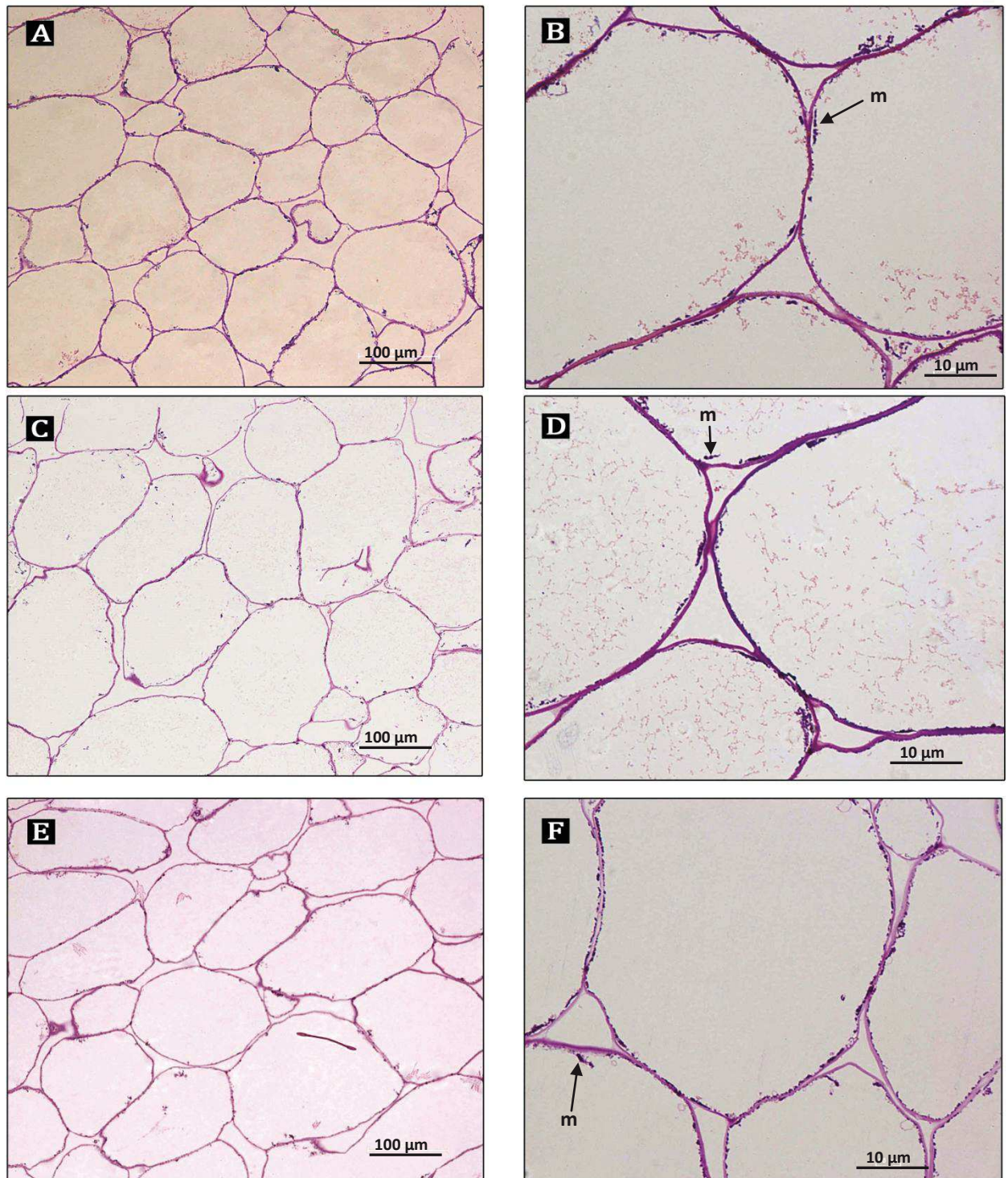


Figura II.3. Caracteres estructurales de pera con tratamientos de escaldado e infusión en corte transversal. Fotomicrografías con MO. A-B: con E+ISs1; C-D: con E+ISs2; E-F: con E+ISg2; m: membrana plasmática.

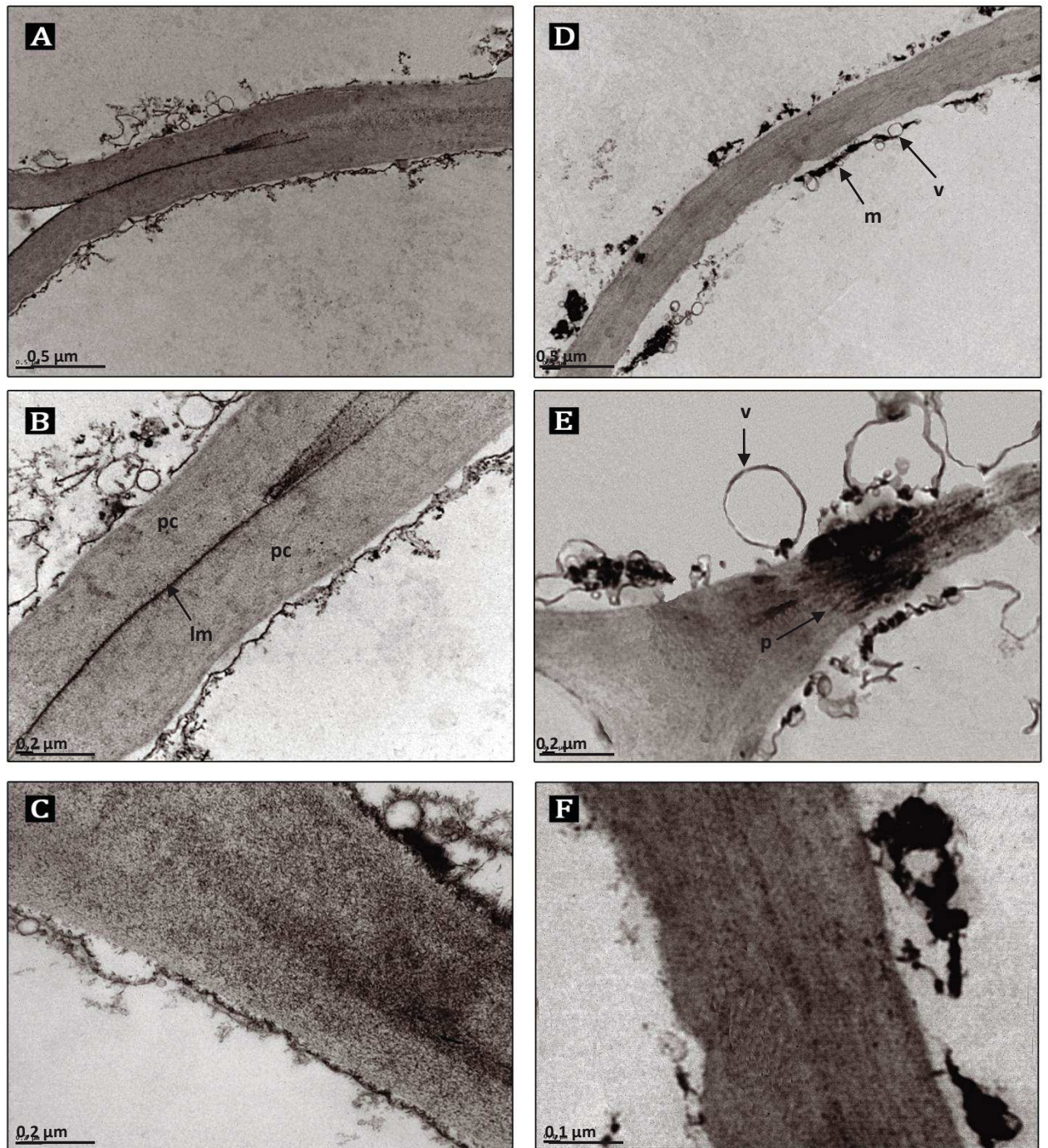


Figura II.4. Micrografías obtenidas por TEM de muestras de pera en corte transversal. Fotomicrografías con MET. A-B-C: fruta fresca; D-E-F: fruta escaldada; pc: pared celular; lm: laminilla media; v: vesícula; p: plasmodesmo.

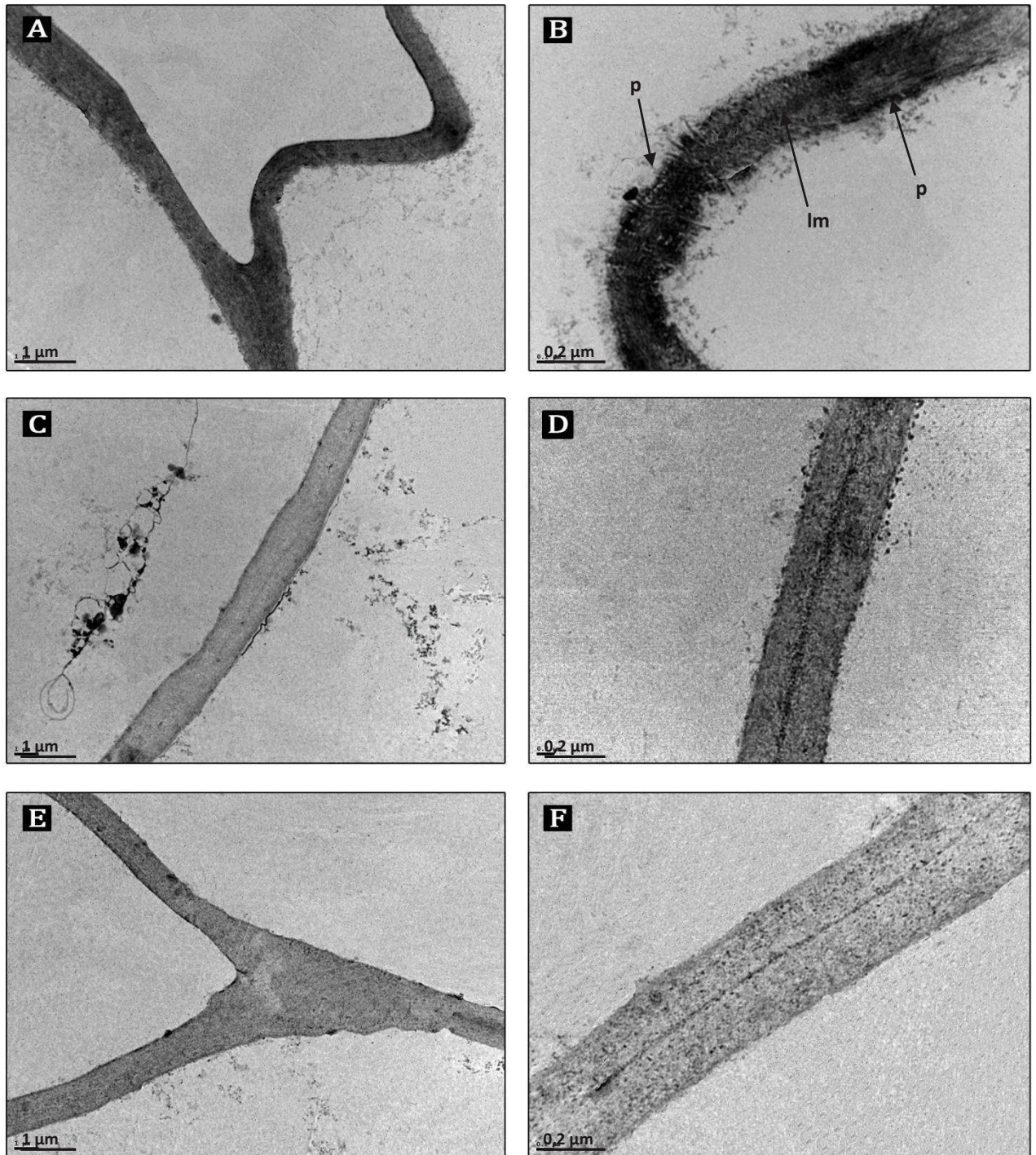


Figura II.5. Caracteres estructurales de pera con tratamientos de infusión en corte transversal. Fotomicrografías con MET. A-B: con ISs1; C-D: con ISs2; E-F: con ISg2; lm: laminilla media; p: plasmodesmo.

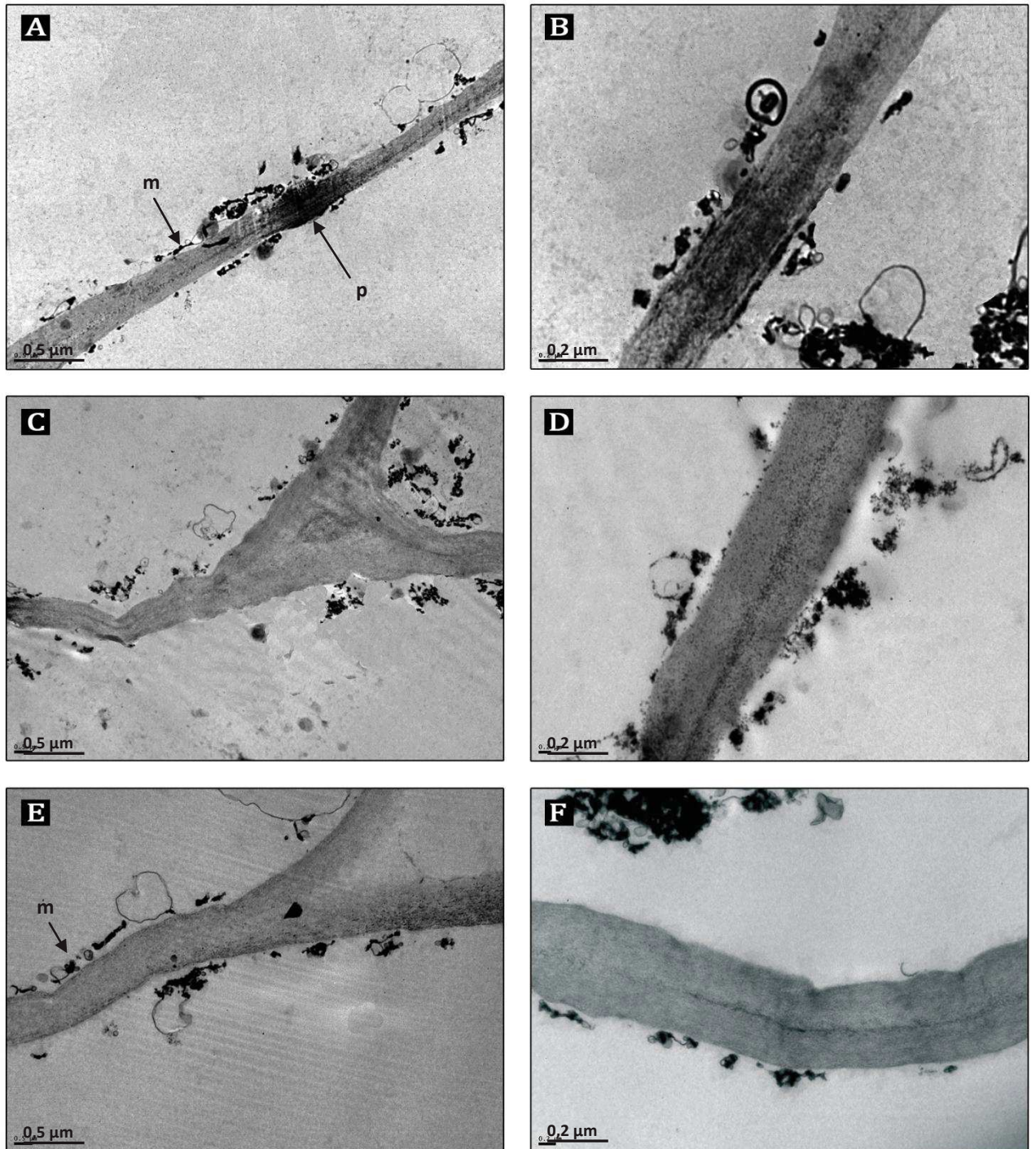


Figura II.6. Micrografías obtenidas por MET de muestras de pera en corte transversal. Fotomicrografías con MET. A-B: con E+ISS1; C-D: con E+ISS2; E-F: con E+ISg2; p: plasmodesmo; m: membrana plasmática.

Integración de resultados: algunas hipótesis sobre la conducta de secado de la pera con pretratamientos

Como consecuencia de la aplicación de pretratamientos en frutas y vegetales, se producen modificaciones en los tejidos tratados, entre ellas, encogimiento, cambios en la estructura y composición química (alteración de macromoléculas, ganancia y/o pérdida de sólidos) y se puede afectar el transporte de masa durante el secado dependiendo de la severidad de las mismas y su grado de participación como resistencias al transporte de agua.

Cuando se considera la influencia de los cambios estructurales internos en el transporte de masa, se debe tener en cuenta las tres posibles vías del movimiento del agua hacia adentro o afuera de las células. Ellas son el transporte transmembrana (a través de la membrana), el transporte simplástico (a través de los plasmodesmos) y el transporte apoplástico (a través de la pared celular), ya mencionados en la sección de Introducción de este trabajo.

Tyree (1970) ha reportado que la vía preferida para el transporte de especies pequeñas no iónicas como el agua es la pared celular y Molz e Ikenberry (1974) han puntualizado que existe una cantidad considerable de evidencia experimental de que las paredes celulares constituyen la vía más importante del movimiento del agua a través del tejido. Rotstein y Cornish (1978) plantearon una expresión para predecir el flujo de agua en el proceso de secado en manzanas considerando que la permeabilidad de la membrana era la etapa controlante. El flujo predicho era significativamente mayor que el obtenido experimentalmente, concluyendo entonces que el fenómeno de secado no era controlado por la permeabilidad a través de la membrana. Estos estudios pondrían de manifiesto la importancia de las modificaciones de las paredes celulares de los tejidos parenquimáticos en los procesos de transporte.

A fin de poder esbozar una explicación parcial del comportamiento del tejido de pera durante el secado, hay que tener en cuenta las propiedades fisicoquímicas evaluadas en las muestras tanto de pera fresca como en las muestras sometidas a los pretratamientos de escaldado y/o infusión con solutos. Esta información conjuntamente con la evaluación de la conducta de las frutas durante el secado permitirá concluir sobre el efecto de cada pretratamiento aplicado (ver información presentada en el **Capítulo I**).

Efecto del escaldado

Diferentes autores observaron que el escaldado influye en la velocidad de secado de frutas y vegetales de diferentes maneras: en algunos casos puede aumentar, en otros disminuir o bien no modificar el coeficiente de transporte de agua.

Alvarez y col. (1995) encontraron que el escaldado en vapor incrementaba el D_{ef} en frutillas. Los estudios de microscopia electrónica revelaron que el tratamiento con vapor producía disrupción de las membranas y degradación de la laminilla media y de los polisacáridos hemicelulósicos presentes en la pared celular, siendo la densidad óptica de las paredes celulares menor que la densidad óptica de las paredes celulares de las frutillas frescas. Los autores explicaron, al menos parcialmente, el comportamiento observado en el secado considerando las alteraciones de la ultraestructura del tejido provocadas por la exposición al calor. El escaldado aumentaría el D_{ef} debido a la eliminación de la resistencia de las membranas celulares y/o a la disminución de la resistencia de la pared celular al flujo de agua.

Mazza (1983) observó que el escaldado en agua tenía una influencia significativa en la velocidad de transporte de humedad en zanahorias. El autor atribuyó el incremento de la velocidad a cambios en las propiedades físicas del tejido, a saber, la destrucción de membranas por calor, y a la pérdida de sólidos solubles. Un comportamiento similar fue reportado por Alzamora y Chirife (1980) en remolacha azucarera, donde el escaldado incrementaba la velocidad de transporte de humedad, siendo el efecto más notorio cuando el escaldado se realizaba en agua. El comportamiento fue atribuido a la pérdida de sólidos solubles. Sin embargo, observaron que en placas de papa el escaldado, ya sea en vapor o en agua, disminuía la velocidad de secado y atribuyeron este efecto a cambios causados por la gelatinización del almidón.

Nieto y col. (1998) estudiaron el efecto del escaldado en la velocidad de secado de manzanas encontrando que tenía poco efecto en la velocidad de secado respecto a la fruta fresca. El escaldado fue realizado en vapor durante un minuto. Estos autores observaron en MET que la etapa de calentamiento no pareció modificar la resistencia de la pared celular al flujo de agua. Ellos supusieron que el leve efecto del escaldado sobre D_{eff} podía ser debido al incremento en la densidad de las manzanas por la leve contracción de los tejidos (~ 23 %). Además, si el valor de D_{eff} para la fruta fresca se corregía considerando la disminución de la porosidad por el encogimiento de la muestra

escaldada, el valor de D_{eff} de la fruta escaldada era similar al valor estimado experimentalmente.

González-Fésler y col. (2008) observaron en manzanas que el escaldado aumentaba un 57 % el valor de D_{eff} respecto de la fruta fresca. El escaldado fue realizado en vapor durante 2 min, un tiempo más largo que el utilizado por algunos de los autores citados anteriormente. Como pudo observarse al microscopio óptico, la etapa de calentamiento pareció modificar la resistencia de la pared celular al flujo de agua. Teniendo en cuenta las tres posibles vías para el movimiento del agua dentro y fuera de las células, esto es, a través de la membrana plasmática, vía los plasmodesmos y a través de la pared celular, estos autores atribuyeron el aumento del coeficiente de difusión efectivo a la eliminación de las resistencias de las membranas y a las continuas interrupciones observadas en la pared celular.

Estos resultados permiten concluir que, para poder explicar la influencia del escaldado en la velocidad de secado, deben tenerse en cuenta varios fenómenos que pueden producirse por la aplicación del calor, ya sea utilizando vapor saturado o agua en ebullición (Alzamora y col. 1997):

- a) variación en las propiedades físicas de los tejidos, entre ellas destrucción de la semipermeabilidad de las membranas celulares, y con ello modificación de las propiedades osmóticas de las células y el turgor.
- b) alteraciones a nivel de la microestructura de la pared: desintegración parcial de la laminilla media con la consecuente separación de las paredes celulares adyacentes, ruptura de las paredes primarias celulares debido a la degradación de los polisacáridos celulósicos y hemicelulósicos y cambios en la cristalinidad de la celulosa, hinchamiento de las paredes primarias.
- c) cambios fisicoquímicos de los componentes citoplasmáticos como el almidón y las proteínas.
- d) pérdida de sólidos solubles.
- e) desplazamiento del aire ocluido y colapso celular.

También, debe considerarse que el secado a altas temperaturas puede modificar las características físicas del vegetal, enmascarando el efecto del escaldado.

En las peras de este trabajo se observó un aumento significativo en la velocidad de secado cuando las peras habían sido escaldadas previamente, sin cambios significativos

en las propiedades fisicoquímicas (humedad, contenido de azúcares y volumen). A partir de la información obtenida en MO y en MET, pudo observarse que la aplicación del tratamiento térmico no produjo modificaciones en la estructura de pared y las células pétreas se observaron intactas. El arreglo celular se mantuvo similar al tejido fresco lo que se corresponde con la ausencia de encogimiento de la muestra. Por consiguiente el aumento en la velocidad de secado debido al escaldado sería atribuido fundamentalmente a la eliminación de las resistencias de las membranas celulares debido a su desorganización, lo cual modificaría la resistencia al flujo de agua a través de la estructura celular.

Efecto de los pretratamientos de infusión con y sin escaldado previo

Tal como se ha comentado en el **Capítulo I**, el efecto de la deshidratación osmótica sobre la velocidad de secado en frutas ha sido estudiado por diversos autores. Sin embargo pocos de ellos han intentado correlacionar la velocidad de secado con los cambios producidos durante el pretratamiento a través de la observación de la microestructura. Martínez y col. (2005) reportaron que el D_{eff} de melón impregnado con solución de glucosa disminuyó respecto al de la fruta fresca. Estos autores atribuyeron este comportamiento a la ganancia de azúcar y a la contracción volumétrica. Estudios previos de microscopía electrónica con el mismo tipo de muestras (Mastrángelo y col. 2000) revelaron que la deshidratación osmótica había causado ruptura y degradación de las paredes celulares, como así también ruptura de las membranas.

Alvarez y col. (1995) reportaron que el D_{eff} para frutillas inmersas en una solución acuosa de 61 % de glucosa no presentaba diferencias significativas con respecto al valor de la fruta fresca. Los autores atribuyeron este comportamiento a que, si bien se producía un incremento de la resistencia interna al movimiento de agua por la incorporación de azúcares, existiría una reducción de la resistencia de la pared celular debido a la probable degradación de polisacáridos, así como pérdidas al medio de pectinas y otros componentes solubles durante el paso de impregnación.

Nieto y col. (1998) observaron una significativa disminución en la difusividad de agua en manzanas pretratadas con deshidratación osmótica con glucosa al 40 %, atribuyendo este comportamiento a la mayor resistencia adicional debido a la incorporación de los azúcares, así como también al encogimiento volumétrico

producido. Estudios realizados sobre la estructura celular por MET y MO, si bien revelaron la plasmólisis del citoplasma, mostraron también que los tratamientos no modificaron en gran medida la resistencia de las paredes y membranas celulares al flujo de agua. Estos autores observaron el mismo comportamiento al trabajar con rodajas de melón.

En las peras de este trabajo la velocidad de secado disminuyó considerablemente en muestras osmotizadas respecto de la pera fresca, sobre todo en muestras ISs1, no lográndose en ningún caso una reducción en el tiempo de secado necesario para llegar a una concentración de 0,3 g agua/ g masa seca. Al observar estas muestras con MO y MET, las paredes celulares aparecían enteras, incluso en muestras ISs1 aparecían más reforzadas. Las membranas celulares se encontraban intactas a pesar de la plasmólisis del citoplasma, más pronunciado en muestras ISs1, las cuales presentaron un tejido más colapsado. De acuerdo a este análisis, la disminución en la velocidad de secado de estas muestras se debería a la mayor resistencia adicional ofrecida por los azúcares incorporados a la matriz y al encogimiento provocado por el tratamiento, tanto mayor cuanto mayor es la reducción de la a_w del producto luego de la ósmosis. Tal como se ha comentado en el Capítulo I la formación de una costra por concentración de azúcares en la superficie de la muestra estaría contribuyendo a una mayor resistencia al flujo de agua en muestras ISs1. Las muestras que sufrieron durante la ósmosis una menor deshidratación final con una menor incorporación de azúcares y una mayor preservación del volumen, mantuvieron un arreglo celular más similar al de las muestras frescas. Esta estructura más abierta del tejido permitió una mayor velocidad de secado posterior.

Llama la atención el comportamiento de las frutas que recibieron un pretratamiento combinado de ósmosis y escaldado, las cuales se deshidrataron a una velocidad menor que las correspondientes frutas sólo osmotizadas. Mazza (1983) estudió el efecto del escaldado en agua y la posterior inmersión en soluciones acuosas de sacarosa como pasos previos al secado de cubos de zanahoria. Observó que cuando la concentración de sacarosa se incrementaba de 5 a 6 %, el contenido la humedad de las zanahorias disminuía, así como también la velocidad de transporte de agua. Este comportamiento lo atribuyó por un lado a la cristalización de la sacarosa durante el proceso que disminuía la difusividad del vapor de agua, y por otro lado a la disminución de la presión de vapor de agua en el producto debido al azúcar disuelto. Por lo tanto la

diferencia de presión de vapor entre el producto y el aire de secado decrecía resultando en una menor velocidad de secado.

En este trabajo no resulta fácil explicar por qué la velocidad de secado resulta menor en muestras escaldadas e impregnadas. En este caso, si bien no existieron diferencias en cuanto al contenido de agua, concentración de azúcares y actividad de agua luego de los pretratamientos, las muestras presentaron un encogimiento significativamente menor no sólo luego de los pretratamientos sino también luego del secado posterior (ver imágenes de la **Figura I.1** y la **Tabla I.1** del **Capítulo I**), por lo que el comportamiento durante el secado de estas muestras podría deberse a una distribución diferente de los azúcares en el tejido. Las observaciones con MO mostraron disrupción de membranas celulares y respecto de la pared celular, no se observó con MET un deterioro importante, permaneciendo incluso más homogénea que las muestras sin escaldado. Sólo las muestras ISS1 presentaron una densidad electrónica levemente menor que las correspondientes muestras sin escaldado previo pero con plasmodesmos teñidos. Sterling y Chichester (1959), cuando estudiaron la distribución de glucosa radioactiva en duraznos después de una cocción en solución de 30 % de glucosa, concluyeron que la concentración de azúcares en el lumen y en los espacios intercelulares era muy cercana a la concentración del azúcar en el jarabe externo, pero los azúcares tendían a acumularse en las paredes celulares debido a fenómenos de adsorción en celulosa, sustancias pécticas y otros polisacáridos de la pared celular. Es probable entonces que un tratamiento de escaldado conduzca a la exposición/producción de algunos grupos reactivos disponibles para enlaces hidrógeno, aumentando la adsorción de azúcares en las paredes celulares y aumentando en consecuencia la resistencia de las mismas al flujo de agua.

II.3. CONCLUSIONES

Varios son los fenómenos que tienen lugar durante los pretratamientos que afectan simultáneamente el transporte de masa durante el proceso de osmodeshidratación como el encogimiento del tejido, los cambios estructurales internos y el intercambio de agua y azúcares.

El análisis de los cambios histológicos y ultraestructurales por microscopía óptica y microscopía electrónica de transmisión indicó que los distintos tratamientos previos al secado, si bien provocaron modificaciones en la forma y tamaño de células y espacios intercelulares, no parecieron alterar la densidad electrónica de las paredes celulares en forma severa, aún en aquellos casos que incluían un escaldado.

El comportamiento del tejido luego de los pretratamientos resultó muy dependiente del tipo de soluto utilizado y la magnitud de la deshidratación final alcanzada en la infusión, observándose una mejor preservación de la estructura en muestras sometidas a tratamientos combinados con escaldado.

El comportamiento durante el secado se afectaría por una serie de fenómenos ocurridos durante los pretratamientos, los que modificarían en mayor o menor grado la resistencia al flujo de agua ya sea aumentándola o disminuyéndola. A saber:

- ganancia de solutos y disminución de la humedad
- colapso de las muestras y disminución de la porosidad
- modificaciones de la permeabilidad de las membranas celulares y de la ultraestructura de pared (contenido de sustancias pécticas y disposición de microfibrillas).
- adsorción de azúcares en la paredes celulares

CAPÍTULO III

Comportamiento mecánico de peras deshidratadas y su relación con la estructura



III.1. INTRODUCCIÓN

Aunque existen muchos factores que influyen sobre la textura de los tejidos vegetales, se acepta que la presión de turgor inicial de las células, la integridad de la pared celular y de la laminilla media, y la permeabilidad de la membrana plasmática son determinantes de las características mecánicas de los tejidos (Alzamora y col., 2000; Waldron y col., 2003; Nieto y col., 2013). Por consiguiente, las modificaciones resultantes del procesamiento que tengan lugar en esos elementos estructurales, afectarán las propiedades mecánicas de los productos. En general, los métodos de procesamiento conducen a la muerte celular, ya que destruyen la integridad del plasmalema y la capacidad de la célula para mantener su turgencia, dando lugar en mayor o menor grado a un colapso de la estructura.

Las propiedades mecánicas de los productos deshidratados dependen fundamentalmente del estado de agregación de sus moléculas (gomoso o vítreo), así como de los cambios inducidos en la estructura como consecuencia de las deformaciones (por contracción y/o hinchamiento) inducidas en las células y en los espacios intercelulares, además de la ruptura de las uniones celulares que ocurre durante el proceso de secado (Contreras y col., 2005). En términos generales, los tejidos vegetales pierden su carácter viscoelástico y se vuelven frágiles conforme reducen su contenido en agua (Lewicki y Jakubczyk, 2004), estando sus propiedades mecánicas estrechamente relacionadas con el nivel de humedad y el valor de actividad del agua alcanzados por éstas al final del secado convectivo.

Por otro lado los pretratamientos aplicados provocan, como hemos visto, alteraciones estructurales que afectan el comportamiento de los productos durante el secado, con un alto impacto sobre las propiedades mecánicas y atributos sensoriales tales como gomosidad y carácter crujiente (Landim y col., 2016). Según Contreras y col. (2005) la respuesta mecánica de las muestras deshidratadas es el resultado del comportamiento de la matriz celular y de la fase líquida interna del tejido que contiene a los sólidos solubles, ambas con diferente interacción con el agua. Dependiendo del contenido en agua, de los cambios en la pared celular así como de la composición de la fracción hidrosoluble pueden observarse diferencias en el comportamiento mecánico del tejido.

El objetivo de este capítulo fue analizar las propiedades mecánicas de las peras deshidratadas y su relación con la estructura observada mediante microscopía electrónica de barrido.

III.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento mecánico de peras luego del proceso de secado

Con el objeto de analizar el efecto de cada uno de los pretratamientos aplicados sobre las propiedades mecánicas de las muestras de peras deshidratadas se utilizó el ensayo de punción, que simula el impacto de los incisivos al morder (Roger Harker y col., 1996; Roudaut y col., 2002). Las **Figuras III.1** y **III.2** muestran, a modo de ejemplo, las curvas típicas de fuerza-distancia obtenidas en cada caso, las cuales mostraron un aumento de la resistencia del material a la punción hasta llegar a un valor de fuerza que corresponde a la penetración de la punta en las capas superficiales más rígidas. Luego la fuerza vuelve a aumentar con una mayor pendiente producto de la compactación del material hasta un punto de fuerza máxima a partir del cual se observa una caída abrupta de la fuerza hasta lograr atravesar totalmente la muestra. El punto máximo de tensión observado se denomina fuerza máxima de ruptura ($F_{m\acute{a}x}$) que está relacionada con la firmeza del material. Se puede observar que los perfiles de penetración en el tejido no presentaron picos muy abruptos típicos de alimentos duros como suele suceder en frutas frescas y turgentes. Por el contrario se observa que la fractura de estos materiales tienen lugar luego de un gran período de deformación, es decir en la región dúctil.

En el caso de muestras con mayor contenido de azúcares se observa un comportamiento zigzagueante antes del punto de fuerza máxima, lo que estaría indicando la presencia de un tejido más quebradizo a pesar de la menor firmeza de estas muestras.

En todos los casos, los parámetros mecánicos obtenidos de las curvas fuerza-deformación fueron, como se ha indicado en la metodología, la fuerza máxima requerida para atravesar la muestra ($F_{m\acute{a}x}$), la deformación en ese punto (d), la pendiente inicial (S_i) de la curva en la zona lineal antes del punto de fractura y el cociente fuerza deformación ($F_{m\acute{a}x}/d$) en el punto de rotura. El pico de fuerza máxima está relacionado

con la resistencia del producto a la fractura o firmeza (Prothon y col., 2001), mientras que la pendiente inicial se relaciona con el módulo de elasticidad o resistencia a la deformación de la muestra, que es una medida de su rigidez. Los valores medios de estos parámetros analizados para las diferentes muestras sometidas a cada uno de los tratamientos se muestran en la **Tabla III.1**.

