

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

## IMPACTO DE LAS CONDICIONES DE LIOFILIZACIÓN DE UN TRITURADO DE POMELO EN LA DURACIÓN DEL PROCESO Y EN LAS PROPIEDADES MORFOGEOMÉTRICAS DEL PRODUCTO OBTENIDO

TRABAJO DE FIN DE GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS  
ALIMENTOS

AUTORA: ANA ORTÍ LULL

TUTORA: NURIA MARTÍNEZ NAVARRETE

CO-TUTORA: MARÍA DEL MAR CAMACHO VIDAL

DIRECTOR EXPERIMENTAL: LUIS ALBERTO EGAS ASTUDILLO

Curso Académico: 2017-2018

Valencia, Julio 2018

## RESUMEN

La liofilización es una tecnología de deshidratación en frío que reduce las pérdidas de compuestos lábiles, muchos de ellos responsables del sabor, aroma y valor nutritivo de alimentos, además de permitir estabilizar y conservar los productos durante periodos de tiempo largos. Hoy en día estas características de calidad en un producto están muy valoradas por el consumidor de alta cocina o cocina gourmet, que puede encontrar en los alimentos liofilizados una nueva oferta de platos de gran calidad nutritiva y organoléptica. No obstante, el proceso de liofilización es lento, resultando una tecnología costosa que repercute en el precio final del producto. Por ello, cualquier intento de acortar el tiempo de proceso podrá permitir competir con los diferentes productos deshidratados que ofrece el mercado obtenidos por otros tipos de secado. Con este objetivo, en el siguiente trabajo se ha estudiado la cinética de deshidratación por liofilización de un puré de pomelo, con y sin biopolímeros añadidos, a dos temperaturas diferentes. Estos biopolímeros, si bien se ha demostrado que otorgan un soporte estructural al producto deshidratado, pueden interactuar con el agua favoreciendo o dificultando tanto su congelación como su posterior sublimación. Además, se ha evaluado la evolución de algunas propiedades morfogeométricas del alimento durante el proceso, con el fin de conocer si es posible establecer el punto final del mismo en base a la porosidad del producto obtenido. Se han elegido estas propiedades por su relación con la calidad de este tipo de alimentos. Para el presente trabajo, las muestras preparadas se han liofilizado durante diferentes tiempos comprendidos entre 3 y 21 horas a  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el condensador y 0,09 mbar. La liofilización se ha llevado a cabo en distintas condiciones: con aporte y sin aporte de calor en las bandejas del equipo, registrándose la temperatura de la muestra durante el proceso. A cada tiempo de liofilización se determinó la humedad, color y espesor de las muestras, así como el tamaño y cantidad de poros formados mediante análisis de imagen. Tanto la temperatura como la incorporación de biopolímeros afectaron al color y a la cantidad y tamaño de poro de las muestras. El espesor sólo se vio influenciado por la temperatura. A partir del estudio cinético se estableció el tiempo óptimo de proceso en cada una de las 4 condiciones estudiadas. Éste fue de 23.4, 24.3, 10.6 y 9.7 h para SB (ST), CB (ST), SB (40) y CB (40), respectivamente.

Palabras clave: porosidad, tamaño de poro, análisis de imagen, cinética de liofilización, goma arábica, fibra de bambú.

## RESUM

La liofilització és una tecnologia de deshidratació en fred que redueix les pèrdues de compostos làbils, molts dels quals són responsables del sabor, aroma i valor nutritiu dels aliments i, a més permeten establir i conservar els productes durant períodes de temps llargs. A dia de hui, aquestes característiques de qualitat en un producte estan molt valorades pel consumidor d'alta cuina o cuina gourmet, els quals poden trobar en els aliments liofilitzats una nova oferta de plats de gran qualitat nutritiva i organolèptica. No obstant, el procés de liofilització és lent, resultant una tecnologia costosa que repercuteix en el preu final del producte. És per això, que qualsevol intent de reduir el temps de procés podrà permetre competir amb els diferents productes deshidratats que s'obtenen per altres tipus d'assecat i que s'ofereixen en el mercat. Amb aquest objectiu, en el següent treball s'ha estudiat la cinètica de deshidratació per liofilització d'un puré de pomelo, sense i amb biopolímers afegits, a dos temperatures diferents. S'ha demostrat que aquests biopolímers proporcionen un suport estructural al producte deshidratat, poden interaccionar amb l'aigua que afavoreixen o dificulten tant la seua congelació com la seua posterior sublimació. A més, s'ha avaluat l'evolució d'algunes propietats morfogeomètriques de l'aliment durant el procés, amb la finalitat de conèixer si és possible establir el punt final del mateix en base a la porositat del producte obtingut. S'han elegit aquestes propietats per la seua relació amb la qualitat d'aquest tipus de productes. Per al present treball les mostres preparades s'han liofilitzat durant distints temps entre 3 i 21 hores a  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el condensador y 0,09 mbar. La liofilització s'ha portat a terme en distintes condicions: sense aplicació i amb aplicació de calor als estants de l'equip, i s'ha registrat la temperatura de la mostra durant el procés. A cada temps de liofilització s'ha determinat la humitat el seu color i espessor de les mostres, així com la mida i quantitat de porus formats mitjançant anàlisi d'imatge. Tant la temperatura com la incorporació de biopolímers han afectat al color i a la mida i quantitat de pous de les mostres. L'espessor tan sols s'ha vist afectat per la temperatura. A partir d'aquest estudi cinètic s'ha establert el temps òptim de procés en cadascuna de les 4 condicions estudiades. Aquest ha sigut de 23.4, 24.3, 10.6 i 9.7 h per a SB (ST), CB (ST), SB (40) i CB (40) respectivament.

