



Facultad de Veterinaria
Universidad Zaragoza



Trabajo Fin de Máster

Máster Iniciación a la Investigación en Ciencia y
Tecnología de los Alimentos

DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SECADO DE FRUTAS CONFITADAS PARA SU USO COMO INGREDIENTE ALIMENTARIO

Autor:

Andrea Bordetas Gascón

Directores:

Dr. Javier Raso Pueyo

Dr. Ignacio Álvarez Lanzarote

Facultad de Veterinaria

Junio 2014

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	3
2. INTRODUCCIÓN	5
2.1. Frutas confitadas.....	5
2.2. Deshidratación osmótica.....	6
2.3. La a_w	8
2.4. La deshidratación	11
3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	14
4. MATERIAL Y MÉTODOS	15
4.1. Materia prima.....	15
4.2. Deshidratación	15
4.3. Determinación de la pérdida de agua a lo largo del proceso de deshidratación	16
4.4. Actividad de agua (a_w)	17
4.5. Dureza.....	17
4.6. Curva de deshidratación.....	17
4.7. Curva de velocidad de deshidratación.	17
4.8. Isoterma de desorpción	18
4.9. Modelización	18
4.10. Análisis de datos.....	18
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
5.1. Cubitos de naranja confitada 4x4 mm.	20
5.1.1. Curva de deshidratación obtenida a distintas temperaturas.....	20
5.1.2. Variación de la a_w de la piel de naranja confitada durante su deshidratación a distintas temperaturas.....	24

5.1.3. Obtención de las isotermas de desorción a distintas temperaturas de deshidratación.....	27
5.1.4. Evolución de la textura de los cubitos de piel de naranja confitada durante su deshidratación a distintas temperaturas.	29
5.2. Dados de albaricoque confitados 4x4 mm	33
5.2.1. Curva de deshidratación obtenida a distintas temperaturas.....	33
5.2.2. Variación de la a_w del albaricoque confitado durante su deshidratación a distintas temperaturas.....	38
5.2.3. Obtención de las isotermas de desorción a distintas temperaturas de deshidratación.....	41
5.2.4. Evolución de la textura de los cubitos de albaricoque confitado durante la deshidratación a distintas temperaturas.....	42
6. CONCLUSIONES	46
7. BIBLIOGRAFÍA.....	47

1. RESUMEN

Uno de los usos más generalizados de las frutas confitadas en la industria alimentaria es como ingrediente de muchos productos de pastelería y repostería con una composición y características muy diferentes. Si las frutas confitadas no tienen una a_w similar a la del producto del que van a formar parte existe riesgo de que se produzcan migraciones de agua, y por tanto, cambios de a_w que pueden afectar a sus propiedades sensoriales y favorecer el crecimiento microbiano reduciendo el tiempo de vida útil del producto. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue establecer las condiciones de secado de cubito de naranja y albaricoque confitados para obtener ingredientes con distinta a_w y con unas propiedades sensoriales adecuadas para ser utilizados en la industria de pastelería y repostería.

Como materia prima se utilizaron cubitos de piel de naranja y de albaricoque confitados de $1,6 \text{ cm}^2$. Estos se secaron a 20, 30, 40 y 50°C durante 10 horas. A lo largo del proceso se tomaron muestras y se determinó su contenido en agua, a_w y dureza. En base a estas medidas, se obtuvieron curvas de deshidratación e isotermas de desorpción a distintas temperaturas. Con el fin de comparar resultados, las curvas obtenidas fueron descritas matemáticamente con modelos preestablecidos como el de Fick para las curvas de deshidratación permitiendo determinar las velocidades de deshidratación, o mediante herramientas de regresión múltiple para relacionar la a_w y textura con el tiempo y la temperatura de deshidratación.

En este trabajo, se han obtenido curvas de deshidratación a distintas temperaturas que no mostraban las típicas etapas de estabilización y velocidad constante sino que correspondían a la etapa decreciente. En todos los casos, la humedad y la a_w de los productos disminuyeron con el tiempo principalmente y con la temperatura de deshidratación. Se observó que la velocidad de deshidratación fue mayor al aumentar la temperatura en ambos productos. Sin embargo, la temperatura no afectó a la forma de la isotermia de sorción ni a la relación entre a_w y textura. Los resultados obtenidos han permitido desarrollar ecuaciones matemáticas que permiten establecer las condiciones de secado (tiempo y temperatura) para conseguir cubitos de naranja y albaricoque con una determinada a_w y textura.

ABSTRACT

One of the most widespread uses of candied fruits in the food industry is as an ingredient in many pastries and cakes. If the aw of candied fruits is not similar than that of the product in which will form part of, water migrations can occur. Then a_w changes may modify sensory properties and favoring the microbial growth reducing the shelf-life of the product. Therefore, the objective of this research was to establish the drying conditions of candied orange peel and apricot cubes in order to obtain products of different aw and suitable sensorial properties to be used as ingredient in the industry of cakes and pastries.

Candied orange peel and apricot cubes of 1.6 cm^2 were used as raw material. These were dried at 20, 30, 40 and 50°C for 10 hours. Samples were taken throughout the process and its water content, a_w and hardness were determined. Based on these measures, dehydration curves and desorption isotherms were obtained at different temperatures. In order to compare results, the obtained curves were mathematically described by preset models such as Fick's equation for dehydration curves permitting to determine the dehydration rates, or by using multiple regression to correlate the a_w and texture with the time and temperature of dehydration.

In this work, dehydration curves obtained at different temperatures did not show the typical stages, only observing declining rate stage. In all cases, moisture and the a_w of the product decreased mainly with time, and with the dehydration temperature. For both products, dehydration rate was higher the higher the temperature. However, the temperature did not affect either the shape of the sorption isotherm or the relationship between a_w and texture. The obtained results enabled to develop mathematical equations that allow establishing the drying conditions (time and temperature) to get cubes of candied orange peels and apricot with certain a_w and texture.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Frutas confitadas.

Las frutas confitadas son un producto obtenido a partir de la pulpa de fruta, su cáscara o ambos sometidos a un proceso en el cual se intercambia el agua contenida en la fruta por una solución de azúcar concentrado. El producto final obtenido tiene una vida útil más larga que la fruta fresca debido al descenso de su a_w como consecuencia de su menor contenido en agua y su mayor contenido en solutos. Además, dependiendo de la a_w final del producto se le añaden conservantes con efecto antimicrobiano sobre los mohos y las levaduras, principal causa de la alteración. Estos productos se caracterizan por poseer una consistencia sólida y un aspecto transparente y brillante.

Las empresas dedicadas a la elaboración de frutas confitadas suelen utilizar como materia prima fruta fresca que tras su recolección se introduce en unos depósitos que contienen una solución de SO_2 y Cl_2Ca . El efecto antimicrobiano y antioxidante del SO_2 junto con el efecto fortalecedor de la consistencia de la fruta del Cl_2Ca permiten que la materia prima se conserve durante largos períodos de tiempo antes del confitado. Gracias a este procedimiento de conservación, las empresas disponen de fruta para confitar a lo largo de todo el año y la producción de la fruta confitada no depende de la estacionalidad propia de la fruta fresca.

El proceso de elaboración de la fruta confitada a partir de la materia prima tratada con SO_2 y Cl_2Ca comienza con un tratamiento térmico con agua en ebullición durante un periodo de tiempo variable dependiendo del tamaño y la consistencia de la fruta. En este proceso, se reduce la concentración de sulfitos y se produce un cierto ablandamiento de la fruta que se va a confitar. El proceso de confitado propiamente dicho consiste en introducir la materia prima tratada térmicamente en el interior de una solución azucarada cuya concentración se aumenta progresivamente a medida que avanza el proceso, a una temperatura de alrededor de 65°C.

En esta operación, se produce un fenómeno denominado deshidratación osmótica (Pointing *et al*, 1966). La deshidratación osmótica consiste en la eliminación de agua de un alimento mediante su inmersión en una solución concentrada de un soluto, que generalmente es azúcar o sal (Chandra, S. *et al*, 2013; Sutar *et al*, 2013; VV.AA, 2002). El producto final obtenido mediante esta operación tiene una humedad

entre un 30-40 % y una a_w entre 0,7-0,8 (Akbarian *et al*, 2014; Rafiq, 2012; Sutar *et al*, 2013).

2.2. Deshidratación osmótica

El proceso de ósmosis consiste en el movimiento de moléculas de agua a través de una membrana con una permeabilidad selectiva desde una zona hipotónica (menor concentración de solutos) a una hipertónica (con una mayor concentración de solutos) (Rastogi *et al*, 2002; Shi and Xue, 2009). En el proceso de deshidratación osmótica se producen dos fenómenos simultáneos: la deshidratación del alimento por pérdida de agua y su impregnación con el soluto. Cuando se introduce un alimento fresco en una solución hipertónica, la fuerza impulsora responsable de la deshidratación del alimento es el gradiente de concentración entre la solución y el fluido intracelular. En el caso de que la membrana fuera perfectamente semipermeable, el soluto de la solución osmótica no podría penetrar al interior celular. Sin embargo, las membranas celulares de los alimentos no se comportan como membranas perfectamente semipermeables. Por lo tanto, durante el proceso de deshidratación osmótica dos importantes flujos contracorriente tienen lugar simultáneamente. Uno de ellos corresponde con el flujo de agua del interior de las células del alimento hacia la solución hipertónica y el otro es la difusión del agente osmótico (sal o azúcar) en la dirección contraria, es decir desde la solución hipertónica hacia el interior del alimento. Existe un tercer flujo menos importante en el intercambio de masa, aunque puede influenciar las propiedades nutritivas y organolépticas del producto que consiste en la salida de distintos compuestos solubles como vitaminas, ácidos orgánicos, sales minerales, etc desde el alimento a la solución osmótica (Iazarides, 2001; Khin *et al*, 2005).

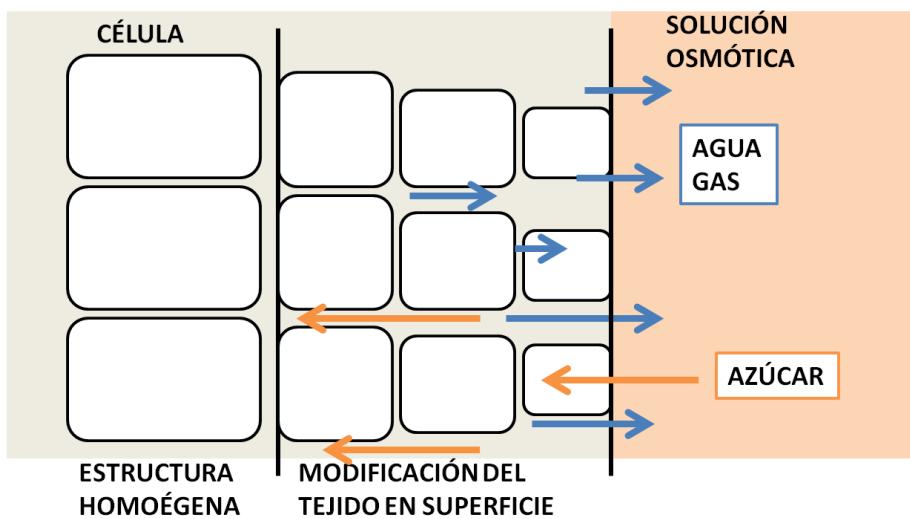


Figura 1. Esquema de las transferencias de masa que ocurren en la deshidratación osmótica.

La Figura 1 representa el patrón de transferencia de masa que ocurre durante el proceso de deshidratación osmótica de un alimento como una fruta. Al introducir la fruta en la solución hipertónica (solución azucarada) las células de la fruta en contacto con la solución comienzan a perder agua debido al gradiente de concentración entre las células y la solución hipertónica, como consecuencia de esta pérdida de agua su volumen se retrae. Una vez que las células de la primera capa del alimento han perdido agua, se establece un gradiente de concentración entre éstas y las células de la segunda capa que provoca el paso de agua, de las células de la segunda a las de la primera. Por lo tanto, el fenómeno de transferencia de masa y de retracción del volumen de las células es un fenómeno que ocurre desde la superficie hacia el centro del alimento a lo largo del proceso de deshidratación osmótica hasta que las células del centro pierden su agua y el fenómeno de transferencia de masa se equilibra tras un largo periodo de tiempo.

La principal ventaja de la deshidratación osmótica frente a un proceso de deshidratación tradicional con aire caliente es que se evitan los efectos negativos del calor sobre las propiedades sensoriales y nutritivas de los alimentos y los costes energéticos del proceso son menores (Akbarian, 2014; Rafiq, 2012). Sin embargo, el producto final obtenido es un producto con una concentración elevada del soluto utilizado en la solución hipertónica lo que modifica su composición y propiedades sensoriales.

2.3. La a_w

El principal parámetro que determina la estabilidad microbiológica y físico-química de las frutas confitadas es su a_w . La a_w es un parámetro físico-químico de mucho interés en la industria alimentaria. Se define como la relación entre la presión de vapor de agua de un alimento y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura. (Fennema, 2000):

$$a_w = \frac{p}{p_0}$$

Donde p es la presión parcial del agua por encima de la muestra y p_0 es la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura, siendo para el agua pura esta relación igual a 1. Cuando se determina la a_w de un alimento es imprescindible indicar la temperatura a la que se ha medido ya que la a_w es dependiente de la temperatura. Según el alimento un cambio de temperatura de 10°C puede causar un cambio en la a_w entre 0,03 y 0,2 (Fennema, 2000).