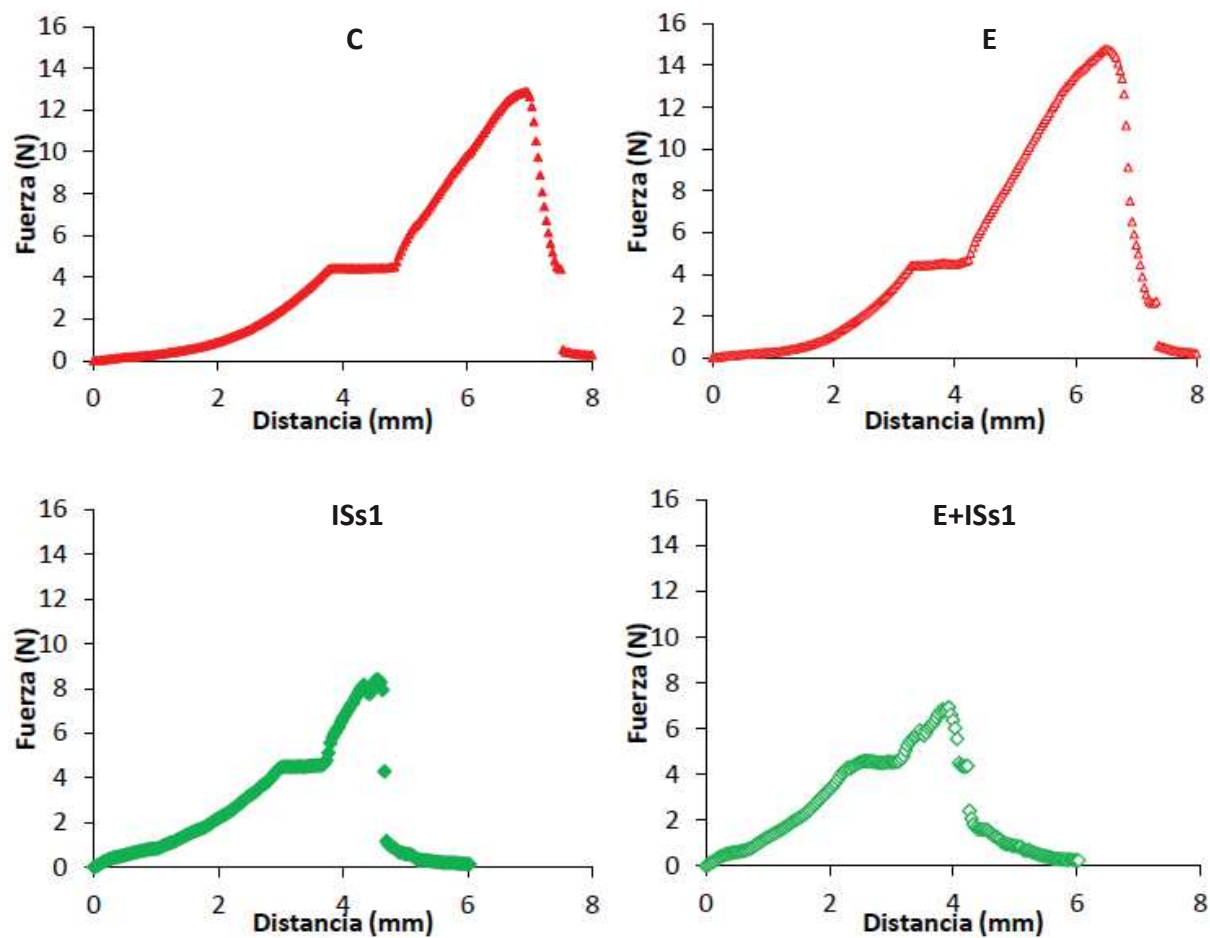


FIGURA III.1. Curvas típicas de fuerza vs distancia obtenidas mediante ensayos de punción en peras deshidratadas. C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$).

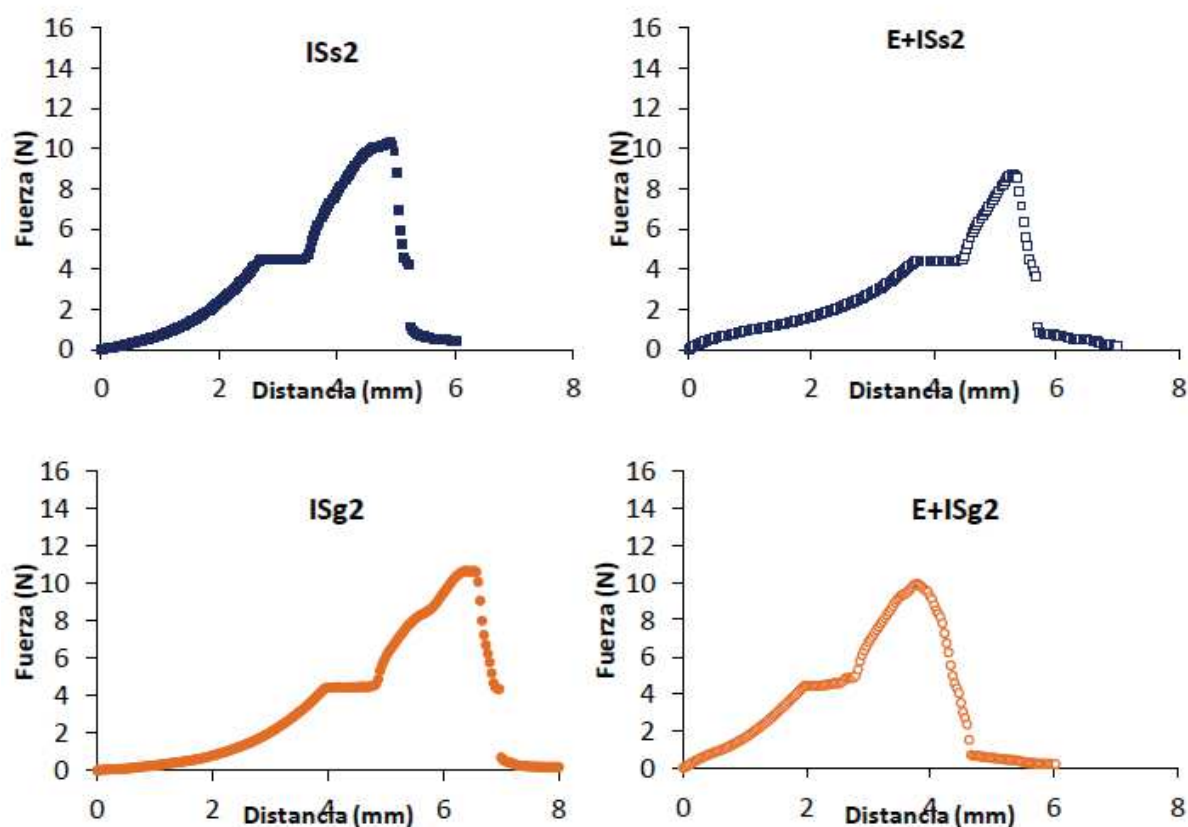


FIGURA III.2. Curvas típicas de fuerza vs distancia obtenidas mediante ensayos de punción en peras deshidratadas. ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

TABLA III.1. Valores medios de fuerza máxima ($F_{m\acute{a}x}$), distancia correspondiente a la fuerza máxima (d), cociente $F_{m\acute{a}x}/d$ y pendiente inicial (S_i) de peras deshidratadas con y sin pretratamiento.

Pretratamiento	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	d (mm)	$F_{m\acute{a}x}/d$ (N/mm)	S_i (N/mm)
C	13,03±1,8 ^e	7,67±0,7 ^e	1,72±0,33 ^a	0,21±0,05 ^a
E	14,05±2,25 ^e	7,71±0,6 ^e	1,84±0,34 ^{ab}	0,19±0,08 ^a
ISs1	8,02±0,91 ^{ab}	4,52±0,47 ^b	1,78±0,22 ^{ab}	1,28±0,33 ^b
E+ISs1	6,59±1,55 ^a	3,06±0,75 ^a	2,21±0,44 ^{bc}	1,7±0,44 ^c
ISs2	10,7±0,66 ^d	5,63±0,79 ^c	1,93±0,23 ^{abc}	0,5±0,23 ^a
E+ISs2	8,36±0,95 ^{bc}	4,53±0,8 ^b	1,91±0,49 ^{abc}	1,03±0,31 ^b
ISg2	10,94±1,29 ^d	6,47±0,57 ^d	1,71±0,26 ^a	0,4±0,19 ^a
E+ISg2	9,77±2,03 ^{cd}	4,32±0,83 ^b	2,33±0,69 ^c	1,1±0,4 ^b

Las diferencias entre los parámetros mecánicos fueron evaluadas mediante un análisis factorial de la varianza, encontrando interacción ($p < 0,05$) entre los factores “escaldado” y “soluto”.

El ANOVA realizado mostró que el escaldado utilizado como único pretratamiento no produjo cambios significativos en las propiedades mecánicas de las frutas deshidratadas a pesar de las disrupciones observadas en las membranas celulares mediante los estudios histológicos y ultraestructurales (**Tabla III.1**).

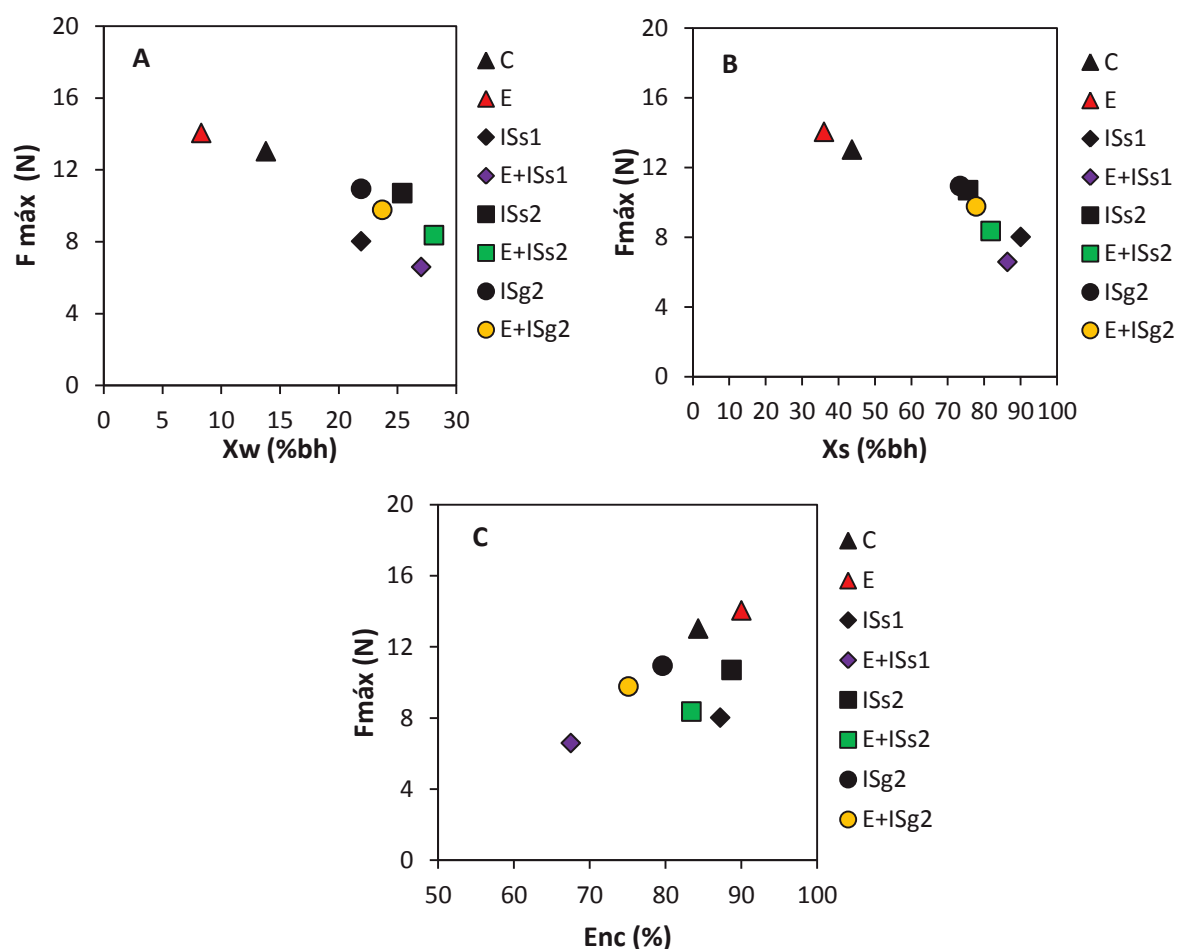


FIGURA III.3. Firmeza de las peras deshidratadas en función de la humedad (A), el contenido de sólidos solubles (B) y el encogimiento (C). C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

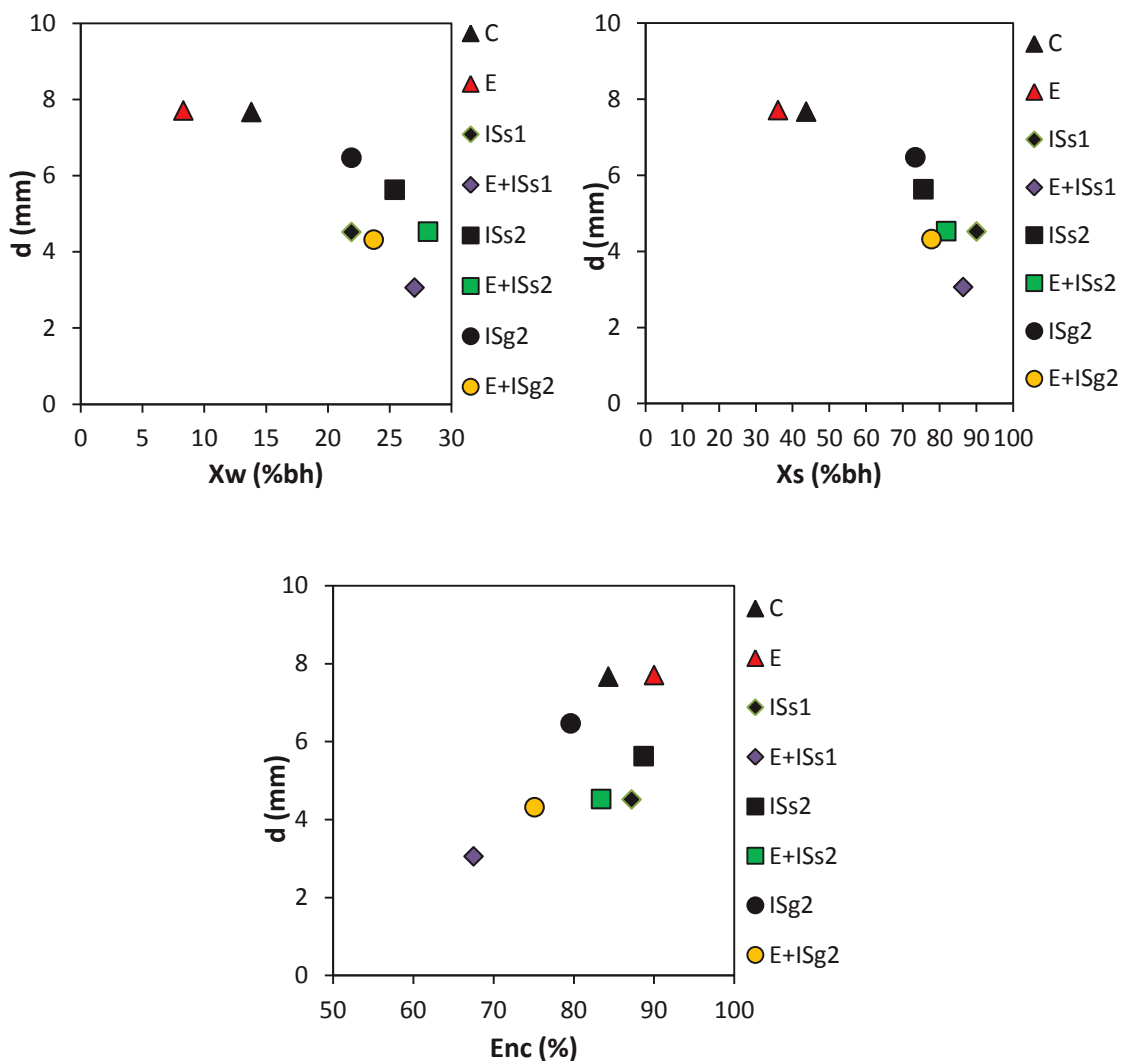


FIGURA III.4. Deformabilidad de peras deshidratadas en función de la humedad (A), el contenido de sólidos solubles (B) y el encogimiento (C). C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

Las frutas con ósmosis previa presentaron una disminución en $F_{m\acute{a}x}$ en comparación con las muestras control y escaldadas, así como también una disminución en la distancia correspondiente a $F_{m\acute{a}x}$ (penetración completa del material). Si bien esto implica que los productos se tornaron menos firmes al mismo tiempo experimentaron una menor deformabilidad, debido fundamentalmente a la concentración de solutos en la muestra.

Tal como puede observarse en las Figuras III.3 y III.4 las frutas pretratadas con infusión con y sin escaldado, si bien presentaron una mayor humedad residual luego del

secado, se produjo un aumento importante en la concentración de sólidos. En las peras ISS2 (menor contenido de azúcares) la disminución en ambos parámetros mecánicos fue menos marcada.

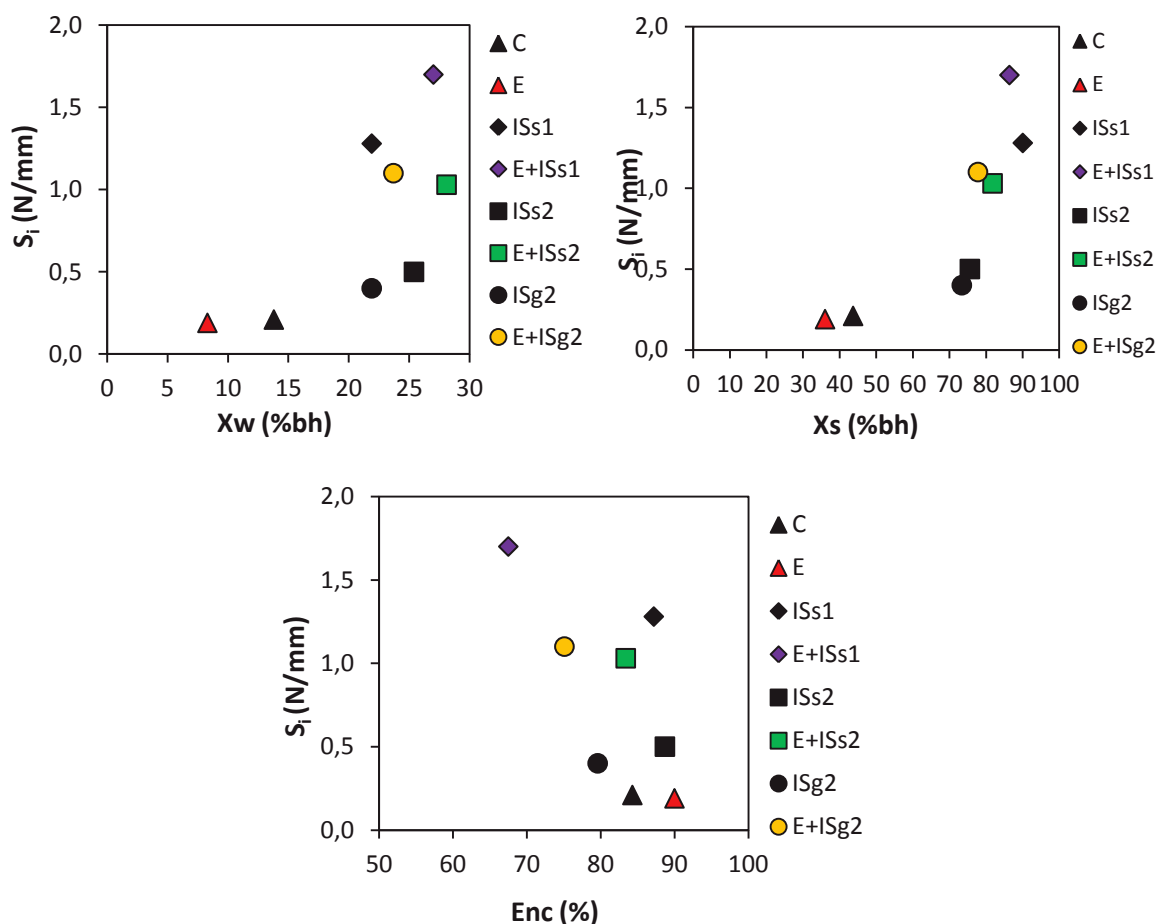


FIGURA III.5. Rigidez de peras deshidratadas en función de la humedad (A), el contenido de sólidos solubles (B) y el encogimiento (C). C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISS1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISS2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISG2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISS1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISS2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISG2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

Varios autores han estudiado los cambios en las propiedades mecánicas de los alimentos durante el secado por convección y, en general, se ha observado que se pasa de un producto más blando (tejido fresco) a un producto rígido (tejido deshidratado). La fuerza y la distancia en el punto de ruptura varían según la humedad final de las muestras. A mayor humedad el producto pierde firmeza y se vuelve más blando debido al efecto plastificante del agua (Keqing, 2004). En cambio a menor humedad, el producto se vuelve más firme (mayor $F_{m\acute{a}x}$) y la fuerza máxima tiene lugar normalmente a una

menor distancia, es decir se pasa de un comportamiento predominantemente plástico a un comportamiento más elástico (Telis y col., 2005). Cuando se utiliza una deshidratación osmótica como pretratamiento, que implica ganancia de sólidos, el comportamiento ha sido muy variado. Maltini y col. (1993) utilizaron deshidratación osmótica en diferentes frutas (damascos, durazno, manzana y guinda) y observaron que, en comparación con una simple deshidratación en corriente de aire, la combinación de ambos procesos producía productos más blandos a bajas actividades de agua. Torregiani y Bertolo (2001) observaron que la firmeza de las frutas pretratadas osmóticamente disminuía al aumentar el contenido de sólidos ganados, mientras que la mayor pérdida de agua conducía a un aumento de la misma. Contreras y col. (2005) observaron una mayor firmeza y una mayor resistencia a la deformación en manzanas y frutillas deshidratadas con osmosis previa, atribuyendo esto a la generación de una matriz celular más compacta durante el secado por el incremento en el contenido de azúcares. Sosa y col. (2012) compararon el comportamiento mecánico de manzanas deshidratadas y pretratadas con infusiones similares a las ISS1 e ISS2 de este trabajo, obteniendo productos de menor firmeza ($< F_{m\acute{a}x}$) a menor contenido de azúcares. Las diferencias en los valores de $F_{m\acute{a}x}$ fueron asociadas a diferencias en la porosidad final obtenida como consecuencia de la mayor o menor saturación de espacios intercelulares por penetración de azúcares en la etapa de infusión. Según estos autores en muestras de menor a_w (mayor contenido de azúcares), la mayor saturación de los espacios intercelulares y paredes celulares por penetración de azúcares durante la ósmosis probablemente haya conducido a una matriz celular de menor porosidad conduciendo esto a un producto de mayor firmeza luego del secado posterior. Sin embargo estos autores no determinaron parámetros asociados a la deformabilidad de las muestras.

Otros autores como Mandala y col. (2005) obtuvieron un comportamiento distinto según el soluto utilizado; con glucosa observaban un aumento de la firmeza y con sacarosa una disminución. En las peras de este trabajo no se observaron diferencias significativas en los valores de $F_{m\acute{a}x}$ entre las muestras tratadas con diferente soluto a un mismo a_w (ISS2 e ISG2), a pesar del menor encogimiento de muestras con glucosa (**Figura III.3C**) lo que denota el efecto preponderante de la concentración de soluto sobre la resistencia a la ruptura de estos tejidos.

En relación a las pendientes de la curva fuerza-deformación, si bien no se observaron diferencias significativas en los valores de $F_{m\acute{a}x}/d$ entre los distintos

tratamientos, se observó que el tratamiento osmótico produjo un aumento notable en la pendiente inicial S_i (**Tabla III.1**) lo que, conjuntamente con la menor distancia “d”, indicaría una mayor resistencia a la deformación de muestras pretratadas en relación a las muestras control y escaldadas, sobre todo en las peras ISs1, las cuales presentaron un mayor contenido de azúcares y un encogimiento importante, lo que puede verificarse en la **Figura III.5B** y **III.5C**. Las diferencias fueron aún mayores en muestras que habían recibido un escaldado previo, lo que estaría indicando una mejora del producto desde el punto de vista de la textura al utilizar un pretratamiento combinado, lo que fue corroborado posteriormente luego del análisis sensorial realizado (ver **Capítulo VII**).

Como ya se ha comentado previamente, durante el secado convectivo entre las distintas modificaciones que pueden producirse en las frutas, puede ocurrir la formación de una costra por concentración superficial de azúcares, siendo este fenómeno aún mayor cuando se utiliza una deshidratación osmótica previa. Este fenómeno sumado a la generación de una matriz celular más compacta durante el secado, explicaría (al menos parcialmente) las diferencias observadas en el comportamiento mecánico de las peras secadas en corriente de aire con azúcares incorporados (ISs1, ISs2 e ISg2) en relación a las muestras control (ver datos de **Tabla I.1** del **Capítulo I**). Adicionalmente la solubilización de las pectinas de la pared celular a lo largo del tiempo de deshidratación osmótica podría estar influyendo en la desunión celular y en el incremento del peso molecular promedio de los compuestos solubles de la fruta. Esto también contribuye, luego de la deshidratación posterior, a la aparición de una estructura celular más homogénea.

El escaldado combinado con ósmosis produjo un aumento más importante en los valores de S_i y una mayor disminución en la distancia correspondiente a la F_{max} , con respecto a las muestras sólo osmotizadas, lo que podría relacionarse con una distribución más homogénea de los azúcares en el tejido y con la presencia de paredes celulares más resistentes debido a la absorción de azúcares, como ya se ha comentado en el ítem II.4 del **Capítulo II** al analizar la microestructura de las frutas luego de los pretratamientos.

Caracterización ultraestructural de los tejidos de pera luego de los diferentes procesos de secado

La **Figura III.6** presenta las micrografías obtenidas por MEB luego de la etapa de secado tanto en muestras con pretratamiento como en muestras sin pretratamiento.

Puede observarse que las células de la pera control (C) se muestran más irregulares en los contornos de la pared (**Figura III.6A**). El tejido ha colapsado, lo cual puede verificarse claramente en las imágenes de los productos presentadas en la **Figura I.1B** del **Capítulo I**. Las muestras pretratadas con infusión presentan una menor disrupción general del tejido en comparación con las muestras sin pretratamiento. Las células presentan formas más redondeadas, hay un mayor contacto célula-célula (**Figuras III.6B-D**) y a mayores aumentos se observa que las paredes resultan más reforzadas (**Figuras III.7C-D**) lo que explicaría la mayor resistencia a la deformación de estas muestras durante los ensayos de punción realizados. En muestras con escaldado previo (**Figuras III.6F-H**), si bien las micrografías exhiben un tejido con células más deformadas y mayor plegamiento de paredes celulares, no se observan grandes diferencias en el patrón de deformación en comparación con las muestras control. Los tratamientos térmicos en frutas porosas conducen normalmente a una mayor compactación del tejido, sin embargo este comportamiento no se ha observado en las peras de este trabajo según lo analizado en el **Capítulo II**. Cuando el tejido es poco poroso como en la pera (Salvatori y col., 1998) y las células están dispuestas en un arreglo denso, la respuesta estructural del tejido se ve afectada por la falta de volumen suficiente para mitigar el estrés provocado por la pérdida de agua de la célula (Chiralt, A. y Talens, P., 2005). De esta manera, aún disminuyendo el contacto célula-célula, con ruptura de membranas celulares y desorganización del citoplasma, se observa una mayor conservación del arreglo y el tamaño de las células en comparación con la fruta control. Por otro lado, las paredes celulares se observan reforzadas (**Figuras III.8A-D**), con una distribución de los azúcares visiblemente ubicados en el volumen intracelular como puede observarse en la **Figura III.8D**.

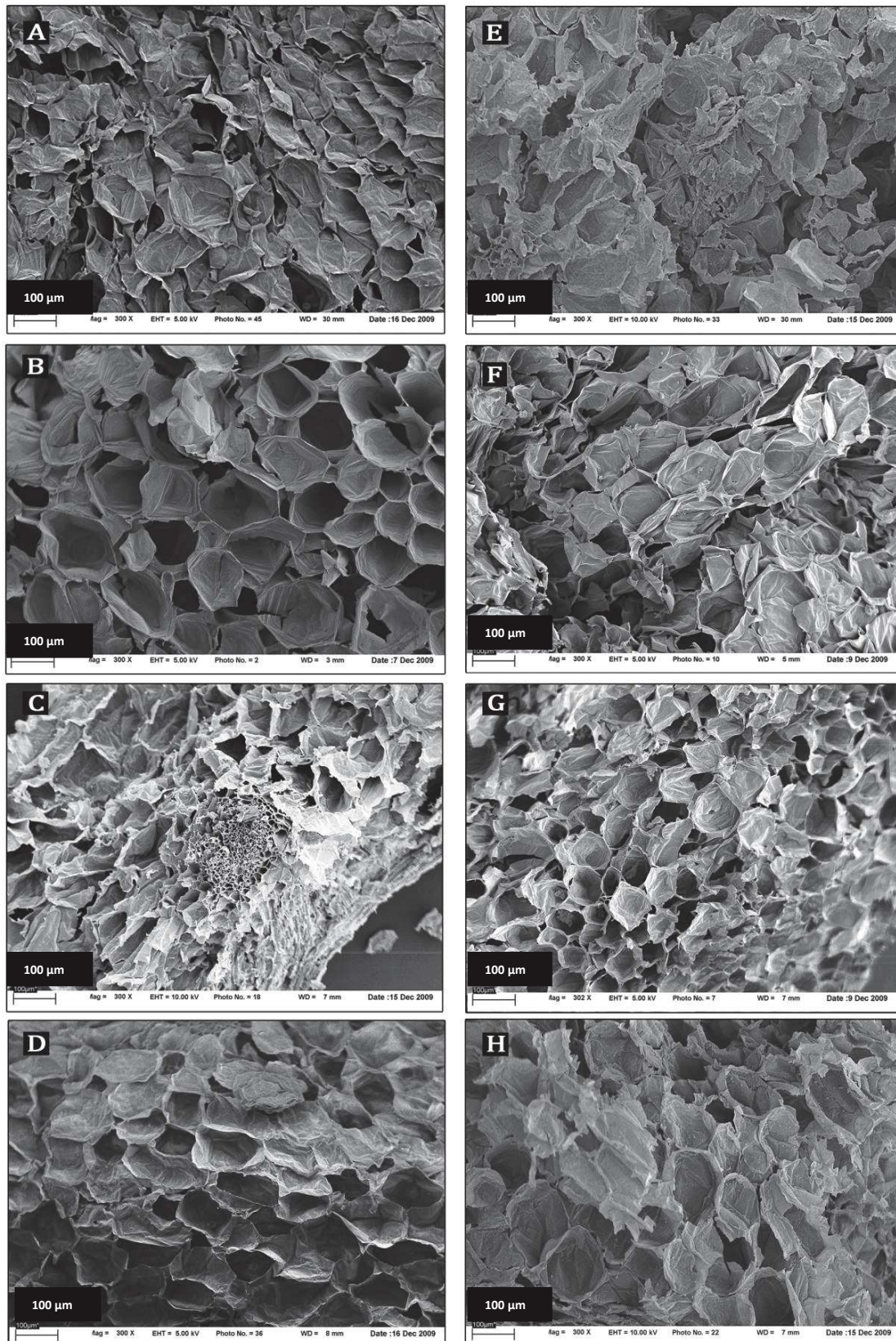


Figura III.6. Caracteres ultraestructurales de peras deshidratadas. Fotomicrografías con MEB. A: Control; B: ISs1; C: ISs2; D: ISg2; E: Escaldada; F: E+ISs1; G: E+ISs2; H: E+ISg2.

Resulta evidente que una mayor penetración de los azúcares a través de las paredes celulares durante la infusión, permitió aumentar el efecto protector sobre éstas durante el secado posterior, aportando mayor rigidez a la estructura ($>S_i$) y una menor deformabilidad ($<d$) contribuyendo de esta manera a una mayor preservación del volumen a nivel global en comparación con las muestras sin escaldado previo (**Figura III.4C**).

En muestras con glucosa (ISg2) las paredes se observan algo más delgadas (**Figuras III.6D y III.7C**), lo que justificaría en parte una menor resistencia a la salida de agua durante el proceso de secado en comparación con muestras con sacarosa (ISs2) (ver comparación de cinética de secado en el **Capítulo I**). Sin embargo al comparar el comportamiento mecánico de estas muestras no se detectaron diferencias significativas.

III.3. CONCLUSIONES

Los pretratamientos aplicados afectaron de manera significativa la textura de los productos de pera deshidratados, resultando éstos de menor firmeza pero menor deformabilidad, sobre todo en las muestras que habían recibido un tratamiento combinado de escaldado e infusión con azúcares previo al secado convectivo. Coherentemente con estos resultados durante los ensayos sensoriales realizados posteriormente los jueces detectaron una mayor terneza y una menor masticabilidad en muestras osmotizadas con escaldado previo en relación al resto de las muestras pretratadas.

El análisis de la ultraestructura de los tejidos, tanto luego de los pretratamientos como después del secado convectivo permitió visualizar el rol que cumplen las modificaciones producidas en las paredes celulares, y la distribución de los azúcares en el volumen extra e intracelular sobre el comportamiento mecánico de los productos luego de la deshidratación, confirmando el efecto protector de los mismos sobre la estructura.

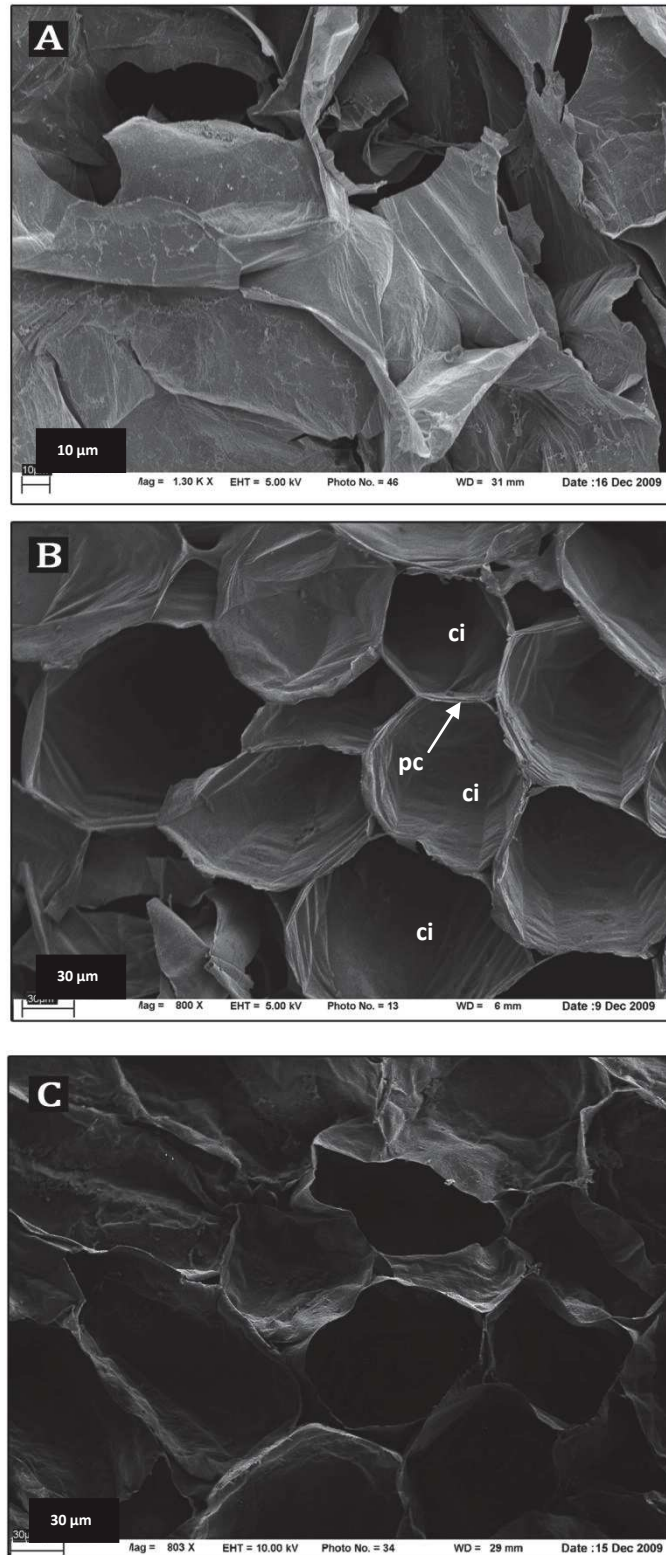


Figura III.7. Caracteres ultraestructurales de peras deshidratadas. Fotomicrografías con MEB mayores aumentos. A: Control; B: ISs1; C: ISg2; ci: citoplasma; pc: pared celular.