Paraules clau: porositat, mida de porus, anàlisi d'imatge, cinètica de liofilització, goma aràbiga, fibra de bambú.

## ABSTRACT

Freeze drying is a cold drying technology that reduces the loss of labile compounds, many of which are responsible for the flavor, aroma and nutritional value of food, as well as stabilizing and preserving the products for long periods of time. Nowadays these quality characteristics in a product are highly valued by the consumer of haute cuisine or gourmet cuisine, which can find in freeze-dried food a new offer of dishes of high nutritional and organoleptic quality. However, the freeze-drying process is slow, resulting in a costly technology that affects the final price of the product. Therefore, any attempt to reduce the process time may allow competing with the different dehydrated products offered by the market obtained by other types of drying. With this objective, in the following work we have studied the drying kinetics by freeze drying of a grapefruit paste, with and without added biopolymers, at two different temperatures. Although, these biopolymers have been shown to give structural support to the dehydrated product, can interact with water, favouring or hindering both freezing and subsequent sublimation. In addition, the evolution of some morphogeometric properties of the food during the process have been evaluated, in order to know if it is possible to establish the end point thereof based on the porosity of the product obtained. These properties have been chosen because of their relationship with the quality of this type of products. For the present work, the samples prepared have been freeze dried for different times between 3 and 21 hours at -55 °C in the condenser and 0.09 mbar. The freeze drying has been carried out in different conditions: with and without heat input in the equipment trays, the temperature of the sample was registered during the process. At each time of freeze drying, the moisture, colour, thickness and size and number of pores formed by image analysis, of the samples were determined. The temperature as well as the incorporation of biopolymers, affected the colour and the size and number of the pores of the samples. The thickness was only influenced by the temperature. From the kinetic study, the optimal process time was established for each of the 4 conditions studied. This was 23.4, 24.3, 10.6 and 9.7 h for SB (ST), CB (ST), SB (40) and CB (40), respectively.

Key words: porosity, size of the pores, image analysis, freeze drying kinetic, arabig gum, bamboo fiber.