La a_w es un indicador del agua que hay disponible en un alimento para ser utilizado por los microorganismos y participar en las reacciones químicas y enzimáticas responsables de la alteración de los alimentos. Se trata de un parámetro más adecuado para estimar la estabilidad de los alimentos que el contenido en agua de los alimentos debido a que el agua más íntimamente unida (no disponible) a los componentes acuosos, no puede ser utilizada por los microorganismos ni participar en las reacciones químicas y enzimáticas. Además de ser un parámetro muy importante para estimar la estabilidad de los alimentos, la a_w de un alimento determina su tendencia a intercambiar agua con el ambiente. En función de la a_w del alimento y la humedad relativa del ambiente donde se encuentra el alimento ganará agua (rehidratación) o perderá agua (deshidratación) según la siguiente relación:

$$A_w = Hr_{equilibrio} / 100$$

Finalmente la a_w y no el contenido en agua es el parámetro que determina las migraciones de agua entre distintos componentes de un alimento. Cuando formulamos un alimento y se mezclan los ingredientes la migración del agua de unos componentes a otros dependerá no del contenido en agua de cada uno de los componentes si no de su a_w . Por ello el agua de un componente con alta a_w migrará hacia otro componente con

una a_w más baja hasta que se alcance el correspondiente equilibrio. Estos fenómenos de intercambio de agua de los alimentos con el ambiente o entre distintos ingredientes de un mismo alimento además de afectar a la estabilidad de los alimentos pueden afectar a sus propiedades sensoriales. Las pérdidas o ganancias de agua pueden modificar la textura, el color o la apariencia de un alimento.

Las gráficas que relacionan la a_w de los alimentos con su contenido en agua se denominan isotermas de sorción. La información que puede obtenerse de las isotermas de sorción es útil en los procesos de concentración y deshidratación para establecer la cantidad de agua que tenemos que eliminar en un alimento para conseguir la a_w deseada para un determinado objetivo (Fennema, 2000). Estas gráficas son curvas sigmoideas, cuya forma varía dependiendo de la composición química del alimento. Estas curvas se suelen dividir en tres zonas, como se muestra en la Figura 2.

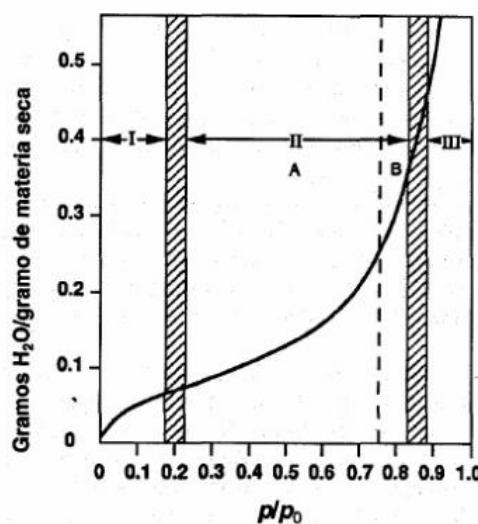


Figura 2. Isoterma de sorción de humedad generalizada para el rango de baja humedad de un alimento a 20°C (Fennema, 2000).

En la zona I de la isoterma se encuentra el agua del alimento más fuertemente absorbida y más inmóvil, esta agua no sirve como solvente y se comporta como parte del sólido. En el límite entre las zonas I y II se encuentra el valor monocapa, que es la cantidad máxima de agua que puede estar ligada muy fuerte a la materia seca. La zona II es el agua de la zona I más el agua multicapa, esta agua multicapa está menos ligada que el agua de la zona anterior por lo que está disponible para disoluciones con solutos de bajo peso molecular y reacciones químicas. La zona III está compuesta por el agua de las dos zonas anteriores más el agua que se denomina añadida o libre, es el agua menos fuertemente ligada, tan solo es retenida por fuerzas de capilaridad, y se encuentra

en estado líquido. El agua de la zona III es congelable, sirve como solvente y es la que permite que se sucedan las reacciones químicas y el crecimiento microbiano rápidamente.

Debido a la importancia del agua en la textura en los alimentos, algunos autores han descrito como la textura se ve influida por los cambios de a_w (Bourne, 1987; Rockland, 1969). Se han relacionado las tres zonas de la isotermia de sorción con los distintos atributos de textura que se pueden percibir al comer un alimento. A la zona I se le asocian los atributos de seca, dura, crujiente y retraída, debido a que en esta zona la humedad del alimento es baja; a la zona II, en la cual los alimentos tienen una humedad intermedia, le corresponden los atributos de seca, firma y flexible; y en la zona III, debido a la alta humedad de los productos, los alimentos son húmedos, blandos, flácidos, hinchados y pegajosos. Sin embargo, otros factores además de la a_w influyen en la textura de los alimentos y en la actualidad no es posible predecir la textura de un alimento con la simple medida de la a_w .

Además de para poder estimar la estabilidad microbiológica, química y enzimática de los alimentos, la a_w y las isotermas de sorción de los alimentos, tienen otras aplicaciones en la industria alimentaria como son: el diseño y control de procesos de deshidratación, la selección de ingredientes en la formulación de los alimentos , o la selección de la permeabilidad del agua del material de envasado, ya que según la a_w del alimento y la permeabilidad al agua del envase se modificará más o menos el contenido en agua del alimento a lo largo de la distribución.

En el caso de las frutas confitadas, en general, la a_w final del producto tras el proceso de deshidratación osmótica no es lo suficientemente baja para que el producto sea estable microbiológicamente. La obtención de un producto con una a_w lo suficientemente baja para impedir el crecimiento de mohos y levaduras requeriría procesos de deshidratación osmótica muy prolongados y la impregnación de la fruta con cantidades muy elevadas de soluto que podría afectar negativamente a sus propiedades sensoriales. Por ello, es necesaria la aplicación de otros métodos de conservación adicionales a las frutas confitadas como la pasteurización, la adición de conservantes o la deshidratación. La deshidratación de la fruta confitada es quizás el proceso más utilizado para conseguir un producto estable sin necesidad de añadir conservantes o para

evitar problemas derivados de la migración de agua entre distintos componentes de un alimento cuando las frutas confitadas se utilizan como ingrediente.

2.4. La deshidratación

La deshidratación es una operación de la industria alimentaria que tiene como objetivo eliminar la mayor parte del agua contenida en un alimento por evaporación mediante la aplicación de calor bajo condiciones controladas. Cuando el proceso de deshidratación se realiza sin control de las condiciones (exposición al sol) el proceso se denomina secado. Cuando la eliminación de agua se realiza mediante un proceso de sublimación el proceso se denomina liofilización.

La mayoría de los procesos de deshidratación se caracterizan porque el alimento se pone en contacto con una corriente de aire caliente de modo que el calor requerido para eliminar el agua se aporta al alimento principalmente por convección. Menos frecuente es la desecación de los alimentos por contacto directo con una superficie caliente en el que el calor se aporta al producto principalmente por conducción.

La deshidratación de los alimentos es un fenómeno complejo que implica procesos de transferencia de masa y calor (Shenma *et al*, 2003). El agua se elimina de los alimentos por medio de su difusión en fase líquida y/o vapor a través de su estructura interior. Al movimiento del agua en estado líquido le sigue su evaporación en algún punto del alimento, para la cual es necesario calor. Por lo tanto el proceso supone un transporte simultáneo de materia y calor.

La evolución de la humedad de un alimento a lo largo del tiempo de secado se muestra en la Figura 3 (Casp y Abril ,1998). En ella, se pueden distinguir las siguientes etapas:

-Precalentamiento (A-B): transcurre mientras el producto y el agua del producto se calientan hasta alcanzar la temperatura de deshidratación. La velocidad de transferencia de masa es muy lenta, sin embargo la transferencia de calor es alta ya que el gradiente de temperatura entre la superficie del producto y el aire es elevado. Este periodo es muy corto en comparación con el tiempo total de secado.

-Periodo de velocidad constante (B-C): Se denomina así porque durante esta etapa se produce una reducción importante del contenido en agua del alimento con un

flujo másico constante. En este periodo la evaporación del agua se produce en la superficie del producto cuya temperatura se mantiene constante. Este periodo continúa mientras que a la superficie del producto llegue agua libre de su interior, fundamentalmente por capilaridad. Generalmente, esta etapa finaliza cuando el contenido medio de humedad del producto alcanza la denominada humedad crítica. La curva de secado en este periodo se ajusta a una línea recta siendo la humedad crítica el contenido de humedad del producto en el que la recta ajustada se separa de la curva de secado.

-Periodo de velocidad decreciente I (C-D): Comienza cuando el contenido en agua del alimento que se deshidrata se corresponde con la humedad crítica. La zona de secado se desplaza de la superficie al interior, lo que provoca que disminuya la velocidad de secado. La migración de agua es cada vez más difícil lo que causa que la transferencia de masa, más que el aporte del calor, sea un factor limitante del proceso. En este periodo, el mecanismo de transporte que predomina es la difusión de vapor desde la zona de evaporación hasta la superficie del producto.

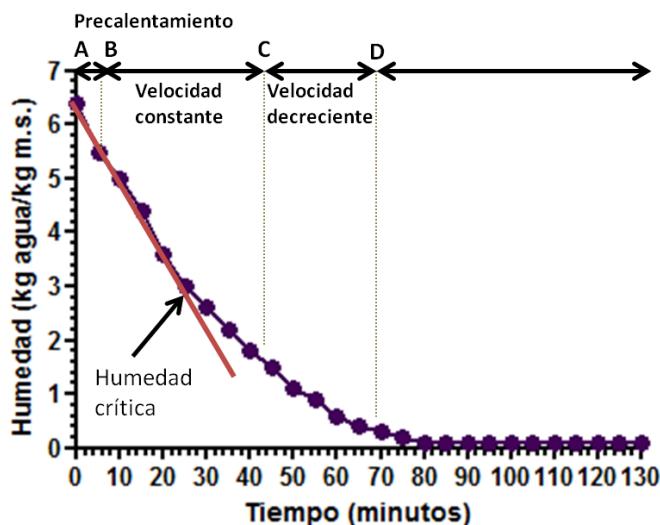


Figura 3. Curva de deshidratación.

Los periodos de la curva de deshidratación se aprecian muy bien si se representa la velocidad de secado, es decir la variación de la humedad respecto al tiempo, frente a la humedad (Figura 4) (Casp y Abril, 1998). El tramo horizontal de la gráfica de velocidad de secado corresponde al periodo de velocidad constante, y los otros dos tramos son los correspondientes a las etapas de velocidad decreciente.

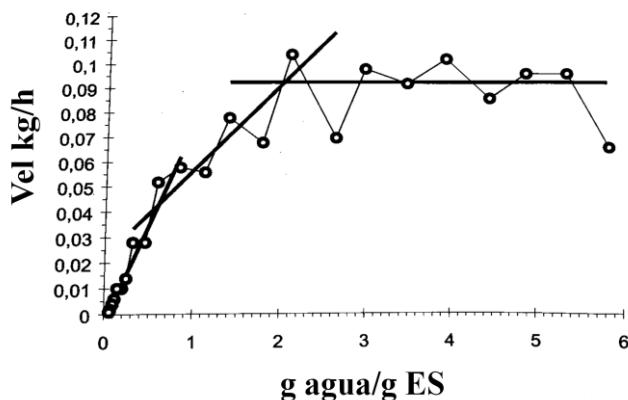


Figura 4. Evolución de la velocidad de secado frente al tiempo (Casp y Abril, 1998).

La temperatura y la velocidad del aire son los dos principales parámetros que influyen en el proceso de deshidratación de un alimento. En general, la velocidad de deshidratación aumenta con ambos parámetros siendo más importante el efecto de la temperatura en la reducción del tiempo de deshidratación. Por ejemplo, en un estudio sobre la deshidratación de arándanos se observó que un aumento de la temperatura de secado de 85°C a 107°C reducía el tiempo de secado a la mitad mientras que para reducir alrededor del 30% el tiempo de secado a 85°C fue necesario aumentar en torno a 100 veces la velocidad del aire (desde 0,4 m/s hasta 45 m/s) (Yemmireddy *et al.*, 2013). Sin embargo, hay que tener en cuenta que la temperatura de deshidratación puede tener influencia en las propiedades sensoriales y nutritivas del producto. Elevadas temperaturas y velocidades de deshidratación suelen provocar que los productos deshidratados tengan una mayor dureza y una peor deshidratación por la formación de una corteza en la superficie. Por lo tanto, es necesario optimizar los procesos de deshidratación considerando tantos aspectos relacionados con la duración del proceso como los aspectos relacionados con las características sensoriales y nutritivas del producto final.

3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Uno de los usos más generalizados de las frutas confitadas en la industria alimentaria es como ingrediente de muchos productos de pastelería y repostería con una composición y características muy diferentes. Si las frutas confitadas no tienen una a_w similar a la del producto del que van a formar parte existe riesgo de que se produzcan migraciones de agua. Dependiendo de la a_w de la fruta confitada el agua migrará del producto a la fruta o viceversa. Estas migraciones de agua pueden modificar las propiedades sensoriales del producto, fundamentalmente la textura, y favorecer el crecimiento microbiano reduciendo el tiempo de vida útil del producto.

El objetivo de esta investigación fue establecer las condiciones de secado de cubito de naranja y albaricoque confitados para obtener ingredientes con distinta a_w y con unas propiedades sensoriales adecuadas para ser utilizados en la industria de pastelería y repostería.

Para obtención de este objetivo general fue necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Obtener las curvas de deshidratación de ambas frutas confitadas a diferentes temperaturas.
2. Determinar la influencia del tiempo y temperatura de secado en los valores de a_w de ambas frutas confitadas.
3. Determinar la influencia del tiempo y temperatura de secado en la textura de ambas frutas confitadas.
4. Desarrollar los correspondientes modelos matemáticos que permiten establecer las condiciones de secado (tiempo y temperatura) y el contenido en agua para conseguir cubitos de naranja y albaricoque con una determinada a_w y textura.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Materia prima

Para este estudio se utilizaron cubitos de piel de naranja y albaricoque confitados, suministrados por la empresa Taisi-José María Lázaro (Calatayud, España).