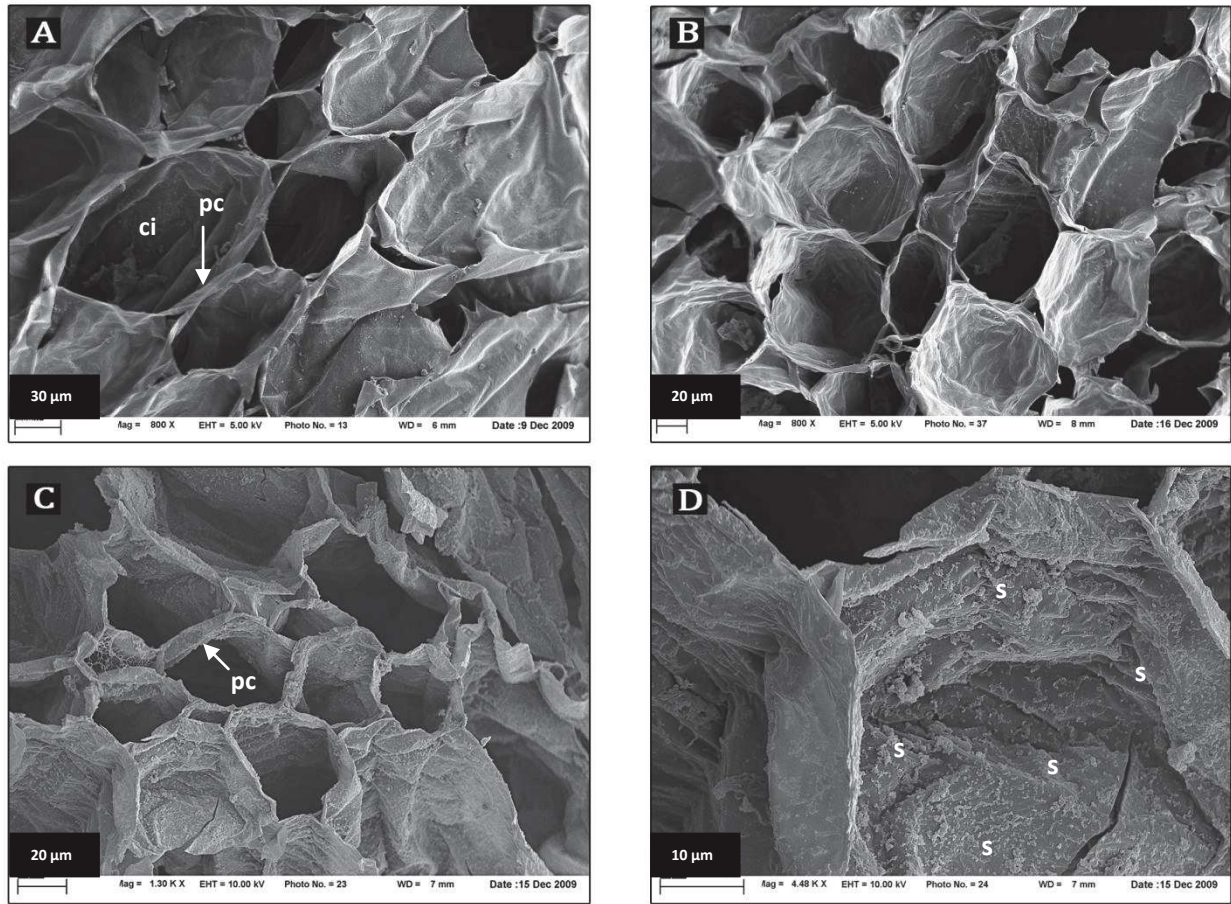


Figura III.8. Caracteres ultraestructurales de peras deshidratadas. Fotomicrografías con MEB a mayores aumentos. A: E+ISs1; B: E+ISs2; C: E+ISg2; D: E+ISg2; pc: pared celular; ci: citoplasma; s: azúcares.

CAPÍTULO IV

Capacidad de rehidratación de peras deshidratadas



IV.1. INTRODUCCIÓN

Una gran parte de los productos comestibles deshidratados requieren ser rehidratados antes de ser consumidos. La rehidratación está influenciada tanto por factores ajenos a la misma (composición del producto, pretratamientos, técnicas y condiciones de deshidratación) como por propios (composición del medio de inmersión, temperatura y condiciones hidrodinámicas) (Oliveira y Ilincanu, 1999). Estos factores inducen cambios en la estructura y en la composición del tejido vegetal (pérdida de integridad de la paredes y membranas celulares, lixiviación de solutos, etc.) que se traducen en un deterioro en las propiedades de reconstitución.

La rehidratación es un proceso complejo dirigido a la restauración de las propiedades de la materia prima cuando el material se seca y entra en contacto con agua, pudiendo ser considerada como una medida de la lesión en el material causada por los procesos de deshidratación aplicados. El objetivo del estudio de la rehidratación es evaluar la capacidad de los tejidos procesados de recuperar su estructura y sus características originales de textura, así como la velocidad a la que tiene lugar la incorporación de agua. La rehidratación no puede entonces entenderse simplemente como el proceso inverso a la deshidratación, dado que no es indiferente al método de secado aplicado y su efecto sobre el material rehidratado no puede ser ignorado (McMinn y Magee, 1997; Lewicki, 1998 a y b; Sanjuan y col., 1999).

Los procesos de deshidratación, especialmente el secado por aire caliente, provocan cambios importantes en las propiedades estructurales y fisicoquímicas de los alimentos, lo que afecta significativamente la calidad del producto final. Particularmente en frutas, cuando el secado convectivo se realiza a temperaturas elevadas o tiempos muy prolongados, los cambios pueden llegar a ser irreversibles reduciéndose la capacidad de rehidratación del producto seco (McMinn y Magee, 1996; Lewicki, 1998a, Lin y col., 1998; Drouzas y col., 1999; Krokida y col., 2000). La utilización de pretratamientos de deshidratación osmótica, si bien contribuyen a un aumento de la retención de factores organolépticos durante el secado posterior, pueden afectar negativamente la rehidratación debido, por un lado, a la disminución de la velocidad de rehidratación de la fruta impregnada y por otro, a la probable reducción de la aceptabilidad del producto por parte de los consumidores (Lenart, 1991; Lenart y Iwaniuk, 1993). A pesar de la importancia de las características de rehidratación de los materiales deshidratados, muy

pocos trabajos se han enfocado en el efecto de las variables de rehidratación como la temperatura y la concentración del medio de rehidratación o en el estudio del transporte de agua y solutos (Mazza y LeMaguer, 1980; Mastrocola y col., 1997; Femenia y col., 2000; Maharaj y Sankat, 2000; Rastogy y col., 2000; Krokida y Marinos-Kouris, 2003; Meda y Ratti, 2005).

Algunos autores consideran que la rehidratación se compone de tres etapas simultáneas: (1) la absorción de agua en el material seco, (2) el aumento de volumen del producto rehidratado, y (3) la pérdida o difusión de los componentes solubles (Lee y col., 2006). Lewicki (1998b) considera la rehidratación como un proceso simultáneo de incorporación de agua y pérdida de sólidos. Por otro lado, la temperatura de rehidratación afecta notablemente la cinética de recuperación del volumen de los productos, dado que la absorción de agua, para un mismo tiempo de procesamiento, normalmente aumenta con el aumento de temperatura. Esto ha sido observado en el rango de 40 a 80 °C para muchas frutas y vegetales, incluyendo, banana, zanahoria, manzana, papa, tomate y pimiento amarillo, rojo y verde (Krokida y Marinos-Kouris, 2003).

Los tratamientos previos al secado, el proceso de secado en sí, y el proceso de rehidratación posterior, producen cambios en la estructura y composición de los tejidos, afectando las propiedades de reconstitución. El grado de rehidratación dependerá por lo tanto del grado de disrupción celular que tiene lugar durante los distintos tratamientos aplicados (Bilbao-Sáinz y col., 2005), de manera que el deterioro de los atributos fisicoquímicos del alimento puede ser también evaluado sobre la base de sus características de rehidratación.

La utilización de modelos matemáticos para describir tanto procesos de deshidratación como de rehidratación es importante para el diseño y la optimización de estas etapas. Los modelos cinéticos han sido muy utilizados para relacionar ciertas variables del proceso con la velocidad de transferencia de agua (Krokida y Marinos-Kouris., 2003; García-Pascual y col., 2005). Un modelo sencillo con el que se ha podido describir la cinética de rehidratación de varios productos alimenticios es el propuesto por Peleg (1988) que consiste en una ecuación no exponencial de dos parámetros. Esta ecuación, que no deriva de leyes físicas, se ha utilizado para describir la mayoría de las curvas publicadas que se aproximan asintóticamente al equilibrio (Palou y col., 1993). Por otro lado, el modelo de Weibull, que describe el proceso como una secuencia de

eventos probabilísticos, ha sido ampliamente aplicado en ingeniería de alimentos, y sugerido para el estudio del fenómeno de rehidratación por varios autores (García-Pascual y col., 2006; Machado y col., 1999; Marabi y col., 2003; Vega-Gálvez y col., 2009).

La descripción matemática de curvas de rehidratación permite mejorar la comprensión del fenómeno de incorporación de agua a la estructura. Resulta interesante no sólo conocer lo rápido que puede absorberse el agua, sino también predecir el tiempo de rehidratación bajo determinadas condiciones experimentales.

De acuerdo a lo planteado, el objetivo de este capítulo del trabajo fue estudiar la velocidad y la capacidad de rehidratación de placas de pera deshidratadas mediante distintas combinaciones de pretratamientos y secado convectivo, así como también evaluar el efecto de la temperatura de rehidratación.

IV.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las **Figuras IV.1** y **IV.2** muestran las placas de pera antes y después de la rehidratación a 25 y 80 °C.

La **Figura IV.3** muestra las cinéticas de rehidratación obtenidas a 25°C y a 80°C expresadas en términos de humedad en base seca (X) versus el tiempo transcurrido hasta alcanzar un plateau o un descenso en la ganancia de peso. Los datos experimentales están representados mediante puntos experimentales y las líneas continuas corresponden a los datos predichos mediante el modelo de Peleg.



FIGURA IV.1. *Imágenes de peras rehidratadas a 25°C.*

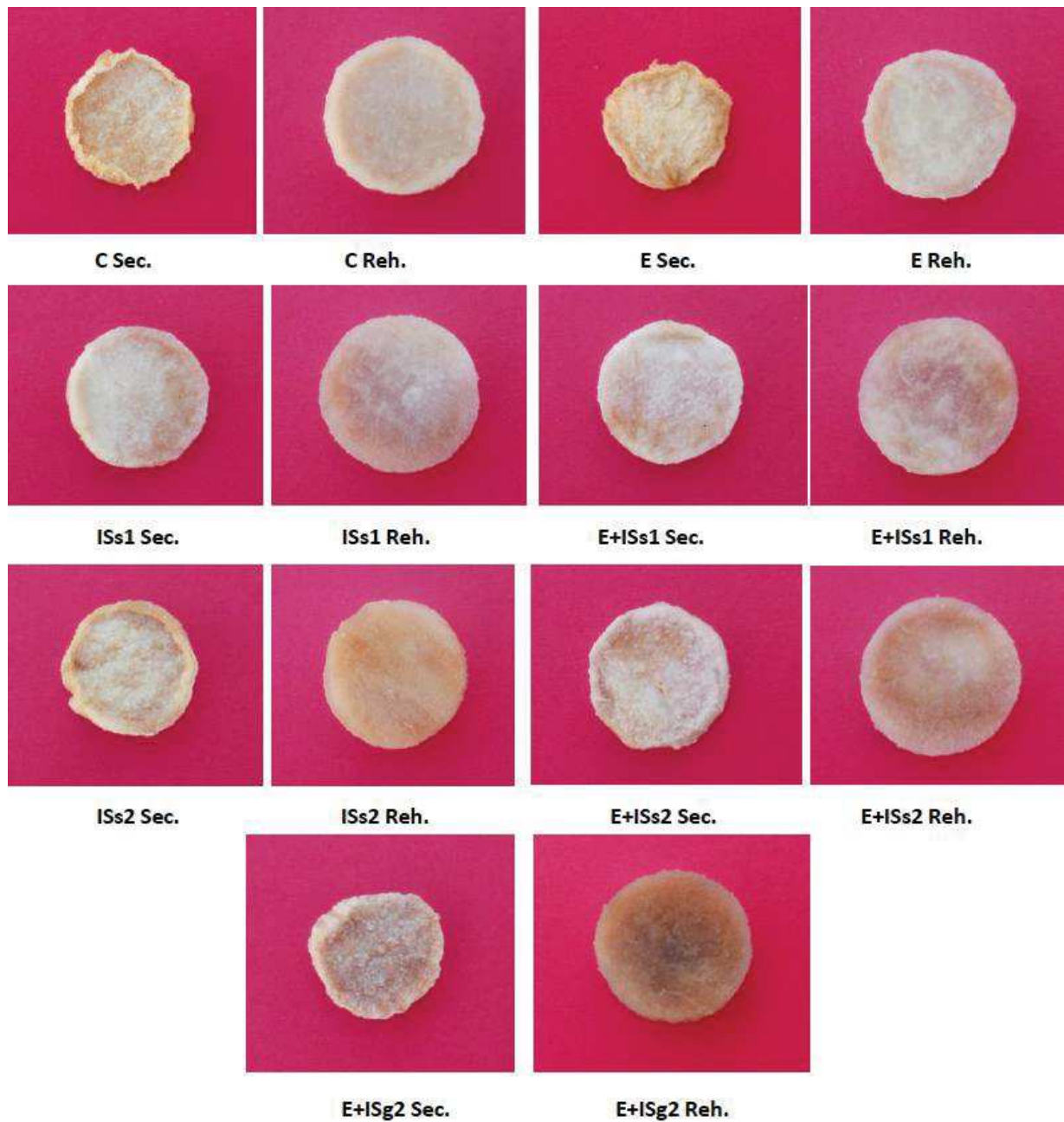


FIGURA IV.2. Imágenes de peras rehidratadas a 80°C.

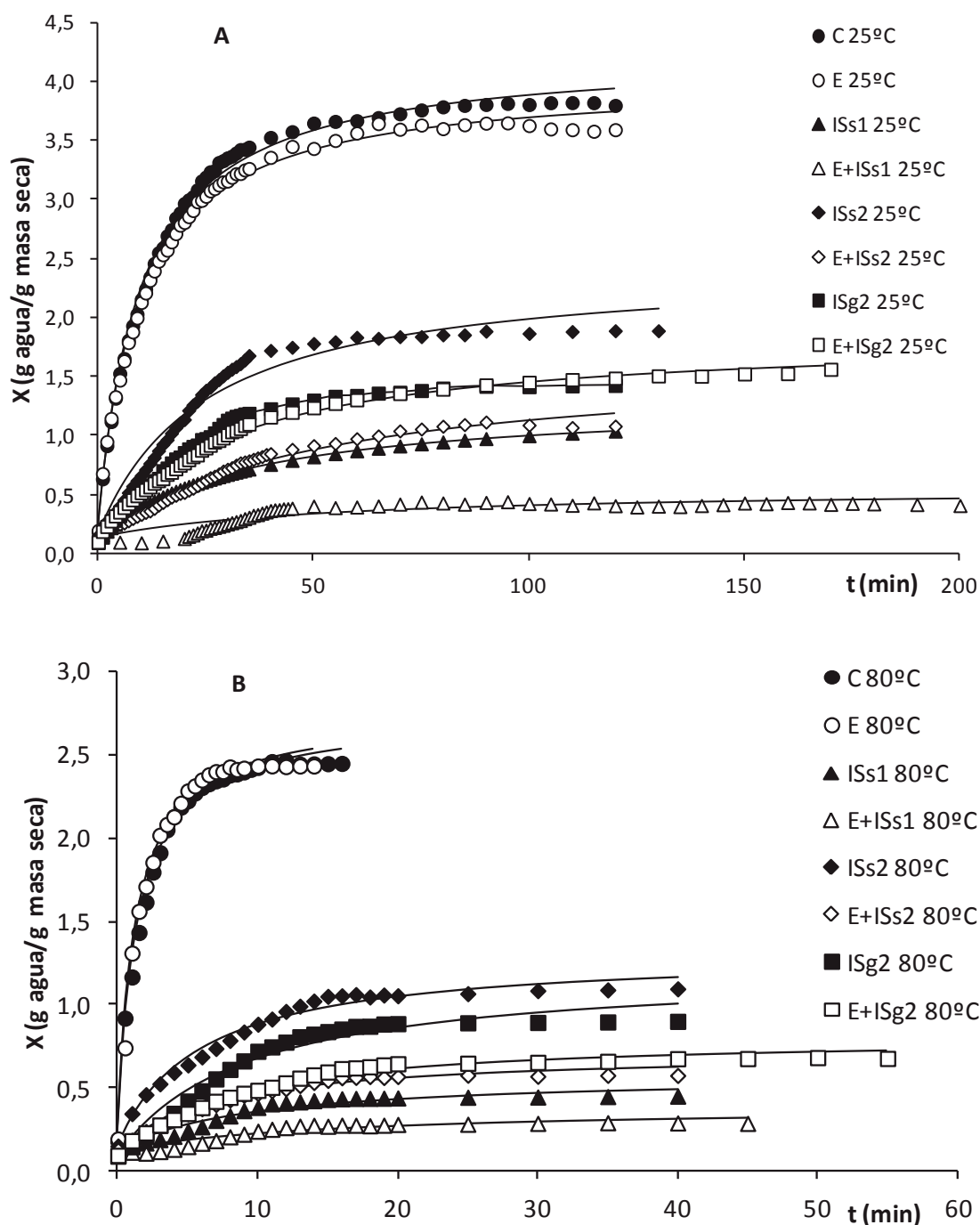


FIGURA IV.3. Humedades experimentales y predichas mediante el modelo de Peleg durante la rehidratación de peras deshidratadas a 25°C (A) y a 80°C (B). C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

Se observó el comportamiento típico de curvas de rehidratación según el cual tiene lugar un aumento del volumen de agua absorbida con el tiempo, observándose tasas de absorción de agua más altas en las etapas iniciales del proceso para luego disminuir

hasta alcanzar el equilibrio (Abu-Ghannam y McKenna, 1997; SanJuan y col., 1999; Resio y col., 2006). En ningún caso se observó que la rehidratación provocase la disgregación de las muestras en el medio de rehidratación. Según Marques y col. (2009), quienes estudiaron la rehidratación de frutas tropicales a 25°C, la rápida velocidad de absorción al principio del proceso es debida probablemente a un mecanismo de capilaridad desde la superficie de la muestra. Con el progreso de la rehidratación, la velocidad disminuye a medida que tanto los capilares como los espacios intercelulares se van llenando de fase líquida. En la primera etapa de rehidratación de las frutas pretratadas, se disuelve la capa superficial de azúcar presente en el producto, lo que hace que la absorción de agua al interior de la fruta sea más difícil. Como resultado, en el inicio de la rehidratación, el agua se mantiene en la superficie, principalmente por la energía de adsorción. Estas fuerzas son menores que para el caso de las frutas deshidratadas sin pretratamiento osmótico, ya que no tienen tanta cantidad de azúcar, lo cual se refleja en la pendiente inicial más abrupta en la velocidad de rehidratación de las peras control con respecto a las muestras pretratadas. Luego de esta etapa inicial, en el transcurso de la rehidratación es principalmente la estructura de la fruta la que determina la cinética de rehidratación y el grado de rehidratación final alcanzado (Lenart, 1991; Agnieszka y Andrzej, 2010; Maldonado y col., 2010).

En general, la temperatura del medio de rehidratación influye en las tasas de rehidratación y en el contenido de humedad de equilibrio, acelerando la incorporación de agua a mayor temperatura (Kader 1995; Abu-Ghannam y McKenna, 1997; Maharaj y Sankat, 2000; García- Pascual y col., 2005). En la **Figura IV.3** se observa que el tiempo necesario para alcanzar el contenido de humedad asintótico de las muestras de pera (X_{ew}) disminuyó con el aumento de la temperatura de rehidratación, siendo las temperaturas más altas (80°C) más eficaces para llegar a la máxima capacidad de rehidratación de las muestras en tiempos más cortos. Sin embargo las muestras rehidratadas a 25°C alcanzaron valores finales de rehidratación más elevados.

A las dos temperaturas de trabajo, las muestras control (C) y sólo escaldadas (E) presentaron un mayor velocidad de rehidratación e incorporaron una mayor cantidad de agua en el equilibrio que el resto de las muestras pretratadas. Las muestras ISS1 presentaron una cinética más lenta debida fundamentalmente a la presencia de una matriz celular más compacta por concentración de azúcares, principalmente en zonas cercanas a la superficie, lo que incrementó la resistencia al transporte de agua. En

muestras con menor contenido de azúcares (condiciones ISs2, ISg2), se observó un aumento en la velocidad de absorción de agua durante la rehidratación. Las muestras previamente escaldadas y osmotizadas (sobre todo las muestras E+ISs1) presentaron una menor velocidad de rehidratación en comparación con las peras sólo osmotizadas. Este comportamiento se debe a las diferencias estructurales que presentaron los tejidos con escaldado previo luego del secado, en los cuales se observó una distribución más homogénea de los azúcares aportando mayor rigidez a la estructura celular. A 25°C sólo las peras control y escaldadas alcanzaron el equilibrio luego de 30 min, mientras que el resto de las muestras necesitaron entre 60-80 min de rehidratación. Las muestras C y E presentaron cinéticas muy similares a ambas temperaturas. A 80°C no se observaron diferencias importantes entre muestras pretratadas con infusión seca (ISs e ISg). Las muestras C y E se rehidrataron completamente en un corto período de tiempo, mientras que el resto de las muestras pretratadas necesitaron un tiempo algo mayor, alcanzando un valor constante de humedad a los 30 min. De acuerdo a las cinéticas obtenidas, resulta evidente que en estos materiales, las distintas etapas de procesamiento, es decir los pretratamientos, el secado y la rehidratación en sí, produjeron cambios significativos en la estructura y en la composición de los tejidos, afectando la capacidad de reconstitución de los materiales.

El modelo de Peleg (**Figura IV.3**), si bien permitió describir la cinética de rehidratación con valores de coeficientes de determinación $R^2 \geq 0,96$ en la mayoría de las condiciones experimentales, no parece predecir adecuadamente el contenido de agua en los estadios finales del proceso de rehidratación, sobre todo a 25°C, conduciendo a valores de equilibrio siempre mayores que los experimentales. Se verifica a través del análisis de los parámetros del modelo, que a 25°C las muestras C y E presentaron una mayor velocidad de captación de agua en los primeros minutos ($>1/k_1$) en comparación con las pretratadas (**Tabla IV.1**), las cuales se vieron fuertemente afectadas por el escaldado previo, excepto en infusiones con glucosa. El incremento de temperatura a 80°C provocó una disminución en todos los parámetros k_1 , lo que implica una mayor velocidad de incorporación inicial de agua. Sin embargo estas muestras experimentaron una menor rehidratación final.

TABLA IV.1.: Parámetros del modelo de Peleg (k_1 y k_2) y errores de las estimaciones correspondientes a las cinéticas de rehidratación a 25°C y a 80°C de peras deshidratadas.

Pretrat.	PARÁMETROS DE LA REGRESIÓN				
	REHIDRATACIÓN 25°C				
	k_1	k_2	R^2	χ^2	RMSE
C	2,4 ^a (0,13)	0,3 ^a (0,01)	99,2	0,0063	0,08
E	2,2 ^a (0,14)	0,3 ^a (0,003)	99,5	0,0041	0,06
ISs1	27 ^c (1)	0,8 ^d (0,02)	95,7	0,0034	0,06
E+ISs1	189 ^e (35,59)	2,2 ^e (0,11)	79,3	0,0024	0,05
ISs2	11,9 ^b (0,85)	0,42 ^b (0,02)	96,4	0,0115	0,107
E+ISs2	38,2 ^d (2,64)	0,6 ^c (0,03)	98,5	0,0013	0,04
ISg2	14,2 ^b (0,73)	0,6 ^c (0,01)	98,2	0,0032	0,06
E+ISg2	16 ^b (1)	0,6 ^c (0,02)	99,1	0,0013	0,04

Pretrat.	PARÁMETROS DE LA REGRESIÓN				
	REHIDRATACIÓN 80°C				
	k_1	k_2	R^2	χ^2	RMSE
C	0,6 ^a (0,02)	0,4 ^a (0,02)	98,8	0,0041	0,06
E	0,5 ^a (0,02)	0,4 ^a (0,01)	99,1	0,0030	0,06
ISs1	21,5 ^c (0,52)	2,1 ^d (0,06)	93,6	0,0010	0,03
E+ISs1	61 ^d (5,1)	4,5 ^e (0,3)	81,2	0,0009	0,03
ISs2	5,6 ^{a,b} (0,38)	0,82 ^a (0,03)	97,6	0,0019	0,04
E+ISs2	13,6 ^{b,c} (0,58)	1,5 ^{c,d} (0,1)	97,4	0,0006	0,02
ISg2	7,8 ^{a,b} (0,21)	0,92 ^{a,b} (0,05)	95,9	0,0029	0,05
E+ISg2	10,9 ^b (0,53)	1,4 ^{b,c} (0,02)	96,2	0,0012	0,03

Los valores entre paréntesis indican el error estándar de las medias. En cada columna, las medias con el mismo superíndice no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$).

Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en la constante de capacidad de Peleg, k_2 , relacionada con la asíntota de las curvas, siendo las E+ISs1 las muestras que alcanzaron valores significativamente mayores que el resto. También se observó en dichas condiciones una menor velocidad de rehidratación inicial para ambas

temperaturas de rehidratación. Las muestras C y E presentaron los menores valores de k_2 a 80°C, mientras que las E-ISs1 exhibieron los valores más altos.

La **Figura IV.4** muestra las cinéticas de rehidratación a 25°C (A) y a 80°C (B) predichas mediante el modelo de Weibull y en la **Tabla IV.2** se muestran los valores de los parámetros α y β característicos. El parámetro α no se vio afectado por el aumento de la temperatura en la mayoría de las muestras, mientras que β disminuyó considerablemente. Un comportamiento similar fue reportado por Machado y col. (1999), Cunningham y col. (2007) y García-Pascual y col. (2006) para cereales de desayuno, pasta, y hongos, respectivamente.

A 80 °C se redujeron considerablemente tanto los valores de β como de X_{ew} , con diferencias menos marcadas entre muestras pretratadas con infusión, lo que indica que, a pesar de la mayor velocidad de rehidratación inicial de los materiales a temperaturas elevadas, a lo largo del tiempo estos redujeron su capacidad de retener agua (menor X_{ew}). Meda y Ratti (2005) interpretaron los resultados de rehidratación obtenidos por Marabi y col. (2003) utilizando el modelo de distribución de Weibull y concluyeron que en productos con alta porosidad (por ejemplo liofilizados), la capilaridad controla la transferencia de masa, mientras que para los productos con baja porosidad (los que se obtienen por secado convectivo) la difusión es predominante. Marabi y col. (2003) sugieren la ecuación de Weibull para predecir satisfactoriamente la incorporación de agua de una gran variedad de alimentos secos, y para describir adecuadamente procesos de rehidratación controlados por diferentes mecanismos incluyendo difusión interna, convección externa y los fenómenos de relajación del material.

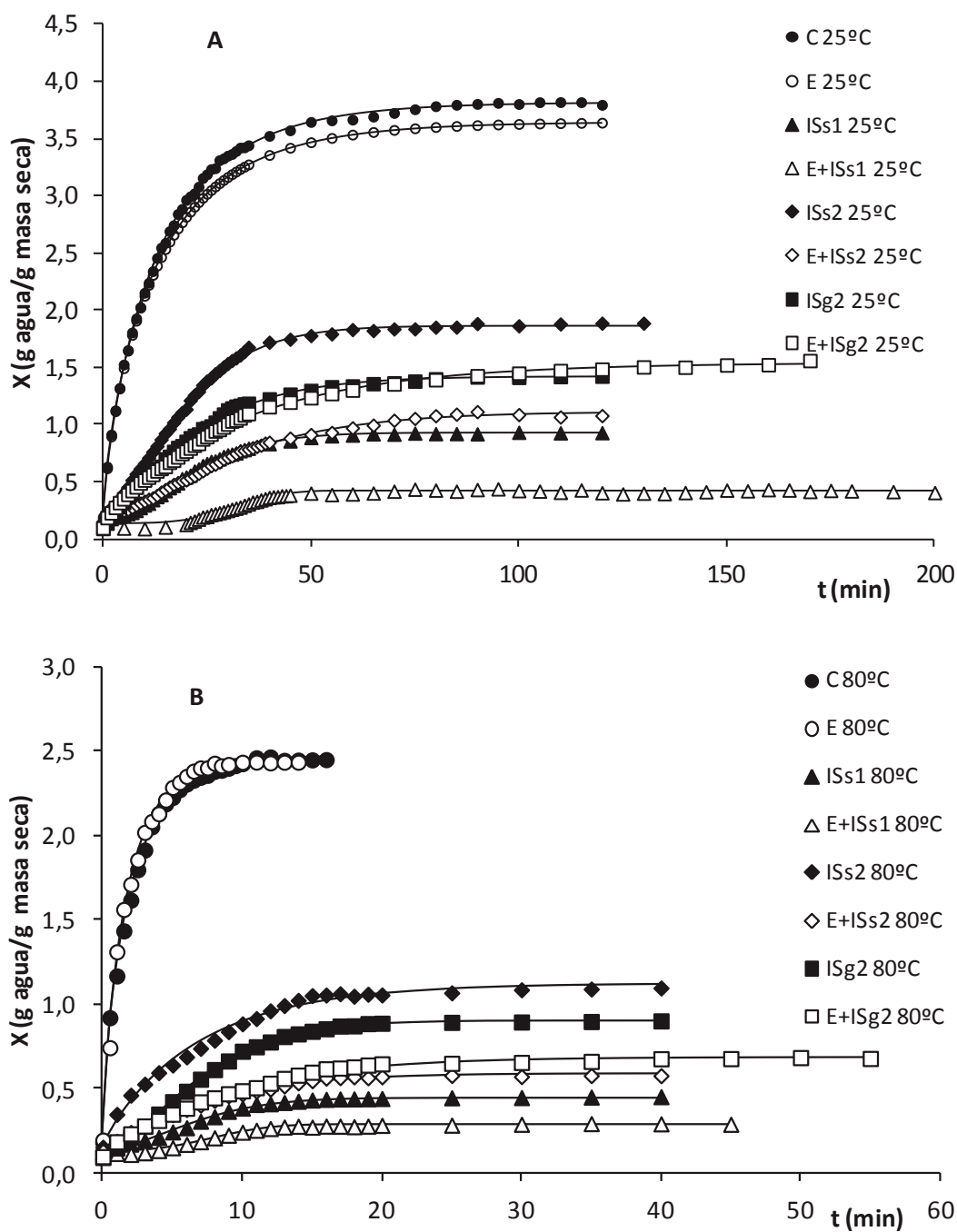


FIGURA IV.4. Humedades experimentales y predichas mediante el modelo de Weibull durante la rehidratación de peras deshidratadas a 25°C (A) y a 80°C (B). C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

TABLA IV.2.: *Parámetros del modelo de Weibull y errores de las estimaciones correspondientes a las cinéticas de rehidratación a 25°C y a 80°C de peras deshidratadas.*

Pretrat.	PARÁMETROS DE LA REGRESIÓN					
	REHIDRATACIÓN 25°C					
	x_{ew}	β	α	R^2	χ^2	RMSE
C	3,8 ^f (0,15)	13,04 ^a (0,14)	0,8 ^{a,b} (0,01)	99,8	1,50E-03	0,04
E	3,7 ^f (0,06)	12,02 ^a (0,47)	0,8 ^a (0,02)	99,9	1,10E-03	0,03
ISs1	1 ^b (0,02)	24 ^b (0,81)	1,5 ^d (0,08)	99,7	2,00E-04	0,014
E+ISs1	0,4 ^a (0,01)	39 ^c (1,89)	4 ^e (0,18)	97,6	2,20E-04	0,015
ISs2	2 ^e (0,03)	23,1 ^b (1,45)	1,4 ^d (0,01)	99,7	9,98E-04	0,03
E+ISs2	1,2 ^{b,c} (0,03)	38,5 ^c (3,47)	1,2 ^{c,d} (0,04)	99,5	4,05E-04	0,02
ISg2	1,5 ^d (0,04)	23 ^b (0,38)	1,14 ^{b,c,d} (0,03)	99,7	5,90E-04	0,02
E+ISg2	1,5 ^{c,d} (0,04)	28 ^b (2,03)	0,9 ^{a,b,c} (0,01)	99,4	8,05E-04	0,03

Pretrat.	PARÁMETROS DE LA REGRESIÓN					
	REHIDRATACIÓN 80°C					
	x_{ew}	β	α	R^2	χ^2	RMSE
C	2,6 ^e (0,11)	2 ^a (0,14)	0,9 ^a (0,06)	99,7	1,11E-03	0,03
E	2,5 ^e (0,05)	1,8 ^a (0,10)	0,8 ^a (0,02)	99,6	1,30E-03	0,04
ISs1	0,5 ^{a,b} (0,0049)	8,03 ^{b,c} (0,22)	1,7 ^b (0,06)	99,4	9,30E-05	0,01
E+ISs1	0,3 ^a (0,01)	9,1 ^c (0,24)	3,5 ^c (0,34)	98,8	2,60E-05	0,01
ISs2	1,15 ^d (0,04)	7,36 ^b (0,32)	1 ^a (0,04)	98,9	9,60E-04	0,03
E+ISs2	0,6 ^b (0,02)	8,2 ^{b,c} (0,50)	1,2 ^{a,b} (0,03)	99,5	1,30E-04	0,01
ISg2	0,9 ^c (0,04)	7,5 ^b (0,30)	1,4 ^{a,b} (0,04)	99,9	9,00E-05	0,01
E+ISg2	0,7 ^b (0,02)	8,15 ^{b,c} (0,31)	1,2 ^{a,b} (0,10)	99,7	1,01E-04	0,01

Los valores entre paréntesis indican el error estándar de las medias. En cada columna, las medias con el mismo superíndice no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$).

Los coeficientes de correlación obtenidos ($> 0,99$ en la mayoría de los casos), así como los errores utilizados para evaluar la bondad de las estimaciones (χ^2 y RMSE), mostraron un mejor ajuste de los datos experimentales con el modelo de Weibull, el cual permitió predecir con mayor exactitud la humedad de las placas de pera durante la rehidratación en todo el intervalo de tiempo considerado.