# ÍNDICE

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.   | INTRODUCCIÓN.....   | 1  |
| 1.1. | El pomelo.....  | 1  |
| 1.2. | Los <i>snacks</i> y su consumo.....   | 1  |
| 1.3. | Algunas técnicas empleadas en la obtención de <i>snacks</i> de frutas.....  | 2  |
| 1.4. | Los biopolímeros en la elaboración de un <i>snack</i> obtenido por liofilización.....   | 3  |
| 2.   | OBJETIVOS.....  | 5  |
| 3.   | MATERIALES Y MÉTODOS.....   | 6  |
| 3.1. | Selección de la materia prima.....  | 6  |
| 3.2. | Preparación de la muestra.....  | 6  |
| 3.3. | Liofilización.....  | 6  |
| 3.4. | Determinación del color y del espesor de las tortas de pomelo liofilizadas.....   | 7  |
| 3.5. | Determinación del tamaño y la cantidad de poros superficiales en las tortas de pomelo liofilizadas.....   | 7  |
| 3.6. | Cinética de secado por liofilización del puré de pomelo.....  | 8  |
| 3.7. | Análisis estadístico de los resultados.....   | 9  |
| 4.   | RESULTADOS Y DISCUSIONES.....   | 10 |
| 4.1. | Efecto de la temperatura de bandeja y de la incorporación de biopolímeros en los parámetros de color medidos en las tortas de pomelo liofilizadas.....                  | 10 |
| 4.2. | Efecto de la temperatura de bandeja y de la incorporación de biopolímeros en el espesor de las tortas de pomelo liofilizadas.....                                       | 13 |
| 4.3. | Efecto de la temperatura de la bandeja y de la incorporación de biopolímeros en el número y tamaño de los poros superficiales de las tortas de pomelo liofilizadas..... | 14 |
| 4.4. | Cinética de secado.....   | 16 |
| 5.   | CONCLUSIONES.....   | 19 |
| 6.   | BIBLIOGRAFÍA.....   | 20 |
| 7.   | ANEXOS:.....  | 24 |
| 7.1. | Anexo I: análisis personal de las características de las tortas de pomelo a lo largo de los tiempos de liofilización.....   | 24 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Consumo según los tipos de snacks en el mercado español y en la Unión Europea (The Nielsen Company, 2014) .....   | 2  |
| <b>Figura 2.</b> Configuración del protocolo de fotografía estandarizada: vista superior (a) y vista lateral (b) .....   | 8  |
| <b>Figura 3.</b> Ejemplo de una muestra de puré de pomelo liofilizado durante 12 h sin biopolímeros añadidos a 40 °C: SB (40) original (a), transformada a escala de grises (b) y tras el proceso de umbralización y reducción del ruido (c) .....   | 8  |
| <b>Figura 4.</b> Curva temperatura-tiempo de la muestra con biopolímeros (CB) y sin (ST) aporte de calor en los estantes del liofilizador, durante la liofilización .....  | 10 |
| <b>Figura 5.</b> Plano cromático ( $a^*$ , $b^*$ ) de las muestras de puré de pomelo liofilizado con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y con (40) y sin (ST) aporte de calor a los estantes del liofilizador. Para la muestra SB (ST), el $C_{ab}^*$ y el ángulo de tono $h_{ab}^*$ aparecen indicados con flechas ..... | 12 |
| <b>Figura 6.</b> Evolución del espesor de las muestras liofilizadas con el tiempo con (CB) y sin biopolímeros añadidos (SB) y con (40) y sin (ST) aplicación de temperatura en los estantes del liofilizador .....   | 13 |
| <b>Figura 7.</b> Ejemplo de la distribución del tamaño de poros de las muestras estudiadas con (CB) y sin (SB) adición de biopolímeros y con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador a un tiempo de proceso de 21 h .....   | 14 |
| <b>Figura 8.</b> Frecuencia de poros acumulados en función de su área, durante todos los tiempos de liofilización estudiados, para cada una de las muestras de puré de pomelo con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y con (40) y sin (ST) aplicación de calor a los estantes del liofilizador ..                         | 15 |
| <b>Figura 9.</b> Medidas del área media de las áreas de los poros superficiales obtenidas por análisis de imagen en tortas de puré de pomelo liofilizadas con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos, con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador. ....  | 16 |
| <b>Figura 10.</b> Valores calculados (modelo modificado de Page) y experimentales del cociente de humedad (MR) durante la liofilización de puré de pomelo con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y aplicando (40) o no (ST) calor a los estantes del liofilizador. Valores medios ( $n=4$ ) y desviación estándar. ....   | 17 |
| <b>Figura 11.</b> Ejemplo de la evolución de la apariencia y textura en muestras SB (ST) durante la liofilización .....  | 24 |
| <b>Figura 12.</b> Ejemplo de la evolución de la apariencia y textura en muestras SB (40) durante la liofilización .....  | 25 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Valores medios $\pm$ desviación estándar de las coordenadas de color ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $h_{ab}^*$ y $C_{ab}^*$ ) de las muestras liofilizadas con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador y con (CB) y sin (SB) adición de biopolímeros. Las letras (a, b, c) en los valores indican la diferencia significativa establecida por el ANOVA ( $p < 0.05$ )..... | 11 |
| <b>Tabla 2.</b> Diferencias de color ( $\Delta E$ ) entre las muestras de puré liofilizadas con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador tomando como referencia la muestra SB (ST) .....  | 13 |
| <b>Tabla 3.</b> Constantes del modelo de Page modificado ( $k$ , $n$ y $a$ ), tiempo necesario para alcanzar 0.02 g de agua / g de muestra en muestras con (CB) y sin (SB) adición de biopolímeros y con (40) y sin (ST) aplicación de temperatura en los estantes del liofilizador .....  | 17 |
| <b>Tabla 4.</b> Condiciones establecidas para el tiempo óptimo de liofilización de las distintas muestras con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y con (40) y sin (ST) aplicación de calor a los estantes del liofilizador.....   | 18 |
| <b>Tabla 5.</b> Características visuales y táctiles a diferentes tiempos de liofilización en tortas de puré de pomelo liofilizadas con (CB) y sin (SB) adición de biopolímeros y con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador. Dónde: X= Sí presenta la característica; — = No presenta la característica .....  | 26 |

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. El pomelo

Las frutas son un alimento con un gran peso en la dieta de la población debido a sus múltiples propiedades funcionales asociadas a un estado de salud favorable. En España, el consumo de frutas cítricas en concreto, es muy habitual, tanto por su gran disponibilidad estacionaria, como por su alto valor nutricional.