La piel de naranja compuesta por el albedo y flavedo (Figura 5) estaba cortada en dados de una superficie de 16 mm^2 y procedía de tres variedades de naranja: Salustiana, Navelina y Navelate. Al final del confitado y antes del proceso de secado la piel de naranja confitada tenía una a_w de 0,74, un contenido en agua del 25%, 62,4 °Brix y 1500 gramos de dureza.

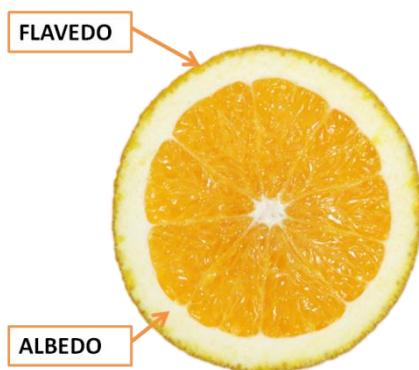


Figura 5. Partes de la piel de la naranja.

Los cubitos de albaricoque sin piel confitados de la variedad Real Fino, tenían 4 mm de lado, una a_w inicial de 0,72, una humedad del 71,6 %, 70 °Brix y 650 gramos de dureza.

4.2. Deshidratación

La deshidratación de las muestras se llevó a cabo en un armario de deshidratación Verinox Junio 1100 (Vigoro Vattaro, Italia), ubicado en la Planta Piloto de la Facultad de Veterinaria (Zaragoza).

En ambos casos, para llevar a cabo la deshidratación se pesaron 16 lotes de aproximadamente 15 gramos de muestra y se colocaron sobre una bandeja perforada (Figura 6).



Figura 6. Distribución de los lotes de 15 g de cubito de naranja confitado en la bandeja para deshidratación.

La deshidratación de ambas muestras se realizó a cuatro temperaturas: 20, 30, 40 y 50 °C durante 10 horas. La velocidad del aire de secado se midió con un anemómetro Almemo (Babaria, Alemania) y se mantuvo a lo largo de todos los experimentos entre 0,6-0,9 m/s. La humedad relativa del ambiente se determinó mediante una sonda de humedad FH-A696-MF (Babaria, Alemania). La Tabla 1 muestra las humedades relativas del ambiente de secado en función de la temperatura del aire, la cual varió dependiendo de la temperatura a la que se realizaba el secado. En la Tabla 1 se muestra la relación de humedades relativas y temperaturas.

Tabla 1. Relación de temperaturas y humedades relativas del armario de deshidratación.

Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
20	28
30	22,8
40	13
50	8,8

A lo largo de las 10 horas de deshidratación se iban tomando muestras de 15 gramos para determinar el contenido en agua, la a_w y la dureza de las mismas a lo largo del proceso de secado.

4.3. Determinación de la pérdida de agua a lo largo del proceso de deshidratación.

La determinación de la pérdida de agua a lo largo del proceso de deshidratación se realizó midiendo la diferencia entre el peso de la muestra antes de iniciar el proceso de secado y tras un determinado tiempo de secado en una balanza analítica Sartorius TE1302S (Madrid, España).

A partir de la pérdida de peso y el extracto seco de la muestra determinado en una termobalanza Kern DBS 1.1 (Balingen, Alemania) se calculó la humedad del producto, expresada como g agua/ 100 g muestra.

4.4. Actividad de agua (a_w)

La medida de la a_w de las muestras se realizó mediante el equipo Aqua Lab 4TEV (Pullman, USA). La determinación de la a_w de la muestra se basa en la determinación de la temperatura del punto de rocío del ambiente en equilibrio con la muestra del alimento.

4.5. Dureza

La medida de la dureza se llevó a cabo en el texturómetro TX-XT2I Stable Micro System (Surrey, UK). Se realizó un análisis de fuerza-compresión, en este tipo de análisis se aplica una fuerza que produce una deformación en el producto. El grado de deformación se considera el índice de textura, el cual te indica los gramos de fuerza necesarios para comprimir el producto. Para tomar el valor, el equipo da un pico máximo que es el que indica la dureza.

Para este test se utilizó una sonda SMS P/KOBE, que consiste en un cilindro de 1 cm de diámetro, que cubriría toda la superficie de la muestra. La velocidad del preensayo eran 2mm/s, el ensayo 0,5 mm/s y postensayo 10 mm/s. Como distancia de compresión se eligió la mitad de la altura de la muestra (2 mm), y la célula de carga fueron 30 Kg.

De cada uno de los lotes se analizaron 10 cubitos de naranja.

4.6. Curva de deshidratación

Las curvas de deshidratación se obtuvieron representando la pérdida de peso de 100 gramos de muestra a lo largo del tiempo de deshidratación.

4.7. Curva de velocidad de deshidratación.

La curva de velocidad de deshidratación se obtuvo representando en el eje abscisas la humedad de la muestra expresada en gramos de agua por gramos de extracto seco frente a la pérdida de agua a lo largo del tiempo expresada en kg de agua perdidos por hora de deshidratación.

4.8. Isoterma de desorción

La isoterma de desorción se elaboró representando la relación entre la a_w de la muestra a lo largo del proceso de deshidratación y su humedad expresada en gramos de agua por 100 gramos de extracto seco.

4.9. Modelización

Las curvas de deshidratación se modelizaron utilizando la ecuación 1 que está basada en el modelo de Fick.

$$Y = Xe + (Xi - Xe) * \exp(-k*t) \quad \text{Ec (1)}$$

Donde Y es la pérdida de peso a lo largo del tiempo (g); Xi es el peso inicial (g); t es el tiempo de secado (h); y Xe y k son las constantes de la ecuación que se calculan mediante la herramienta Solver del Excel XP (Microsoft Corporation, Washington DF, USA).. Xe representa la cantidad máxima de agua perdida y k representa la velocidad de secado. La bondad del ajuste se estimó a partir del coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático de la media (ECM).

La influencia de la temperatura y tiempo de secado sobre la a_w de la muestra y su textura se describió mediante un modelo de regresión múltiple con la herramienta “Essential Regression 2.22” del programa Excel XP (Microsoft Corporation, Washington DF, USA). En ambos casos se partió de una ecuación de segundo grado y se fueron eliminando las variables de la ecuación no significativas ($p > 0,05$) mediante el procedimiento paso a paso hacia atrás. La bondad de los ajustes se estimó a partir del coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático de la media (ECM). La influencia de las distintas variables del modelo se evaluó a partir del Valor F.

4.10. Análisis de datos

El análisis estadístico se realizó con el programa Prism 5.0 (GraphPad Prism 5, San Diego, CA). Las curvas de deshidratación y la a_w en el cubito de naranja representan la media de los valores de dos experimentos independientes. Las barras de error se corresponden con el error estándar de la media. Los valores de textura se corresponden con el valor medio obtenido a partir de 10 medidas independientes de cada una de las dos muestras obtenidas en el proceso de deshidratación. En el caso del cubito de albaricoque la curva de deshidratación y a_w solo se corresponde con los

resultados obtenidos en una única replica. Los valores de textura se corresponden con los valores medios obtenidos a partir de 10 medidas independientes.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente trabajo, se han establecido las condiciones de secado más adecuadas para conseguir frutas confitadas (cubitos de piel de naranja y cubitos de albaricoque) con distintas a_w y determinadas propiedades sensoriales (concretamente la textura) para ser utilizada como ingrediente en distintos productos y así evitar posibles fenómenos de migración de agua entre diferentes puntos del producto. Ello ha requerido, en primer lugar, obtener a distintas temperaturas de secado las curvas de deshidratación de cada producto y sus isotermas de desorpción. En base a estos resultados, se han establecido las condiciones de deshidratación (tiempo y temperatura) que permitan conseguir una determinada a_w del producto. Debido a que también se ha investigado la modificación de la textura de los productos durante su deshidratación, se han podido definir las condiciones de deshidratación que permitan conseguir una determinada textura.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los dos productos investigados: cubito de piel de naranja confitada 4x4mm y cubitos de albaricoque 4x4 mm.

5.1. Cubitos de naranja confitada 4x4 mm.

5.1.1. Curva de deshidratación obtenida a distintas temperaturas.

La Figura 7 muestra la curva de deshidratación obtenida tras deshidratar durante 10 horas cubitos de piel de naranja confitada de 4x4 mm a las temperaturas de estudio de 20, 30, 40 y 50 °C (puntos). En esta gráfica, también se muestra con líneas continuas el ajuste de los valores obtenidos experimentalmente a la ecuación de Fick (Ec. 1) para cada una de las temperaturas de deshidratación como se describe más adelante. En esta figura se observa que se produce un descenso continuo de la cantidad de agua del alimento a lo largo del tiempo de deshidratación y esta pérdida de peso está influenciada por la temperatura. Sin embargo, y a diferencia de la curva teórica de deshidratación descrita en la “Introducción”, en este caso no se observa la fase de precalentamiento, sino que desde el primer punto se produce pérdida de agua. Este hecho puede ser debido a que la cantidad de producto a secar respecto al volumen de aire utilizado en el armario de deshidratación es muy pequeña, así como que las dimensiones del producto (4x4 mm) son reducidas, por lo que toda la masa del producto se acondicionaría

inmediatamente a las condiciones de secado comenzando a perder agua rápidamente una vez se introduce en el equipo. En cualquier caso, para confirmar esta circunstancia sería interesante registrar la temperatura del producto con el fin de determinar la existencia o no de esta fase de precalentamiento y observar si la temperatura en algún momento se estabiliza y que coincide con la temperatura de bulbo húmedo del aire de deshidratación (Casp y Abril, 1998).

Como se ha indicado, en la Figura 7, se puede observar como con el paso del tiempo se produce un descenso continuo de la cantidad de agua del producto, siendo este descenso mayor cuanto más elevada era la temperatura del aire de deshidratación. Curvas similares han sido descritas por Singh *et al.* (2008) así como por Demarchi *et al.* (2013) deshidratando castañas y manzanas respectivamente, a diferentes temperaturas. Como se observa en la Figura 7, cuanto mayor es la temperatura menor es la cantidad de agua que tiene la muestra para un mismo tiempo de deshidratación, es decir que para un mismo tiempo las muestras pierden mayor cantidad de agua cuanto mayor es la temperatura de procesado. En esta investigación, tras 10 horas de deshidratación, es cuando se consigue una mayor pérdida de peso, o lo que es lo mismo un menor contenido en agua, siendo esta mayor cuanto más elevada es la temperatura de procesado. Es a estas temperaturas más elevadas con las que se consiguen los menores contenidos de agua. Esto es de destacar ya que, según las características finales del producto que se pretendan conseguir (a_w o contenido en humedad), será necesario trabajar a esas temperaturas ya que hay valores que no se alcanzan a todas las temperaturas dentro del tiempo de deshidratación investigados. Por ejemplo, si se quiere un contenido en agua de 85 g agua/100g muestra únicamente se consigue a 40 y 50°C tras 6 y 3 horas respectivamente.

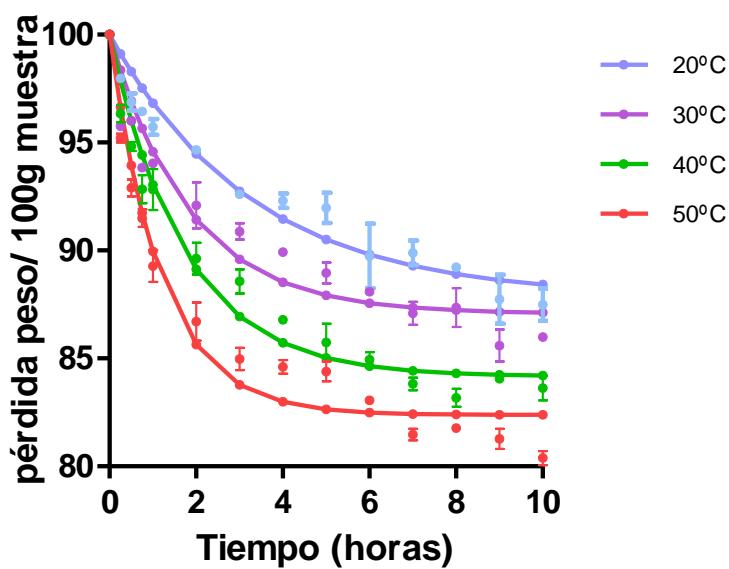


Figura 7. Curva de deshidratación de los cubitos de piel de naranja confitada, las líneas continuas representan los valores estimados con la ecuación de Fick (Ec. 1) y los puntos son los valores reales.