De acuerdo a los parámetros obtenidos a partir de los dos modelos aplicados (**Tablas IV.1 y IV.2**), tanto el parámetro de velocidad (β) del modelo de Weibull como la constante de velocidad del modelo de Peleg (k_1), evolucionaron de manera inversamente proporcional a la temperatura de rehidratación aplicada.

Para poder cuantificar la rehidratabilidad de las muestras, tal como se ha explicado en la sección 3.8 de Materiales y Métodos, se utilizó el coeficiente CR calculado a los 10 min, 30 min y al final de la rehidratación. Dicho coeficiente representa la capacidad de la muestra seca de absorber agua. La **Figura IV.5** muestra la capacidad de rehidratación tanto a 25°C (**Figura IV.5A**) como a 80°C (**Figura IV.5B**). Puede observarse a 25°C que a los 10 min de rehidratación las muestras todavía conservan la capacidad de absorber agua, sobre todo las muestras control y las sólo escaldadas. Sólo las muestras pretratadas con sacarosa (sobre todo las E+ISs1) prácticamente alcanzaron la máxima rehidratación posible (CRf) a ese tiempo. Esto estaría indicando que a pesar de que estas muestras presentaron un tejido con una estructura aparentemente mejor preservada luego del secado, ello no implica que la integridad celular no se haya afectado, dando lugar a una pérdida de textura durante la rehidratación posterior y disminuyendo la capacidad de retención de agua del tejido. A 80°C se verifica que las muestras C y E presentaron un comportamiento similar frente a su capacidad de absorber agua (CR10min = CRf), mientras que el resto de las muestras pretratadas, todavía conservan (aunque muy leve) una cierta capacidad residual (**Figura IV.5B**).

A ambas temperaturas, la condición E+ISs1 fue la que se diferenció significativamente del resto de las condiciones, tanto a los 10 minutos como al final del proceso. Por otro lado, se verifica a 25°C una mayor capacidad de rehidratación total que a 80°C en todas las muestras. Estudios realizados con mango (Maldonado y col., 2010) sobre la variación en el comportamiento de rehidratación con la temperatura indicaron que un aumento de 25 a 40°C mejoraba la eficiencia con mínima pérdida de sólidos, siendo mayor al comienzo del proceso y poco significativa en condiciones cercanas a la saturación. Por encima de 60°C la eficiencia disminuía debido al daño celular causado por calor. Experiencias realizadas con otras frutas como manzana, banana y tomate, han demostrado que un aumento de 25 a 40°C provoca no sólo un aumento en la absorción de agua sino también la pérdida de sólidos de los tejidos (Krokida y Marinos-Kouris, 2003). Estudios realizados con brócoli (Femenia y col., 2000) también mostraron para un intervalo de temperaturas de rehidratación entre 20-

80°C, una mayor capacidad de rehidratación a temperaturas bajas. Según estos autores, la capacidad de absorción de agua está relacionada con el contenido total de polisacáridos pécticos presentes en la pared celular de los tejidos, en concreto con las cadenas de pectina formadas por arabinosa, y con el efecto de la temperatura de rehidratación sobre la actividad de las enzimas pécticas.

En este trabajo la capacidad de rehidratación de los distintos materiales obtenidos puede verse disminuida debido a la combinación de distintos factores que afectan la habilidad de la estructura para absorber agua. Por un lado el encostramiento superficial desarrollado durante el secado dificulta la rehidratación posterior, lo que pudo observarse principalmente en muestras con un mayor contenido de azúcares. A mayor temperatura, este fenómeno condujo a una menor CR final debido a la mayor desorganización estructural por efecto del calor, que en las capas más externas condujo probablemente a una mayor pérdida de sólidos. Por otro lado, la capacidad de muchos alimentos para absorber agua está relacionada con su composición química. Las pectinas, hemicelulosas y celulosa, que son los principales componentes del tejido celular, forman enlaces con el agua, y es sabido que durante la ósmosis puede tener lugar el debilitamiento de paredes celulares por solubilización y depolimerización de estos componentes (Alzamora y col., 2000). Sin embargo en este trabajo no se observó una alteración importante de las paredes celulares luego de los pretratamientos, aún en las condiciones que incluían un escaldado previo. Pero el debilitamiento de paredes celulares puede ser también una consecuencia de las altas temperaturas a las que es sometido el tejido durante la rehidratación, contribuyendo de esta manera a la desintegración de las mismas. Según Femenia y col. (2000) la degradación química de las pectinas, inducida por el calor generado en los tratamientos, influye en la capacidad de absorción y de retención de agua por parte del tejido celular.

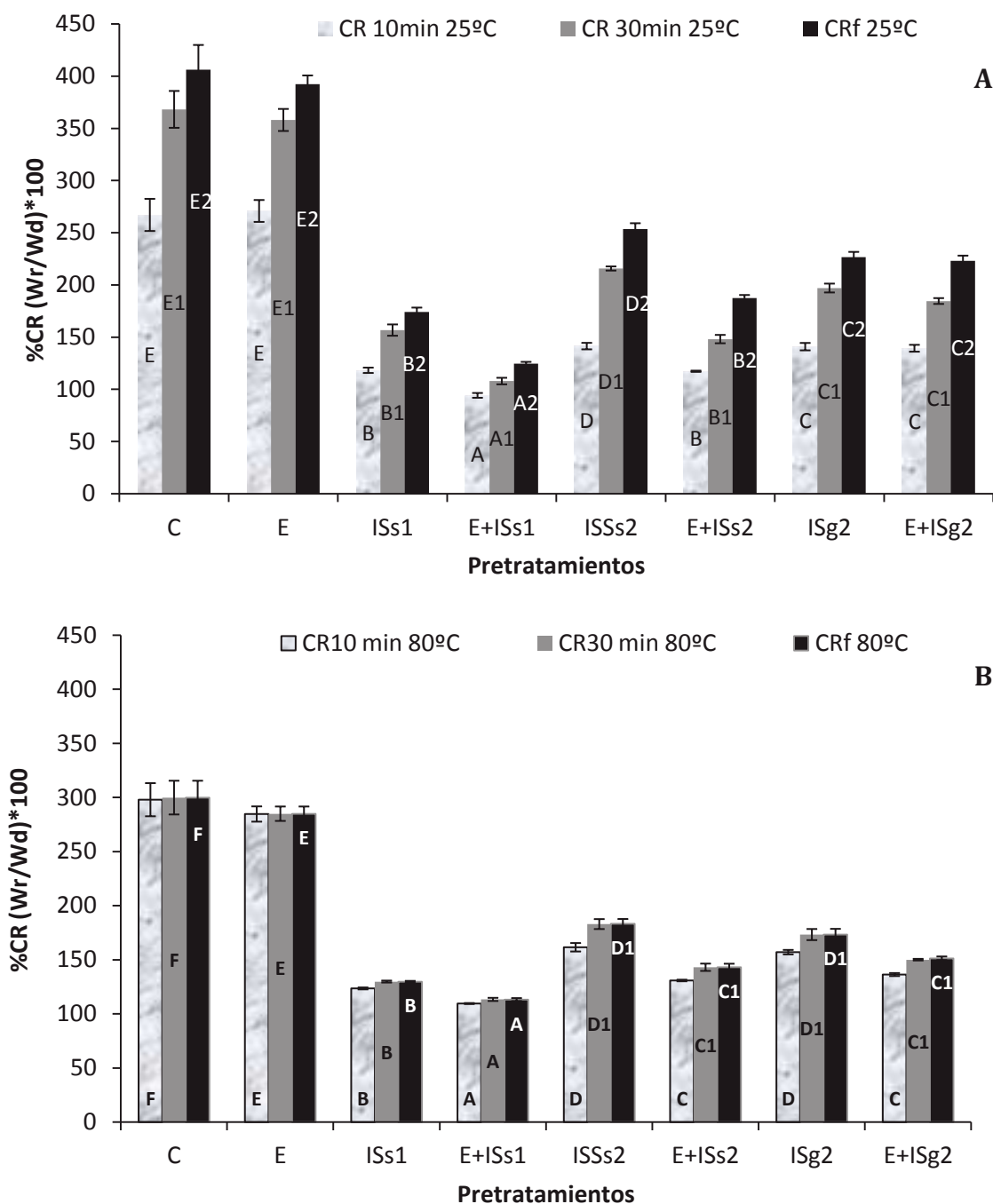


FIGURA IV.5. Capacidad de Rehidratación (CR) a 10 min, 30 min y al final de la rehidratación a 25°C (A) y 80°C (B) de peras deshidratadas. C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$). Los tratamientos con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$). Los números 1 y 2 que acompañan a las letras indican diferencias significativas respecto al tiempo para cada tipo de tratamiento.

Estudios realizados con manzana (Monzón, 2006) mostraron que un menor contenido de protopectina en las muestras deshidratadas con pretratamientos de

impregnación a vacío y en aquellas en las que la temperatura de secado era mayor, eran también las que presentaban una menor capacidad de retención de agua, lo que podría ser indicativo de que las sustancias pécticas podrían estar actuando como un punto activo para la adsorción de agua.

IV.3. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se pueden desarrollar productos diferentes en base a pera deshidratada. Se estudió la rehidratación a 25°C por la posible aplicación de peras incorporadas en un mix de cereales donde se espera una baja velocidad de rehidratación ya que es deseable que la fruta conserve las características del producto deshidratado. La rehidratación a 80°C podría considerarse en la elaboración de una tarta donde se requiere que la fruta se rehidrate rápido y muestre una apariencia más blanda y de fácil desarme en el paladar.

El análisis realizado de la capacidad de rehidratación a un tiempo de 10 min, para ambas temperaturas, mostró que las peras pretratadas E-ISs1, resultarían apropiadas en las aplicaciones donde se requiera baja velocidad de captación de agua. En cambio, las peras secadas control y escaldadas, serían recomendables para procesos a altas temperaturas y corto tiempo, con una significativa incorporación de agua en su estructura final. Si interesara la máxima capacidad de rehidratación posible de las muestras independientemente del tiempo transcurrido, resultaría conveniente la rehidratación a 25°C dado que se obtienen valores de humedad de equilibrio mayores que a 80°C. .

De los dos modelos utilizados para la descripción matemática de la cinética de rehidratación, el modelo de Weibull resultó el más apropiado, dado que permitió predecir con mayor exactitud el comportamiento de las variables analizadas durante la rehidratación tanto en las muestras pretratadas como en las no pretratadas osmóticamente.

Se puede concluir que los pretratamientos aplicados afectaron considerablemente la velocidad y la capacidad de rehidratación de las distintas frutas obtenidas, lo que permitiría contar con productos rehidratados con distintas aplicaciones en la industria alimenticia.

CAPÍTULO V

Influencia de los pretratamientos sobre el color superficial de peras deshidratadas



V.1. INTRODUCCIÓN

Los cambios de color en las frutas implican varios mecanismos y diferentes propiedades, que son dependientes del estado del producto y de su composición específica. La alteración del color está fundamentalmente relacionada con el pardeamiento. Existen dos tipos de pardeamiento, uno enzimático y otro no enzimático. La intensidad del pardeamiento depende de factores como pH, temperatura, actividad de agua y composición del producto. La actividad enzimática puede quedar inhibida si la actividad de agua es suficientemente baja (menor de 0,3). El pardeamiento no enzimático, que involucra a la reacción de Maillard y a la reacción de caramelización, produce la formación de pigmentos de color marrón o negro, melanoidinas y compuestos aromáticos (Hii y Law, 2010), provocando alteraciones importantes en la tonalidad de las frutas sobre todo durante tratamientos a temperaturas elevadas, La reacción de Maillard queda prácticamente inhibida a valores de a_w cercanos al valor de la monocapa y se ve potenciada a valores intermedios de a_w . Este hecho explica el pardeamiento que se observa con frecuencia en alimentos secos y concentrados. Por ejemplo el intervalo de máxima velocidad de pardeamiento en frutas se da para actividades de agua entre 0,65 a 0,75 que corresponden a valores de humedad de muchas frutas deshidratadas que se comercializan.

La pera es un sustrato donde, potencialmente, puede ocurrir la mayoría de los mecanismos de deterioro del color, lo que está relacionado con la cantidad de compuestos fenólicos en el tejido, la presencia de la enzima polifenoloxidasa y también con el elevado nivel de azúcares reductores (Kadam y col., 1995; Khalloufi y Ratti, 2003).

Es sabido que, entre las técnicas de deshidratación, el secado por aire caliente puede causar severos cambios de color en los alimentos, en particular frutas y hortalizas. El pardeamiento que presentan las frutas durante el secado puede ser consecuencia tanto de la acción enzimática que tiene lugar en las primeras etapas del procesamiento antes de la inactivación de la polifenoloxidasa, como de reacciones no enzimáticas de Maillard, las cuales ocurren tanto durante el secado como en el almacenamiento del producto deshidratado (Acevedo y col., 2008). Uno de los objetivos del uso de pretratamientos al secado convectivo es la preservación del color. El uso de una deshidratación osmótica como pretratamiento, tiene como una de las principales ventajas, ya comentadas previamente, la inhibición de la oxidación enzimática (Krokida

y col., 2001; Torreggiani y Bertolo, 2002). La adición de azúcares durante esta etapa, combinada con la de agentes químicos que, además de actuar como antifúngicos y antimicrobianos funcionan como inhibidores de pardeamiento, tanto enzimático como no enzimático, permite el desarrollo de productos de mayor vida útil y con atributos de calidad sensorial más cercano a los de las materias primas de partida, entre ellos el color (Alzamora y Salvatori, 2006). Por otro lado, un escaldado previo al secado no sólo se suele utilizar para inactivar las enzimas responsables de diversas reacciones enzimáticas indeseables (Chiewchan y col., 2010; González-Fesler y col., 2008), sino también permite aumentar la velocidad de secado y por lo tanto reducir el tiempo de proceso (ver **Tabla I.2** y **Figura I.3A** del **Capítulo I**),

La pera es una fruta muy sensible al deterioro del color inducido por las elevadas temperaturas del secado convectivo (Khalloufi y Ratti, 2003), lo que sugiere que es necesaria una diversificación de las tecnologías de deshidratación disponibles para obtener nuevos productos deshidratados que conserven las características cromáticas de las frutas frescas. El objetivo de esta parte del trabajo fue investigar el efecto de los tratamientos de escaldado y/o de infusión seca (IS) previos al proceso de secado en el color superficial de los productos deshidratados obtenidos.

V.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se compararon las variables de color (L^* , a^* y b^*) de los discos de pera luego de los pretratamientos y luego del secado. La fruta fresca presentó las siguientes características cromáticas: $L_0^*=80,8\pm 1,3$, $a_0^*=-2,9\pm 0,7$ y $b_0^*=14\pm 2$. La lectura de estos valores refleja la presencia de una fruta de pulpa clara, de un color opaco blanco-crema y con una leve tonalidad verdosa representada por los valores negativos de a_0^* .

El pardeamiento de una muestra estudiada a través de los cambios de las variables de color L^* , a^* y b^* , está representado principalmente por la pérdida de luminosidad, el desplazamiento de los valores de la coordenada cromática a^* desde el verde hacia el rojo por la producción de pigmentos pardos, además de un aumento en la tonalidad amarilla del material, representada por los incrementos en los valores de la variable b^* . En frutas de color claro como pera y manzana, muchos autores han relacionado el desarrollo de pigmentos pardos principalmente con la disminución del valor de L^* y el aumento del

valor de a^* (Sapers y Douglas, 1987; Monsalve-González y col., 1993; Goupy y col., 1995; Taiwo y col., 2001; Rocha y Morais, 2003; Riva y col., 2005; Gómez y col., 2010; Guiné y col., 2010). Como puede observarse en las **Figuras V.1, V.2 y V.4**, el cambio simultáneo de ambos parámetros resulta un indicador útil del pardeamiento que sufren las peras de este trabajo como resultado de las reacciones enzimáticas y no enzimáticas que tuvieron lugar durante el procesamiento. Se verifica que tanto después de la etapa de infusión como del secado, efectivamente las superficies de las placas de pera perdieron luminosidad tendiendo hacia tonalidades más pardo-rojizas en comparación con las muestras frescas recién cortadas.

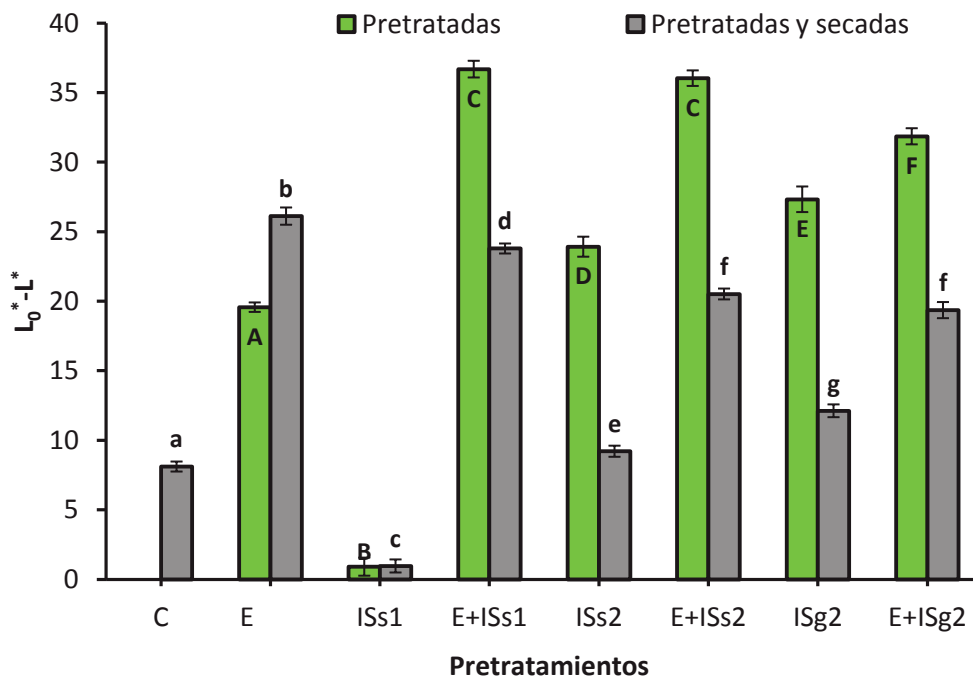


Figura V.1. Cambios de luminosidad ($L_0^* - L^*$) luego de la etapa de pretratamientos y luego del secado en comparación con la fruta fresca. En cada etapa, las barras con la misma letra no presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$). C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

Como era de esperar, se observó un mayor aumento en los valores de a^* (viraje hacia tonos más rojizos) en muestras secadas en comparación con las muestras sólo pretratadas (**Figuras V.2 y V.4**).

Durante los pretratamientos de infusión, las muestras son parcialmente deshidratadas. Sin embargo, debido a la estructura abierta del tejido, como ya se ha comentado antes, tiene lugar la difusión de los azúcares en los espacios intercelulares y en las células externas cortadas. La alta concentración de azúcares en las peras sin escaldado y pretratadas a un $a_w = 0,83$ causó menores alteraciones en el color después de las infusiones que las pretratadas a concentraciones más bajas ($a_w = 0,94$), resultando valores de L^* y de a^* más cercanos a los obtenidos en frutas frescas (**Figuras V.1 y V.2**).

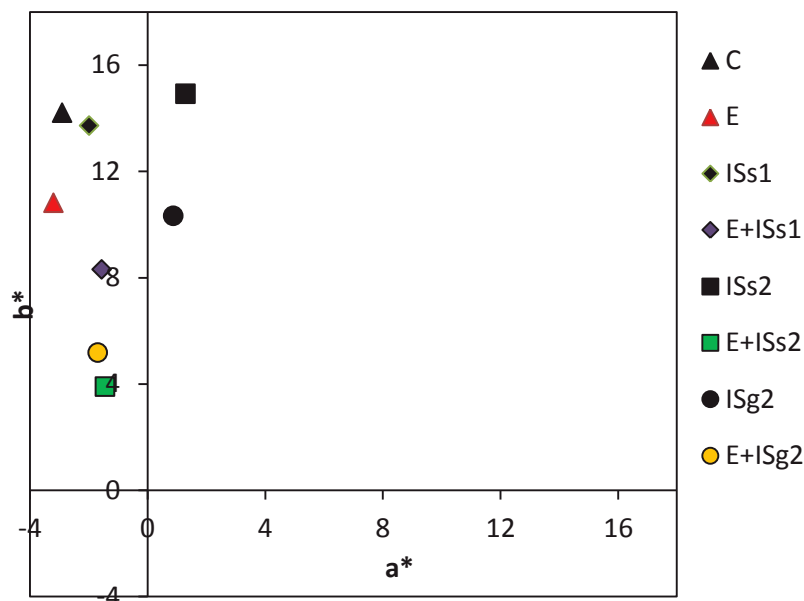


Figura V.2. Valores del componente b^* versus valores del componente a^* de peras luego de procesos de infusión. C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

Algunos autores han observado un papel protector de los azúcares en algunos pigmentos de los vegetales y una reducción de la actividad de la polifenoloxidasa responsable del pardeamiento enzimático como por ejemplo Chiralt y Talens (2005). La acción de la polifenoloxidasa requiere de la presencia de oxígeno, y en este sentido, los procesos de infusión, que reducen el contenido de aire en los espacios intercelulares del tejido, podrían suponer un factor de inhibición del pardeamiento enzimático, junto con la reducción de la actividad de agua del producto, lo que parece haber ocurrido en

muestras ISS1. Además, la mayor pérdida de agua producida en estas muestras pudo promover la formación de una capa más concentrada en azúcares luego de la infusión, permitiendo la conservación del color. Las muestras escaldadas presentaron un comportamiento diferente. Por un lado durante el tratamiento térmico el aire del tejido es reemplazado por agua, reduciendo la dispersión de la luz y contribuyendo al desarrollo de traslucidez, lo que puede apreciarse en la **Figura V.3** que presenta el grado de opacidad de las muestras con y sin escaldado. Puede observarse en esta figura que en el caso de las muestras frescas y las osmotizadas sin escaldado previo, la luminosidad medida por reflectancia sobre fondo blanco y sobre fondo negro no fue afectada por el fondo, y se trata por lo tanto de materiales opacos por lo que presentaron valores de opacidad cercanos a 1. En cambio las muestras con escaldado presentaron un cierto grado de traslucidez evidenciado por menores valores de opacidad. Por otro lado puede observarse en la **Figura V.1** que ya en el proceso de escaldado tuvo lugar un oscurecimiento de las muestras por pardeamiento ($< L^*$), siendo aún mayor luego de la etapa de infusión en pretratamientos E+ISS1, E+ISS2, y E+ISg2. Una disminución de la luminosidad por efecto de los tratamientos térmicos ha sido también reportada en otros productos frutales como trozos de guayaba, mango y tomate de árbol (Cuastumal Canacuan y col., 2016), atribuyendo estos cambios a las reacciones de pardeamiento de Maillard, tales como condensación de hexosas y componentes de aminoácidos y oxidación del ácido ascórbico. Sin embargo en la **Figura V.2** puede observarse que los valores de a^* mostraron cierta estabilidad en estas muestras así como también una leve disminución en los valores de b^* , lo que estaría indicando un menor desarrollo de tonalidades amarillas, a pesar del mayor oscurecimiento que presentaron estas muestras en comparación con las no escaldadas.

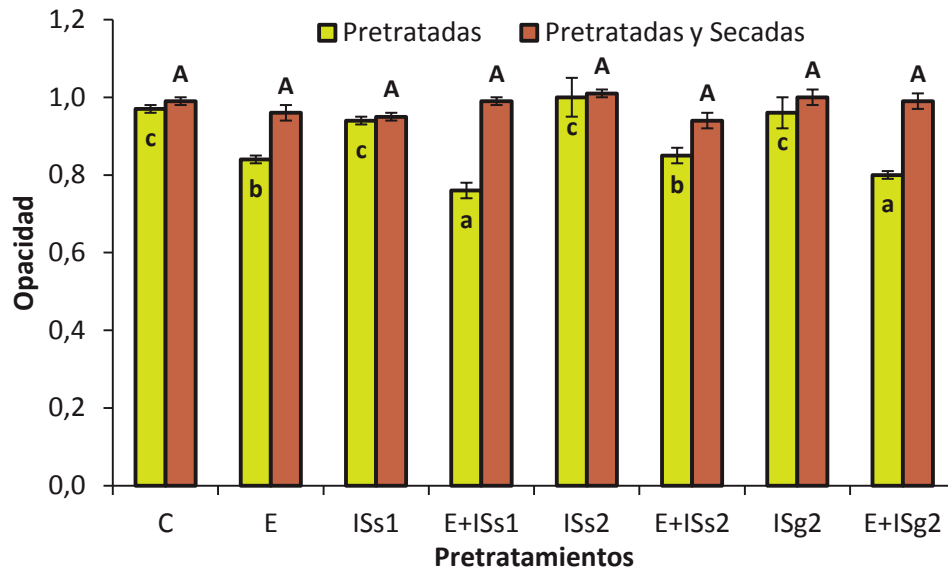


Figura V.3. Valores de opacidad de peras luego del proceso de infusión y luego del proceso de secado. C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

Las **Figuras V.3** y **V.4** muestran el comportamiento de las muestras luego del secado. Puede observarse que todas las muestras recuperan la opacidad. Durante el secado de materiales, se ha observado que los cambios de las coordenadas de color son afectados por la pérdida de agua, por el encogimiento producido y por las alteraciones de la estructura de la superficie. En materiales porosos, el agua es reemplazada por aire durante el secado, dando lugar a una apariencia más pálida (Lewicki, 2004). Las reacciones de pardeamiento, así como también el encogimiento producido en los productos, normalmente dan como resultado una disminución en la luminosidad y un color más saturado del material durante la etapa final de secado, intensificado por el efecto de la concentración de la muestra. Por otro lado, el deterioro del color en frutas deshidratadas debido a la temperatura de secado ha sido analizado por muchos autores. Por ejemplo, Krokida y col. (2001) observaron un aumento de a^* en diversos tejidos vegetales durante el secado y encontraron que el mismo dependía de la temperatura del proceso, siendo este aumento más evidente a mayores temperaturas ($\geq 70^\circ\text{C}$), lo que, según estos autores, estaría asociado a reacciones de pardeamiento no enzimático. Fernández y col. (2005) estudiaron el color de manzana (variedad Granny Smith) durante el proceso de secado a 50°C y reportaron que el tejido presentó un

pardeamiento importante, aunque muy heterogéneo. Si bien los valores de L^* se mantuvieron constantes, los valores de a^* y b^* aumentaron considerablemente durante el proceso, virando hacia colores rojizo-amarillentos. El importante pardeamiento observado por estos autores podría deberse al diferente método de secado utilizado (en estufa sin convección forzada de aire) y a la menor temperatura empleada, lo cual incrementó mucho el tiempo de proceso (14 hs para alcanzar una humedad del 12% en el producto), condiciones de secado que podrían estar favoreciendo la actividad de las polifenoloxidasas (PPO). En esta tesis el tiempo de secado fue de 4 hs, lográndose un menor contenido de humedad. Por su parte, Buckow y col. (2009) determinaron que los tratamientos térmicos aplicados a temperaturas entre 45-55°C causaban un incremento inicial del 40% en la actividad de PPO de manzana debido a la liberación de PPO en estado de latencia, la que comenzó a disminuir gradualmente a partir de los 10 minutos de proceso, mientras que, a temperaturas mayores (60°C y 70°C), dicho efecto no se observó, por lo cual la activación-inactivación enzimática estaría ocurriendo al mismo tiempo, siendo predominante el efecto de inactivación. Sin embargo, los autores afirmaron que estas condiciones pueden cambiar en función de la variedad del fruto empleado. Gasull y Becerra (2006) caracterizaron la PPO extraída de pera variedad Packham's Triumph, observando que al calentar la enzima durante 20 minutos a 50°C, la actividad de la misma disminuía un 40 % y se encontraba prácticamente inactivada calentando durante 10 minutos a 70°C. En este trabajo también se informó que la actividad de PPO de pera Packham's Triumph es máxima a pH 6,5, que se corresponde aproximadamente con los valores de pH alcanzados en las peras osmotizadas de este trabajo. Según Ludikhuyze y col. (2003), la inactivación térmica de PPO de pera se hace notoria a unos 60-65°C. Si bien en el presente trabajo no se estudió el efecto de la temperatura de secado sobre la actividad de la PPO en peras, se podría inferir que al trabajar a 65°C sería una temperatura límite para el fenómeno de activación-inactivación, donde las enzimas oxidativas no se estarían inactivando completamente, con un impacto importante sobre el color final, como puede visualizarse en las imágenes de peras deshidratadas control presentadas en la **Figura I.1** del **Capítulo I** y en los parámetros cromáticos obtenidos en la **Figura V.4**. Se verifica también en muestras secadas que un escaldado previo no fue efectivo para disminuir el desarrollo de pardeamiento durante el secado.

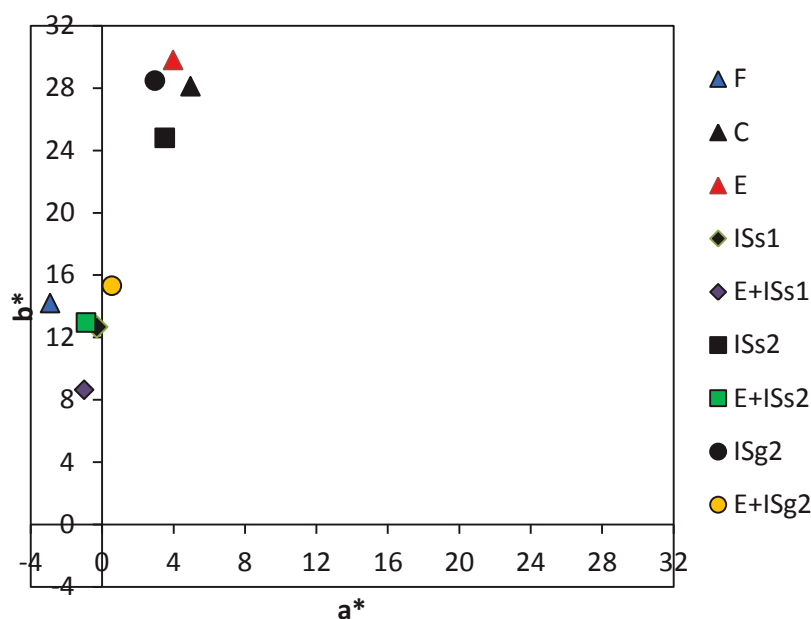


Figura V.4. Valores del componente b^* versus valores del componente a^* de peras luego del proceso de secado. C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

Los resultados obtenidos luego de la evaluación de los parámetros cromáticos de las peras deshidratadas del presente trabajo mostraron que la penetración de azúcar en los frutos causó una relativa estabilidad del color después del secado, sobre todo en muestras con escaldado previo y posterior infusión ya que la variación del parámetro a^* fue menos drástica que en las muestras control (**Figura V.4**). Sin embargo estas muestras presentaron valores de b^* mucho menores, es decir evolucionaron hacia tonalidades menos amarillentas. Con respecto a los valores de L^* , llama la atención que excepto las muestras control y sólo escaldadas, el resto de las frutas deshidratadas recuperaron luminosidad luego del secado (la diferencia $L_0^* - L^*$ disminuyó) debido a que la incorporación de azúcares que ocurrió durante el pretratamiento pueden impartir mayor claridad y brillantez a la fruta luego del secado posterior, sobre todo las muestras ISs1, que nuevamente mantuvieron una luminosidad y una tonalidad similar a la de la fruta fresca.

Por otro lado la naturaleza de los humectantes parece afectar el comportamiento del color en las muestras secadas ya que se observaron diferencias significativas entre

las muestras pretratadas con sacarosa (ISs2) y con glucosa (ISg2) (**Figura V.1 y V.2**). Estas diferencias de color superficial en las frutas deshidratadas pueden también visualizarse en las imágenes mostradas en la **Figura I.1** del **Capítulo I** y en los valores de ángulo de tono y de croma presentados en la **Tabla V.2**. En muestras con menor contenido de solutos (ISs2 e ISg2), el viraje hacia tonos más pardos se había producido ya en la etapa de infusión previa, manteniéndose la tonalidad luego del secado final con una intensidad del color similar a la de la muestra control secada. Se verifica un aumento del croma producto de la concentración de pigmentos en todas las muestras luego del secado, excepto en muestras ISS1 con y sin escaldado. Puede apreciarse que en las muestras secadas con pretratamientos de infusión la utilización de un escaldado previo condujo a una menor saturación del color (menor croma), relacionado con un menor desarrollo de pigmentos pardos, así como también con el menor encogimiento que presentaron estas muestras, sugiriendo una menor concentración de pigmentos por unidad de volumen de tejido.

TABLA V.2. Ángulo de tono (h_{ab}) y croma (C^*_{ab}) obtenidos en peras luego del pretratamiento y luego del secado

Pretrat.	Luego del pretratamiento		Luego del secado	
	h_{ab}	C^*_{ab}	h_{ab}	C^*_{ab}
C	101,8±3,17 ^{b,c}	14,5±2,05 ^D	80,3±3,81 ^A	27,1±2,3 ^e
E	106,14±3,15 ^{c,d}	11,13±2,15 ^C	82,5±2,51 ^B	30,1±3,33 ^f
ISS1	98,4±2,20 ^b	13,9±2,22 ^D	90,9±3,3 ^E	12,9±2 ^b
E+ISS1	100,7±1,57 ^b	8,4±1,01 ^B	96,7±2,7 ^G	8,3±1,3 ^a
ISS2	85,13±4,94 ^a	15,03±1,56 ^D	84,8±2,7 ^C	25,02±2,1 ^d
E+ISS2	111,5±6,09 ^e	4,2±1,4 ^A	94,9±1,9 ^F	12,4±1,3 ^b
ISg2	85,12±4,2 ^a	10,4±1,01 ^C	83,4±1,5 ^{B,C}	27,9±2,6 ^e
E+ISg2	108,01±3,54 ^{d,e}	5,5±1,3 ^A	88,2±2,4 ^D	17±1,9 ^c

El grado de pardeamiento de las muestras fue evaluado también a través del índice de browning (IB) (**Figura V.5**). Se verifica a través de este parámetro que las muestras secadas y tratadas previamente con menos humectante ($a_w = 0,94$) desarrollaron un mayor pardeamiento que aquellas pretratadas a un a_w de 0,83 y que las muestras

pretratadas con glucosa a un a_w de 0,94 (ISg2) mostraron una menor retención del color durante el secado que aquellas tratadas previamente con sacarosa a igual a_w . A pesar de que el bisulfito de sodio se había añadido a los medios osmóticos con el fin de inhibir fundamentalmente el pardeamiento no enzimático, la incorporación de un azúcar reductor durante la infusión ISg2 ha favorecido evidentemente la reacción de Maillard durante la etapa posterior de secado, provocando un aumento del IB. Cabe aclarar que las condiciones a las que fueron sometidas las muestras de pera durante el secado convectivo, tanto en lo que respecta a la temperatura aplicada como al tiempo necesario para reducir la a_w fueron propicias para el desarrollo de esta reacción.