Según la FAO (2017) el pomelo (*Citrus paradisi*) es el cuarto cítrico más producido a nivel mundial, por detrás de las naranjas, las mandarinas y los limones, es un fruto que pertenece a la familia de las rutáceas, procede de una hibridación natural entre un naranjo dulce y un pummelo (*Citrus grandis*). Existen principalmente dos variedades: las blancas y las pigmentadas (Infoagro, 2018). Estas últimas son las más populares entre los consumidores, ya que poseen un color más intenso que otorga al producto un aspecto más favorable que influye fuertemente en la decisión final del cliente de aceptarlo o rechazarlo (Chiralt et al., 2012).

En España la variedad favorita es la Star Ruby, la cual se caracteriza por tener una pulpa y una corteza con un color más vivo, una piel fácil de extraer, menor cantidad de semillas, alto contenido en zumo y un sabor menos amargo con respecto a otras variedades (Infoagro, 2018; Kimball, 1999).

El pomelo destaca por su bajo contenido calórico en comparación con otros cítricos y por ser rico en vitamina A, B y C, polifenoles y ácido cítrico. Estos tres últimos son conocidos antioxidantes, muy beneficiosos para la salud, ya que actúan como secuestrantes de radicales libres en caso de estrés oxidativo (EO). El EO puede afectar negativamente al metabolismo celular, impidiendo que el organismo realice sus funciones fisiológicas con total normalidad (Coronado, et al., 2015; Soledad, 2018). Por ello, el pomelo se convierte en un alimento muy interesante desde el punto de vista nutricional. A pesar de sus múltiples propiedades funcionales, su consumo no es muy frecuente en España, debido a su característico sabor amargo, si bien, en la última década ha aumentado su ingesta, sobre todo como fruto fresco, en forma de mermelada o de zumo (Infoagro, 2018). Dentro de este marco, resulta conveniente buscar un nuevo formato de producto para potenciar su consumo, manteniendo su valor nutritivo y funcional. Se ha visto que una alternativa con mucha aceptación en la actualidad son los *snacks* saludables y por ello podrían ser una opción con mucho potencial.

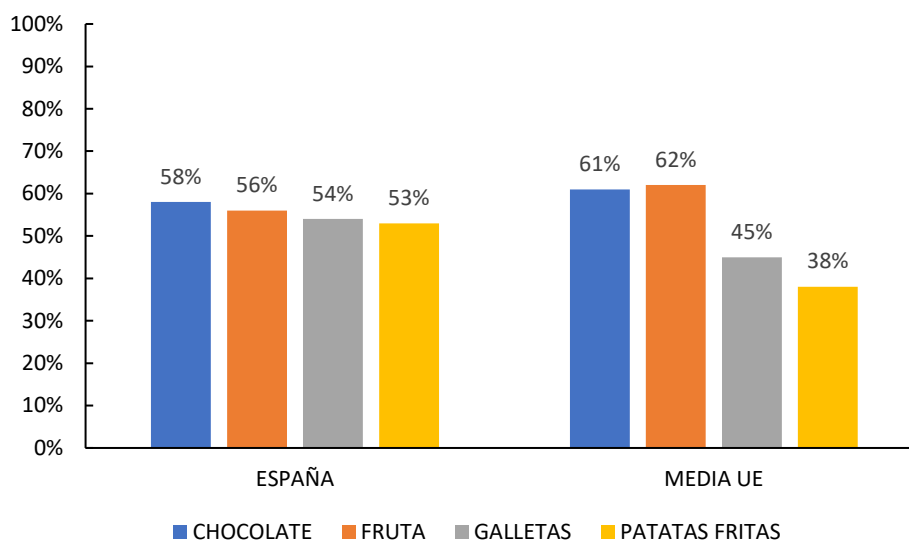
## 1.2. Los *snacks* y su consumo

El término *snack* engloba a cualquier alimento que se pueda consumir fuera del horario de la comida principal, por lo general en la calle y en un periodo corto de tiempo (ProChile, 2011; Viviant, 2007). En el mercado coexisten principalmente dos tipos de *snacks*: salados y dulces. Dentro del primer grupo se encuentran mayoritariamente productos fritos elaborados a base de maíz y trigo o patatas, caracterizados por su alto contenido en grasas y sal. Por otro lado, los *snacks* dulces más conocidos son las golosinas, las chocolatinas, los lácteos o aquellos elaborados a partir de frutas y hortalizas (Viviant, 2007).