Con el fin de describir con mayor precisión las curvas de deshidratación obtenidas y cuantificar el efecto de la temperatura en la velocidad de deshidratación, las curvas obtenidas en la Figura 7 fueron descritas mediante la ecuación de Fick (Ec. 1) descrita en “Material y métodos”. Las líneas continuas representan los valores de humedad obtenidos con el modelo, mientras que los puntos son los valores reales obtenidos experimentalmente. El ajuste de esta ecuación a las curvas ha permitido obtener los parámetros del modelo para cada una de las temperaturas investigadas (Tabla 2). Como puede observarse, el parámetro X_e disminuye ligeramente con el aumento de temperatura, y el parámetro k aumenta al aumentar la temperatura, sobre todo entre 20 y 30°C y entre 40 y 50°C. A partir de estos parámetros, se ha obtenido la gráfica de velocidad de deshidratación de la piel de naranja para las cuatro temperaturas de este estudio (Figura 8) a partir de los g agua/100 g ES (ES: extracto seco) y los kg agua perdidos/h. Como se ha descrito en la “Introducción”, en una gráfica típica de velocidad de secado, se pueden diferenciar las distintas fases (precalentamiento, velocidad constante y velocidad decreciente de deshidratación) que se describen en un proceso de deshidratación. Sin embargo y como se observa en la Figura 8, la relación entre la velocidad de deshidratación y la humedad del producto es lineal a todas las temperaturas investigadas. Ya se ha comentado que en este trabajo no se ha observado fase de precalentamiento, hecho que en estas gráficas se vuelve a corroborar. En este

caso, además tampoco se describe la etapa de velocidad constante. Esto podría ser debido a que no se parte de un producto fresco sino de un producto que ha sufrido previamente una deshidratación osmótica, es decir que ha perdido parte de su agua durante dicho proceso y otra parte del agua se encuentra retenida en su interior por los azúcares, encontrándonos en este caso con un producto con un agua más ligada desde el principio de la deshidratación por aire y, por tanto, comenzando en la etapa que correspondería a la velocidad decreciente de deshidratación.

Tabla 2. Parámetros del modelo para cada una de las temperaturas

Temperatura (°C)	Xe	K	R ²	ECM
20	0,878	0,302	0,962	0,008
30	0,871	0,545	0,935	0,012
40	0,841	0,580	0,973	0,009
50	0,824	0,844	0,963	0,011

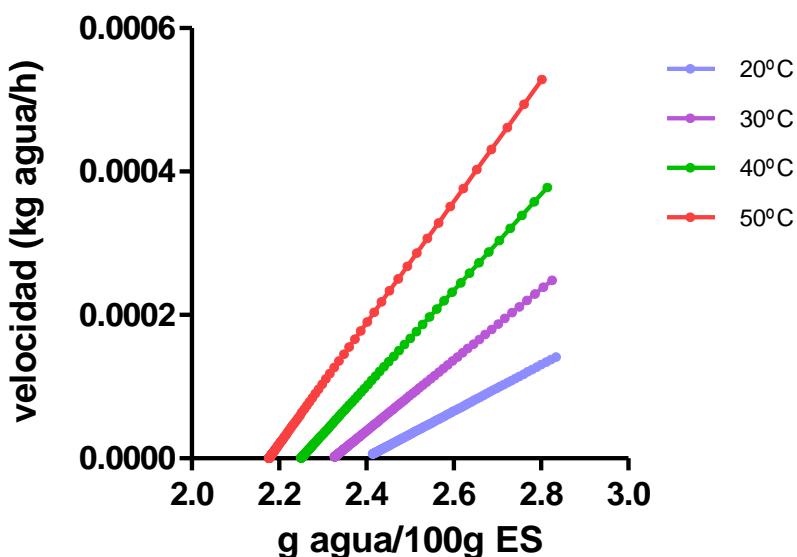


Figura 8. Curvas de velocidad de secado a las diferentes temperaturas de deshidratación investigadas

Como se observa en la Figura 8, la velocidad de deshidratación es mayor cuanto más elevada es la temperatura para alcanzar un mismo nivel de humedad del producto. Con objeto de poder cuantificar el efecto de la temperatura en la velocidad de deshidratación de la piel de naranja confitada así como estimar su valor a temperaturas y tiempos diferentes a los del estudio, se realizó una regresión lineal de las gráficas de la Figura 8. Las pendientes y ordenadas en el origen obtenidas de cada una de las velocidades tras la regresión lineal se representaron frente a la temperatura (Figura 9).

Para ambos parámetros, se observó una relación lineal con la temperatura de deshidratación. En el caso de la pendiente, se puede determinar que la velocidad de deshidratación incrementa 1,7, 2,3 y 2,7 veces cuando ésta se realizó 10, 20 y 30 °C por encima de la temperatura ambiente (20°C). Por otro lado, a partir de las dos relaciones lineales mostradas en la Figura 9, se puede estimar la velocidad de deshidratación (expresado en kg agua/h) para los trozos de piel de naranja dentro del rango investigado de temperaturas de (T) de 20 a 50 °C y hasta un máximo de 10 horas de deshidratación para un contenido en humedad (H) que se pretende alcanzar en base a la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad deshidratación} = (0,00002*T - 0,00002)*H + 0,00003*T + 0,0001$$

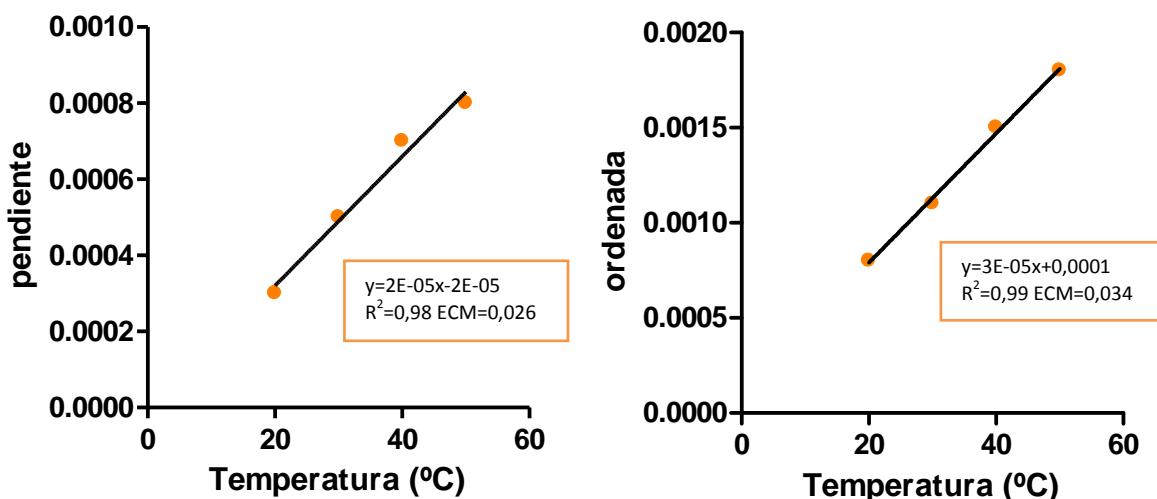


Figura 9. Relación entre la pendiente y ordenada en el origen obtenida a partir de la regresión lineal de las gráficas de velocidad de secado mostradas en la Figura 8.

5.1.2. Variación de la a_w de la piel de naranja confitada durante su deshidratación a distintas temperaturas.

La Figura 10 muestra la variación de la a_w de los trozos de piel de naranja confitada con el tiempo a distintas temperaturas de deshidratación. Como se observa, y de forma similar a lo descrito para el contenido en humedad (Figura 7), la a_w del producto disminuye con el tiempo de deshidratación siendo esta disminución mayor cuanto más elevada fue la temperatura de deshidratación. Así para un tiempo de deshidratación de 10 horas, la a_w de la piel de naranja confitada varió desde 0,45 hasta 0,21 al realizar la deshidratación a 20 y 50°C respectivamente.

Por otro lado, según la a_w que se pretenda conseguir en el producto final se tendrá que tener en cuenta tanto la temperatura como el tiempo de secado. Por ejemplo, para conseguir una a_w de 0,5 se necesitan 2 horas a una temperatura de 50 °C y 10 horas a 20°C. La posibilidad de alcanzar una determinada a_w y, por tanto, un cierto nivel de estabilidad, tras distintas condiciones de procesado, hará necesario evaluar tanto el tiempo de deshidratación como el impacto en determinadas características organolépticas del producto, como la textura, para definir las condiciones más adecuadas de procesado.

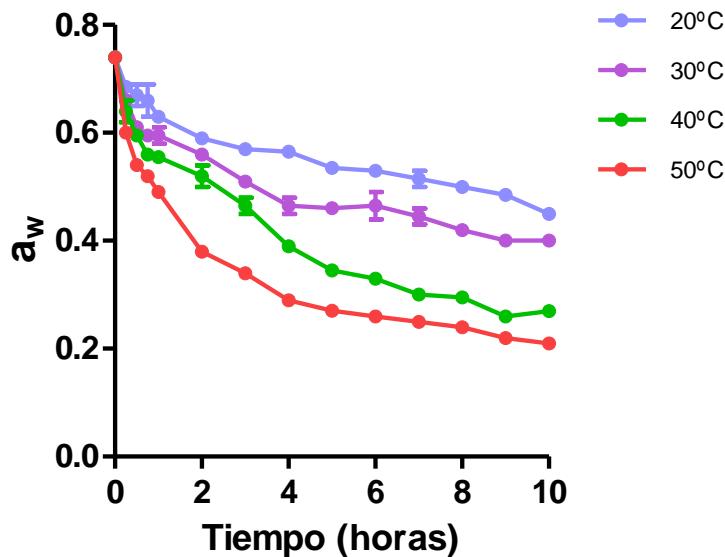


Figura 10. Evolución de la a_w de la piel de naranja confitada durante el secado a las temperaturas de estudio

Con objeto de poder definir las condiciones de secado en el rango estudiado que permitan alcanzar una determinada a_w , los datos mostrados en la Figura 11 se describieron mediante el siguiente modelo de regresión múltiple:

$$a_w = 0,793 - 0,00368 * T - 0,04835 * t - 0,000734 * T * t + 0,00430 * t^2 \quad \text{Ec (2)}$$

donde T (°C) es la temperatura de deshidratación y t (horas) el tiempo de deshidratación. En la siguiente Tabla 3, se muestran para cada uno de los parámetros de la Ec. 2 sus coeficientes así como su intervalo de confianza para el 95% y el valor F.

Tabla 3. Valores F de las variables significativas y sus interacciones de la ecuación polinomial que describe la a_w a distintas temperaturas y tiempo de deshidratación.

$a_w = b0 + b1*T + b2*t + b3*T*t + b4*t*t$			
	Coeficientes	IC 95%	Valor F
b0	0,793	0,845	
b1	-0,00368	-0,0023	2,444
b2	-0,04835	-0,0340	23,92
b3	-0,000734	-0,0005	12,24
b4	0,00430	0,0054	14,12

Tabla 4. Parámetros de la bondad del ajuste del modelo.

$ R $	0,972
R^2	0,944
R^2 ajustado	0,940
Error estándar	0,0366

Como se puede observar, la a_w del producto está principalmente condicionada por el tiempo (mayor valor F) y por el tiempo al cuadrado. La presencia de este último factor indica que una pequeña variación del tiempo, modifica cuadráticamente la a_w . Por otro lado, la interacción tiempo/temperatura también influye notablemente en la a_w lo que se traducirá en que el efecto de la temperatura variará con el tiempo de deshidratación. Con el fin de observar con mayor claridad estas interacciones, a partir de la ecuación 2, se puede obtener la Figura 11 en la que se muestra la relación entre la temperatura y el tiempo de deshidratación con la a_w del producto. En esta gráfica, se puede observar como con el aumento de la temperatura la a_w disminuye linealmente, siendo más importante el efecto de la temperatura cuanto mayor es el tiempo de deshidratación, como ya se ha indicado según la interacción temperatura/tiempo. Por otro lado, con el tiempo se observa un rápido descenso de la a_w en las primeras horas y luego se ralentiza este descenso. Esta cinética es consecuencia de que la a_w varía con el cuadrado del tiempo de deshidratación. Por otro lado la interacción temperatura/tiempo, se refleja en la gráfica en que el efecto del tiempo de deshidratación en la a_w del alimento es más pronunciado a mayores temperaturas.

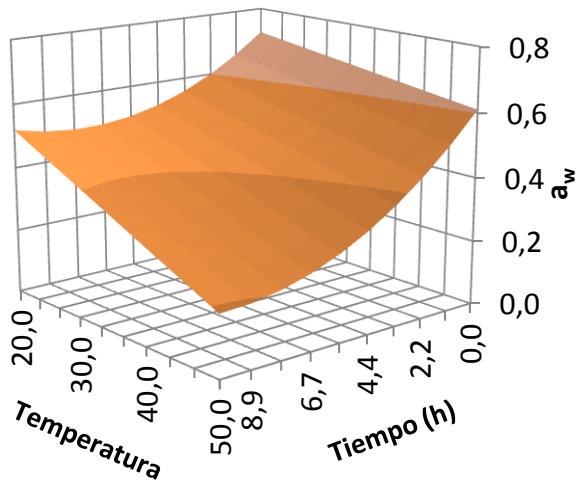


Figura 11. Gráfica de superficie respuesta en la que se muestra la evolución de la a_w de la piel de naranja confitada a distintas temperaturas y tiempo de deshidratación.

A partir de esta o de la ecuación (2) se puede determinar según las condiciones a las cuales se realice el secado, la a_w que tendrá la piel de naranja confitada, o definir estas condiciones para conseguir un producto de una a_w determinada. Este tipo de ecuación, por tanto, resulta de gran utilidad práctica para la empresa ya que es una forma de optimizar el proceso: como se ha explicado, dependiendo del producto al que se quiera incorporar la fruta confitada deberá tener unas características u otras, entre ellas y como la más importante la a_w por lo que esta ecuación permitirá establecer los parámetros de procesado necesarios para obtener cubitos de 4x4 mm de naranja confitada con la a_w que desean, siempre que se realice en las condiciones de deshidratación aplicadas en esta investigación.