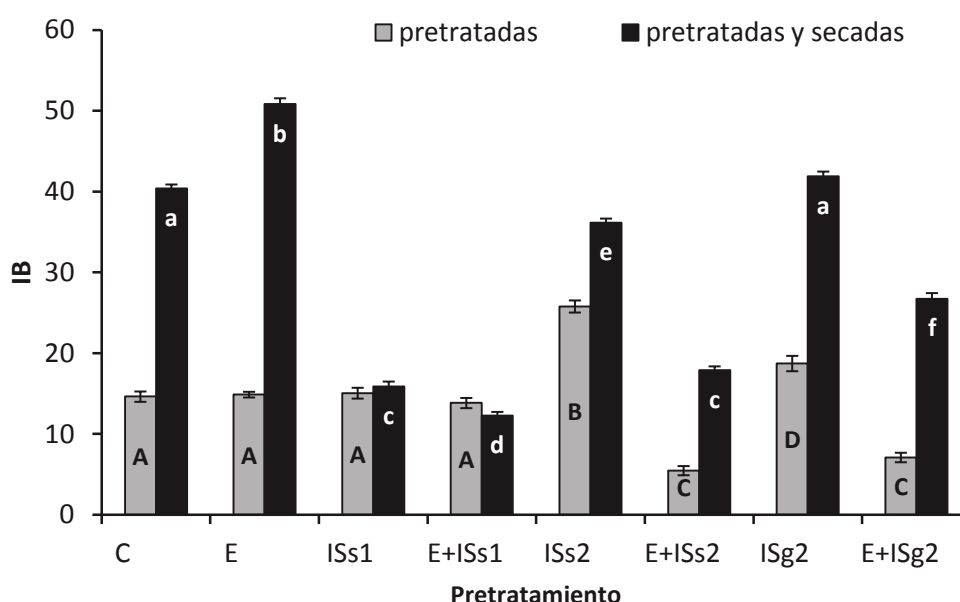


Figura V.5. Índice de Browning (IB) de peras luego de la etapa de pretratamientos y luego del secado. En cada etapa, las barras con la misma letra no presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$). C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

Aunque las muestras con pretratamientos combinados de escaldado e infusión fueron las que experimentaron los mayores cambios en la luminosidad, el menor índice de pardeamiento obtenido en estas muestras denota que el tratamiento térmico promovió la inactivación enzimática y condujo a la obtención de peras con una mayor

preservación del color en todos los casos en comparación con las correspondientes peras sin escaldado.

V.3. CONCLUSIONES

Los diferentes comportamientos observados en las muestras luego del secado denotan que el tipo de pretratamiento afectó de manera considerable los cambios de color superficial, y en particular la luminosidad de las muestras. Las muestras control y aquellas sólo escaldadas, presentaron luego del secado un viraje hacia tonos más anaranjados y con una saturación similar, coherentemente con el desarrollo de un mayor pardeamiento. Las placas de pera con sacarosa incorporada antes del secado hasta un a_w de 0,83 presentaron un pardeamiento menor, lo que confirma el efecto protector de los azúcares como la sacarosa. La aplicación de un escaldado ejerció un efecto significativo sobre el color superficial al utilizarse en forma combinada con procesos de infusión, preservando mejor las tonalidades de las frutas frescas. En cambio su uso no fue efectivo como único pretratamiento.

CAPÍTULO VI

***Isotermas de sorción,
transición vítrea y movilidad
molecular del agua y de los
sólidos de peras deshidratadas***



VI.1. INTRODUCCIÓN

La comprensión de los datos de sorción de humedad es esencial para muchos aspectos en relación con la tecnología de los alimentos, tales como la selección de los materiales de embalaje, el secado y el diseño de procesos de deshidratación, así como de opción de parámetros de almacenamiento adecuados. La complejidad que involucran los sistemas alimenticios requiere necesariamente de una determinación experimental de las isotermas de sorción cuya forma está afectada principalmente por la estructura y la composición del material (Maftoonazad, 2010). La cantidad de agua retenida en cada muestra será diferente dependiendo de los distintos cambios que se produzcan en cada una de las fases (sólida y líquida) debido a la aplicación de pretratamientos y técnicas de deshidratación (Moraga y col., 2004).

La actividad del agua se ha relacionado generalmente con la estabilidad de los alimentos, sin tener en cuenta los aspectos cinéticos. Sin embargo, según Goff (1992), el verdadero equilibrio no puede lograrse (ni siquiera a largo plazo) en sistemas alimentarios complejos tales como productos deshidratados o de humedad intermedia. Algunas reacciones de deterioro pueden ocurrir antes de que el equilibrio higroscópico haya sido alcanzado dependiendo de la movilidad molecular del sistema. Varios autores han analizado los conceptos de actividad de agua conjuntamente con las temperaturas de transición vítrea (T_g) con el fin de evaluar la estabilidad de alimentos, proporcionando así un enfoque integrado del rol del agua en los mismos (Mard y col., 2013).

La eliminación del agua en muchos productos da lugar a menudo a la formación de estructuras amorfas o parcialmente amorfas. Estos materiales suelen estar en un estado de no equilibrio porque exhiben cambios dependientes del tiempo. Es sabido que un material puede existir en estado amorfo (o vítreo) o en estado de líquido sobre-enfriado (gomoso), dependiendo de la temperatura y/o de la concentración de agua. La temperatura a la cual ocurre el cambio entre estos dos estados, se conoce como temperatura de transición vítrea (T_g). Como la T_g depende del contenido de agua, como consecuencia de un aumento del contenido de agua del producto puede ocurrir un cambio de un estado vítreo a un estado gomoso con pérdida del aspecto crujiente (Ross y col., 1998). En el estado vítreo, algunas

reacciones que dependen de la difusión molecular, como algunos cambios químicos y enzimáticos, pueden inhibirse (Gould y Christian, 1988), aunque este comportamiento no parece ser generalizado para todos los cambios químicos (Bell y Hageman, 1994). La movilidad molecular y las propiedades físicas del producto cambian drásticamente por encima del intervalo de temperaturas de transición vítrea. Estos cambios afectan las propiedades mecánicas y la difusión de componentes.

Una interesante aplicación del estudio de la transición vítrea es el entendimiento de los cambios que pueden ocurrir durante el procesado y el almacenamiento de los alimentos y que dependen fundamentalmente de la movilidad del agua y de los biopolímeros que los constituyen (Nelson y Labuza 1994). Por ejemplo el fenómeno de colapso es la resultante de un encogimiento de la estructura o del cambio en el flujo del material causado por una disminución de la viscosidad que provoca pegajosidad, apelmazamiento y pérdida de porosidad (White y Cakebread, 1966; Bellows y King, 1973; Tsourouflis y col., 1976; To y Flink, 1978 a y b; Flink, 1983; Levine y Slade, 1988; Slade y Levine, 1991). Los cambios en la difusión afectan la cinética de cristalización de azúcares amorfos, la liberación de aromas y, posiblemente, la cinética de las reacciones.

Por su parte, la movilidad molecular se puede estimar mediante los tiempos de relajación de la magnetización nuclear (H^1 RMN). El experimento de RMN consiste en inducir la transición entre niveles de energía correspondientes a la magnetización de núcleos atómicos. Luego de la excitación, los espines de los núcleos retornan al estado de equilibrio por procesos de transiciones no radiactivas, llamados en conjunto procesos de relajación (Colquhoun y Goodfellow, 1994). La relajación espín-espín se realiza a través de núcleos vecinos. Esta relajación generalmente es un proceso de disminución exponencial de primer orden que se relaciona con un tiempo de relajación T_2 . Para sólidos cristalinos o líquidos muy viscosos el fenómeno de relajación espín-espín es más eficiente y los tiempos son muy pequeños (10^{-4} s). Cuanto menor es la viscosidad de la muestra más largos son estos tiempos.

En frutas osmodeshidratadas, los cambios fisicoquímicos que pueden ocurrir durante las distintas etapas de procesamiento requiere necesariamente del análisis integrado de las propiedades de sorción de agua, de la movilidad del agua y de los sólidos presentes y del conocimiento del estado físico de la matriz vegetal. La evaluación de estas

propiedades resulta de gran importancia no sólo para el control de calidad del producto, sino también como herramienta para el análisis de procesos con vistas a definir, ajustar u optimizar la tecnología adecuada a cada matriz vegetal.

El objetivo de esta parte fue entonces analizar el efecto del escaldado y de la deshidratación osmótica empleando diferentes azúcares, sobre las isothermas de sorción de agua, las temperaturas de transición vítrea (T_g) y la movilidad molecular (T_2) en los discos de pera deshidratados.

VI.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Figura VI.1** se muestran las isothermas de sorción de agua obtenidas a 20°C en peras control (sin pretratamiento) y peras pretratadas con infusión seca y con tratamientos combinados de infusión seca y escaldado. Las curvas presentaron una forma ligeramente sigmoideal, que es característica de las matrices con sólidos solubles como las frutas y corresponde a un comportamiento intermedio entre los tipos II y III de acuerdo a la clasificación de Brunauer, Emmett y Teller (Brunauer y col., 1940).

Las diferencias observadas en el contenido de agua de equilibrio entre las muestras se debe tanto a las diferencias en la composición química y el tipo de componentes, así como también a la estructura final alcanzada en las mismas debido a la combinación de pretratamientos y secado posterior, lo que pueden modificar, en mayor o menor medida, la capacidad de sorción de agua de las muestras (Ciurzynska y Lenart, 2010). Las peras control presentaron una mayor retención de agua hasta una $a_w = 0,73$ en comparación con las peras pretratadas. Cuando el a_w superó el valor de 0,75, se observó un comportamiento similar en todos los casos. Este patrón de sorción es típico de alimentos ricos en azúcares, observándose un lento crecimiento en el contenido de humedad de equilibrio a bajos valores de a_w y un aumento pronunciado a valores de a_w mas altos ($> 0,75$), debido a los efectos de las interacciones de los diversos solutos con el agua que comienzan a prevalecer en la fruta (Falade y Aworh, 2004; Moraga y col., 2004; Keqing, 2004; Ciurzynska y Lenart, 2010; Sette y col., 2016b).

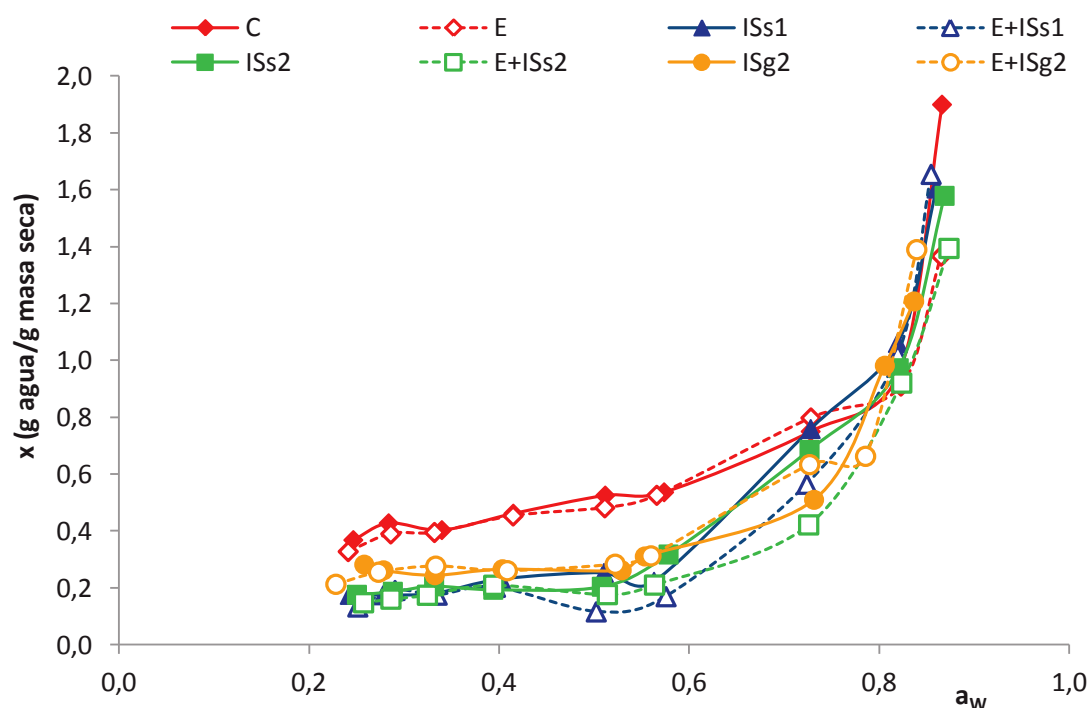


FIGURA VI.1. Isotermas de sorción a 20°C de peras control y pretratadas con infusión seca y tratamientos combinados. C: sin pretratamiento, E: escaldado, ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISg2: escaldado y posterior infusión con glucosa ($a_w = 0,94$).

La presencia de azúcares en una alta proporción en las muestras pretratadas constituye un factor de gran importancia con respecto al comportamiento de sorción de agua. Posiblemente los azúcares en las muestras pretratadas estén en parte presentes en forma cristalina y una proporción menor en forma amorfa. De acuerdo a estudios realizados sobre isotermas de sorción de agua de por ejemplo sacarosa cristalina, la solubilización de este compuesto comienza a ocurrir en el rango de a_w 0,84 – 0,86 (Ruegg y Blanc, 1981; Salameh y col., 2006; Yao y col., 2011; Lipasek y col., 2012; Penner, 2013) y este comportamiento se aprecia como un cambio abrupto de la pendiente de la isoterma de sorción de agua (Yu y col., 2008). Esto se observó claramente en este trabajo, comenzando a subir la pendiente de las isotermas de todas las muestras de pera en forma pronunciada por encima de una actividad de 0,75 (**Figura VI.1**). Por otro lado el desarrollo de una capa superficial concentrada o costra, y la reducción de la porosidad del tejido y/o contracción

debido a la infiltración del azúcar en muestras pretratadas con infusión y secado podrían ser responsables del comportamiento de sorción de agua diferente con respecto a la muestra control, causando una reducción en la capacidad de adsorción de agua, comportamiento que luego se revierte al comenzar a disolverse la sacarosa y otros compuestos presentes en la fruta. En estudios realizados por ejemplo con otras frutas como manzana deshidratada y sometida a pretratamientos similares (Sosa y col., 2012), se ha obtenido un comportamiento de sorción análogos. Otro factor a tener en cuenta es que durante los procesos de infusión, además de la pérdida de agua y la incorporación de azúcares, tiene lugar el “leaching” de compuestos higroscópicos como minerales u otros azúcares de bajo peso molecular al medio de ósmosis. Esto implica la pérdida de sitios polares para interactuar con el agua, lo que podría explicar en parte la mayor capacidad de sorción de agua en muestras control y escaldadas.

Las infusiones con glucosa adsorbieron una mayor cantidad de agua que aquellas con sacarosa hasta un $a_w = 0,56$, probablemente por la mayor higroscopicidad de la glucosa respecto de la sacarosa. A partir de ese valor la adsorción de agua fue similar en todas las muestras. A pesar de las diferencias observadas en los caracteres ultraestructurales de las frutas con escaldado previo comentadas en el Capítulo III, este tratamiento térmico no tuvo un efecto significativo sobre la capacidad de adsorción de las muestras, tanto en la fruta control como en las pretratadas.

Con el objetivo de expresar matemáticamente la relación entre la actividad de agua de los alimentos y su contenido de humedad, se han aplicado diversos modelos, constituidos por dos, tres y cuatro coeficientes de regresión parcial que explican cada uno una de las tres zonas que conforman la isoterma de sorción de agua. Algunos de ellos se desarrollaron con una base teórica para describir mecanismos de adsorción como el modelo de GAB; mientras que otros son sólo empíricos o una simplificación de modelos más elaborados. En muchos casos, el modelo que es adecuado para ciertos productos alimenticios no es adecuado para otro diferente. Algunos modelos sólo presentan una capacidad predictiva adecuada para ciertos rangos de actividad de agua. Entre los diversos modelos que han sido propuestos para describir isotermas de sorción de productos alimenticios, en este trabajo se ha utilizado el modelo GAB, el modelo de Oswin, el modelo de Halsey y el modelo de Peleg, los cuales fueron presentados en la sección de Materiales y Métodos. En la **Tabla VI.1.** se

describen los parámetros correspondientes, así como también los estadísticos obtenidos luego del ajuste de los datos experimentales con cada uno de ellos. Puede notarse que los modelos que se ajustaron mejor a la tendencia de los datos obtenidos fueron el modelo de GAB y el de Peleg, ya que se obtuvieron valores de $R^2 > 0,98$ en las mayoría de las condiciones experimentales y los valores de RSME resultaron $\leq 0,08$, lo que indica la suficiencia de los mismos para describir el comportamiento de sorción de las muestras.

TABLA VI.1. Parámetros y estadísticos obtenidos a partir del ajuste de las isotermas mediante los modelos de GAB, de Oswin, de Halsey y de Peleg. C: control, E: escaldada, IS: infusión seca, s: sacarosa, g: glucosa, 1: $a_w = 0,83$ y 2: $a_w = 0,94$.

Modelos	PRETRATAMIENTOS							
	C	E	ISs1	E+ISs1	ISs2	E+ISs2	ISg2	E+ISg2
GAB								
MM	0,224	0,246	0,114	0,077	0,111	0,089	0,135	0,108
C	74,2	25,6	16,1	21,8	45,0	19,5	37,4	30,0
K	0,989	0,954	1,087	1,115	1,074	1,081	1,044	1,083
R^2	0,985	0,972	0,984	0,993	0,987	0,997	0,977	0,968
RMSE	0,06	0,07	0,08	0,05	0,06	0,03	0,06	0,07
OSWIN								
C_1	0,442	0,452	0,234	0,148	0,236	0,168	0,279	0,192
C_2	0,608	0,550	1,076	1,315	1,002	1,145	0,798	1,047
R^2	0,901	0,910	0,957	0,953	0,954	0,963	0,949	0,866
RMSE	0,14	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,08	0,13
HALSEY								
C	0,228	0,210	0,226	0,209	0,209	0,189	0,187	0,190
n	1,324	1,457	0,795	0,659	0,852	0,761	1,014	0,799
R^2	0,902	0,908	0,957	0,955	0,954	0,965	0,955	0,878
RMSE	0,13	0,11	0,12	0,11	0,11	0,10	0,07	0,12
PELEG								
k_1	0,791	0,820	0,412	0,682	0,429	0,344	0,265	0,365
n_1	0,698	0,737	0,851	1,772	0,874	0,875	0,176	0,464
k_2	86,7	88,5	7,1	53,2	6,5	8,5	3,2	17,9
n_2	31,6	33,2	11,2	24,6	11,8	13,9	7,6	16,9
R^2	0,994	0,974	0,976	0,986	0,979	0,994	0,983	0,997
RMSE	0,04	0,08	0,10	0,07	0,09	0,05	0,05	0,02

La **Figura VI.2** muestra los datos experimentales de sorción conjuntamente con los predichos con el modelo de GAB, el cual ha sido ampliamente utilizado para describir las

propiedades de sorción de agua de muchos alimentos, debido a la amplitud del rango de validez expresado en actividad de agua (Timmermann, 2003) y a que sus tres parámetros tienen significado físico. Puede apreciarse que el modelo de GAB fue más satisfactorio para la predicción de las isotermas de sorción de las peras deshidratadas de este trabajo en comparación con el modelo de Peleg (**Figura VI.3**).

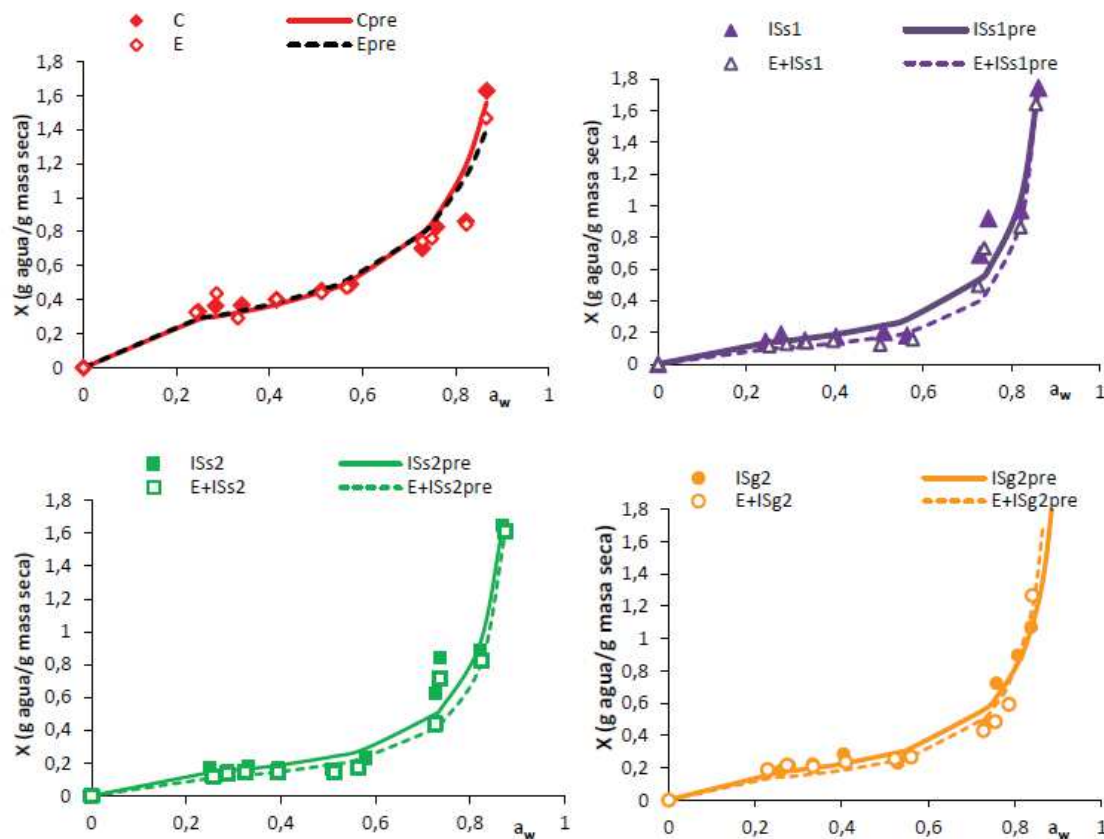


FIGURA VI.2. Curvas de sorción de agua experimentales y predichas mediante el modelo de GAB de peras control (C), escaldadas (E) y pretratadas con infusión seca (ISs, ISg) y tratamientos combinados (E+IS) a dos a_w diferentes ($a_w1 = 0,83$ y $a_w2 = 0,94$).

El valor de humedad de monocapa (MM) obtenido a partir del modelado con la ecuación de GAB fue mayor en la muestra sólo escaldada en comparación con la muestra control, debido probablemente a la exposición de algunos grupos reactivos disponibles para enlaces hidrógeno, dando lugar a una mayor adsorción de agua. En el caso de muestras con pretratamientos de ósmosis, y sobre todo combinados con escaldado previo la humedad de monocapa disminuyó considerablemente. Esto puede deberse a que los azúcares hayan

competido por los sitios activos reduciendo la adsorción de agua en la fase sólida ocasionando la pérdida hidrófila.

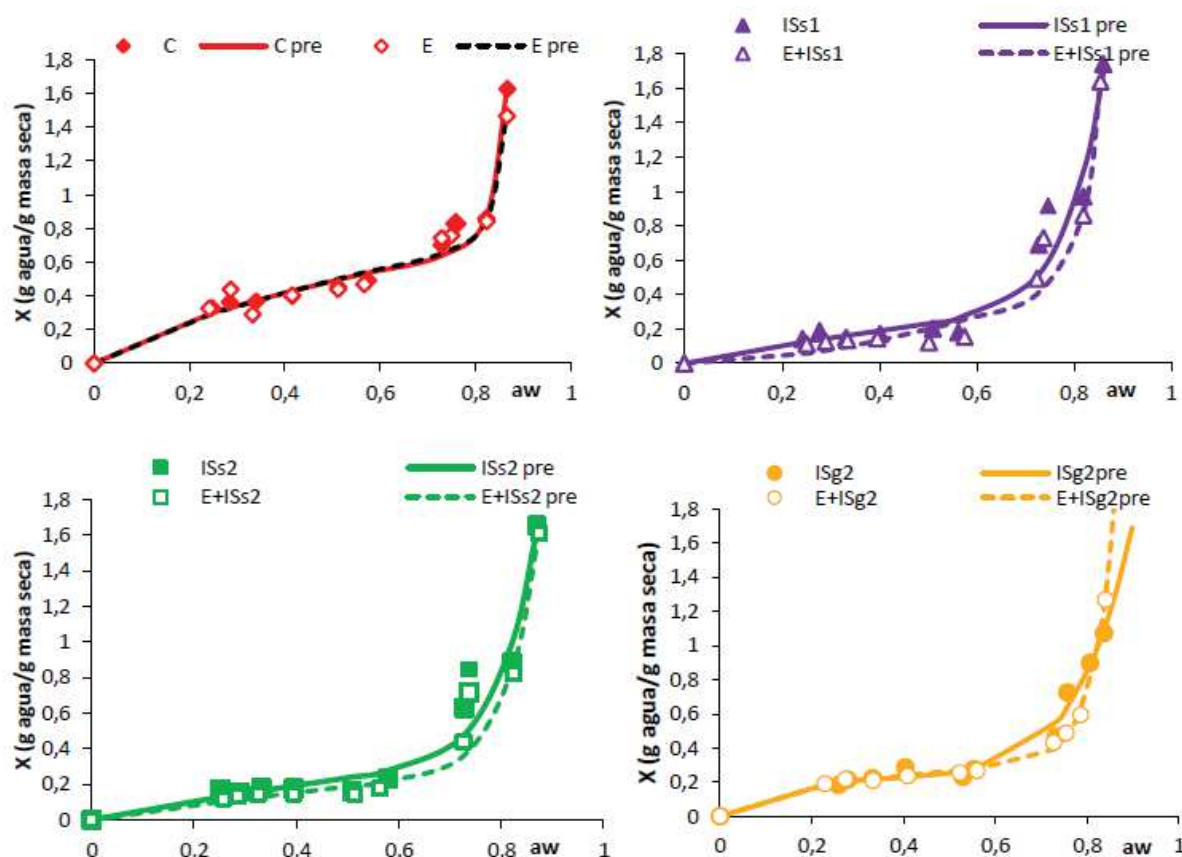


FIGURA VI.3. Curvas de sorción de agua experimentales y predichas mediante el modelo de PELEG de peras control (C), escaldadas (E) y pretratadas con infusión seca (ISs, ISg) y tratamientos combinados (E+IS) a dos a_w diferentes ($a_w1 = 0,83$ y $a_w2 = 0,94$).

Los conceptos de actividad de agua (a_w) y de transición vítrea (T_g) son complementarios. La actividad de agua es una propiedad termodinámica ligada a la disponibilidad de agua y se mide en el equilibrio. Sin embargo los alimentos, son en su mayoría heterogéneos en su composición y pueden no estar en un estado de equilibrio sino en un estado metaestable (o amorfo), caracterizado por una temperatura de transición vítrea a la cual ocurre un cambio drástico en la movilidad molecular, como ya se ha comentado. Por lo tanto, se han relacionado ambos conceptos para establecer criterios de estabilidad unificados para los alimentos (Rahman, 2010). El agua y los sólidos solubles,

conformados principalmente por azúcares, constituyen el componente principal de las frutas. Los azúcares y otros componentes como los ácidos orgánicos presentes son los que determinan la temperatura de transición vítrea en estas materias primas (Telis y Martínez-Navarrete, 2010).

Para evaluar las temperaturas de transición vítrea (T_g) de las diferentes muestras luego de la equilibración a distintas humedades relativas se empleó la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC). Como se puede apreciar en la **Tabla VI.2** las temperaturas de inicio (“onset”) de la transición vítrea tuvieron un claro descenso con el aumento del a_w , llegando en todos los casos a valores cercanos a -75°C a un $a_w \cong 0,75$. Este descenso de la T_g con el aumento de la humedad de las muestras se debe al efecto plastificante del agua (Moraga y col., 2006; Jaya y Das, 2009). Todas las muestras se encontraban en estado sobreenfriado (gomoso) a temperatura ambiente, lo cual se condice con la textura blanda de las mismas. Los valores de T_g fueron más elevados en las muestras pretratadas con infusión, lo cual se condice con los valores de humedad menores que los observados en las muestras control y escaldadas (**Figura VI.1**).

TABLA VI.2. T_g ($^\circ\text{C}$) vs a_w para muestras de peras secadas en corriente de aire sometidas a diferentes pretratamientos. C: control, E: escaldada, IS: infusión seca, s: sacarosa, g: glucosa, 1: $a_w = 0,83$ y 2: $a_w = 0,94$.

C		E		ISs1		E+ISs1		ISs2		E+ISs2		ISg2		E+ISg2	
a_w	T_g	a_w	T_g	a_w	T_g	a_w	T_g	a_w	T_g	a_w	T_g	a_w	T_g	a_w	T_g
0,25	-1,79	0,24	0,34	0,24	8,43	0,25	17,23	0,25	2,33	0,26	7,55	0,26	11,83	0,23	-1,40
0,28	-11,48	0,29	-12,13	0,28	-5,94	0,29	-10,31	0,29	-4,58	0,29	-0,08	0,28	-15,49	0,27	-9,42
0,34	-19,18	0,33	-17,98	0,33	-11,59	0,33	-10,15	0,33	-14,74	0,32	-7,54	0,33	-18,55	0,33	-14,53
0,42	-29,2	0,41	-32,51	0,40	-26,26	0,40	-20,55	0,39	-28,50	0,39	-22,78	0,40	-26,77	0,41	-25,15
0,51	-41,98	0,51	-41,36	0,51	-37,54	0,50	-34,32	0,51	-40,39	0,51	-18,19	0,53	-39,73	0,52	-40,08
0,57	-46,39	0,57	-45,44	0,56	-43,18	0,58	-38,90	0,58	-41,74	0,56	-20,23	0,55	-47,30	0,56	-46,41
0,73	-64,49	0,73	-71,67	0,73	-68,00	0,72	-61,00	0,73	-62,38	0,73	-60,6	0,73	-64,37	0,73	-59,28
0,76	-76,34	0,75	-75,09	0,75	-75,14	0,74	-73,91	0,74	-73,89	0,74	-76,38	0,76	-71,16	0,75	-71,33

Al analizar las muestras con infusión y escaldado previo en comparación con las sólo osmotizadas, puede observarse que, a pesar de presentar el mismo contenido de agua (isotermas similares), tuvieron una T_g mayor para $a_w < 0,73$, sobre todo en presencia de

sacarosa (muestras E+ISs1 y E+ISs2). Esto podría deberse a que en las muestras sin escaldado (ISs1 e ISs2), la sacarosa podría haber cristalizado en las zonas más externas de la fruta debido a su concentración durante el proceso de deshidratación posterior. Por lo tanto la sacarosa cristalina no estaría contribuyendo a aumentar la T_g de las muestras y el agua disponible se encontraría plastificando la fase amorfa restante del sistema, dando lugar a valores de T_g más bajos. En muestras pretratadas con una combinación de escaldado e infusión posterior, una mayor distribución de los azúcares en el interior de la matriz limitaría sus posibilidades de cristalizar haciendo que contribuyan a la fase amorfa con el consecuente aumento de la temperatura de transición vítrea.

Con la finalidad de estimar la movilidad molecular de los sólidos y del agua presente en las muestras a diferentes actividades de agua, se determinó el tiempo de relajación transversal T_2 (espín-espín) mediante ^1H RMN resuelto en el tiempo. Se empleó el método de decaimiento libre de la inducción FID luego de la aplicación de un pulso de 90° . Los valores de T_2 calculados a partir del método FID se atribuyen a la relajación de los protones presentes en los sólidos y a las moléculas de agua asociadas fuertemente mediante puentes de hidrógeno a la matriz sólida (Kalichevsky y col., 1992; Ruan y col., 1999; Rugraff y col., 1996; Choi y Kerr, 2003). Se ha reconocido que la movilidad molecular del agua y los sólidos está relacionada con aspectos cinéticos y su análisis tiene amplias aplicaciones en la predicción de la estabilidad de alimentos. Hasta el momento hay escasos trabajos que incluyan estudios de movilidad molecular en frutas; entre ellos se pueden mencionar los realizados con manzanas (Hills y Remigereau, 1997; Nieto y col., 2013, Agudelo-Laverde y col., 2014), melón y pera (Agudelo-Laverde y col., 2014) y frambuesas (Sette y col., 2016b).

La **Figura VI.4** muestra los tiempos de relajación T_2 obtenidos para las diferentes muestras humidificadas, seleccionando valores de a_w a los que se podrían almacenar los productos estudiados (0,11, 0,22, 0,33), que según las isothermas obtenidas son valores muy cercanos a la humedad de monocapa. Se observó un aumento de los valores de T_2 con el aumento de a_w , particularmente en las muestras control y escaldadas y en las infusiones secas con glucosa. La mayor movilidad se registró en muestras que no fueron pretratadas (C y E). Los pretratamientos con infusión con sacarosa redujeron significativamente los valores de T_2 , lo que fue particularmente observado a 33 % de humedad relativa y sobre todo en muestras con escaldado previo.

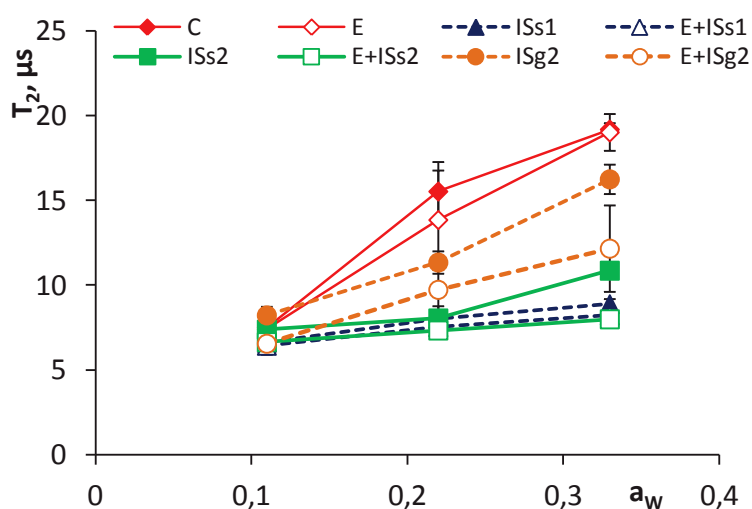


FIGURA VI.4. Tiempos de relajación T_2 obtenidos por 1H RMN en función de a_w para muestras de peras secadas en corriente de aire sometidas a diferentes pretratamientos. Peras Control (C), Escaldadas (E) y pretratadas con Infusión Seca (ISs, ISg) y tratamientos combinados (E+IS) a dos a_w diferentes ($a_{w1} = 0,83$ y $a_{w2} = 0,94$). Las barras representan el desvío estándar asociado a las medias.

Las diferencias de movilidad molecular se encuentran estrechamente relacionadas con el contenido de agua de las muestras, así como también con la distribución de los sólidos en la muestra. En un trabajo publicado por Sosa y col. (2012) con manzanas deshidratadas por secado convectivo y liofilización y pretratadas previamente con infusión seca de sacarosa, se observó que las muestras pretratadas presentaron menor movilidad molecular que sus respectivos controles. Puede decirse entonces que la incorporación de azúcares podría mejorar la estabilidad de las muestras dado que reduce la movilidad molecular con un potencial retraso de los cambios deteriorativos. Coherentemente con el comportamiento previamente observado al analizar la T_g , las muestras con infusión y escaldado previo presentaron una movilidad molecular visiblemente reducida en todo el intervalo de actividad de agua analizado lo que podría relacionarse con una mayor estabilidad de los productos en este caso.

Las muestras pretratadas con infusión seca con glucosa (ISg) presentaron valores de T_2 mayores que las pretratadas con sacarosa (ISs), posiblemente debido a que la glucosa, al ser una molécula de menor tamaño tenga mayor movilidad que la sacarosa y además, las

infusiones con glucosa adsorbieron más agua que aquellas con sacarosa en el rango de a_w analizado.