La demanda de este tipo de productos cada vez es mayor, debido al cambio en el estilo de vida que ha experimentado la población. Se tiene un horario más agitado, con una jornada laboral más larga y unas necesidades personales que dejan como consecuencia un menor tiempo para comer (The Nielsen Company, 2014; Infoetail, 2014).



En el mercado español (Fig. 1), los *snacks* más consumidos son el chocolate, seguido de la fruta y frutos secos, las galletas y las patatas fritas. Mientras que a nivel europeo, los resultados son idénticos, excepto que en primer lugar se encuentra la fruta y en segundo el chocolate (The Nielsen Company, 2014).



*Figura 1. Consumo según los tipos de snacks en el mercado español y en la Unión Europea (The Nielsen Company, 2014)*

Siguiendo esta línea se pretende dar un giro al concepto de *snack*, pasando de una percepción de alimento poco saludable, a una oportunidad para llevar una dieta sana y equilibrada. Por este motivo, la industria alimentaria está buscando nuevos formatos para obtener *snacks* nutritivos y saludables y una vertiente que está alcanzando mucha popularidad son los *snacks* de frutas deshidratadas (The Nielsen Company, 2014).

### **1.3. Algunas técnicas empleadas en la obtención de *snacks* de frutas**

Una de las técnicas más empleadas en la obtención de *snacks* de frutas deshidratadas es la deshidratación osmótica. Es una operación basada en la reducción del contenido en agua de un alimento sólido con estructura celular, debido a la creación de gradientes de presión osmótica. La técnica consiste en introducir el alimento en una disolución concentrada de sal o azúcar generando así un flujo de agua desde el interior de las células hacia el exterior donde hay una mayor concentración de solutos. Este flujo se origina debido a la diferencia de potencial químico entre el agua del alimento y su entorno (Fito et al., 2001). En este caso, se obtienen productos con una textura gomosa y un incremento en el contenido en azúcares o sales del producto.

Otra técnica utilizada es el secado por aire caliente, proceso de deshidratación de un alimento sólido o líquido, por contacto con una corriente de aire caliente y seco basado en la evaporación del agua del alimento. Permite alcanzar valores de  $a_w$  relativamente bajos (< 0.3), asegurando la estabilidad total del alimento. Sin embargo, es una técnica agresiva que daña el producto final tanto organoléptica como sensorial y nutricionalmente (Fito et al., 2001).

Una tecnología que puede emplearse también como alternativa, para la elaboración de aperitivos y/o postres tipo *snack* con un alto valor añadido a nivel culinario gourmet, es la liofilización. Esta es una operación de secado basada en el principio de sublimación del hielo de un producto congelado, de forma que el agua del alimento pasa directamente de estado sólido a gaseoso sin pasar por el

estado líquido. Se emplean condiciones de presión a vacío, hecho que permite utilizar unas temperaturas inferiores a las convencionales y por lo tanto, habrá una menor pérdida de compuestos lábiles, la mayoría de ellos responsables del aroma y del valor nutricional del producto, así como una mejor conservación de la estructura original, lo que supone una gran ventaja con respecto a las otras técnicas de secado mencionadas anteriormente. Los productos liofilizados pueden ser almacenados durante un gran periodo de tiempo a temperatura ambiente sin sufrir degradaciones (Casp y Abril, 2003).

Por otra parte, el proceso de liofilización es lento y costoso y, por tanto, repercute en el precio final del producto. Es por ello, que cualquier intento de acortar el tiempo de proceso, podría permitir competir con los diferentes productos deshidratados que ofrece el mercado, obtenidos por los otros tipos de secado mencionados anteriormente. Con el control de las condiciones de deshidratación se podría conseguir la reducción del tiempo de proceso y por tanto, un ahorro desde el punto de vista económico y energético. Según un estudio realizado por la consultora Nielsen, los consumidores están dispuestos a invertir más en alimentación, hablando en términos monetarios, a cambio de productos exentos de alérgenos, más naturales, sin aditivos artificiales añadidos y saludables y placenteros desde el punto de vista sensorial y organoléptico (Olarte et al., 2017; The Nielsen Company, 2014). Atendiendo a la demanda de los consumidores, la liofilización se convierte en una buena alternativa para saciar sus necesidades y deseos.