5.1.3. Obtención de las isotermas de desorpción a distintas temperaturas de deshidratación.

A partir de los valores de a_w y humedad del producto (pérdida de peso/100 g muestra) mostrados en las Figuras 10 y 7, respectivamente, se obtienen las isotermas de desorpción del producto investigado a distintas temperaturas de deshidratación. Como se ha indicado en la “Introducción”, en este tipo de productos, las isotermas de desorpción son una herramienta de mucho valor, ya que aportan información de interés sobre la estabilidad microbiológica y química del producto final, así como para determinar si se producirán migraciones de agua de un producto a otro durante el

almacenamiento, para determinar las mejores condiciones de envasado y almacenamiento, y para diseñar y controlar el proceso, así como elegir la formulación óptima.

Generalmente, el efecto de la temperatura en las isotermas de sorción es de gran importancia ya que los alimentos tanto durante su procesado como en el almacenamiento se someten a diferentes temperaturas, como es el caso del proceso de deshidratación. Varios estudios indican que al aumentar la temperatura los azúcares se disuelven haciendo que el producto tenga un menor contenido en agua para una misma a_w , implicando esto que al modificar la temperatura de deshidratación la isoterma del producto varía (Goula *et al*, 2008; Jamali *et al*, 2006; Mrad *et al*, 2013; Nguyen *et al*, 2004; Staudt *et al*, 2013). En este estudio y para el producto investigado, esto se observa para algunos valores de a_w ($a_w=0,4, 0,5$), pero de forma general las isotermas de la piel de naranja confitada obtenidas tras el secado no muestran influencia de la temperatura, (Figura 12). En esta figura, se ha representado con distinto color los datos obtenidos a cada una de las temperaturas de deshidratación aplicadas. Como se observa, de forma general, la relación entre la humedad del producto y su a_w es independiente de la temperatura de deshidratación, lo que permite predecir el comportamiento y estabilidad del producto con una única isoterma de sorción dentro del rango investigado.

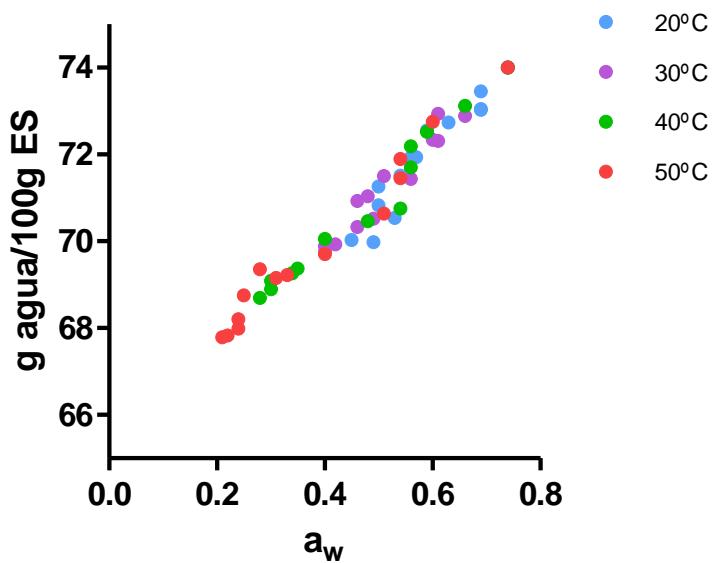


Figura 12. Isoterma de desorción obtenidas por deshidratación a distintas temperaturas de trozos de piel de naranja confitada.

5.1.4. Evolución de la textura de los cubitos de piel de naranja confitada durante su deshidratación a distintas temperaturas.

La Figura 13 representa la evolución de la textura de la piel de naranja confitada expresada como dureza en gramos, durante su deshidratación a distintas temperaturas. Se puede observar que la dureza del producto incrementa con el tiempo de deshidratación a todas las temperaturas siendo más marcada al aumentar la temperatura y, en especial, cuando la deshidratación se realiza a 50°C, a partir de las 3 horas de deshidratación.

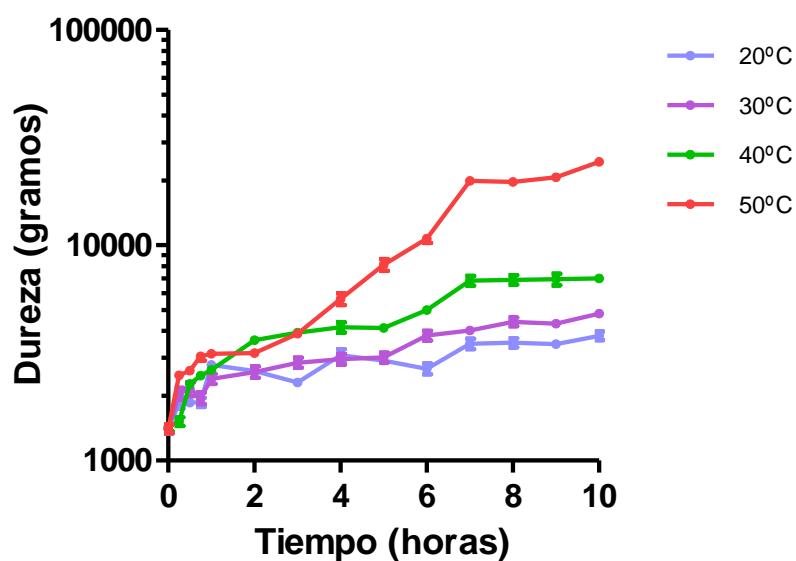


Figura 13. Evolución de la textura durante el secado de piel de naranja confitada a las diferentes temperaturas.

A la vista de la influencia que tiene tanto el tiempo como la temperatura en la textura de los cubitos de naranja confitados, se realizó una regresión múltiple para obtener una ecuación que permita determinar la textura según el tiempo y la temperatura (Ec 3). Se puede observar en esta ecuación y en la Tabla 5 de los parámetros de ajuste que el factor que más influye en la textura durante la deshidratación es la temperatura, siendo esta influencia no lineal sino cuadrática; es decir, una pequeña variación de la temperatura afecta notablemente en la textura del producto. El tiempo de secado tampoco influye linealmente ya que aparece elevado al cuadrado y su efecto está muy condicionado por la temperatura, debido a la interacción que hay entre ambos parámetros como se refleja en la ecuación (Ec. 3). Todo esto se puede observar en la gráfica que se obtiene de esta ecuación (Figura 14).

$$D = 3,693 - 0,02867*T + 0,000427*T^2 + 0,00281*T*t - 0,00376*t^2$$

Ec (3)

Tabla 5. Valores F de las variables significativas y sus interacciones de la ecuación polinomial que describe la dureza a distintas temperaturas y tiempo de deshidratación.

	D = b0 + b1*T + b2*T*T + b3*T*t + b4*t*t		
	Coeficientes	IC 95%	Valor F
b0	3,693	3,918	
b1	-0,02867	-0,01498	63,10
b2	0,000427	0,00062	62,25
b3	0,00281	0,0032	7,228
b4	-0,00376	-0,00226	6,376

Tabla 6. Parámetros de la bondad del ajuste del modelo.

 R 	0,971
R²	0,944
R² ajustado	0,939
Error estándar	0,0718

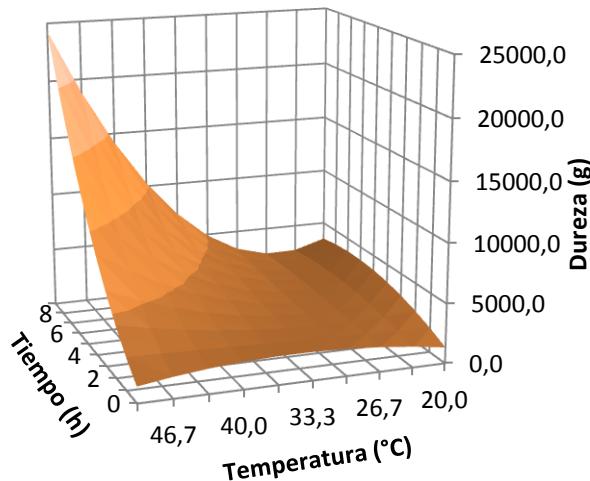


Figura 14. Gráfica de superficie respuesta en la que se muestra la evolución de la textura según el tiempo y la temperatura de deshidratación de cubitos de naranja confitados.

Algunos autores han relacionado la textura de un producto con su a_w (Bourne, 1987; Rockland, 1969). En esta investigación, y con el fin de comparar estos parámetros, se ha representado la Figura 15 donde se muestra la evolución de la textura (eje OY izquierdo) y la a_w del producto (eje OY derecho) a lo largo del tiempo de deshidratación para cada una de las temperaturas investigadas. Como se observa a todas las temperaturas, con el tiempo de deshidratación disminuye la a_w y aumenta la dureza del producto. Pero lo más importante de esta gráfica es que para un mismo valor de a_w , la dureza del producto es la misma independientemente de la temperatura a la que se ha deshidratado. Así para un valor de $a_w=0,45$, la textura de la piel de naranja confitada era de 3800, 3750, 4000 y 3160 g al deshidratar a 20, 30, 40 y 50°C, respectivamente.

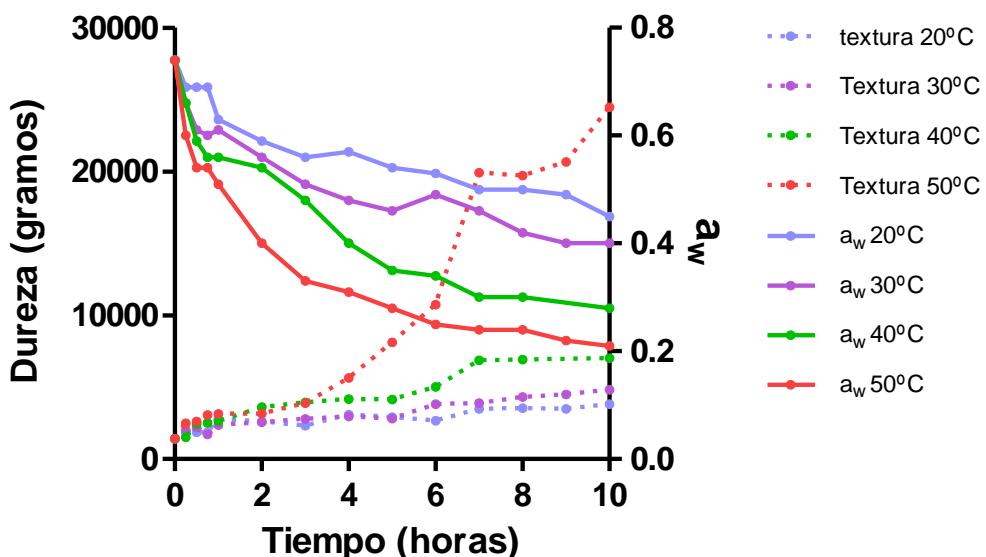


Figura 15. Evolución de la textura y a_w durante el secado de piel de naranja confitada

Con el objetivo de mostrar más claramente estos resultados, se ha construido la Figura 16 donde se representa la dureza frente a la a_w para cada uno de los puntos investigados. En esta figura, se observa como la textura es la misma independientemente de la temperatura de deshidratación para una misma a_w . Por lo tanto, las diferencias en textura que se muestran al representarlo frente al tiempo es debido a que para un mismo tiempo de secado la a_w no es la misma según la temperatura. Se podría concluir que lo que determina la textura de los cubitos de naranja confitados es la a_w , la cual viene determinada por el tiempo y la temperatura de deshidratación.

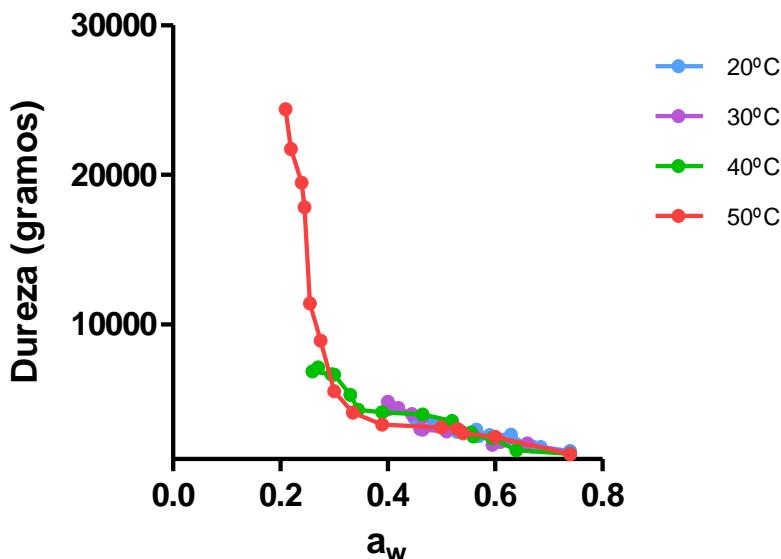


Figura 16. Evolución de la dureza de la piel de naranja confitada según la a_w .

Una gráfica similar a la mostrada en la Figura 16 se puede obtener a partir de las ecuaciones 2 y 3 desarrolladas anteriormente para la a_w y la textura (Figura 17). En base a estos resultados, se podría llegar a alcanzar texturas similares a las observadas a 50°C a menores temperaturas, lo cual implicaría mayores tiempos de deshidratación.