Por otro lado se evaluó la higroscopicidad de las diferentes muestras deshidratadas. La higroscopicidad de una matriz se define como la propiedad de adsorción de vapor de agua del ambiente. Esta propiedad tiene importancia en los alimentos deshidratados, dado que la adsorción de vapor de agua puede afectar la calidad estructural y comprometer la estabilidad del producto. Por tal motivo, el entendimiento de las cinéticas de sorción de vapor de agua puede contribuir a seleccionar el material de empaque y las condiciones de almacenamiento apropiadas (Rhim y col., 2011). Se analizó la adsorción de vapor de agua a 75% HR, que es una humedad relativa del ambiente a la cual podrían exponerse las peras deshidratadas durante su almacenamiento (**Figura VI.5**). La mayoría de las cinéticas exhibieron una forma exponencial asintótica y el valor de H_i se asoció al valor de humedad alcanzado en el equilibrio, el cual se alcanzó antes de los 300 días en todas las muestras.

Las muestras secadas C y E presentaron una mayor adsorción de vapor de agua que las muestras pretratadas. Luego de ≈ 3 días de exposición estas muestras alcanzaron la máxima capacidad de ganancia de vapor de agua (≈ 28 g agua/100 g fruta deshidratada en base húmeda). Sin embargo el pretratamiento de infusión redujo significativamente la higroscopicidad de las muestras, alcanzándose el equilibrio en tiempos mucho más largos (140-160 días) de exposición de las muestras, salvo en aquellas con glucosa incorporada que alcanzaron la zona asintótica a los 30-35 días de exposición. Las muestras con IS alcanzaron el 50 % de la capacidad total de la ganancia de vapor de agua en un período relativamente corto (27-35 días) mientras que con escaldado previo el tiempo aumentó a 92-95 días. Las muestras con glucosa alcanzaron el 50 % del valor de equilibrio a los 8 días de exposición. Como puede observarse en la **FIGURA VI.6**, que muestra los valores medios de higroscopicidad (H_i) obtenidos cuando las muestras alcanzaron el estado estacionario, todas las muestras presentaron menor higroscopicidad que el control (C) y que las sólo escaldadas (E), coherentemente con el comportamiento observado en las isothermas de sorción de agua correspondiente a esa condición (**Figura VI.1**) donde las muestras control y escaldadas absorbieron más agua hasta una $a_w \approx 0,75$. Las muestras previamente escaldadas y pretratadas (E+ISS1y E+ISS2, E+ISg2) exhibieron los valores más bajos de H_i y presentaron una cinética más lenta durante todo el tiempo de análisis, sobre todo las

muestras con sacarosa incorporada, resultando finalmente con una higroscopicidad (H_i) significativamente más baja que el resto de las muestras.

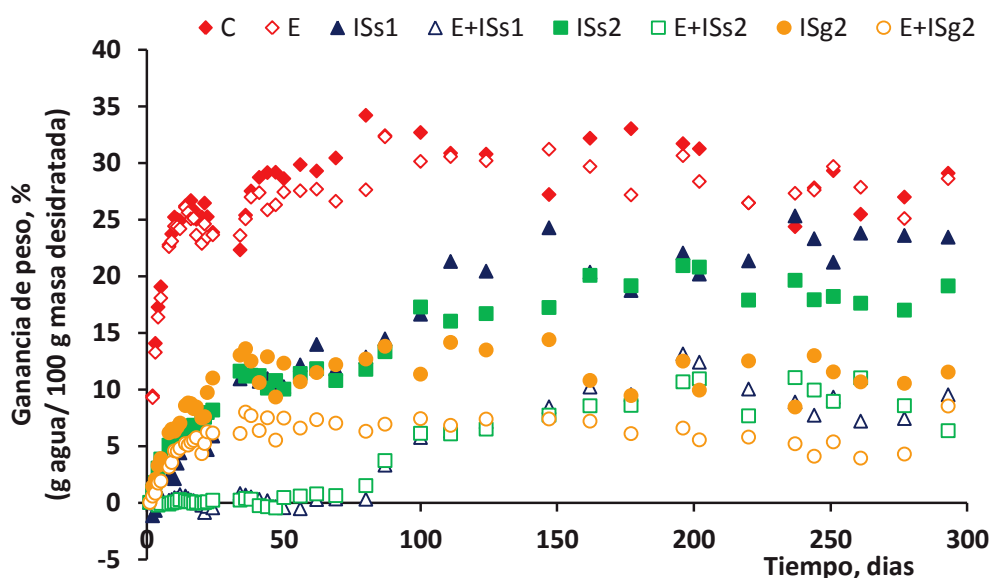


FIGURA VI.5. Cinéticas de adsorción de vapor de agua a 75% HR, para muestras de peras secadas en corriente de aire sometidas a diferentes pretratamientos. Peras Control (C), Escaldadas (E) y pretratadas con Infusión Seca (ISs, ISg) y tratamientos combinados (E+IS) a dos a_w diferentes ($a_{w1} = 0,83$ y $a_{w2} = 0,94$).

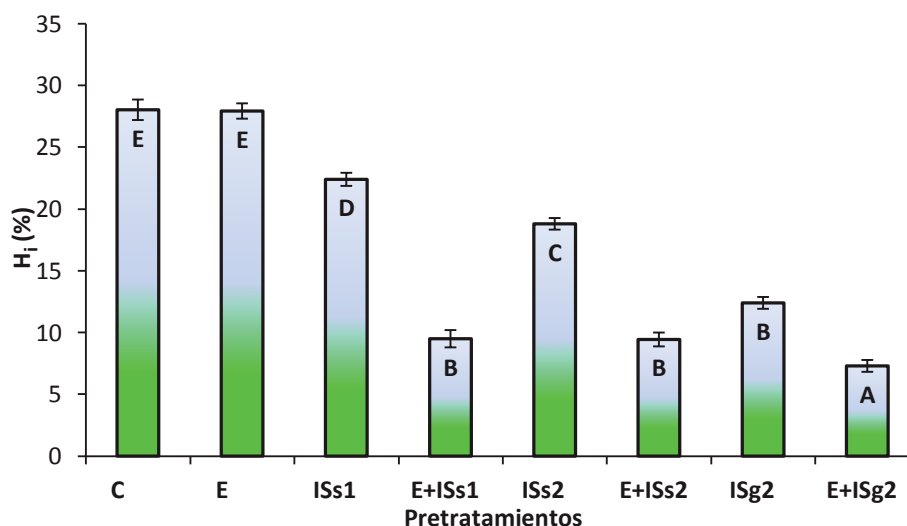


FIGURA VI.6. Valores medios de higroscopicidad (H_i) de los diferentes pretratamientos (ISs, E+ISs, ISg, E+ISg) sometidos a procesos de deshidratación por secado convectivo con aire caliente (S). En cada barra, las medias con el mismo superíndice no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$). Cada valor medio se representa junto a su error estándar.

VI.3. CONCLUSIONES

Las isotermas de sorción de agua son importantes herramientas para predecir las interacciones entre el agua y los componentes de los alimentos. En el caso del modelo GAB, su uso se generaliza por sus bases teóricas, simplicidad matemática y facilidad de interpretación ya que sus parámetros tienen un significado fisicoquímico.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la aplicación de un tratamiento de infusión previo al proceso de secado permitió reducir la capacidad de sorción de agua de las muestras y la movilidad molecular, contribuyendo posiblemente a obtener productos de mayor estabilidad frente a las reacciones de deterioro. El agregado de un escaldado previo a la infusión permitió reducir considerablemente la higroscopicidad y la movilidad molecular de las muestras lo que implica una mayor estabilidad de estas frutas deshidratadas durante el almacenamiento. La mayor temperatura de transición vítrea observada en estas muestras es coherente con la menor deformabilidad y la mayor rigidez observada al analizar el comportamiento mecánico de las mismas, así como también en el menor deterioro del color.

CAPÍTULO VII

Análisis Sensorial de los productos obtenidos



VII.1. INTRODUCCIÓN

Detrás de cada alimento que nos llevamos a la boca existen múltiples procedimientos para hacerlos apetecibles y de buena calidad para el consumo. Uno de estos aspectos es el análisis sensorial, que consiste en evaluar las propiedades organolépticas de los productos, es decir, todo lo que se puede percibir por los sentidos y determinar su aceptación por el consumidor.

Para la realización de cualquier análisis hay una serie de factores experimentales que de no ser considerados, influyen negativamente en la validez, precisión y reproducibilidad de los resultados obtenidos. En el caso particular de la evaluación sensorial, donde el instrumento de medida lo constituyen los jueces, es de suma importancia la normalización de las condiciones fisiológicas que rodean al grupo de personas que evalúan el producto. Es sabido que la calidad sensorial de un alimento no es una característica propia de este, sino que es el resultado de la interacción alimento-hombre y se puede definir como la sensación humana provocada por determinados estímulos procedentes del alimento, lo que depende no sólo de la clase e intensidad del estímulo, sino también de las condiciones del ser humano. Sobre la base de reconocer que la calidad sensorial depende de las sensaciones humanas, es imprescindible la planificación correcta del análisis sensorial. El desarrollo e implementación de pruebas específicas reguladas por normas de estandarización (ISO, UNE, etc.) hace del análisis sensorial una herramienta muy útil y con un amplio campo de aplicación (Cordero-Bueso, 2013).

En este mundo globalizado con cantidad ilimitada de información disponible, la necesidad de adaptarse a los gustos del consumidor conlleva a intentar conocer cuál será el juicio del mismo en la apreciación y valoración sensorial que realizará del alimento. Con el análisis sensorial podemos conocer la opinión de los consumidores, la cual es de relevante importancia en los mercados actuales. En estos últimos años se ha observado que los consumidores tienden a otorgar mayor importancia a la calidad de los alimentos que consumen, interesándose no sólo por el valor nutritivo de los mismos sino por el grado de satisfacción y placer que les brindan. Por tanto, dentro de un mundo desarrollado la elección de los alimentos se hace en función de su calidad. Se entiende por calidad de un alimento su “grado de excelencia” que comprende conceptos como valor nutritivo, aspecto, textura, aroma y sabor (García y Canada, 1997).

En la producción de alimentos cada día se tiene más en cuenta la satisfacción del cliente; así el concepto de calidad ha evolucionado desde ser “una adaptación a las especificaciones internas” a “la capacidad de una organización de satisfacer las necesidades, explícitas e implícitas, que el cliente tenga” (Ferratto, 2003).

El objetivo de este capítulo fue realizar el análisis sensorial de los distintos productos deshidratados obtenidos.

VII.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó el análisis sensorial de los productos obtenidos luego de 4 hs de secado. El estudio se realizó en dos etapas: en la primera se trabajó con un panel de evaluadores y en la segunda, colaboraron 40 consumidores sobre un grupo de muestras seleccionadas: control (C) y pretratadas ISs1, E+ISs1, ISs2 y E+ISs2, secadas por corriente de aire. Las muestras se seleccionaron considerando el mismo soluto (s: sacarosa) aplicado en las infusiones secas a dos a_w diferentes (1: $a_w = 0,83$; 2: $a_w = 0,94$), con y sin escaldado previo. La selección de las muestras se basó en los resultados obtenidos al analizar las propiedades cromáticas (Capítulo V), mecánicas (Capítulo III) y de estabilidad (Capítulo VI) de las muestras, observándose que, en general las infusiones con sacarosa fueron las que condujeron a productos deshidratados con mejores características físicas.

Test de Diferencia de Control

En esta etapa, nueve evaluadores familiarizados con los atributos sensoriales del producto evaluaron a las distintas muestras respecto a la control en cuanto a su sabor y aroma, indicando en la planilla correspondiente (Planilla N°1, ver sección 3.10 de Materiales y Métodos) el tipo de diferencia que encontraban respecto a la misma. De este primer análisis resultó que todas las muestras pretratadas presentaban diferencias con respecto a la muestra control (**Tabla VII.1**).

Tabla VII.1. Medias correspondientes a las frecuencias obtenidas con el Test de Diferencia contra control, error estándar (EE), % de respuestas con aceptabilidad mayor que 5 de las distintas peras pretratadas (con y sin escaldado previo) y secadas respecto a la muestra control (s: sacarosa; 1: $a_w = 0,83$; 2: $a_w = 0,94$) y % de respuestas con rechazo.

Pretrat.	Media	EE	%AP.	%REC.
ISs1	5,47 ^{AB}	0,27	70,59	29,41
E+ISs1	6,29 ^B	0,32	94,12	5,88
ISs2	4,65 ^A	0,28	47,06	52,94
E+ISs2	5,59 ^{AB}	0,23	88,24	11,76

Medias dentro de columnas con una letra diferente en el superíndice indica que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). APROBADAS “%AP.” (Muestras con grandes diferencias) Puntajes ≥ 5 y RECHAZADAS “%REC.” (Muestras con pequeñas diferencias) Puntajes < 5 .

Para los evaluadores las muestras ISs1, E+ISs1 y E+ISs2 fueron las que más se diferenciaban en cuanto a sabor y aroma respecto a la muestra control.

En la **Figura VII.1** se muestran los resultados obtenidos del test de Diferencia de Control (DFC) que surgieron de evaluar cuál de las muestras pretratadas presentaba más resaltado cada uno de los atributos considerados en el análisis: dulzor, sabor a pera, facilidad de masticación, brillo, dureza y humedad respecto a la muestra control. De dicho análisis se pudo observar que las muestras E+ISs1 y E+ISs2 presentaron mayor dulzor, menor dureza y mejor masticabilidad, en relación al control. El efecto del escaldado se observó en el aumento del dulzor y en la facilidad de masticación, mientras que el efecto de la a_w se observó en el mayor sabor a pera en las muestras con elevada actividad de agua (ISs2 y E+ISs2).

Test de Campo con Consumidores

El test de campo con consumidores se realizó con el fin de evaluar la aceptabilidad global, aceptabilidad por apariencia, por textura y por sabor y recabar información del consumidor para optimizar las características de las peras procesadas por los diferentes métodos. Se utilizó una escala hedónica balanceada de nueve puntos en dicha evaluación con una puntuación entre 1 y 9, donde 1 correspondía a “me disgusta extremadamente” y 9 a “me gusta extremadamente”. Los estadísticos obtenidos

de la distribución de los resultados se presentan en la **Tabla VII.2**. De acuerdo al ANOVA realizado sobre la variable “aceptabilidad global” de las peras pretratadas y secadas por corriente de aire ($p < 0,0001$) se observó que la muestra E+ISs2 registró un promedio significativamente mayor de aceptación equivalente a un valor de 6,76 que corresponde a la categoría “me gusta moderadamente”. El resto de las muestras pretratadas registraron valores levemente menores al obtenido con la muestra anterior y sin diferencias significativas entre ellos, correspondiendo a la categoría “ni me gusta ni me disgusta” en la escala de nueve puntos (**Figura VII.2**). A partir de dicha evaluación se pudo detectar que la muestra preferida por los consumidores fue la E+ISs2 (90,24%), siguiendo en orden de preferencia la ISs2 (75,61%) y la E+ISs1 (65,85%). La muestra ISs1 fue la de menor preferencia (53,66%).

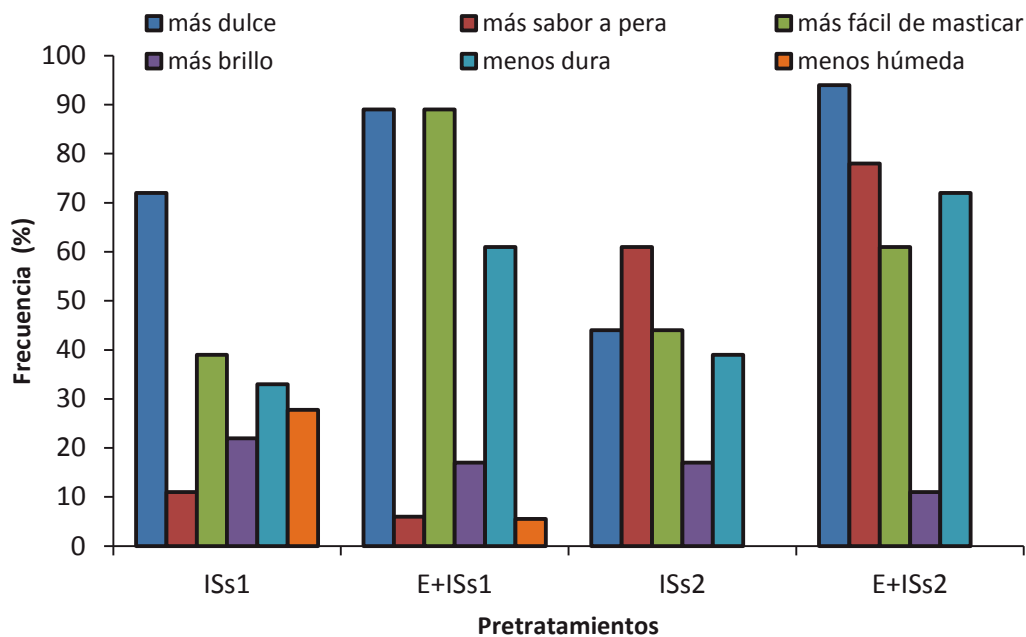


Figura VII.1. Frecuencias de los atributos que diferencian las muestras obtenidas en la prueba de DFC dadas por los evaluadores para la apreciación de los distintos atributos de las peras pretratadas y secadas. ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), ISg2: infusión con glucosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$).

Tabla VII.2. Media de Aceptabilidad Global, error estándar (EE), % de respuestas con aceptabilidad mayor que 5 de las diferentes peras pretratadas, con y sin escaldado previo, y secadas (s: sacarosa; 1: $a_w = 0,83$; 2: $a_w = 0,94$) y % de respuestas con rechazo.

Pretrat.	Media	EE	%AP.	%REC.
ISs1	4,71 ^a	0,35	53,66	46,34
E+ISs1	5,27 ^a	0,34	65,85	34,15
ISs2	5,49 ^a	0,3	75,61	24,39
E+ISs2	6,76 ^b	0,24	90,24	9,76

Medias dentro de columnas con una letra minúscula diferente en el superíndice indica que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). APROBADAS "%AP." (Muestras preferidas) Puntajes ≥ 5 y RECHAZADAS "%REC." (Muestras no preferidas) Puntajes < 5 .

En la **Figura VII.2** que muestra la frecuencia porcentual del puntaje asignado por los consumidores a la aceptabilidad global, se puede observar que las muestras ISs1 presentaron una distribución porcentual repartida en toda la escala de aceptabilidad, registrando el mayor porcentaje en el puntaje correspondiente a la categoría "me gusta moderadamente". El mismo comportamiento lo registraron las muestras ISs2 y E+ISs1 indicando el mayor porcentaje en las categorías "ni me gusta ni me disgusta" y "me gusta moderadamente", respectivamente. En cambio las muestras E+ISs2 alcanzaron los porcentajes más altos entre las categorías 6 y 9, correspondientes a las categorías "me gusta". Estos resultados indicarían que, en general, hubo una mayor aceptación de las peras previamente escaldadas y pretratadas con sacarosa a un a_w de 0,94.

En la **Tabla VII.3** se muestran los valores medios obtenidos a partir de la prueba de aceptabilidad sensorial para cada categoría de la escala hedónica de los atributos "apariencia", "textura" y "sabor", respectivamente. A través de estas pruebas se buscó determinar las razones que motivaron los resultados de aceptabilidad global y realizar un diagnóstico de los atributos principales de las peras procesadas. Se pudo observar que las muestras E+ISs2, E+ISs1 e ISs2 registraron los porcentajes de aceptabilidad más altos para los tres atributos. Las muestras previamente escaldadas, E+ISs2 y E+ISs1, fueron las más preferidas en cuanto a su "apariencia" y "textura" (% AP.: 75,61 y 70,73 para el atributo "apariencia"; 95,12 y 70,73 para el atributo textura, respectivamente), resaltando en el atributo "sabor" las muestras E+ISs2. Las muestras ISs1 registraron la menor preferencia. Estos resultados pueden apreciarse también en la **Figura VII.3** en la que puede observarse que las muestras ISs1 presentaron los valores más bajos de

aceptabilidad respecto a los tres atributos evaluados, siendo significativamente menor su aceptabilidad en cuanto al atributo "apariciencia" en relación a las otras muestras.

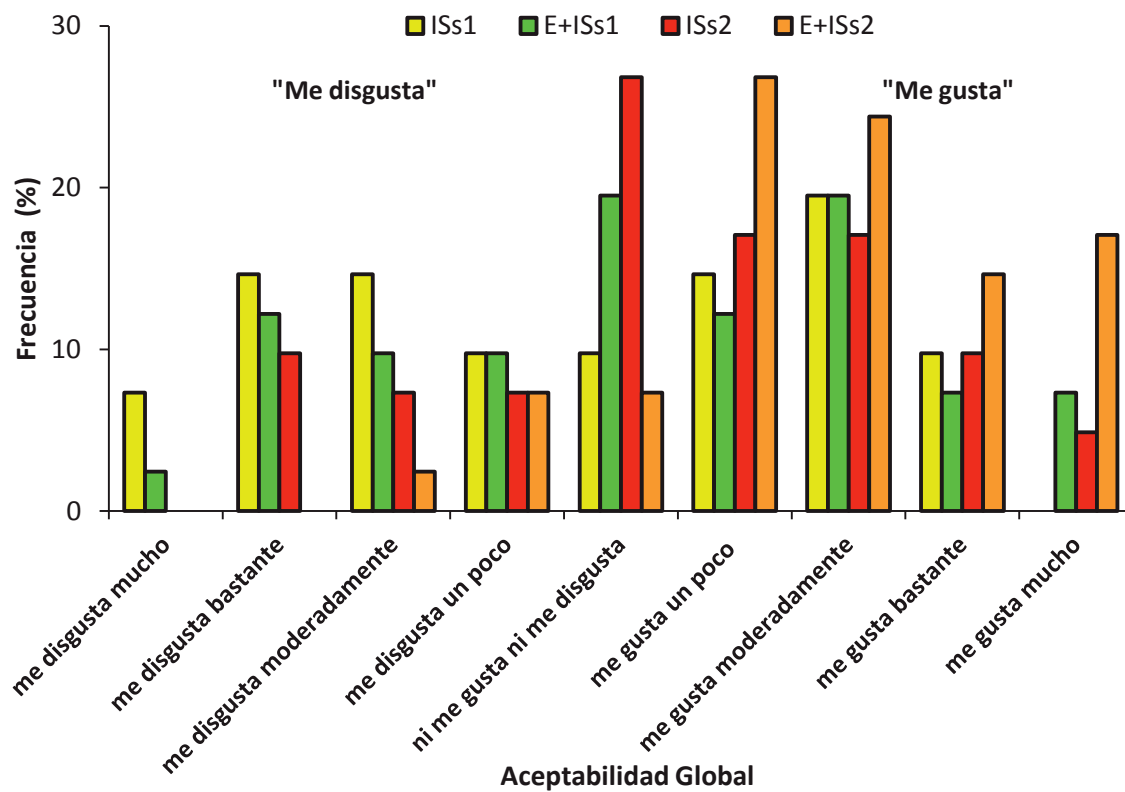


Figura VII.2. Frecuencias de la aceptabilidad global dadas por los consumidores de las peras pretratadas y secadas. ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E + ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E + ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$).

La relación de la estructura de los alimentos con la percepción de la textura mediante la boca humana, no es sencilla. Se lleva a cabo, en parte, durante el proceso dinámico de masticación de la comida en la boca y se ve afectada por procesos orales, tales como la motilidad, la producción de la saliva y la temperatura (Wilkinson y col., 2000).

Tabla VII.3. Media de Aceptabilidad obtenida a partir de la evaluación sensorial de los atributos Apariencia, Textura y Sabor, error Estándar (EE), % de respuestas con aceptabilidad mayor que 5 de las diferentes peras pretratadas, con y sin escaldado previo, y secadas (s: sacarosa; 1: $a_w = 0,83$; 2: $a_w = 0,94$) y % de respuestas con rechazo.

Pretrat.	APARIENCIA				TEXTURA				SABOR			
	Media	E.E	%AP.	%REC.	Media	E.E	%AP.	%REC.	Media	E.E	%AP.	%REC.
ISs1	4,39 ^A	0,31	48,79	51,21	4,73 ^{B*}	0,33	51,22	48,78	4,83 ^a	0,3	56,10	43,90
E+ISs1	5,68 ^B	0,34	70,73	29,27	5,71 ^{B*}	0,36	70,73	29,27	5,41 ^{ab}	0,33	65,85	34,15
ISs2	5,73 ^B	0,27	68,29	31,71	5,51 ^{B*}	0,32	65,85	34,15	6,07 ^b	0,31	73,17	26,83
E+ISs2	5,59 ^B	0,27	75,61	24,39	6,88 ^{A*}	0,21	95,12	4,88	7,15 ^c	0,22	95,12	4,88

Medias dentro de columnas con una letra minúscula diferente en el superíndice indica que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). APROBADAS "%AP." (Muestras preferidas) Puntajes ≥ 5 y RECHAZADAS "%REC." (Muestras no preferidas) Puntajes < 5 .

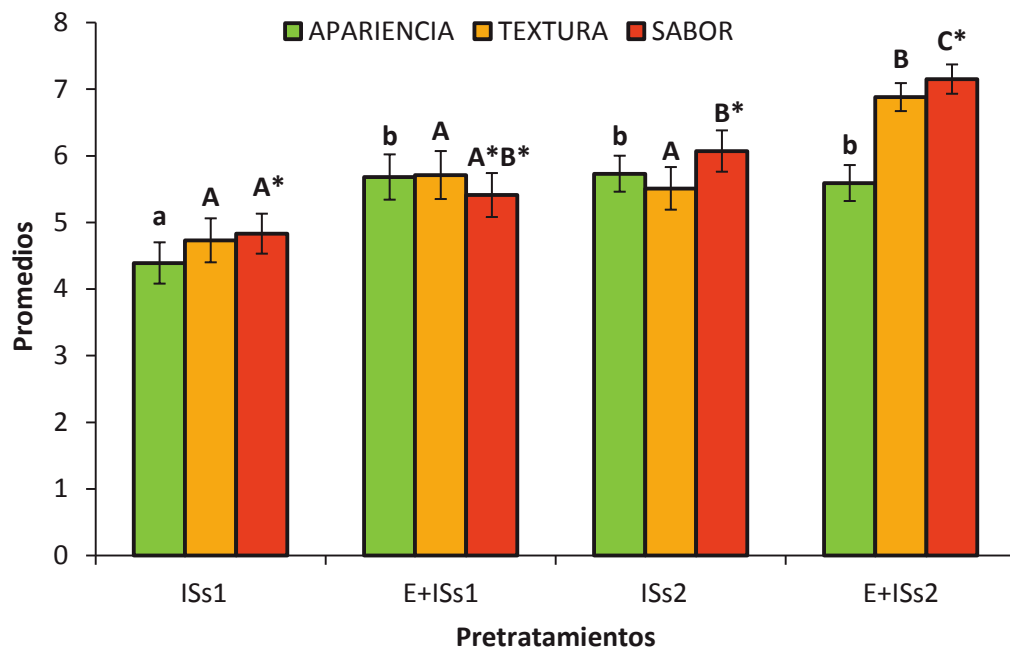


Figura VII.3. Promedios de aceptabilidad obtenidos a partir de la evaluación sensorial de los atributos Apariencia, Textura y Sabor de las peras pretratadas y secadas. ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$).

Adicionalmente se evaluaron las respuestas asociadas a la optimización de estos productos, en cuanto a los atributos "dulzor" y "color" utilizando una escala LO JUSTO "JAR" de 5 puntos. Este análisis se centró en los atributos que resultaron más críticos para este tipo de muestras. En la **Figura VII.4** se observan los promedios

correspondientes a las respuestas obtenidas para estos atributos. De acuerdo a los resultados obtenidos del ANOVA, en cuanto al dulzor no se observaron diferencias significativas entre las muestras ISs1 y E+ISs2 y respecto del color no se detectaron diferencias entre las muestras pretratadas para una misma a_w .

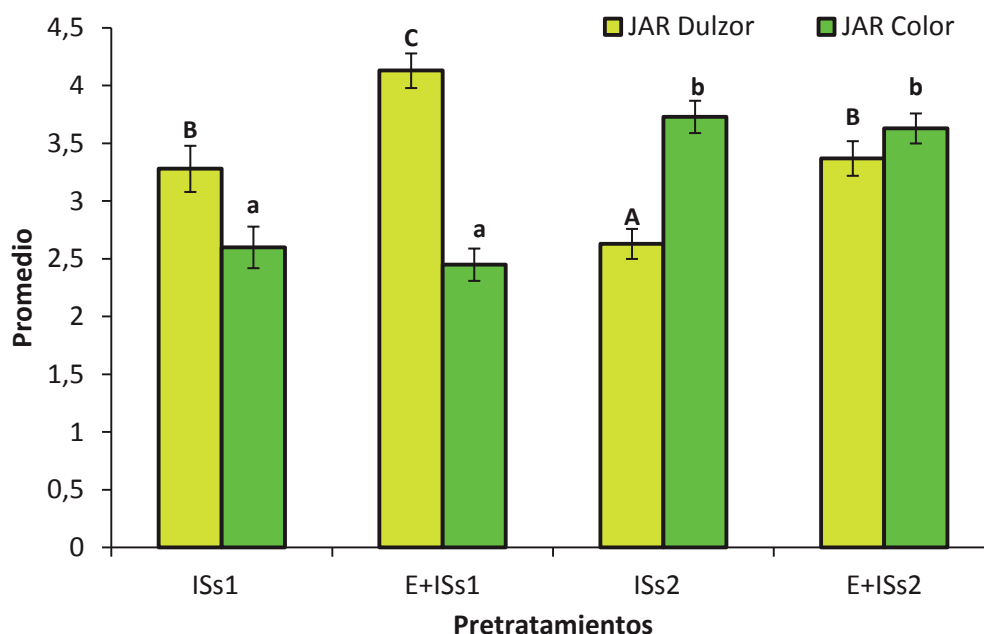


Figura VII.4. Promedios de respuesta obtenidos mediante el análisis con escala “JAR”, de los atributos “dulzor” y “color” de las peras pretratadas y secadas. ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E + ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E + ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$).

En la **Figura VII.5** se muestran las frecuencias porcentuales obtenidas a partir de la evaluación sensorial de los atributos “dulzor” y “color” de las peras. Las que se destacaron con el dulzor “justo” fueron las muestras ISs2 y E+ISs2, mientras que las E+ISs1 fueron las que registraron el mayor porcentaje (75%) en la escala de 5 puntos correspondiente a la categoría “dulce” (**Figura VII.5A**). Con respecto a la evaluación del atributo “color” (**Figura VII.5B**) de las muestras, las ISs1 fueron las que revelaron el mayor porcentaje en el rango de color “claro” dentro de la escala de puntos. Con el color “justo” fueron consideradas en un 55% las muestras E+ISs1, mientras que las ISs2 y E+ISs2 fueron las que registraron los porcentajes más altos (58,5 y 53,5 %) en la escala correspondiente a color “oscuro”.

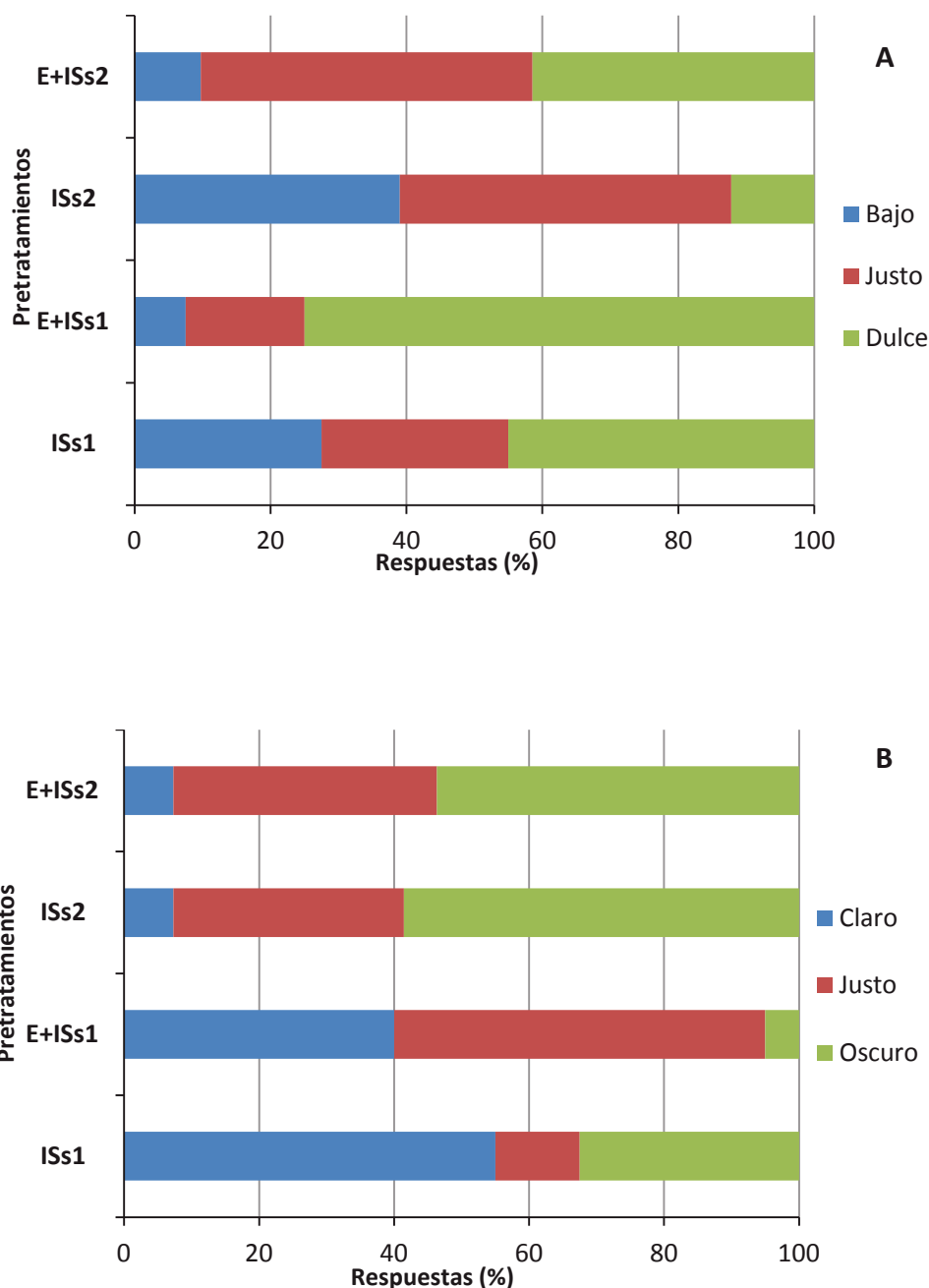


Figura VII.5. Frecuencias obtenidas de la escala LO JUSTO “JAR” dadas por los consumidores para la apreciación de los atributos Dulzor (A) y Color (B) de las peras pretratadas y secadas. ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$).

De la evaluación de todos los atributos considerados en el análisis sensorial de las muestras de pera se confeccionó el siguiente gráfico de radar (o diagrama de araña) que permite integrar los resultados individuales obtenidos (**Figura VII.6**). Del mismo se puede concluir que las muestras con mayor aceptación global fueron las E+ISs2, siendo

además las que mayor aceptación tuvieron en cuanto a su sabor, textura, color y apariencia. Le siguieron las muestras ISs2 debido a que muchos de los consumidores las aceptaron favorablemente, resaltando sus atributos de sabor, color, apariencia y en menor grado su textura. En cuanto al dulzor, estos dos tipos de muestras presentaron un valor bajo, a diferencia de las muestras E+ISs1 que reflejaron el mayor dulzor, coherentemente con el mayor contenido de azúcares de estas muestras. Las muestras de menor aceptación global fueron las ISs1, manifestando los valores más bajos en la mayoría de los atributos.