#### **1.4. Los biopolímeros en la elaboración de un *snack* obtenido por liofilización**

A la hora de elaborar productos con una  $a_w$  baja, la textura se convierte en un factor clave en la aceptación del producto por parte del consumidor. Sin embargo, estos productos, por sus características suelen desarrollar problemas relacionados con la transición vítrea de su matriz provocando el paso del estado vítreo, de alta estabilidad, al gomoso, más inestable. Esto ocurre debido a pequeños aumentos en la humedad o temperatura cuando se sobrepasa la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del alimento. Este suceso está directamente relacionado con el aumento de la velocidad de las reacciones de deterioro y con la pérdida de la estructura del producto, que se vuelve muy pegajosa (Silva, 2015). Para evitar este fenómeno indeseable, se ha propuesto el uso de diferentes biopolímeros, unos de alto peso molecular, capaces de aumentar la temperatura de transición vítrea, y otros con un papel estérico (Barbosa et al., 2005; Telis y Martínez, 2009). Las propiedades funcionales de los biopolímeros abarcan cualquier propiedad fisicoquímica que ejerza un efecto en las características de los alimentos a los que se han aplicado durante su producción, procesado, almacenamiento y/o consumición, contribuyendo así en su calidad final (Dehnad et al., 2016). Dichas propiedades incluyen la capacidad de retención de agua y aceite de los alimentos, las propiedades emulsionantes y espumantes, la solubilidad, la viscosidad, la porosidad, el hinchamiento, la elasticidad y la adsorción entre otros (Kinsella, 1979; Wu et al., 2009). En este sentido, en este trabajo se ha utilizado un carbohidrato de alto peso molecular, la goma arábiga y una fibra de bambú para estabilizar al producto obtenido, ya que en estudios anteriores realizados se determinó que su efecto era el más adecuado (Alcalá, 2017).

La goma arábiga o *acacia gum* es un polisacárido natural conocido en la industria alimentaria como E-414. Se extrae de la resina producida por los árboles subsaharianos *Acacia senegal* y *Acacia seyal* como consecuencia de la gomosis, una enfermedad que afecta a las plantas de tallo leñoso provocando la secreción de sustancias gomosas de tonalidad ámbar como mecanismo de defensa frente a las lesiones en el tronco producidas por la asfixia radicular, el ataque de hongos o insectos masivos, entre otros (Franquesa, 2018; Mosquera, 2010). Esta resina destaca por su elevada

solubilidad (aproximadamente 500 g/L) y baja viscosidad en agua, así como por su gran capacidad como emulsificante, texturizante y gelificante (Mosquera, 2010; Badui, 2013). Su uso favorece el aumento de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de los productos, reduciendo su higroscopicidad y pegajosidad y dando a lugar a productos más fáciles de manejar durante su elaboración y transporte, así como con mejores características de calidad (Gabas et al. 2007; Agudelo, 2017), además, afecta de manera poco notable al color con respecto a otros solutos. Si se agrupan todas las propiedades mencionadas, la goma arábica se califica dentro del sector como un importante estabilizante de productos deshidratados. También se le reconocen otros atributos como la retención de sustancias volátiles, de suma importancia en alimentos procesados como se ha citado anteriormente, y como antioxidante (Mosquera, 2010; Gabas et al., 2007).

Con respecto a la fibra de bambú, es un polisacárido no amiláceo que se obtiene a partir de la fracción comestible del bambú. Esta fibra insoluble está compuesta principalmente por celulosa y se caracteriza por poseer una gran capacidad de retención de agua, independiente del pH y de la temperatura, garantizando así la distribución homogénea de la humedad en el producto final y evitando la sinéresis. Además, actúa como crioprotector y estabilizante en la congelación y descongelación de los alimentos, de esta forma se previene la formación de cristales de hielo grandes, que puedan dañar su estructura. Otro atributo de interés es que aporta beneficios nutricionales relacionados con la salud, por ejemplo, su alto contenido en silicio ayuda a reducir los problemas osteoarticulares o su bajo contenido calórico y su efecto laxante lo hacen muy recomendable en dietas adelgazantes. Cabe mencionar, que la fibra de bambú no es tan conocida en alimentación como la goma arábica, sin embargo, cada vez se está expandiendo más su uso, sobre todo en repostería y productos cárnicos gracias a su poder como texturizante y antiaglomerante (Igual et al., 2014; Sigma, 2017; Agudelo, 2017; Vitacel, 2018).