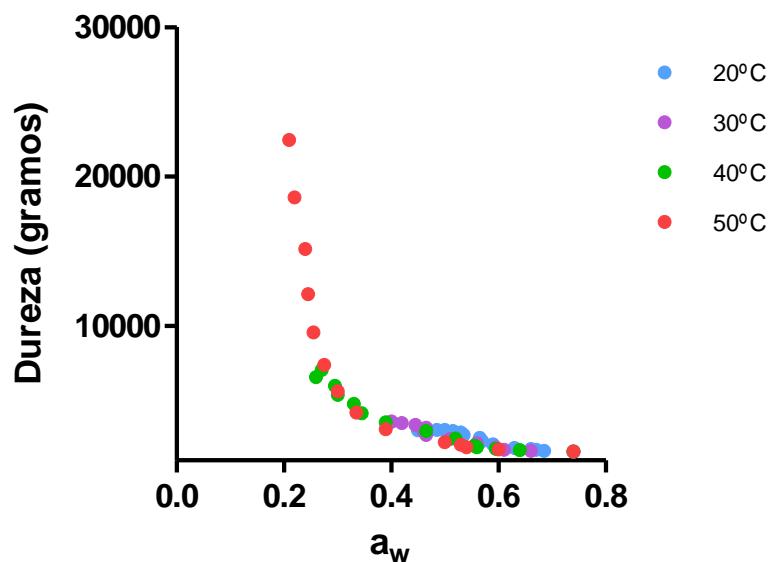


Figura 17. Evolución de la textura dependiendo de la a_w , valores obtenidos por la regresión múltiple de la textura

En base a los resultados obtenidos y las ecuaciones desarrolladas, se pueden establecer las condiciones de deshidratación para obtener un producto de una

determinada a_w y textura. Estos parámetros no van a estar condicionados por la temperatura sino que para alcanzarlos se podrá hacer a mayor o menor temperatura requiriendo menores o mayores tiempos de deshidratación que se elegirán según las necesidades de la empresa.

5.2. Dados de albaricoque confitados 4x4 mm

5.2.1. Curva de deshidratación obtenida a distintas temperaturas.

En la Figura 18, se muestra la evolución de la humedad de los datos de albaricoque durante las 10 horas de deshidratación realizada a diferentes temperaturas. Con puntos, se representan los valores experimentales y con líneas continuas los valores teóricos obtenidos a partir del ajuste de los datos con el modelo de Fick (Ec. 1). En la Tabla 7, se muestran los valores de los parámetros del modelo de Fick tras su ajuste a las curvas de deshidratación así como la bondad de estos ajustes. Al igual que se ha descrito para la piel de naranja confitada (Figura 7 y Tabla 2), la pérdida de agua del producto aumenta con el tiempo de procesado, siendo ésta mayor cuanto más elevada es la temperatura a la cual se realiza el secado. Además, la forma de la curva es similar no detectándose fase de precalentamiento o estabilización produciéndose la pérdida de agua inmediatamente cuando se introduce el producto en el equipo de deshidratación.

Si se comparan los cubitos de naranja con los del albaricoque, a pesar de que el comportamiento de la curva y la influencia de los factores es la misma, la reducción de g agua por cada 100 g de muestra no es la misma. En el caso de los cubitos de naranja se eliminan 20 g de agua, sin embargo en el albaricoque es menor esta reducción. Pero lo más destacado es observar la diferencia entre las temperaturas, en el caso de la naranja se observan más diferencias entre temperaturas pero en el albaricoque las diferencias son menores. Por lo tanto, el cambio de temperatura afecta a ambos productos pero en menor medida al albaricoque. Esto puede ser debido a que en la naranja les cuesta a las temperaturas más bajas más penetrar al interior y por eso reducen menos la cantidad de agua, sin embargo en el albaricoque consiguen reducirla más con las temperaturas más bajas del estudio. Por otro lado el descenso mayor de la naranja que del albaricoque podría ser causado por que en la naranja se puede eliminar mayor cantidad de agua que en el albaricoque debido a que esta esté más ligada y a pesar de las altas temperaturas no es capaz de romper las fuerzas que retienen a este tipo de agua. Otra explicación de esta diferencia podría ser que la piel de la naranja tiene una

estructura más porosa que la del albaricoque, lo que permite que entre el calor y salga el agua de una forma más fácil.

Por otro lado, se vuelve a observar que en este producto no hay fase de precalentamiento. De este modo, se podría deducir que en curvas de deshidratación las cuales se hayan llevado a cabo con poca cantidad de muestra respecto al volumen del armario de deshidratación, la fase de precalentamiento no se producirá.

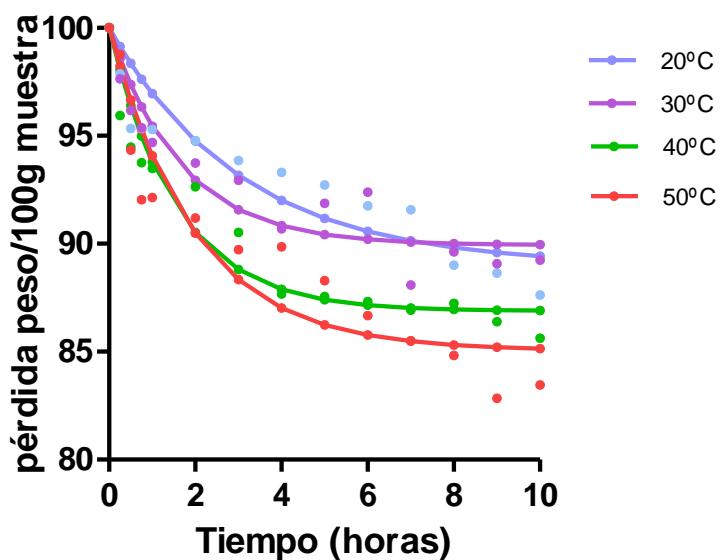


Figura 18. Evolución de la humedad durante el secado del albaricoque.

Tabla 7. Parámetros de la pérdida de peso de los cubitos de albaricoque 4x4.

Temperatura (°C)	Xe	k	R ²	ECM
20	0,889	0,323	0,855	0,015
30	0,880	0,602	0,894	0,012
40	0,870	0,640	0,938	0,011
50	0,850	0,505	0,890	0,018

De forma similar a como se ha descrito en la naranja, a partir de estos parámetros de la ecuación de Fick se ha obtenido la curva de velocidad de deshidratación a cada una de las temperaturas investigadas (Figura 19). En esta gráfica, se observa que cuanto mayor es la temperatura de deshidratación mayor es la velocidad de pérdida de agua por encima de los 30°C. Entre 20 y 30°C, en este producto, no se observó una mayor velocidad de deshidratación. Por otro lado, y según estos resultados, tampoco en el albaricoque confitado se observó fase de velocidad constante. Es decir, en estos

productos confitados que han sido sometidos a un proceso de deshidratación osmótica en los que se ha eliminado parte del agua y han incorporado azúcar no se obtendrían curvas de deshidratación por aire típicas como las que se observarían en un producto fresco que se deshidratase.

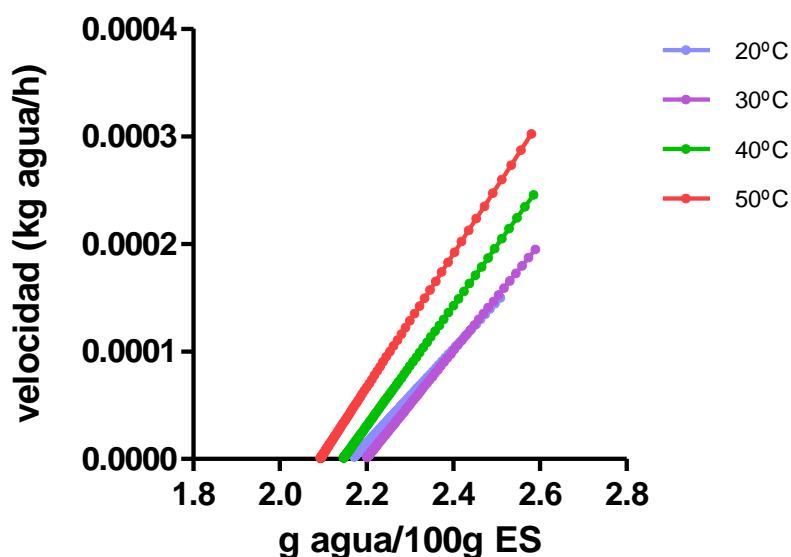


Figura 19. Relación entre la velocidad de deshidratación para cada una de las temperaturas y el contenido en humedad del producto.

A partir de las gráficas de la velocidad de deshidratación realizando una regresión lineal de dichos datos, se ha obtenido la pendiente y la ordenada en el origen para cada una de las temperaturas investigadas, permitiendo obtener la relación entre esta temperatura y dichos parámetros (Figura 20). Gracias a estas relaciones, se puede obtener la siguiente ecuación que permite estimar la velocidad de deshidratación (expresada en kg agua/h) para los trozos de albaricoque confitados dentro del rango investigado de temperaturas (T) de 20 a 50°C y hasta un máximo de 10 horas de deshidratación para un contenido en humedad (H) que se pretende alcanzar:

$$\text{Velocidad deshidratación} = (0,000007*T + 0,0003)*H + 0,00001*T + 0,0007$$

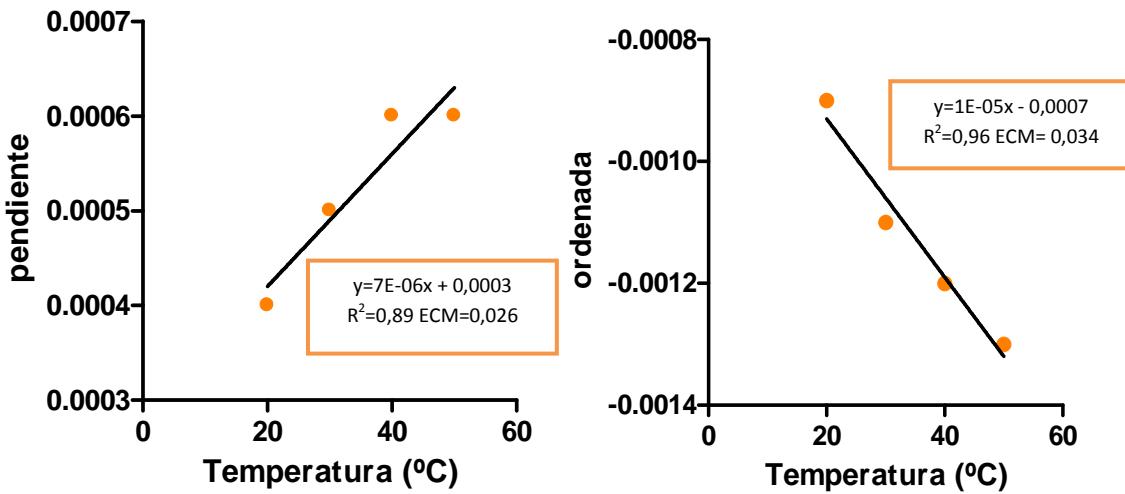


Figura 20. Pendiente y ordenada de las curvas de velocidad de deshidratación del albaricoque

Si se comparan las curvas de deshidratación de los cubitos de naranja con los del albaricoque, a pesar de que el comportamiento de la curva y la influencia de los factores es similar, la reducción de g agua por cada 100 g de muestra no es la misma. En el caso de los cubitos de naranja, se elimina un 20% de agua en las condiciones más extremas investigadas (10 horas a 50°C); sin embargo en el albaricoque esta reducción fue del 15%. Esta mayor deshidratación en la naranja al aplicar las mismas condiciones de procesado podría ser debido a que la piel de la naranja tendría una estructura más porosa que la del albaricoque, lo que permitiría una más fácil migración del agua por interior del producto y posterior evaporación del agua.

Por otro lado, el efecto de la temperatura en las curvas de deshidratación fue más marcado en el caso de la naranja que en el del albaricoque. Esto queda reflejado en el que la pendiente de la velocidad de deshidratación de la naranja varía en mayor medida que en el caso del albaricoque con la temperatura. Por lo tanto, el cambio de temperatura afecta a ambos productos pero en mayor medida a la naranja. Sin embargo, esto no quiere decir que la velocidad de deshidratación sea mayor en la naranja. Para un mismo contenido en humedad, la velocidad de deshidratación fue de forma general mayor para el albaricoque; si bien esta diferencia fue reduciéndose al aumentar la temperatura siendo incluso superior dicha velocidad a elevadas temperaturas como se observa en la Figura 21 y 22. En estas figuras, se muestra la relación de la velocidad de deshidratación y la humedad de la naranja (Figura 8) y albaricoque (Figura 19),

respectivamente, cuando se deshidrataron a 30 y 50°C. Esta mayor velocidad de deshidratación del albaricoque, aunque la cantidad de agua eliminada sea menor, es consecuencia del modelo matemático utilizado para describir los datos (ecuación de Fick) ya que en esta ecuación, el parámetro que define dicha velocidad está condicionado por el contenido de humedad final alcanzando en el producto.

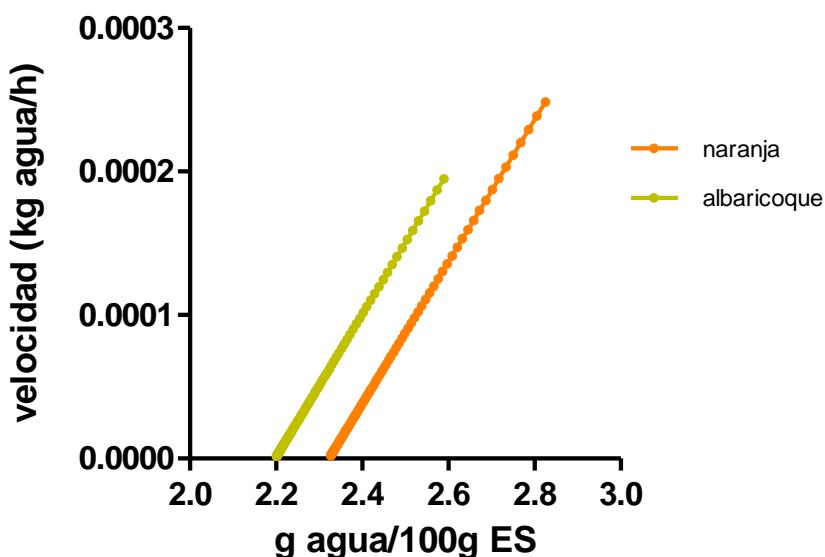


Figura 21. Comparación de la velocidad de deshidratación de la naranja y el albaricoque a 30°C.