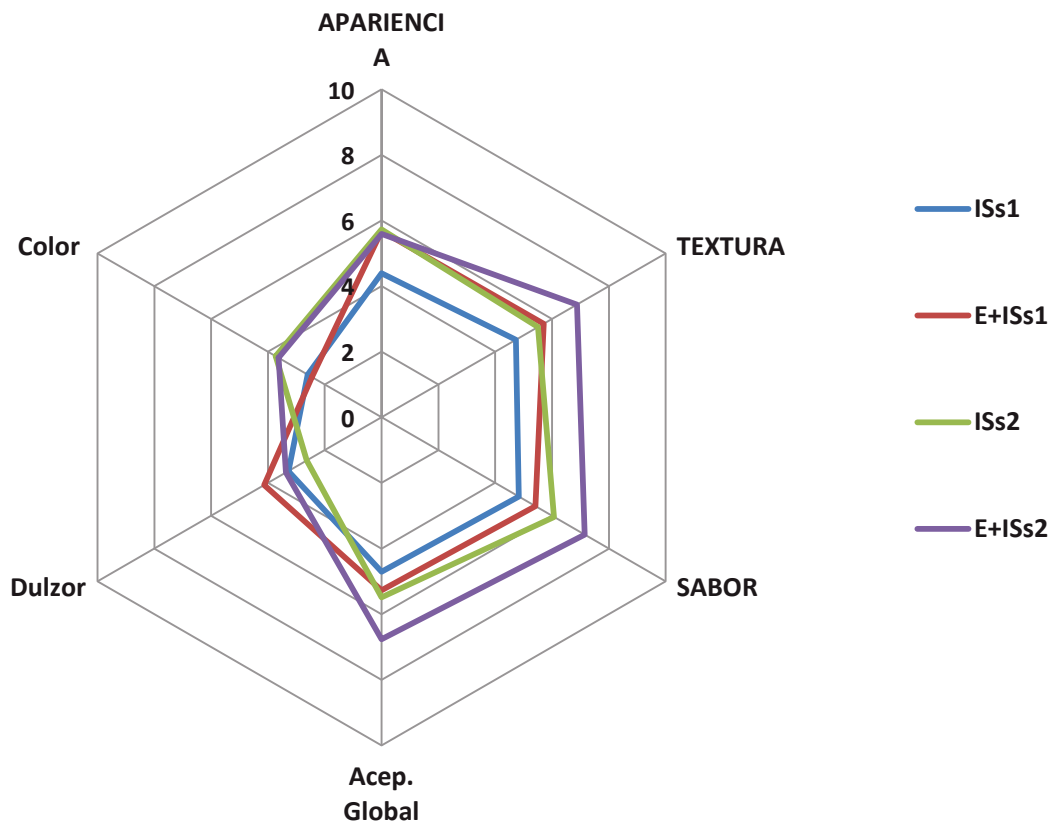


Figura VII.6. Gráfica radial representando los diferentes atributos evaluados por los consumidores en las muestras pretratadas y secadas. ISs1: infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), ISs2: infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$), E+ISs1: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,83$), E+ISs2: escaldado y posterior infusión con sacarosa ($a_w = 0,94$).

VII.3. CONCLUSIONES

La intensidad del sabor dulce percibida en las muestras pretratadas dependió no sólo de la concentración de azúcares de la muestra, sino también de su distribución dentro de la estructura final obtenida. Se observó que a pesar de tener igual contenido de azúcares, las muestras con escaldado previo a la infusión (E+ISs1 y E+ISs2) se percibieron como más dulces que las muestras sin escaldado previo (ISs1 e ISs2). Ello parece indicar que las diferencias estructurales entre ambas muestras influyeron en el comportamiento de cada matriz durante su transformación en la cavidad bucal modificando la liberación de las moléculas de sacarosa desde la matriz y su posterior contacto con los receptores. En el caso de muestras con escaldado previo, una mayor distribución de los azúcares en el tejido, probablemente haya facilitado la liberación de moléculas durante la masticación con un mayor impacto en el sabor y en el dulzor. Adicionalmente las diferencias estructurales observadas entre muestras escaldadas y no escaldadas influyeron significativamente en la textura percibida en ambos tipos de matrices. El análisis sensorial reflejó que un escaldado previo a la infusión condujo a muestras de menor dureza, mejor masticabilidad y una mayor aceptabilidad en cuanto al atributo textura, sobre todo las muestras E+ISs2. De acuerdo a los resultados del análisis de las propiedades mecánicas de las distintas muestras pretratadas (**Capítulo III**), las muestras con menor contenido de azúcares presentaron una mayor firmeza.

CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

- Se modelaron satisfactoriamente las curvas de secado convectivo de peras con y sin pretratamiento por infusión con azúcares, considerando geometría de placa plana y suponiendo condiciones isotérmicas. El modelo empírico de Henderson y Pabis permitió reproducir con adecuada precisión la evolución de la humedad reducida del producto con el tiempo de secado, obteniéndose menores errores estadísticos, incluso en comparación con el modelo difusional de Fick.
- Los pretratamientos modificaron los coeficientes cinéticos, fundamentalmente los de infusión con azúcares, los cuales disminuyeron la velocidad de secado convectivo posterior y condujeron a un aumento en los tiempos de secado, debido a la mayor concentración de azúcar y al encogimiento volumétrico producido en las muestras durante esta primera etapa de procesamiento.
- El análisis de las alteraciones producidas a nivel celular luego de los pretratamientos indicó una recuperación del arreglo tridimensional del tejido en muestras con infusión y escaldado previo, las cuales mostraron una mayor integridad de las paredes celulares en comparación con las peras osmotizadas sin escaldado. Esta mayor retención de la estructura original se tradujo en una mayor preservación del volumen a nivel macroscópico luego del secado posterior aportando una textura más agradable.
- La aplicación de un escaldado como único pretratamiento permitió disminuir el tiempo de secado pero no fue efectivo para reducir el pardeamiento de las muestras deshidratadas, permitiendo una mayor preservación del color al utilizarse en forma combinada con procesos de infusión, sobre todo en muestras E+ISs1. Sin embargo en el análisis sensorial realizado con consumidores, estas muestras registraron una menor aceptabilidad debido a su elevado dulzor.

- La aplicación de pretratamientos E+ISs2 condujo a productos de mayor aceptabilidad sensorial en cuanto a preferencia global, textura y sabor con un color levemente más oscuro que las E+ISs1, aunque igualmente aceptable, sugiriendo que el pretratamiento E+ISs2 se presenta como una alternativa potencialmente aplicable para el desarrollo de productos deshidratados de pera de características organolépticas más cercanas a las de las frutas frescas de partida.
- En cuanto a la estabilidad de las muestras, los pretratamientos de infusión permitieron reducir la capacidad de sorción de agua, así como también la movilidad molecular, sobre todo en muestras con escaldado previo, sugiriendo que estos productos serían bastante resistentes a los cambios químicos y físicos deteriorativos si no permanecen por tiempos prolongados fuera de su envase. Además, si se realizara el almacenamiento en envases adecuados, el estado físico de los productos no se vería alterado por tiempos prolongados.

POSIBLES APLICACIONES

- Si se pretende obtener frutas deshidratadas que puedan consumirse directamente como snack, las muestras con pretratamientos E+ISs2 serían las más adecuadas por sus características sensoriales de buena aceptación, su menor contenido de azúcares y su mayor firmeza. Si bien las muestras con ISs2 fueron también aceptadas por los consumidores, serían menos recomendables debido a las peores características físicas (mayor actividad de agua, mayor higroscopicidad y mayor índice de pardeamiento).
- Las peras deshidratadas con pretratamiento E+ISs1 se presentan como productos apropiados para el desarrollo de un producto azucarado destinado a la población infantil como un mix de cereales y frutas deshidratadas. Estas frutas mostraron una baja capacidad de rehidratación a temperatura ambiente y a tiempos cortos, sugiriendo que si estos productos se mezclan con un líquido como leche o jugo, podrán conservar las características de textura en el tiempo esperado de consumo de este tipo de producto.

CONCLUSIONES FINALES

- Los resultados obtenidos resultan útiles en la selección de la tecnología de procesamiento más adecuada para la obtención de peras deshidratadas de alta calidad para consumo directo o para la incorporación en alimentos compuestos, así como también en la determinación de las condiciones de almacenamiento en la que los cambios físicos indeseables son evitados.
- Si bien las frutas pretratadas con infusión poseen un mayor contenido de azúcares que las frutas sin pretratamiento, es interesante considerar a estos productos como una golosina a base de fruta constituyendo una buena alternativa al consumo de otros productos de escaso valor nutricional y elevado valor calórico como papas fritas o galletitas.
- Si bien los pretratamientos de infusión con azúcares representan alternativas factibles para generar productos deshidratados, es necesario realizar en un futuro nuevos estudios con énfasis en la incorporación de humectantes menos calóricos, lo cual permitiría obtener nuevas alternativas de snacks saludables.

NOMENCLATURA



NOMENCLATURA**TRATAMIENTOS**

C = Control

E = Escaldado

IS = Infusión Seca

s = sacarosa

g = glucosa

DO = Deshidratación Osmótica

DETERMINACIONES FISICOQUÍMICAS

a_w = actividad de agua

X = contenido de agua a cada tiempo

H = Humedad

HR = Humedad Relativa

ss = sólidos solubles

V = Volumen

Enc = Encogimiento

$F_{m\acute{a}x}$ = Fuerza Máxima

$\Delta F_{m\acute{a}x}$ = Desplazamiento correspondiente a la $F_{m\acute{a}x}$

S_i = Pendiente Máxima

T_g = Temperatura de Transición Vítrea

T_2 = Tiempo de Relajación

L^* = Luminosidad

a^* = cromaticidad sobre un eje que va del verde (-) al rojo (+)

b^* = cromaticidad sobre un eje que va del azul (-) al amarillo (+)

C^*_{ab} = Croma

h_{ab} = ángulo de tono

FN = fondo negro

FB = fondo blanco

IB = Índice de pardeamiento o índice de browning

CR = Capacidad de Rehidratación

H_i = Higroscopicidad

MO = Microscopía Óptica

MET = Microscopía Electrónica de Transmisión

MEB = Microscopía Electrónica de Barrido

JAR = JUST ABOUT RIGHT

DFC = Test de Diferencia contra Control

BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Ghannam, N. & McKenna, B. (1997). Hydration kinetics of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of food science*, 62(3), 520-523.
- Acevedo, N. C., Briones, V., Buera, P., & Aguilera, J. M. (2008). Microstructure affects the rate of chemical, physical and color changes during storage of dried apple discs. *Journal of Food Engineering*, 85(2), 222-231.
- Adabi, E. M., Motevali, A., Nikbakht, A. M., & Khoshtaghaza, H. M. (2013). Investigation of some pretreatments on energy and specific energy consumption drying of black mulberry. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 19(1), 89-105.
- Adambounou T.L., Castaigne F. & Dillon J.C. (1983). Lowering the water activity of tropical vegetables by partial osmotic dehydration. *Sciences des Aliments* 3, 551-67.
- Adiletta, G., Russo, P., Senadeera, W., & Di Matteo, M. (2016). Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment. *Journal of Food Engineering*, 172, 9-18.
- Agnieszka, C., & Andrzej, L. (2010). Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries. *Journal of Food Engineering*, 97(2), 267-274.
- Aguado Alonso, J.; Calles Martin, J.A.; Canizares, P.; Lopez Perez, B.; Santos Lopez, A.; Serrano Granados, D.P. (2002). Operaciones de conservacion de alimentos. *Ingenieria de la Industria Alimentaria*, 3. Editorial Sintesis.
- Agudelo-Laverde, L.M.; Schebor, C.; Buera, P. (2014). Proton mobility for the description of dynamic aspects of freeze-dried fruits. *Journal of Food Engineering*, 125: 44–50.
- Aguilera, J.M. (2005). Why food microstructure? *Journal of Food Engineering* 67, 3-11.
- Aguilera, J. M., & Lillford, P. J. (2008). Structure–property relationships in foods. *Food Materials Science*, 229-253.
- Aguilera, J. M., Oppermann, K., & Sanchez, F. (1987). Kinetics of browning sultana grapes. *Journal of Food Science*, 52, 990-993, 1025.
- Aguilera, J. M.; Stanley, D.W. (1990). *Microstructural principles of food processing and engineering*. London, Elsevier applied Science.
- Akbulut, A., & Durmuş, A. (2009). Thin layer solar drying and mathematical modeling of mulberry. *International journal of energy research*, 33(7), 687-695.

- Akpınar, E. K., Bicer, Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of food engineering*, 59(1), 99-104.
- Aktas, T., Fujii, S., Kawano, Y., & Yamamoto, S. (2007). Effects of pretreatments of sliced vegetables with trehalose on drying characteristics and quality of dried products. *Food and Bioproducts Processing*, 85(3), 178-183.
- Alandes, L.; Pérez Munuera, I.; Llorca, E.; Quiles, A. & Hernando, I. (2009). Use of calcium lactate to improve structure of “Flor de Invierno” fresh cut pears. *Postharvest Biology and Technology*, 53, 145–151.
- Alvarez, C.A., Aguerre, R., Gomez, R., Vidales, S., Alzamora, S.M. & Gerschenson, L.N. (1995). Air dehydration of strawberries: effects of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transport. *J. Food Engng*, 25, 167-178.
- Alzamora S.M. & Chirife J. (1980). Some factors controlling the kinetics of moisture movement during avocado deliydration. *Journal of Food Science* 45, 1649-1651 & 1657.
- Alzamora, S.M., Castro, M., Nieto, A., Vidales, S., Salvatori, D. (2000). The role of tissue microstructure in the textural characteristics of minimally processed fruits. In: Alzamora, S.M., Tapia, M.S., López-Malo, A. (Eds.), *Minimally Processed Fruits and Vegetables*. Aspen Publishers Inc., Gaithersburg, MD, pp. 153–171.
- Alzamora, S.M.; Gerchenson, L.N.; Vidales, S.L.; Nieto, A.B. (1996). Structural changes in the minimal of fruits: some effects of blanching and sugar impregnation. En: *Food Engineering 2000*. P.Fito E. Ortega –Rodriguez y G.V. Barbose –Canovas (Eds) NY: Chapman and Hall. 117 - 139.
- Alzamora, S. M., Gerschenson, L. N., Vidales, S. L., & Nieto, A. (1997). Structural changes in the minimal processing of fruits: some effects of blanching and sugar impregnation. *Food engineering 2000*, 117-139.
- Alzamora, S. M.; Salvatori, D. M. (2006). Minimal processing foods. En *Handbook of Food Technology and Food Engineering*; Taylor & Francis Books; CRC Press: Boca Raton, USA; 118/1 – 118/16.
- Alzamora, S. M.; Tapia, M. S.; Welti-Chanes, J. (1993). Application of combined methods technology in minimally process fruits. *Food Research International*, 26: 125–130.

- Alzamora, S. M; Tapia, M. S; Welti Chanes, J. (1998). New strategies for minimally processed foods. The role of multitarget preservation. *Food Science and Technology International*, 4 (5) 353-361.
- Andersson, A., Gekas, V., Lind, I., Oliveira, F., Oste, R. (1994). Effect of pre-heating on potato texture. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 34, 229-251.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (1990). *Official Methods of Analysis*, 15th ed. Virginia, USA: Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- Arevalo-Pinedo, A.; Giraldo-Zuniga, A.D.; Dos Santos, F.L.; Arevalo, D.S.Z.; Arevalo, P.R. (2004). Sorption isotherms experimental data and mathematical models for murici pulp (*Byrsonima sericea*). In: Silva M., Rocha S. (eds): *Drying 2004, Proceedings 14 th Drying Symposium (IDS 2004)*. Sao Paulo, Brazil, A: 634-639.
- Azoubel, P. M., & Murr, F. E. X. (2004). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 291-295.
- Azuara, E.; Beristai, C.I. (2002). Osmotic dehydration of apples by immersion in concentrated sucrose/ maltodextrin solutions. *Journal of Food Processing Preservation*, 26: 295-306.
- Azuara, E., Flores, E., & Beristain, C. I. (2009). Water diffusion and concentration profiles during osmodehydration and storage of apple tissue. *Food and Bioprocess Technology*, 2(4), 361.
- Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W., & Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of food engineering*, 55(4), 323-330.
- Barat, J. M., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). Equilibrium in cellular food osmotic solution systems as related to structure. *Journal of Food Science*, 63, 836-840.
- Barroca MJ, Guiné RPF, Pinto A, Gonçalves FM, Ferreira DMS (2006) Chemical and microbiological characterization of Portuguese varieties of pears. *Food Bioprod Process* 84(C2):109-113
- Bell, L. N., & Hageman, M. J. (1994). Differentiating between the effects of water activity and glass transition dependent mobility on a solid state chemical reaction: aspartame degradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42(11), 2398-2401.

- Bellows, R. J., & King, C. J. (1973). Product collapse during freeze drying of liquid foods. In *AIChE Symp. Ser* (Vol. 69, No. 132, pp. 33-41).
- Benítez, Celia (2001) Libro "Cosecha y Poscosecha de peras y manzanas en los valles irrigados de la Patagonia". <http://inta.gob.ar/documentos/packhams-triumph>
- Bennamoun, L., & Belhamri, A. (2008). Mathematical description of heat and mass transfer during deep bed drying: Effect of product shrinkage on bed porosity. *Applied Thermal Engineering*, 28(17), 2236-2244.
- Bilbao-Sáinz, C., Andrés, A., & Fito, P. (2005). Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. *Journal of food Engineering*, 68(3), 369-376.
- Bolin, H. R., & Huxsoll, C. C. (1993). Partial drying of cut pears to improve freeze/thaw texture. *Journal of Food Science*, 58(2), 357-360.
- Bonazzi, C.; Dumulin, E.; Roult-Wack, A.L.; Berk, Z.; Bimbenet, J.J.; Coustois, F.; Trystram, G.; Vasseur, J.F. (1996). Food drying and dewatering. *Drying Technology*, 14: 2135-2170.
- Brunauer, S., Emmet, P., Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 60, 309-319.
- Brunauer, S.; Demming, L.; Demming, W.; Teller, E. (1940). On a theory of the Van der Waals adsorption of gases. *J. Am. Chem. Soc.*, 62: 1723-1732.
- Buckow, R., Weiss, U., & Knorr, D. (2009). Inactivation kinetics of apple polyphenol oxidase in different pressure-temperature domains. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(4), 441-448.
- Caivano, J. L. (1991). Cesia: A system of visual signs complementing color. *Color Research & Application*, 16(4), 258-268.
- Calvo, M. (2006) Pardeamiento Enzimático. [Artículo de clases de Bioquímica de Alimentos]. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias Biológicas. Zaragoza, España.
- Carter, K., & Risky, D. (1990). The roles of sensory research and marketing research in bringing a product to market. *Food technology*, 44(11), 160-162.
- Castelló, M. L., Fito, P. J., & Chiralt, A. (2010). Changes in respiration rate and physical properties of strawberries due to osmotic dehydration and storage. *Journal of food engineering*, 97(1), 64-71.
- Cheftel, J., & Cheftel, H. (1999) *Introducción a la Bioquímica y Tecnología de Los Alimentos*. Editorial Acribia S.A. Zaragoza-España. Volumen 1.

- Chen, P. L., Long, Z., Ruan, R., & Labuza, T. P. (1997). Nuclear magnetic resonance studies of water mobility in bread during storage. *LWT-Food Science and Technology*, 30(2), 178-183.
- Chiewchan, N., Praphraiphetch, C., & Devahastin, S. (2010). Effect of pretreatment on surface topographical features of vegetables during drying. *Journal of food engineering*, 101(1), 41-48.
- Chiralt, A., & Fito, P. (2003). Transport mechanisms in osmotic dehydration: the role of the structure. *Food Science and Technology International*, 9, 179-186.
- Chiralt, A.; Martinez Navarrete, N.; Martinez-Monzo, 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.
- Chiralt, A., & Talens, P. (2005). Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 67(1), 167-177.
- Chirife, J.; Ferro Fontan, C.; Benmergui, E.A. (1980). The prediction of water activity in aqueous solutions in connection with intermediate moisture foods. IV. a_w prediction in aqueous non electrolyte solutions. *Journal of food technology*, 15: 59-70.
- Choi, S.G.; Kerr, W.L. (2003). ^1H NMR studies of molecular mobility in wheat starch. *Food Research International*, 36: 341-348.
- Chottamom, P.; Kongmanee, R.; Manklang, C.; Soponronnarit, S. (2012). Effect of Osmotic Treatment on Drying Kinetics and Antioxidant Properties of Dried Mulberry. *Drying Technology*, 30: 80-87.
- Ciurzynska, A.; Lenart, A. (2010). Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries. *Journal of Food Engineering*, 97: 267-274.
- Código Alimentario Argentino. Capítulo XVIII. Art. 1398.
http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp
- Collignan, A., Raoult-Wack, A. L., & Thémelin, A. (1992). Energy study of food processing by osmotic dehydration and air drying. *Agricultural Engineering Journal*, 1(3), 125-135.
- Colquhoun, I. J., & Goodfellow, B. J. (1994). Chiral recognition by cyclodextrins: the interaction of naringin with β -cyclodextrin. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*, (8), 1803-1807.

- Contreras, C.; Martin, M.E.; Martinez-Navarrete, N.; Chiralt, A. (2005). Effect of vacuum impregnation and microwave application on structural changes which occurred during air-drying of apple. *LWT*, 38: 471–477.
- Cordero-Bueso, G. (2013) “Aplicación del Análisis Sensorial en la cocina y en la industria alimentaria”. Universidad Pablo de Olavide. Crtra de Utrera km1, 41013, Sevilla, España.
- Crank, J., (1975). *Mathematics of Diffusion*. (Oxford University Press, London).
- Crofton, E. C., Markey, A., & Scannell, A. G. (2014). Perceptions of healthy snacking among Irish adolescents: a qualitative investigation. *International Journal of Health Promotion and Education*, 52(4), 188-199.
- Cuastumal, H. G., Ledesma, M. A., & Ordoñez, L. E. (2016). Vitamin C and surface color in tomato and green pepper: effect of heat treatments. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 10(20), 32-36.
- Cunningham, S. E., McMinn, W. A. M., Magee, T. R. A., & Richardson, P. S. (2007). Modelling water absorption of pasta during soaking. *Journal of food Engineering*, 82(4), 600-607.
- Del Valle, J.M.; Cuadros, T.R.M.; Aguilera, J.M. (1998). Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food Research International*, 31 (3): 191-204.
- Dennis F.G. (1986). Apple. En *CRC Handbook of Fruit Set and Development*. Ed. Monselise S.P. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, USA.
- Dirección Nacional de Transformación y Comercialización de Productos Agrícolas y Forestales. MinAgri, (2010). INFORME SECTORIAL de las cadenas de origen agrícola y forestal Nº 1 Peras y Manzanas, marzo – abril 2010.
- Dissa, A. O., Desmorieux, H., Bathiebo, J., & Koulidiati, J. (2008). Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica L. cv. 'Amelie'*) with correction for shrinkage. *Journal of food Engineering*, 88(4), 429-437.
- Doymaz, İ. (2004). Effect of pre-treatments using potassium metabisulphide and alkaline ethyl oleate on the drying kinetics of apricots. *Biosystems Engineering*, 89(3), 281-287.
- Doymaz, I. (2004a). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61, 359–364.
- Doymaz, İ. (2007). Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 591-596.

- Doymaz, İ. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), 914-919.
- Doymaz, İ., & Ismail, O. (2011). Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioproducts Processing*, 89(1), 31-38.
- Doymaz, İ., & Pala, M. (2003). Effect of ethyl oleate on drying characteristics of mulberries. *Molecular Nutrition & Food Research*, 47(5), 304-308.
- Drouzas, A.E.; Tsami, E.; Saravasco, G.D. (1999). Microwave/vacuum drying of model fruit gels. *Journal of Food Engineering*, 39, 117-122.
- El-Aouar, Â. A., Azoubel, P. M., & Murr, F. E. X. (2003). Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of food engineering*, 59(1), 85-91.
- Erenturk, S., Gulaboglu, M. S., & Gultekin, S. (2004). The thin-layer drying characteristics of rosehip. *Biosystems Engineering*, 89(2), 159-166.
- Falade, K. O., & Aworh, O. C. (2004). Adsorption isotherms of osmo-oven dried African star apple (*Chrysophyllum albidum*) and African mango (*Irvingia gabonensis*) slices. *European Food Research and Technology*, 218(3), 278-283.
- Falade, K. O., & Ogunwolu, O. S. (2014). Modeling of drying patterns of fresh and osmotically pretreated cooking banana and plantain slices. *Journal of food processing and preservation*, 38(1), 373-388.
- Femenia, A., Bestard, M. J., Sanjuan, N., Rossello, C., & Mulet, A. (2000). Effect of rehydration temperature on the cell wall components of broccoli (*Brassica oleracea* L. Var. *italica*) plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 46(3), 157-163.
- Feng, H., & Tang, J. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38, 353-367.
- Fennema, O. (1996). *Water and Ice*. Fennema (Ed.). New York: Marcel Dekker.
- Fennema, O. (1999). Water: the star of biomanipulators obscured in a cloud of superficial familiarity. In: Roos, Y.H., Leslie, R.B., Lillford, P.J. (Eds.) *Water Management in the Design and Distribution of Quality Foods: ISOPOW 7*. Technomic Publishing Company, Inc., Pennsylvania, USA.
- Fernandez, L., Castellero, C., & Aguilera, J. M. (2005). An application of image analysis to dehydration of apple discs. *Journal of Food Engineering*, 67(1), 185-193.

- Flink, J.M. (1980). Dehydrated Carrots Slice: Influence of Osmois Concentration on Drying Behaviour and Product Quality. En : Food Process Engineeing I. Edited by linko-Maikki-lariñakari. Aplied Sci. Pub. Ltd. London ,England.
- Flink, J. M. (1983). Nonenzymatic Browning of Freeze-Dried Sucrose. Journal of Food Science, 48(2), 539-542.
- Forni, E., Torreggiani, D., Battistin, P., & Polesello, A. (1986). Research into changes of pectic substances in apricots and peaches processed by osmotic dehydration. Carbohydrate Polymers, 6, 379-393.
- Franks, F. (1994). Long term stabilization of biologicals. Biotech, 12: 253-256.
- Fundación Barrera Zoofitosanitaria Patagónica (2013). Anuario estadístico. Disponible en: www.funbapa.org.ar
- Gabas, A.L.; Telis, V.R.N.; Sobral, P.J.A.; Telis-Romea, J. (2007). Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. Journal of Food Engineering, 82: 246–252.
- García-Pascual, P., Sanjuán, N., Benedito, J., Mateos, M., & Mulet, A. (2000). Hydration behavior of dehydrated Morchella esculenta mushrooms through Peleg's equation. In Proc 12th Int Drying Symp IDS.
- García-Pascual, P., Sanjuán, N., Bon, J., Carreres, J. E., & Mulet, A. (2005). Rehydration process of Boletus edulis mushroom: characteristics and modelling. Journal of the Science of Food and Agriculture, 85(8), 1397-1404.
- García-Pascual, P., Sanjuán, N., Melis, R., & Mulet, A. (2006). Morchella esculenta (morel) rehydration process modelling. Journal of Food Engineering, 72(4), 346-353.
- Gasull, E., & Becerra, D. (2006). Caracterización de Polifenoloxidasas Extraída de Pera (cv. Packham's Triumph) y Manzana (cv. Red Delicious). Información tecnológica, 17(6), 69-74.
- Giangiaco, R., Torreggiani, D., & Abbo, E. (1987). Osmotic dehydration of fruit. Part I: sugar exchange between fruit and extracting syrup. Journal of Food Processing and Preservation, 11, 183-195.
- Gilabert Perez, E. (1992). MEDIDA DEL COLOR/EDUARDO J. GILABERT (No. 535.6 G553M.).

- Giraldo, G.; Vazquez, R.; Martin-Esparza, M.E.; Chiralt, A. (2006). Rehydration kinetics and soluble solids lixiviation of candied mango fruit as affected by sucrose concentration. *Journal of Food Engineering*, 77: 825-834.
- Goff, H.D. (1992). Low temperature stability and the glassy state in frozen foods. *Food Research International*, 25, 317-325.
- Gómez, P. L., Alzamora, S. M., Castro, M. A., & Salvatori, D. M. (2010). Effect of ultraviolet-C light dose on quality of cut-apple: Microorganism, color and compression behavior. *Journal of Food Engineering*, 98(1), 60-70.
- González-Fésler, M., Salvatori, D., Gómez, P., & Alzamora, S. M. (2008). Convective air drying of apples as affected by blanching and calcium impregnation. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 323-332.
- González-Martínez, C., Cháfer, M., Xue, K., & Chiralt, A. (2006). Effect of the osmotic pre-treatment on the convective air drying kinetics of pear var. Blanquilla. *International journal of food properties*, 9(3), 541-549.
- Gould, G. W., & Christian, J. H. B. (1988). Characterization of the state of water in foods: Biological aspects.
- Goupy, P., Amiot, M. J., RICHARD-FORGET, F., Duprat, F., Aubert, S., & Nicolas, J. (1995). Enzymatic browning of model solutions and apple phenolic extracts by apple polyphenoloxidase. *Journal of Food Science*, 60(3), 497-501.
- Greenspan L. (1977). "Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions." *Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section A. Physics and Chemistry*, 81:89-95.
- Guiné, R. P., & AM Castro, J. A. (2003). Analysis of moisture content and density of pears during drying. *Drying Technology*, 21(3), 581-591.
- Guiné, R., Lima, M. J., Barroca, M. J., & Ferreira, D. (2010). Analysis of the alterations in the color of pears dried under different systems. In 17th International Drying Symposium (pp. 1057-1061).
- Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., & Hepbasli, A. (2005). Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46(11), 1667-1679.
- Halsey, G. (1985) Physical adsorption on uniform surfaces. *Journal of Chemical Physics*, Woodbury: Amer. Inst. Physics, v. 16, n. 10, p. 931-937.

- Haque, E.; Bhandari, B.R.; Gidley, M.J.; Deeth, H.C.; Moller, S.M.; Whittaker, A.K. (2010). Protein conformational modifications and kinetics of water-protein interactions in milk protein concentrate powder upon aging: effect on solubility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58: 7748–7755.
- Hawladar, M. N. A., Chou, S. K., & Chua, K. J. (1997). Development of design charts for tunnel dryers. *International journal of energy research*, 21(11), 1023-1037.
- Hii, C.L. & Law, C.L. (2010) Product Quality Evolution During Drying of Foods, Vegetables and Fruits, pp. 125 – 145, en Jangam, S.V; Law, C.L y Mujumdar, A.S. (Eds.), *Drying of Foods, Vegetables and Fruits (Vol. 1)*, The University of Nottingham, Malaysia.
- Hills, B.P.; Remigereau, B. (1997). NMR studies of changes in subcellular water compartamentation in parenchyma apple tissue during drying and freezing. *International Journal of Food Science and Technology*, 32: 51–61.
- <http://alimentosnutricion.com/frutas/la-pera-nutricion-aportes-mas-beneficios/>
- Hughes, R.E., Chichester, C.O. & Sterling, C. (1958). Peneu'ation of maltosacchalides in processed Clingstone-peaches. *Food Technology* 12, lll115.
- Ibarz, A., Pagan, J., & Garza, S. (1999). Kinetic model for colour changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 39, 415-422.
- Iguaz, A., San Martin, M. B., Mate, J. I., Fernandez, T., & Virseda, P. (2003). Modelling effective moisture difusivity of rough rice (Lido cultivar) at low drying temperatures. *Journal of Food Engineering*, 59(2), 253-258.
- Islam, M.N. & Flink, J.N. (1982). Dehydration of potato. II. Osmotic concentration and its effect on air drying behavior. *J. Food Technol.*, 17, 387-403.
- ISO 11136 (2014). Sensory analysis. Methodology. General guidance for conducting hedonic tests with consumers in an controlled area.
- Jackman, R. L., Marangoni, A. G., & Stanley, D. W. (1992). The effects of turgor pressure on puncture and viscoelastic properties of tomato tissue. *Journal of Texture Studies*, 23, 491-505.
- Jackman, R. L., & Stanley, D. W. (1995). Perspectives in the textural evaluation of plant foods. *Trends in Food Science & Technology*, 6(6), 187-194.

- Jaya, S., & Das, H. (2009). Glass transition and sticky point temperatures and stability/mobility diagram of fruit powders. *Food and Bioprocess Technology*, 2(1), 89-95.
- Jazini, M. H., & Hatamipour, M. S. (2010). A new physical pretreatment of plum for drying. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2), 133-137.
- Jewell, G. G. (1979). Fruits and Vegetables. En *Food Microscopy*. J. D. Vaugham (ed). Academic Press. New York, 1-34.
- Kadam, P.Y., Dhumal, S.A. & Shinde, N.N. (1995). Pears. In: *Handbook of Fruit Science and Technology: Production, Composition, Storage and Processing* (edited by D.K. Salunkhe & S.S. Kadam). Pp. 183–203. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Kader, Z. M. A. (1995). Study of some factors affecting water absorption by faba beans during soaking. *Food Chemistry*, 53(3), 235-238.
- Kaláb, M., Allan-Wojtas, P., & Miller, S. S. (1995). Microscopy and other imaging techniques in food structure analysis. *Trends in food science & technology*, 6(6), 177-186.
- Kaleta, A., & Górnicki, K. (2010). Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. *International journal of food science & technology*, 45(5), 891-898.
- Khalloufi, S.; Ratti, C. (2003). Quality Deterioration of Freeze-dried Foods as Explained by their Glass Transition Temperature and Internal Structure. *Journal of Food Science*, 68: 892-903.
- Karathanos, V. T., & Belessiotis, V. G. (1999). Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(4), 355-361.
- Karathanos, V. T., Kanellopoulos, N. K., & Belessiotis, V. G. (1996). Development of porous structure during air drying of agricultural plant products. *Journal of Food Engineering*, 29(2), 167-183.
- Karathanos, V. T., Kostaropoulos, A. E., & Saravacos, G. D. (1995). Air-drying kinetics of osmotically dehydrated fruits. *Drying Technology*, 13(5-7), 1503-1521.
- Karel, M. (1975). Dehydration of foods. En *Principles of Food Science, Part II Physical Principles of Food Preservation*. Eds.: Karel, M., Fennema, O.R. & Lund, D.B. Marcel Dekker, New York, USA.