## 2. OBJETIVOS

Estudiar la cinética de deshidratación por liofilización de un puré de pomelo, con y sin biopolímeros añadidos, a dos temperaturas diferentes, con el fin de conocer la posibilidad de acortar el tiempo de proceso.

Evaluar la evolución del color, el espesor y la distribución del tamaño de poros del alimento durante el proceso de deshidratación del puré de pomelo, en diferentes condiciones de liofilización.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Selección de la materia prima

La materia prima que se utilizó para realizar el estudio fue el pomelo (*Citrus paradisiae*), en concreto de la variedad Star Ruby. Este se adquirió en un supermercado local de Valencia y el método de selección empleado fue mediante evaluación visual, en función de su tamaño, firmeza, color y ausencia de daños físicos y fisiológicos, buscando la máxima homogeneidad posible entre las frutas.

Por otro lado, los biopolímeros empleados fueron la goma arábica (GA) Scharlab (España) y la fibra de bambú (FB) Vitacel (Alemania).

#### 3.2. Preparación de la muestra

Para la obtención del triturado de pomelo la fruta se peló, se le retiró el albedo, el eje central, y las semillas para finalmente despedazarla de forma manual. A continuación, el pomelo troceado se colocó en un robot de cocina (Thermomix® TM 21, Vorwerk, España) a velocidad 4 durante 40 s. Seguidamente se incrementó la velocidad a 9 durante 40 s más, obteniendo así una mezcla homogénea. El triturado se dividió en dos partes, a una de las cuales se le incorporaron los biopolímeros de acuerdo con la proporción establecida en trabajos anteriores (Agudelo, 2017): 4.2% de goma arábica (GA) y 0.58% de fibra de bambú (FB). La introducción de los biopolímeros se hizo en un robot de cocina (Thermomix® TM 21, Vorwerk, España) a velocidad 2 durante 300 s. De esta forma se consiguieron dos tipos de muestras: una sin biopolímeros añadidos (SB) y otra con biopolímeros añadidos (CB). Se determinó la humedad (estufa de vacío Vaciotem-T, JP Selecta, España) a  $60 \pm 1$  °C y a una presión < 100 mm Hg y el contenido en sólidos solubles (refractómetro, Refracto 30PX, Mettler Toledo, Suiza) de ambas por triplicado.

#### 3.3. Liofilización

Las muestras obtenidas según se describe en el punto 3.2 se congelaron (arcón congelador, LGT 2325, Liebherr, Austria) durante 6 h a -45 °C para su posterior liofilización. Para ello se distribuyeron en bandejas de aluminio de 5.8 cm de diámetro y 1 cm de espesor, con un peso aproximado de 27 g por recipiente.

Las muestras congeladas de puré, fueron liofilizadas durante 3, 5, 7, 9, 10, 12, 15, 18 y 21 h en un liofilizador (LyoQuest-55, Telstar, España), el cual está compuesto por una cámara de acrílico cilíndrica estándar ( $\varnothing$  215 x 300 mm) y tres estantes con posibilidad de calefacción. Se utilizaron dos condiciones diferentes para realizar la operación de liofilización, una sin aplicación de calor a los estantes (muestras ST) y la otra aplicándoles calor hasta una temperatura de 40 °C (muestras 40). En ambos procesos se mantuvo la presión de la cámara de 0.09 mbar. De esta forma, se procesaron cuatro muestras diferentes: SB (ST), CB (ST), SB (40) y CB (40). Durante el proceso, se registró la evolución de la temperatura en las muestras cada 30 s, mediante sondas PT100 administradas por un Logger DNL910A (Fourtec, EE.UU.), conectado a un ordenador. Al concluir cada proceso de liofilización se determinó el contenido en humedad (estufa de vacío Vaciotem-T, JP Selecta, España) a  $60 \pm 1$  °C y a una presión < 100 mm Hg, el color, el espesor y la cantidad y el tamaño de poros superficiales formados, de cada una de las muestras, para así poder observar su

evolución a lo largo de la liofilización y poder relacionarlo con el final del proceso. A continuación se describe cómo se realizaron cada uno de los análisis.

Por otra parte, a lo largo de todo el estudio, también se realizó un análisis subjetivo, tanto visual como de la textura, de todas las muestras obtenidas (Anexo I).