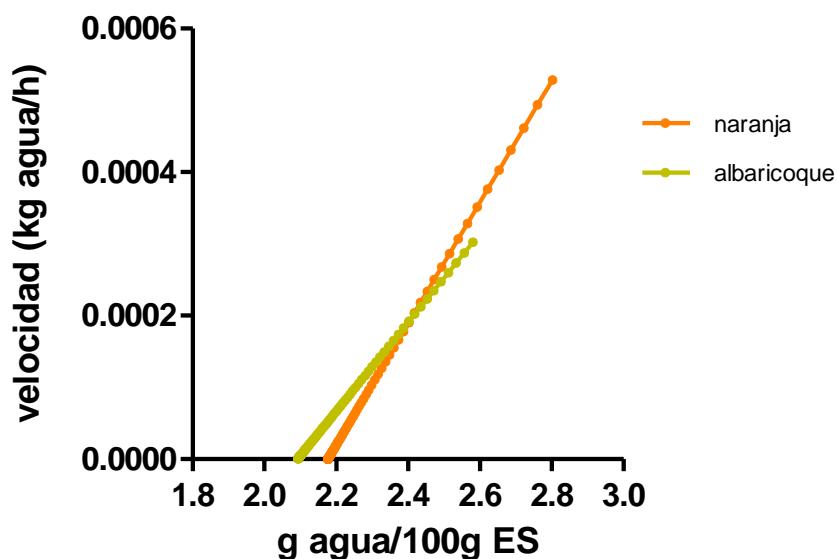


Figura 22. Comparación de la velocidad de deshidratación de la naranja y el albaricoque a 50°C.

5.2.2. Variación de la a_w del albaricoque confitado durante su deshidratación a distintas temperaturas.

La evolución de la a_w durante el secado de los cubitos de albaricoque confitado a las diferentes temperaturas de estudio se muestra en la Figura 23. Al igual que ocurría con los cubitos de naranja, se puede observar como al aumentar el tiempo y la temperatura de secado la a_w desciende. Cuanto mayor es la temperatura a la que se seca el producto menor es la a_w para un mismo tiempo de deshidratación. Si se comparan estas gráficas con las de la naranja, el comportamiento es similar a lo largo de la curva de deshidratación. La única diferencia es que el efecto de la temperatura es más marcado en la naranja que en el albaricoque de forma similar a lo que sucedería con el contenido en humedad de dichos productos. Así, por ejemplo, a las 10 horas de deshidratación, el cubito de naranja tiene una a_w de 0,24 unidades inferior cuando se deshidrató a 20°C o a 50°C, mientras que en el cubito de albaricoque esta diferencia era de 0,13.

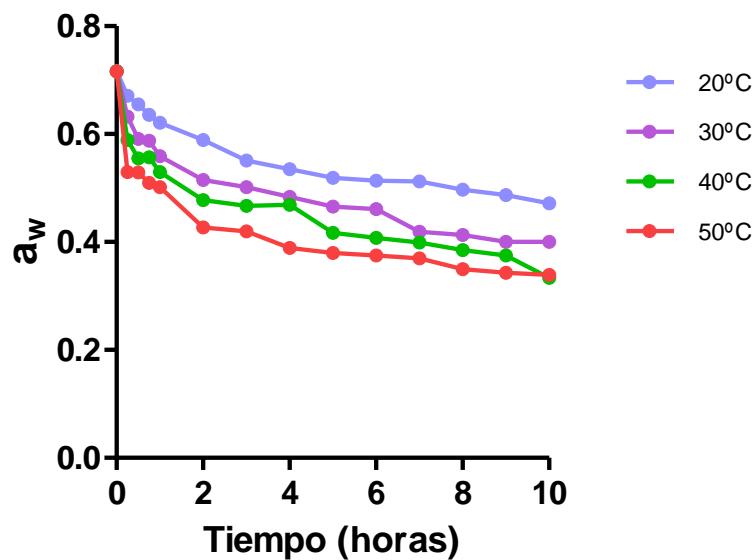


Figura 23. Evolución de la a_w durante el secado del albaricoque

De forma similar al caso de la piel de naranja, también se realizó una regresión lineal a los datos de a_w obtenidos a lo largo de la deshidratación del albaricoque a distintas temperaturas obteniéndose la siguiente ecuación así como el intervalo de confianza y los valores F para cada uno de sus parámetros (Tabla 8):

$$aw = 0,777 - 0,00418 * T - 0,05416 * t + 0,00319 * t^2$$

Ec (4)

donde T ($^{\circ}$ C) es la temperatura de deshidratación y t (horas) el tiempo de deshidratación.

Tabla 8. Valores F de las variables significativas y sus interacciones de la ecuación polinomial que describe la a_w a distintas temperaturas y tiempo de deshidratación.

$a_w = b_0 + b_1 * T + b_2 * t + b_3 * t^2$			
	Coeficientes	IC 95%	Valor F
b0	0,777	0,811	
b1	-0,00418	-0,00335	1,000
b2	-0,05416	-0,04372	14,12
b3	0,00319	0,00427	14,12

Tabla 9. Parámetros de la bondad del ajuste del modelo.

 R 	0,947
R²	0,896
R² ajustado	0,89
Error estándar	0,03479

La ecuación 4 permite determinar en el rango investigado la a_w de los trozos de albaricoque confitado para unos determinados parámetros de deshidratación, es decir tiempo (0 a 10 horas) y temperatura (20-50 $^{\circ}$ C). Esta ecuación es muy similar a la obtenida para la piel de naranja salvo que en este caso no hay parámetro de interacción entre el tiempo y la temperatura de deshidratación; es decir, el efecto de la temperatura es independiente del tiempo de deshidratación y viceversa. Al igual que en la naranja, el tiempo fue el factor que más influyó en la variación de la a_w , siendo esta influencia no lineal sino que varió con el cuadrado del tiempo. Así mismo, la temperatura influyó linealmente en la modificación de la a_w , siendo este factor menos importante que el tiempo. Estos comportamientos se observan más claramente en la Figura 24 obtenida a partir de la ecuación 4 y que muestra la influencia de los parámetros de deshidratación (tiempo y temperatura) en la a_w del albaricoque confitado.

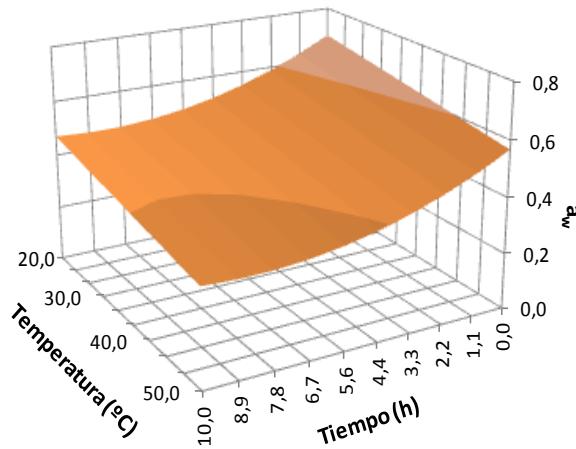


Figura 24. Gráfica de superficie respuesta en la que se muestra la evolución de la a_w del albaricoque confitado a distintas temperaturas y tiempo de deshidratación.

Finalmente, la ecuación 4 para el albaricoque y la 2 para la naranja permiten definir las ecuaciones de deshidratación para conseguir un producto de una determinada a_w . Por ejemplo, la Figura 25 muestra las condiciones de tiempo y temperatura de deshidratación para obtener productos de por ejemplo 0,4 de a_w . Como se observa, el tiempo de deshidratación a todas las temperaturas para alcanzar trozos de albaricoque confitado con una a_w de 0,4 fue superior que para el caso de la naranja. Estos tiempos variaron desde las casi 8 horas a 35°C hasta las 4 a 50°C para el albaricoque, mientras que para los trozos de naranja confitada fueron desde las 7 hasta las 3 horas cuando la deshidratación se realizó a 30 y 50°C, respectivamente.

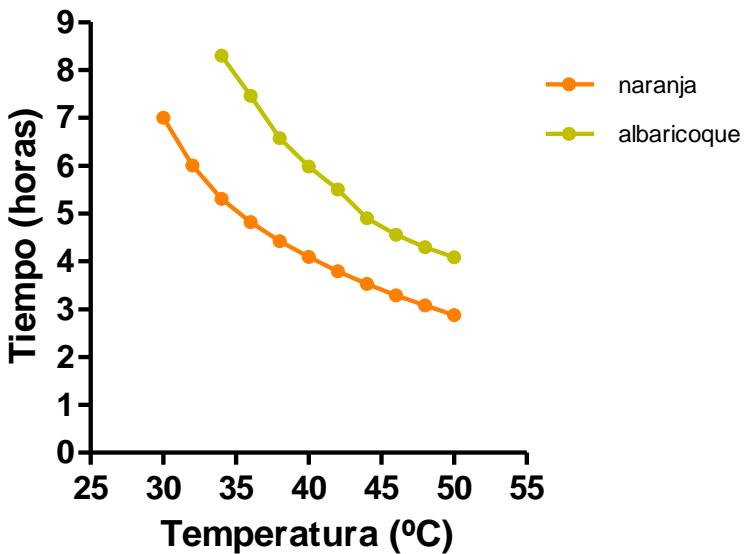


Figura 25. Condiciones de tiempo y temperatura necesarias para obtener un cubito de naranja o de albaricoque con una a_w de 0,4.

Como se puede observar, el desarrollo de las ecuaciones matemáticas descritas para definir las condiciones de deshidratación para obtener un producto de una determinada a_w pueden resultar de gran interés para la empresa que le permitirá además optimizar rendimientos.

5.2.3. Obtención de las isotermas de desorpción a distintas temperaturas de deshidratación.

Para el albaricoque también se realizaron isotermas de desorpción, no solo por la importancia que tiene sino también para comprobar si se producía un comportamiento similar al observado en el caso de la naranja. Como se muestra en la Figura 26, aunque hay una cierta dispersión en los datos obtenidos de humedad para una misma a_w a cada una de las temperaturas de deshidratación, no se observa una tendencia de variación de la a_w o de la humedad con la temperatura de deshidratación. Es por ello que se podría considerar que, al igual que lo observado en la piel de naranja confitada, la isoterma no varió con la temperatura de deshidratación. Esta ausencia de efecto de la temperatura de deshidratación facilita la actividad en la empresa ya que una única isoterma de desorpción obtenida a cualquier temperatura sería válida para evaluar la estabilidad del producto en base a su contenido en humedad.

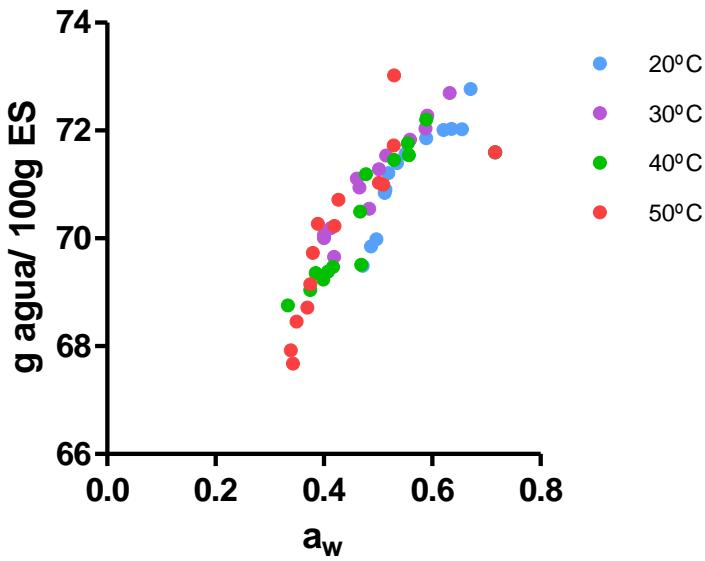


Figura 26. Isoterma de desorción del albaricoque durante el secado

5.2.4. Evolución de la textura de los cubitos de albaricoque confitado durante la deshidratación a distintas temperaturas.

El análisis de la dureza de los cubitos de albaricoque durante el secado se muestra en la Figura 27. A diferencia del caso de la piel de naranja confitada, las diferencias entre temperaturas son mínimas, simplemente a partir de las 6 horas de secado se ve una dureza un poco mayor si se realiza el secado a 50°C.

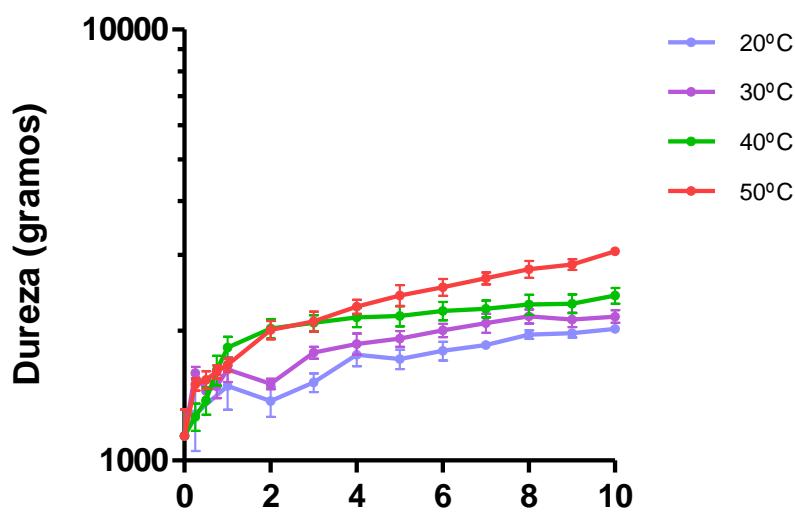


Figura 27. Evolución de la textura durante el secado del albaricoque.