- Karel, M.; Anglea, S.; Buera, P.; Karmas, R.; Levi, G.; Roos, Y. (1994). Stability-related transitions of amorphous foods. *Thermochim. Acta*, 246: 249-69.
- Kaya, A.; Gogus, F.; Maskan, M. (2002). Moisture sorption isotherms of grape pestil and foamed grape pestil. *Nahrung/Food*, 46: 73-75.
- Keurentjes, J.T.F., Janssen, A.E.M., Brock, A.P., Van der Padt, A., Wesselingh, J.A. & Van T'Riet, K. (1992). Multicomponent diffusion in dialysis membranes. *Chemical Engineering Science* 47, 1963-1971.
- Keqing, D. Xue (2004). Optimización del secado por aire caliente de pera (Variedad Blanquilla). Tesis doctoral, Universidad politécnica de Valencia, España.
- Khin, M. M., Zhou, W., & Perera, C. (2005). Development in the combined treatment of coating and osmotic dehydration of food-a review. *International Journal of Food Engineering*, 1(1).
- Khoyi, M. R., & Hesari, J. (2007). Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1355-1360.
- Kim, M. H., & Toledo, R. T. (1987). Effect of osmotic dehydration and high temperature fluidized bed drying on properties of dehydrated rabbiteye blueberries. *Journal of Food Science*, 52(4), 980-984.
- Kingsly, R. P., Goyal, R. K., Manikantan, M. R., & Ilyas, S. M. (2007). Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice. *International journal of food science & technology*, 42(1), 65-69.
- Knee, M. (1993). Pome fruits. En *Biochemistiy of Fruit Rlpening*. Eds. Seymour G.B., Taylor J.E. & Tucker G.A. Chapman & Hall, Cambridge, UK.
- Kou, Y.; Molitor, P.F.; Schmidt, S.J. (1999). Mobility and stability characterization of model food systems using NMR, DSC, and conidia germination techniques. *Journal of Food Science*, 64 (6): 950-959.
- Krokida, M. K., & Marinos-Kouris, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 1-7.
- Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (2000). The effect of drying methods on viscoelastic behaviour of dehydrated fruits and vegetables. *International journal of food science & technology*, 35(4), 391-400.

- 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 & technology*, 36(1), 53-59.
- Kucner, A., Klewicki, R., & Sójka, M. (2013). The influence of selected osmotic dehydration and pretreatment parameters on dry matter and polyphenol content in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits. *Food and Bioprocess Technology*, 6(8), 2031-2047.
- Labuza, T. (1980). The effect of water activity on reaction kinetics of food deterioration. *Food Technol.*, 34 (59), 18: 36-41.
- Labuza, T. P., Mizrahi, S., & Karel, M. (1972). Mathematical models for optimization of flexible film packaging of foods for storage. *Transactions of the ASAE*, 15(1), 150-0155.
- Landim, A. P. M., Barbosa, M. I. M. J., & Júnior, J. L. B. (2016). Influence of osmotic dehydration on bioactive compounds, antioxidant capacity, color and texture of fruits and vegetables: a review. *Ciência Rural*, 46(10), 1714-1722.
- Lawless, H. & Heymann, L. (1998) *Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices*. Chapman & Hall.
- Lazarides, H. N., Fito, P., Chiralt, A., Gekas, V., & Lenart, A. (1999). Advances in osmotic dehydration. En: *Minimal Processing of Food and Process Optimization*. Singh, R.P. y Oliveira, F.A.R. (Eds.), CRC Press, Boca-Raton, 175-200.
- Lazarides H.N. & Mavroudis N.E. (1996). Kinetics of osmotic dehydration of a highly shrinking vegetable tissue in a salt-free medium. *Journal of Food Engineering* 30, 61-74.
- Lee, K. T., Farid, M., & Nguang, S. K. (2006). The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits. *Journal of Food Engineering*, 72(1), 16-23.
- Leistner, L. (2000). Hurdle Technology in the Design of Minimally Processed Foods. In *Handbook of Minimally Processed Fruits and Vegetables. Fundamental Aspects and Applications*; Alzamora, S.M., Tapia, M.S., Lopez-Malo, A., Eds.; Aspen Publication: Maryland; 13-28.
- Le Maguer, M. (1998). Osmotic dehydration: review and future directions. En: *Proceeding of the international Symposium of Progrss. Food Preservation Process*, 1: 283-309.

- Le Maguer, M. & Yao, Z.-M. (1995). Mass transfer during osmotic dehydration at the cellular level. En: *Food Preservation by Moisture Control. Fundamentals and Applications*. Eds.: Barbosa-Canovas, G.
- Le Meste, M.; Voilley, A. & Colas, B. (1991). Influence of water on the mobility of small molecules dispersed in a polymeric system. In: Levine, H., Slade, L. (Eds.), *Water Relationship in Foods Advances in the 1980s and Trend for the 1990s*, New York, pp. 123–138.
- Lenart, A. (1991). Effect of saccharose on water sorption and rehydration of dried carrot. En: Mujumdar, A.S., Filkova, I. (Eds.), *Drying*. Elsevier, Amsterdam: 489–498.
- Lenart, A. (1996). Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. *Drying technology*, 14(2), 391-413.
- Lenart, A., & Cerkowniak, M. (1996). Kinetics of convection drying of osmodehydrated apples. *Polish journal of food and nutrition sciences*, 2(05).
- Lenart, A., Flink, J.M. (1984a). Osmotic Concentration of Potatoes I, Spatial Distribution of the osmotic effect. *Journal of Food Technology* 19: 45-63.
- Lenart, A., Flink, J.M. (1984b). Osmotic Concentration of Potatoes II, Spatial Distribution of the osmotic effect. *Journal of Food Technology* 19: 65-89.
- Lenart, A., & Iwaniuk, B. (1993). Mass transfer during rehydration of dewatered apple [*Malus domestica*], pumpkin [*Cucurbita pepo*] and carrot [*Daucus carota* L.]. *Polish journal of food and nutrition sciences*, 2(4), 69-76.
- Lenart, A., & Lewicki, P. P. (1988). Osmotic preconcentration of carrot tissue followed by convection drying. *Preconcentration and drying of food materials*, 307-308.
- Lerici, C. R., Pinnavaia, G., Rosa, M. D., & Bartolucci, L. (1985). Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. *Journal of Food science*, 50(5), 1217-1219.
- Levi, A., Ben-Shalom, N., Plat, D. & Reid, D. S. (1988). Effect of blanching and drying on pectin constituents and related characteristics of dehydrated peaches. *Journal of Food Science*, 53, 1187-1190.
- Levine, H., & Slade, L. (1988). Collapse phenomena: A unifying concept for interpreting the behaviour of low moisture foods. *Food Structure—Its Creation and Evaluation*; Blanshard, JMV; Mitchell, JR, Eds, 149-180.

- Lewicki, P. P. (1998a). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. *International Journal of Food Properties*, 1(1), 1-22.
- Lewicki, P. P. (1998b). Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 36(1), 81-87.
- Lewicki, P. P. (2004). Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering*, 61(4), 483-495.
- Lewicki, P. P., Gondek, E., Witrowa-Rajchert, D., & Nowak, D. (2001). Effect of drying on respiration of apple slices. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 333-337.
- Lewicki, P.P.; Jakubczyk, E. (2004). Effect of Hot Air Temperature on Mechanical Properties of Dried Apples. *Journal of Food Engineering*, 64 (3): 307-314.
- Lewicki, P., Lenart, A. (1997). Effect of osmotic pre-treatment on convection drying of selected fruits. En: *Osmotic treatments for the food industry*. A. Sereno (Ed.). FEUP edicoes. Porto. 29-40.
- Lewicki, P. P.; Pawlak, G. (2003). Effect of drying on microstructure of plant tissue. *Drying Technology*, 21: 657-683.
- Lewis D.F. (1986). Features of food microscopy. *Food Microstructure* 5, 1-18.
- Lin, T. M., Durance, T. D., & Scaman, C. H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31(2), 111-117.
- Lipasek, R. A., Ortiz, J. C., Taylor, L. S., & Mauer, L. J. (2012). Effects of anticaking agents and storage conditions on the moisture sorption, caking, and flowability of deliquescent ingredients. *Food research international*, 45(1), 369-380.
- Little, A. H. (1964). The effect of light on textiles. *Coloration Technology*, 80(10), 527-534.
- Lombard, G. E., Oliveira, J. C., Fito, P. & Andrés, A. (2008). Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *Journal of Food Engineering*, vol. 85, pp. 277-284.
- Lozano, R.D. (1978). *Tolerancias de color. El color y su medición*. Editorial AméricaLee. Buenos Aires. Argentina.
- Lozano, J. E., & Ibarz, A. (1997). Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 44, 71-78.
- Luckwill, L.C. & Pollard, A. (1963). *Perry Pears*. University of Bristol Press. Bristol.
- Ludikhuyze, L., Van Loey, A., Indrawati, Smout, C., & Hendrickx, M. (2003). Effects of combined pressure and temperature on enzymes related to quality of fruits and

- vegetables: from kinetic information to process engineering aspects. *Critical reviews in food science and nutrition*, 43(5), 527-586.
- Mabellini, A., Vullioud, M., Márquez, C., & Michelis, A. (2010). Kinetic drying experimental data and mathematical model for sweet cherries (*Prunus avium*). *Journal of food process engineering*, 33(6), 1115-1128.
- Machado, M. D. F., Oliveira, F. A., Gekas, V., & Singh, R. P. (1999). Kinetics of moisture uptake and soluble-solids loss by puffed breakfast cereals immersed in water. *International journal of food science & technology*, 33(3), 225-237.
- Maharaj, V., & Sankat, C. K. (2000). Rehydration characteristics and quality of dehydrated dasheen leaves. *Canadian Agricultural Engineering*, 42(2), 81-85.
- Maftoonazad, N. (2010). Use of osmotic dehydration to improve fruits and vegetables quality during processing. *Recent patents on food, nutrition & agriculture*, 2(3), 233-242.
- Maldonado, S., Arnau, E., & Bertuzzi, M. A. (2010). Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. *Journal of Food Engineering*, 96(3), 333-341.
- Maltini, E., Torreggiani, D., Broveto, B. R., & Bertolo, G. (1993). Functional properties of reduced moisture fruits as ingredients in food systems. *Food Research International*, 26(6), 413-419.
- 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(3), 307-316.
- Marabi, A., Livings, S., Jacobson, M., & Saguy, I. S. (2003). Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *European Food Research and Technology*, 217(4), 311-318.
- Marcotte, M., & Maguer, M. (1991). Repartition of water in plant tissues subjected to osmotic processes. *Journal of Food Process Engineering*, 13(4), 297-320.
- Maroulis, Z. B., Tsami, E., Marinos-Kouris, D., & Saravacos, G. D. (1988). Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. *Journal of food engineering*, 7(1), 63-78.
- Marques, L. G.; Silveira, A. M.; Freire, J. T. (2006). Freeze-drying characteristics of tropical fruits. *Drying Technology*, 24(4): 457-463.

- Marques, L. G., Prado, M. M. and Freire, J. T. (2009). "Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits". *Journal of Food Science and Technology* 42, 1232-1237.
- Martínez, V. Y., Nieto, A. B., Viollaz, P. E., & Alzamora, S. M. (2005). Viscoelastic behaviour of melon tissue as influenced by blanching and osmotic dehydration. *Journal of Food Science*, 70(1), 12-18
- Maskan, M. (2000a). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 169-175.
- Mastrangelo, M.M.; Rojas, A.M.; Castro, M.A.; Gerschenson, L.N.; Alzamora, S.M. (2000) Texture and structure of glucose-infused melon. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80: 769-776.
- Mastrocola, D., Dalla Rosa, M., & Massini, R. (1997). Freeze-dried strawberries rehydrated in sugar solutions: mass transfers and characteristics of final products. *Food Research International*, 30(5), 359-364.
- Mayor, L., Silva, M.A., Sereno, A.M. (2005). Microstructural changes during drying of apple slices. *Drying Technology* 23, 2261-2276.
- Mazza, G. (1983). Dehydration of Carrots. Effects of pre-treatment on moisture transport and product quality. *J. food Technol.*, 18: 113-123.
- Mazza, G., & LeMaguer, M. (1980). Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. *International Journal of Food Science & Technology*, 15(2), 181-194.
- McMinn, W.A.M & Magee T.R.A (1997). Physical characteristics of dehydrated potatoes-part I. *Journal of Food Engineering*, 33, 37-48.
- Meda, L., & Ratti, C. (2005). Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures. *Journal of Food Process Engineering*, 28(3), 233-246.
- Meilgaard, M., Civille, B., & Carr, T. (1999) *Sensory Evaluation Techniques*. CRC Press New York. 3rd edition.
- Menges, H. O., & Ertekin, C. (2006). Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77(1), 119-125.
- Molz, F. J., & Ikenberry, E. (1974). Water transport through plant cells and cell walls: theoretical development. *Soil Science Society of America Journal*, 38(5), 699-704.

- Monnerat, S.M., Pizzi, T.R.M., Mauro, M.A., Menegalli, F.C. (2006). Concentration profiles and effective diffusion coefficients of sucrose and water in osmodehydrated apples. *Food Research International* 39, 739–748.
- Monsalve-González, A. D. E. L. M. O., Barbosa-Cánovas, G. V., & Cavalieri, R. P. (1993). Mass transfer and textural changes during processing of apples by combined methods. *Journal of Food Science*, 58(5), 1118-1124.
- Montenegro, G., Gómez, M., Pizarro, R., Casaubon, G., & Peña, R. C. (2008). Implementation de un panel sensorial para mieles chilenas. *Ciencia e investigación agraria*, 35(1), 51-58.
- Monzón, C. I. C. (2006). Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratadas (Doctoral disertación, Universidad Politécnica de Valencia).
- Moraga, G.; Martinez-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.
- Moraga, G.; Martinez-Navarrete, N.; Chiralt, A. (2004). Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: influence of pretreatment, *J. of Food Eng.*, 62: 315-321.
- Morey, R. V., & Li, H. (1984). Thin-layer equation effects on deep-bed drying prediction. *Transactions of the ASAE*, 27(6), 1924-1928.
- Moy, J.H., Lau, N.B.H., Dollar, A.M. (1978). Effects of sucrose and acids on osmotic dehydration of tropical fruits. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2(2) 131-135.
- Mrad, N. D., Bonazzi, C., Courtois, F., Kechaou, N., & Mihoubi, N. B. (2013). Moisture desorption isotherms and glass transition temperatures of osmo-dehydrated apple and pear. *Food and bioproducts processing*, 91(2), 121-128.
- Nelson, K. A., & Labuza, T. P. (1994). Water activity and food polymer science: implications of state on Arrhenius and WLF models in predicting shelf life. *Journal of Food Engineering*, 22(1-4), 271-289.
- Nieto, A., Castro, M. A., & Alzamora, S. M. (2001). Kinetics of moisture transfer during air drying of blanched and/or osmotically dehydrated mango. *Journal of Food Engineering*, 50(3), 175-185.

- 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(1), 63-79.
- Nieto, A.B., Salvatori, D.M., Castro M.A. & Alzamora, S.M. (2004). Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *Journal of Food Engineering* 60, 269-278.
- Nieto, A.B.; Vicente, S.; Hodara, K.; Castro, M.A.; Alzamora, S.M. (2013). Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility. *Journal of Food Engineering*, 119: 104–114.
- Nijhuis, H.H, Torringa, H.M, Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt, C., Kloek, W. (1998). Approaches to improving the quality of dried fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 9, 13-20.
- Noble, A.C. (1993a) Sensory Evaluation of wine. Types of test: When and How to Use Them. University California Davis. *Viticulture & Enology*. Winter 1993: 15-36.
- Nsonzi, F., & Ramaswamy, H. S. (1998). Quality evaluation of osmo-convective dried blueberries. *Drying Technology*, 16(3-5), 705-723.
- Oliver, L.; Betoret, N.; Fito, P.; Meinders, M.B.J. (2012). How to deal with visco-elastic properties of cellular tissues during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 110: 278–288.
- Oliveira FAR and Illincanu, L. (1999). Rehydration of dried plant tissues: basic concepts and mathematical modeling. In Oliveira FAR: Oliveira JC (Eds) *Processing Foods. Quality Optimization and Process Assessment*, CRC Press, Boca Raton, USA, pp 201-208.
- Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 65(12), 419-421.
- Palou, E., Malo, L., Argai, A., & Welti, J. (1993). Osmotic dehydration of papaya: effect of syrup concentration. *Revista española de ciencia y tecnología de alimentos*.
- Park, K. J., Bin, A., & Brod, F. P. R. (2001). Obtencao das isotermas de sorcao e modelagem matematica para a péra bartlett (*Pyrus sp.*) com e sem desidratacao osmotica. *Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 21(1), 73–77.
- Park, K. J., Bin, A., & Brod, F. P. R. (2003). Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 56(1), 97-103.

- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food science*, 53(4), 1216-1217.
- Peleg, M. (1993) Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *Journal of Food Processing Engineering, Connecticut-USA: Food & Nutrition Press Inc.*, v. 16, n. 1, p. 21-37.
- Peleg, M. (2002). Modeling and simulation of microbial survival during treatments with a dissipating lethal chemical agent. *Food research international*, 35(4), 327-336.
- Penner, E. (2013). Comparison of the new vapor sorption analyzer to the traditional saturated salt slurry method and the dynamic vapor sorption instrument. M. Sc. dissertation, University of Illinois.
- Pirone, B. N., De Michelis, A., & Salvatori, D. M. (2014). Pretreatments effect in drying behaviour and colour of mature and immature 'Napolitana'sweet cherries. *Food and bioprocess technology*, 7(6), 1640-1655.
- Pitombo, R.N.M.; Lima, G.A.M.R. (2003). Nuclear magnetic resonance and water activity in measuring the water mobility in Pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) fish. *Journal of Food Engineering*, 58: 59-66.
- Pitt, R.E. (1992). Viscoelastic properties of fruits and vegetables. En: *Viscoelastic properties of foods*. M: A. Rao y J.F.Steff (Eds) (49-76). London and NY: Elsevier Applied Science.
- Porto, A. A., 2015. Curso de biología. Estructura celular. España. Disponible en: <http://www.bionova.org.es/biocast/tema11.htm>
- Prothon, F., Ahrné, L. M., Funebo, T., Kidman, S., Langton, M., & Sjöholm, I. (2001). Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *LWT-Food Science and Technology*, 34(2), 95-101.
- Puente-Díaz, L., Ah-Hen, K., Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R., & Scala, K. D. (2013). Combined infrared-convective drying of murta (*Ugni molinae Turcz*) berries: Kinetic modeling and quality assessment. *Drying Technology*, 31(3), 329-338.
- Qiao, YJ, Zhang, SL, Tao, ST, Zhang, ZM, y Liu, ZL. (2005). Advances in research on developing mechanism of stone cells in pear fruit, *Journal of Fruit Science* 4, 019.
- Quiles, A., Hernando, I., Pérez-Munuera, I., & Lluch, M. A. (2007). Effect of calcium propionate on the microstructure and pectin methy-lesterase activity in the parenchyma of fresh-cut Fuji apples. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(3), 511-519.

- Rahman, M. S. (2010). Food stability determination by macro-micro region concept in the state diagram and by defining a critical temperature. *Journal of Food Engineering*, 99(4), 402-416.
- Rahman, S.M.A. & Mujumdar, A. S. (2007). Effect of osmotic treatment with concentrated sugar and salt solutions on kinetics and color in vacuum contact drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 31(6): 671-687.
- Ramaswamy, H. S., & Nsonzi, F. (1998). Convective-air drying kinetics of osmotically pre-treated blueberries. *Drying Technology*, 16(3e5), 743-759.
- Ramos, I.N., Silva, C.L.M., Sereno, A.M., Aguilera, J.M. (2004). Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue. *Journal of Food Engineering* 62, 159-164.
- 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(5), 838-841.
- Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Niranjana, K., & Knorr, D. (2002). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*, 13(2), 48-59.
- Rastogi, N. K., Nayak, C. A., & Raghavarao, K. S. M. S. (2004). Influence of osmotic pre-treatments on rehydration characteristics of carrots. *Journal of Food Engineering*, 65(2), 287-292.
- Reppa, A.; Mandala, J.; Kostaropoulos, A. E.; Saravacos, G. D. (1999). Influence of solute temperature and concentration on the combined osmotic and air drying. *Drying Technology*, 17: 1449-1458.
- Resio, A. C., Aguerre, R. J., & Suarez, C. (2006). Hydration kinetics of amaranth grain. *Journal of food engineering*, 72(3), 247-253.
- Restrepo Duque, A. M., Cortés Rodríguez, M., & Suárez Mahecha, H. (2008). Evaluación sensorial de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) y uchuva (*Physalis peruviana* L.) fortificadas con vitamina E. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 61(2).
- Resurrección, A. (1998) *Consumer Sensory Testing for Product Development*. Chapman & Hall.

- Rhim, J.; Somi, K. Y Kim, J.M. (2011). Effect of freezing temperature on rehydration and water vapor adsorption characteristics of freeze-dried rice porridge, *Journal of Food Engineering*, 104; 484-491.
- Richardson, S.J.; Baianu, I.C.; Steinberg, M.P. (1987). Mobility of water in starch powders determined by nuclear magnetic resonance. *Starch*, 39 (6): 198-203.
- Riva, M., Campolongo, S., Leva, A. A., Maestrelli, A., & Torreggiani, D. (2005). Structure-property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. *Food Research International*, 38(5), 533-542.
- Riva, M.; Cortellino, G.; Maestrelli, A.; Torreggiani, D. (2001). Structure collapse and colour changes in osmo-air-dehydrated peach cubes. *Food Science and Biotechnology*, 10: 598-601.
- Roca, E., Guillard, V., Broyart, B., Guilbert, S., Gontard, N. (2008). Effective moisture diffusivity modeling versus food structure and hygroscopicity. *Food Chemistry* 106, 1428-1437.
- Rocha, A. M. C. N., & Morais, A. M. M. B. (2003). Shelf life of minimally processed apple (cv. Jonagored) determined by colour changes. *Food control*, 14(1), 13-20.
- Roger Harker, F., Hallett, I. C., Murray, S. H., & Carter, G. (1996). Food-mouth interactions: towards a better understanding of fruit texture. In *International Postharvest Science Conference Postharvest 96* 464 (pp. 461-466).
- Roos, Y.H. (1992). Reaction kinetics and thermodynamics in food systems; Part II, Phase transitions and transformations. In D. Lund y D. Heldman (Ed.), *Handbook of Food Engineering*. New York: Marcel Dekker.
- Roos, Y.H., Jouppila, K. & Zielasko, B. (1996). Nonenzimatic browning-induced water plasticization: Glass transition temperature depression and reaction kinetics determination using differential scanning calorimetry. *J. Thermal Anal.*, 47:1437-1450.
- Roos, Y., & Karel, M. (1991). Amorphous state and delayed ice formation in sucrose solutions. *International journal of food science & technology*, 26(6), 553-566.
- Roos, Y. H., Roininen, K., Jouppila, K., & Tuorila, H. (1998). Glass transition and water plasticization effects on crispness of a snack food extrudate. *International Journal of Food Properties*, 1(2), 163-180.

- Rosenthal, A. (2001). *Textura de los alimentos: medida y percepción*. Editorial Acribia.
- Rotstein E. & Comish ARH. (1978). Influence of cellular membrane permeability on drying behavior. *Journal of Food Science* 43, 926-934 & 939.
- Roudaut, G.; Dacremont, C.; Valles Pamies, B.; Colas, B.; Le Meste, M. (2002). Crispness: A critical review on sensory and material science approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 13(6-7): 217-227.
- Ruan, R.; Wang, X.; Chen, P.L.; Fulcher, R.G.; Pescheck, P.; Chakrabarti, S. (1999). Study of water in dough using nuclear magnetic resonance. *Cereal Chemistry*, 76: 231-235.
- Ruegg, M., & Blanc, B. (1981). Water activity of honey and related sugar solutions. *Lebensmittel-Wissenschaft+ Technologie.= Food science+ technology*.
- Rugraff Y.L, Desbois P.; Le Botlan D.J. (1996). Quantitative analysis of wheat starch-water suspensions by pulsed NMR spectroscopy measurements. *Carbohydrate Research*, 295: 185-194.
- Ruiz-López, I. I., & García-Alvarado, M. A. (2007). Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *Journal of food engineering*, 79(1), 208-216.
- Sablani, S.S. (2006). Drying of Fruits and Vegetable: Retention of Nutritional/Functional Quality. *Drying Technology*, 24: 123-125.
- Sacilik K, Keskin R, Elicin AK. (2006) Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *J Food Eng*; 73:231-8.
- Sagar, V. R., & Kumar, P. S. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 47(1), 15-26.
- Salameh, A. K., & Taylor, L. S. (2006). Role of deliquescence lowering in enhancing chemical reactivity in physical mixtures. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(20), 10190-10196.
- Salvatori, D. M., González-Fesler, M., Weisstaub, A., Portela, M. L., & Alzamora, S. M. (2007). Uptake kinetics and absorption of calcium in apple matrices. *Revista de Agaroquímica y Tecnología de Alimentos*, 13(5), 333-340.
- Salvatori, D. (1997). *Deshidratación osmótica de frutas: Cambios composicionales y estructurales a temperaturas moderadas*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.

- Salvatori, D.; Andres, A.; Albors, A.; Chiralt, A.; Fito, P. (1998) Structural and compositional profiles in osmotically dehydrated apple. *Journal of Food Science*, 63 (4): 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(1-2), 361-382.
- Sander, A., Prlić Kardum, J. & Glasnović, A. (2010). Drying of solids: estimation of the mathematical model parameter. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 88, pp. 822-829.
- Sanjuan, N., Simal, S., Bon, J., & Mulet, A. (1999). Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering*, 42(1), 27-31.
- Sankat, C. K., Castaigne, F., & Maharaj, R. (1996). The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International journal of food science & technology*, 31(2), 123-135.
- Sapers, G. M., & Douglas, F. W. (1987). Measurement of enzymatic browning at cut surfaces and in juice of raw apple and pear fruits. *Journal of Food Science*, 52(5), 1258-1285.
- Saurel, R., Raoult-Wack, A. L., Rios, G., & Guilbert, S. (1994). Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple I. Fresh plant tissue. *International journal of food science & technology*, 29(5), 531-542.
- Schroeder, C. A. (1982). Progress report on study of sclereid formation in avocado fruit pericarp. *California Avocado Society Yearbook*, 66, 161-165.
- Senadeera, W., Bhandari, B. R., Young, G., & Wijesinghe, B. (2003). Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*, 58(3), 277-283.
- Sereno, A. M., Moreira, R., & Martinez, E. (2001). Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of food Engineering*, 47(1), 43-49.
- Sette, P.; Franceschinis, L.; Schebor, C.; Salvatori, D. (2015). Osmotic dehydrated raspberries: changes in physical and bioactive compounds. *Drying Technology*, 33(6):1-12.

- Sette, P., Salvatori, D., & Schebor, C. (2016b). Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air- and freeze-drying. *Food and bioproducts processing*, 100, 156-171.
- Shiota, H. (1990). Changes in the volatile composition of "La France" pear during maturation. *J. Sci. Food Agr.* 52(3): 421.
- Simal, S., Deyá, E., & Roselló, C. (1997). Simple modeling of drying curves of fresh and osmotically pre-hydrated apple cubes. *Journal of Food Engineering*, 33, 139-150.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Roselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, 66(3), 323-328.
- Skrede, G. (1985). Color quality of blackcurrant syrups during storage evaluated by hunter L', a', b' values. *Journal of Food Science*, 50(2), 514-517.
- 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(1), 143-152.
- Slade, L., & Levine, H. (1991). A food polymer science approach to structure-property relationships in aqueous food systems: non-equilibrium behavior of carbohydrate-water systems. In *Water relationships in foods* (pp. 29-101). Springer US.
- Sokhansanj, S. (1984). Grain drying simulation with respect to energy conservation and grain quality. *Advances in drying*, 3, 121-180.
- Sosa, N., Salvatori, D. M., & Schebor, C. (2012). Physico-chemical and mechanical properties of apple disks subjected to osmotic dehydration and different drying methods. *Food and Bioprocess Technology*, 5(5), 1790-1802.
- Sperling, L. (1986). *Introduction to physical Polymer Science*. New York: John Wiley y Sons.
- Stanley, D. W., & Tung, M. A. (1976). Microstructure of food and its relation to texture. *Rheology and texture in food quality*, 28-78.
- Sterling C. & Chichester C.O. (1959). Sugar distribution in plant tissues cooked in syrup. *Nineteenth Annual Meeting of the Institute of Food Technologists*. Philadelphia, USA.
- Taiwo, K. A., Angersbach, A., Ade-Omowaye, B. I., & Knorr, D. (2001). Effects of pretreatments on the diffusion kinetics and some quality parameters of osmotically dehydrated apple slices. *Journal of Agricultural and food Chemistry*, 49(6), 2804-2811.

- Tao, S., Khanizadeh, S., Zhang, H., & Zhang, S. (2009). Anatomy, ultrastructure and lignin distribution of stone cells in two *Pyrus* species. *Plant Science*, 176(3), 413-419.
- Tarhan, S. (2007). Selection of chemical and thermal pretreatment combination for plum drying at low and moderate drying air temperatures. *Journal of food engineering*, 79(1), 255-260.
- Tapia de Daza, M.S.; Alzamora, S.M.; Welti-Chanes, J. (1996). Combination of preservation factors applied to minimal processing of foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 36: 629 – 659.
- Telis, V. R. N., & Martínez-Navarrete, N. (2010). Application of compression test in analysis of mechanical and color changes in grapefruit juice powder as related to glass transition and water activity. *LWT-Food Science and Technology*, 43(5), 744-751.
- Telis V.R.N., Murari R.C.B.D.L. Carrizo J.M., Telis-Romero J. (2001). Air drying kinetics of osmotically pre-treated tomato. (2001). En: *Ingeniería de Alimentos: nuevas fronteras en el siglo XXI*. P. Fito, A. Mulet, A. Chiralt, A. Andrés. (Eds.), SPUPV, Valencia, España.
- Timmermann, E. O. (2003). Multilayer sorption parameters: BET or GAB values?. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 220(1), 235-260.
- To, E. y Flink, J. (1978 a). "Collapse", a structural transition in freeze dried carbohydrates I. Evaluation of analytical methods. *J. Food Technol.*, 13: 551-565.
- To, E.C. y Flink, J.M. (1978 b). "Collapse", a structural transition in freeze-dried carbohydrates II. Effect of solute composition. *J. Food Technol.*, 13: 567-581.
- Toğrul, İ. T. (2010). Modeling of heat and moisture transport during drying black grapes. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1146–1152.
- Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 209-216.
- Toranzo, J. (2016) *Producción Mundial de Manzanas y Peras*. Programa Nacional Frutales. http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_produccion-mundial-de-manzanas-y-peras_0.pdf
- Torreggiani, D. (1993). Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International*, 26(1), 59-68.
- Torreggiani, D., & Bertolo, G. (2001). Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. *Journal of Food Engineering*, 49(2), 247-253.

- Torregiani, D.; Forni, E.; Maestrelli, A.; Quadri, F. (1998). Influence of osmotic dehydration on texture and pectic composition of kiwifruit slices. *Drying Technology*, 17 (7): 1378-1397.
- Tsourouflis, S., Flink, J. M., & Karel, M. (1976). Loss of structure in freeze-dried carbohydrates solutions: effect of temperature, moisture content and composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 27(6), 509-519.
- Tucker, G.A. & Grierson, D. (1987). Fruit ripening. En: *The Biochemistry of Plants. A comprehensive treatise*. D.D. Davies (Ed), Academic Press. 265-318.
- Tyree M.T. (1970). The symplast concept: a general theory of symplastic transport according to the thermodynamics of irreversible processes. *Journal of Theoretical Biology* 26, 181-214.
- Uddin, M.S., Hawlader, N.A. (1990). Evaluation of drying characteristics of pineapple in the production of pineapple powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 14, 375-391.
- Uddin, M.S.; Hawlader, M.N.A.; Ding, L.; Mujumdar, A.S. (2002). Degradation of ascorbic acid in dried guava during storage. *Journal of Food Engineering*, 51: 21-26.
- Vaccarezza, L. M., Lombardi, J. L. & Chirife, J. (1974) Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. *Journal of Food Technology* 9, 317-327.
- Vagenas, G. K., & Karathanos, V. T. (1993). Prediction of the effective moisture diffusivity in gelatinized food systems. *Journal of Food Engineering*, 18(2), 159-179.
- Van den Berg, C. (1985). Development of B.E.T. like models of sorption of water of foods; theory and relevance. In: Simatos, D., Multon, J.L., Multon, J.L. (Eds.), *Properties of Water in Foods*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 119–135.
- Van Den Berg, C. & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In *Water activity: influences on food quality*. L.B. Rockland and G.F. Stewart (ed). Academic Press, New York.
- Vega A., Cortell L., Andrés A., Fito P. (2001). Deshidratación osmótica como pretratamiento al secado por aire caliente de cubos de pimiento. En: *Ingeniería de Alimentos: nuevas fronteras en el siglo XXI*. P. Fito, A. Mulet, A. Chiralt, A. Andrés. (Eds.), SPUPV, Valencia, España.

- Vega A, Fito P, Andres A, Lemus R. (2007) Mathematical modelling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var Lamuygo). *J Food Eng*; 79:1460-6.
- Vega-Galvez, A.; Ah-Hen, K.; Chacana, M.; Vergara, J.; Martinez-Monzo, J.; Garcia-Segovia, P.; Lemus-Mondaca, R.; Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132: 51-59.
- Vega-Gálvez, A., Notte-Cuello, E., Lemus-Mondaca, R., Zura, L., & Miranda, M. (2009). Mathematical modelling of mass transfer during rehydration process of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *Food and Bioproducts Processing*, 87(4), 254-260.
- Vega, A. A., & Lemus, R. A. (2006). Modelado de la cinética de secado de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*). *Información tecnológica*, 17(3), 23-31.
- Vincent, J. F. V. (1991). Texture of plants and fruits. In Seminar series-Society for Experimental Biology.
- Waldron, K.W.; Parker, M.L.; Smith, A.C. (2003). Plant cell walls and food quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2: 128-146.
- Waldron, K. W., Smith, A. C., Parr, A. J., Ng, A., & Parker, M. L. (1997). New approaches to understanding and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. *Trends in Food Science & Technology*, 8(7), 213-221.
- Wang, H., Feng, H., & Luo, Y. (2007). Control of Browning and Microbial Growth on Fresh-Cut Apples by Sequential Treatment of Sanitizers and Calcium Ascorbate. *Journal of food science*, 72(1).
- Watts, B.M.; Ylimaki, G.L.; Jeffery, L.E. y Elias, L.G. (1995). Métodos sensoriales básicos para la evaluación de alimentos. Universidad de Manitoba. Ottawa, Canadá. Disponible en: <http://idl-bnc.idrc.ca/dspace/bitstream/10625/12666/1/IDL-12666.pdf>
- Welti-Chanes, J.; Alzamora, S.M.; Lopez-Malo, A.; Tapia, M.S. (2000). Minimally processed fruits using hurdle technology. *Food preservations technologies: innovations in food processing*, 123-148.
- Wilkinson, C., Dijksterhuis, G. B., & Minekus, M. (2000). From food structure to texture. *Trends in Food Science & Technology*, 11(12), 442-450.
- Williams, M.W., Courey, H.M., Moffatt, H., Coyer, D.L. (1978). Pear Production, U.S. Department of Agriculture Handbook 526.

- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., & Oliveira, F. A. (2008). Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana. *Journal of Food Engineering*, 86(3), 342-348.
- Yanniotis, S.; Blahovec, J. (2009). Model analysis of sorption isotherms. *LWT*, 42: 1688-1695.
- Yao, W., Yu, X., Lee, J. W., Yuan, X., & Schmidt, S. J. (2011). Measuring the deliquescence point of crystalline sucrose as a function of temperature using a new automatic isotherm generator. *International journal of food properties*, 14(4), 882-893.
- Yong, C.K., Islam, M.R., Mujumdar, A.S. (2006). Mechanical means of enhancing drying rates: effect on drying kinetics and quality. *Drying Technology* 24, 397-404.
- Yu, X., Kappes, S. M., Bello-Perez, L. A., & Schmidt, S. J. (2008). Investigating the moisture sorption behavior of amorphous sucrose using a dynamic humidity generating instrument. *Journal of food science*, 73(1).