Con el fin de describir y poder comparar estos resultados, se realizó una regresión múltiple a los datos de la dureza del cubito de albaricoque confitado con el fin de obtener una ecuación (Ec. 5) que relacione los parámetros del secado con la dureza del producto. De nuevo, se obtuvo una ecuación similar a la de la piel de naranja, siendo de igual manera el tiempo de secado el factor que más influyó en la dureza del albaricoque (mayor valor F de cualquiera de los parámetros de la ecuación) (Tabla 10). Además la variación de este factor afectó de forma cuadrática en la textura del producto. Finalmente, el efecto de la temperatura es pequeño y está condicionado por el tiempo observándose un mayor efecto del tiempo cuanto más elevada es la temperatura de deshidratación.

$$D=10^{(3,003+0,00314*T+0,04892*t+0,000279*T*t-0,00342*t^2)}$$

Ec. (5)

Tabla 10. Valores F de las variables significativas y sus interacciones de la ecuación polinomial que describe la dureza a distintas temperaturas y tiempo de deshidratación.

$D = b_0 + b_1*T + b_2*t + b_3*T*t + b_4*t*t$			
	Coeficiente	IC 95%	Valor F
b0	3,003	3,057	
b1	0,00314	0,00458	2,44
b2	0,04892	0,06398	23,92
b3	0,000279	0,00055	12,24
b4	-0,00342	-0,00222	14,12

Tabla 11. Parámetros de la bondad del ajuste del modelo.

R	0,948
R^2	0,894
R^2 ajustado	0,886
Error estándar	0,03854

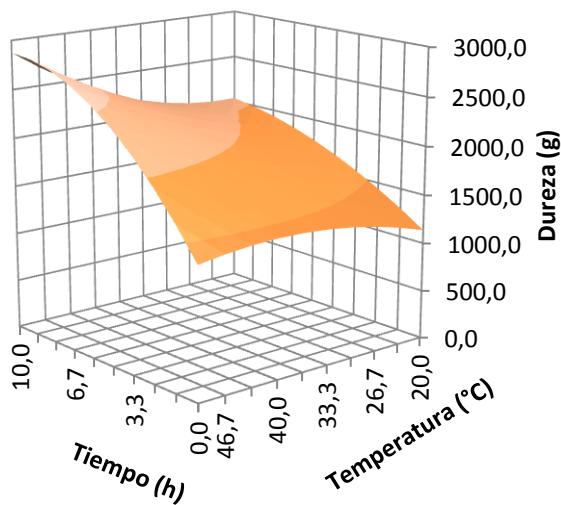


Figura 28. Gráfica de superficie respuesta en la que se muestra la evolución de la textura según el tiempo y la temperatura de deshidratación de cubitos de albaricoque confitados.

Con el fin de evaluar si existe alguna relación entre la a_w y la dureza del albaricoque confitado deshidratado a diferentes temperaturas y como se ha hecho para el caso de la piel de naranja confitada, se ha representado tanto la dureza como la a_w del cubito de albaricoque confitado a lo largo de la deshidratación (Figura 29). Al igual que se ha observado en la naranja, para un mismo valor de a_w , la dureza del albaricoque fue similar independientemente de la temperatura a la que se realizó la deshidratación. Por ejemplo, para una a_w de 0,5, la dureza a 20, 30, 40 y 50°C fue de 1959, 1790, 1900 y 1810 g, respectivamente. La representación de todos los valores de a_w con los de textura obtenidos a los mismos tiempos de deshidratación a las diferentes temperaturas permite obtener una gráfica como la mostrada en la Figura 30. Se observa, al igual que en el caso de la piel de naranja confitada, que la textura del albaricoque de una determinada a_w era independiente de la temperatura a la que se había llevado a cabo el proceso. Al igual que en el caso de la isoterma de sorpción, esta circunstancia simplifica la actividad en la empresa ya que teniendo esta gráfica (Figura 30) se puede determinar el grado de dureza deseado para un determinado nivel de estabilidad del producto.

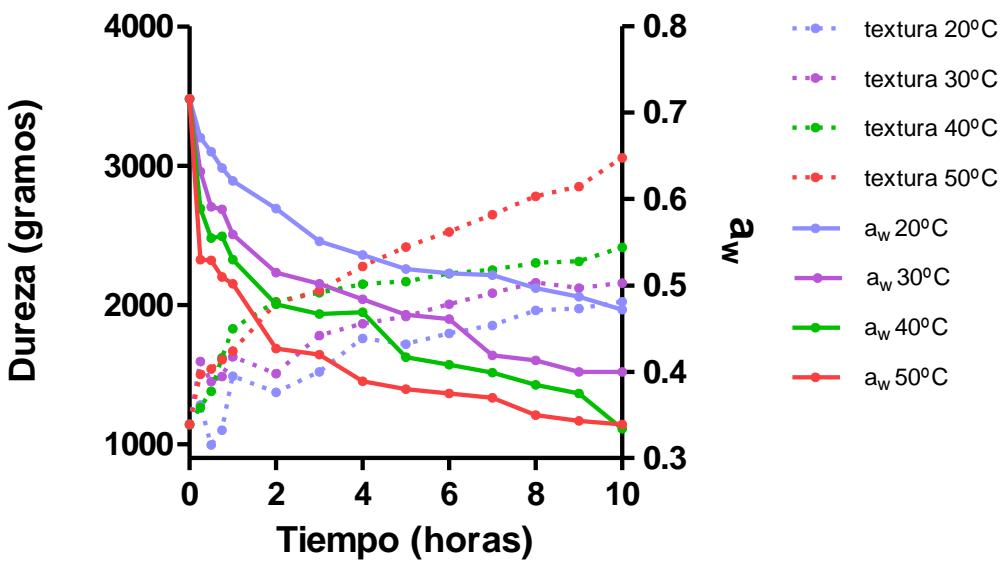


Figura 29. Comparación de textura y a_w durante el secado del albaricoque

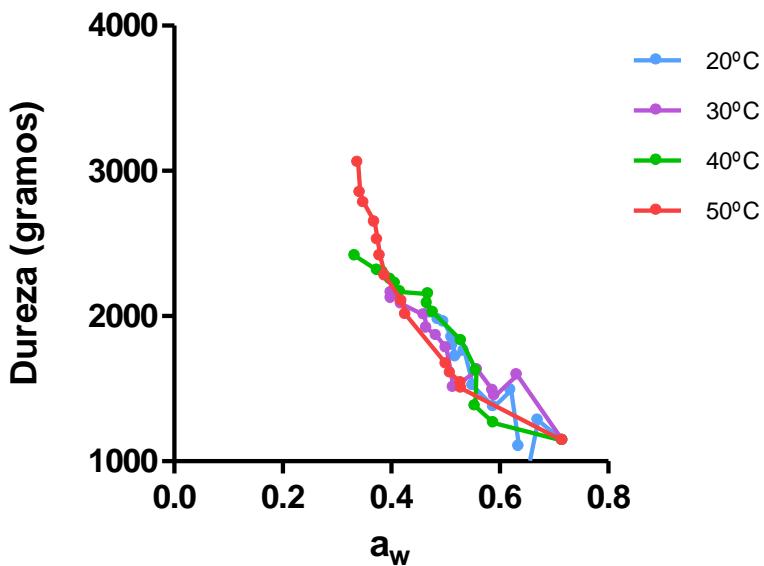


Figura 30. Evolución de la dureza según la a_w del producto.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten obtener conclusiones apenas antes descritas en la literatura. La novedad de estos resultados radica en que se ha trabajado con matrices muy particulares como son los productos confitados (dados de piel de naranja y de albaricoque) que ya han sido deshidratados osmóticamente, donde han perdido parcialmente agua y ganado azúcar, y que posteriormente se han sometido a un proceso de deshidratación por aire a distintas temperaturas.

Se ha podido observar que las curvas de deshidratación no mostraron las etapas de estabilización y velocidad constante de deshidratación, encontrándose desde un principio en la etapa de velocidad decreciente. Como era esperable, la velocidad de deshidratación fue mayor al aumentar la temperatura en ambos productos. Sin embargo, este parámetro no afectó a la forma de la isoterma de sorpción ni en la relación que se encontró entre la a_w y la textura. Finalmente, se pudieron desarrollar ecuaciones matemáticas que describían con precisión tanto la a_w como la textura tras distintas condiciones de deshidratación en un rango de 20 a 50°C y de 0 a 10 horas. Es más, gracias a las ecuaciones 2 para la naranja y 4 para el albaricoque, que relacionan la a_w con el tiempo y la temperatura de deshidratación, así como con la isoterma de sorpción y la relación entre la textura y la a_w (Figuras 16 y 30), se puede:

- Establecer las condiciones (tiempo y temperatura) de deshidratación tanto de la piel de naranja confitada como del albaricoque confitado para obtener un producto de una determinada a_w y textura.
- Estimar la estabilidad del producto, mediante su a_w , y su textura tras unas determinadas condiciones de deshidratación.
- Estimar la estabilidad del producto y su textura conociendo su contenido en agua.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Akbarian, M., Ghasemkhani, N., Moayedi, F., 2014. Osmotic dehydration of fruits in food industrial: A review. International Journal of Biosciences 4, 42-57.
- Bourne, M.C., 1987. Effects of water activity on textural properties of food. Water Activity: Theory and Applications to Foods, 369.
- Casp.A, Abril, J., 1998. Procesos de conservación de alimentos. Editorial Mundiprensa. ISBN 8471148102.
- Chandra, S., Kumari, D., 2013. Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review. Food Science and Nutrition.
- Demarchi, S.M., Quintero, N.A., Concellón, A., Giner, S.A., 2013. Effect of temperature on hot-air drying rate and on retention of antioxidant capacity in apple leathers. Food and Bioproducts Processing 91, 310-318.
- Fennema, O.R., 2000. Química de los alimentos. Editorial Acribia. ISBN 9788420011424.
- Goula, A.M., Karapantsios, T.D., Achilias, D.S., Adamopoulos, K.G., 2008. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. Journal of Food Engineering 85, 73–83.
- Iazarides, H.N., 2001. Reasons and possibilities to control solid uptake during osmotic treatment of fruit and vegetables. Osmotic dehydration and vacuum impregnation. Technomic Publishing Company, USA.
- Jamali, A., Kouhila, M., Mohamed, L.A., Jaouhari, J.T., Idimam, A., Abdenouri, N., 2006. Sorption isotherms of Chenopodium ambrosioides leaves at three temperatures. Journal of Food Engineering 72, 77–84
- Khin, M.M., Weibiao, Z., Perera, C., 2005. Development in the combined treatment of coating and osmotic dehydration of food: a review. International Journal of Food Engineering, 1-19.

- Mrada, N.D., Bonazzia, C., Courtoisa, F., Kechaouc, N., Mihoubid, N.B., 2013. Moisture desorption isotherms and glass transition temperatures of osmo-dehydrated apple and pear. *Food and Bioproducts Processing* 91, 121–128.
- Nguyen, T.A., Verboven, P., Daudin, J-D., Vandewalle, S., Nicola, B.M., 2004. Effect of picking date, time and temperature on water sorption of ‘Conference’ pear tissue. *Postharvest Biology and Technology* 33, 243–253
- Pointing, J.D., Warrers, G.G., Forrey, R.R., Jackson, R., Stanley, W.L., 1966. Osmotic dehydration of fruits. *Food Technology*, 1365-1368.
- Rafiq, M., 2012. Osmotic deshydration technique for fruits preservation-A review. *Pakistan Journal of Food Sciences* 22, 71-85.
- Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., Niranja, K., Knorr, D., 2002. Recent developments in osmotic deshydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science and Technology* 13, 48-59.
- Rockland, L.B., 1969. The practical approach to better low-moisture foods: water activity and storage stability, *Food Tecnology* 23, 1241.
- Staudt, P.B., Tessaro, I.C., Marczak, L.D.F., Soares, R.P., Cardozo, N.S.M., 2013. A new method for predicting sorption isotherms at different temperatures: Extension to the GAB model. *Journal of Food Engineering* 118, 247-255
- Shenma, Mulvaney, Rizvi, 2003. Ingeniería de alimentos: operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Editorial Limusa. ISBN 9681862031.
- Shi, J., Xue, J.S., 2009. Application and development of osmotic dehydration technology in food processing. In Ratti, C. (Ed). *Advances in food dehydration*. CRC Press, USA.
- Singh, G.D., Sharma, R., Bawa, A.S., Saxena, D.C., 2008. Drying and rehydration characteristics of water chestnut (*Trapa natans*) as a function of drying air temperature. *Jorunal of Food Engineering* 87, 213-221.
- Sutar, N., Sutar, P.P., 2013. Developments in osmotic dehydration of fruits and vegetable-a review. *Trends in Post Harvest Technology* 1, 20-36.

VV.AA., 2002. Manual de conservación de los alimentos. Editorial Acribia, ISBN 9788420009896.

Yemmireddy, V.K., Chinnan, M.S., Kerr, W.L., Hung, Y-C., 2013. Effect of drying method on drying time and physico-chemical properties of dried rabbiteya blueberries. Food Science and Technology 50, 739-745.