### 3.4. Determinación del color y del espesor de las tortas de pomelo liofilizadas

El color de las muestras se midió por triplicado poniendo un vidrio reflectante en la parte superior de las tortas de pomelo nada más salir del liofilizador. El equipo empleado fue un espectrofotómetro (CM- 2600d, Konica Minolta, Japón) conectado a un ordenador provisto de una ventana de medida de 8 mm de diámetro, de esta forma, se obtuvieron las coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$  utilizando como referencia el iluminante D65 y el observador  $10^\circ$ . En este sistema, la coordenada  $L^*$  indica la luminosidad en una escala de 0 a 100 de negro a blanco;  $a^*$ , (+) la cantidad de rojo o (-) de verde; y  $b^*$ , (+) la cantidad de amarillo o (-) de azul. El ángulo de matiz ( $h_{ab}^*$ ), el croma ( $C_{ab}^*$ ) y la diferencia total de color ( $\Delta E^*$ ) se obtuvieron a partir de las Ecuaciones (1), (2) y (3). A continuación, se midió el espesor de la muestra mediante un calibrador Vernier tipo CM (0.02 mm). Esta determinación se realizó aleatoriamente en diferentes puntos de la muestra (diez en total), para así estandarizar el valor obtenido.

$$h_{ab}^* = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (1)$$

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

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad (3)$$

### 3.5. Determinación del tamaño y la cantidad de poros superficiales en las tortas de pomelo liofilizadas

La cantidad y el tamaño de poros formados después de cada liofilización se analizaron a partir de fotografías tomadas de las muestras a cada tiempo, dos por proceso, con la ayuda de una cámara digital (Canon EOS 350D, Canon, Japón). Esta se colocó en un soporte iluminado (RS 2 XA, Kaiser, Alemania), el cual permite mantener las condiciones de distancia entre la cámara y la muestra (23 cm) y una luminosidad estándar con luz blanca de 6500K según el Protocolo de estandarización de imágenes de alimentos realizado por la Unión Europea (Charbonnier et al., 2015) (Fig. 2). Las imágenes se adquirieron con una abertura focal de 55 mm (Lente EFS 18-55, Canon, Países Bajos) y en modo automático. Estas se analizaron mediante software imageJ, 1.51 g (National Institutes of Health, EE. UU) (Abràmoff et al., 2004; Datta et al., 2008; Jha et al., 2017), que utiliza el contraste entre las dos fases (poro y parte sólida) en la imagen. La imagen a color (Fig. 3a) se transformó a escala de grises (8 bit) (Fig. 3b), para luego aplicar un proceso de umbralización (95%, iso data) y reducir el ruido (remover el valor atípico), lo que permitió la determinación del área de los poros formados (Fig. 3c). Para cada grupo experimental se realizaron tres medidas.

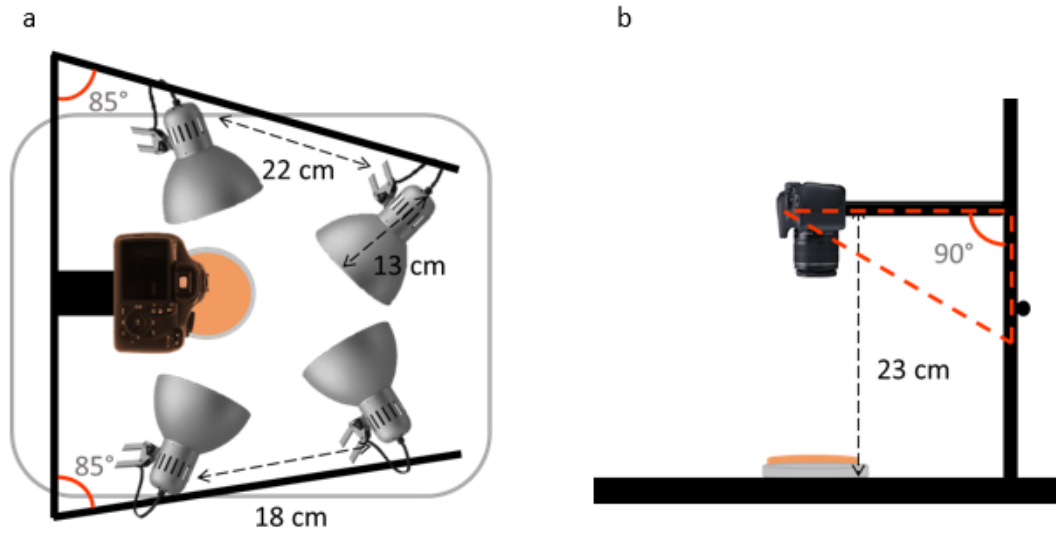


Figura 2. Configuración del protocolo de fotografía estandarizada: vista superior (a) y vista lateral (b)

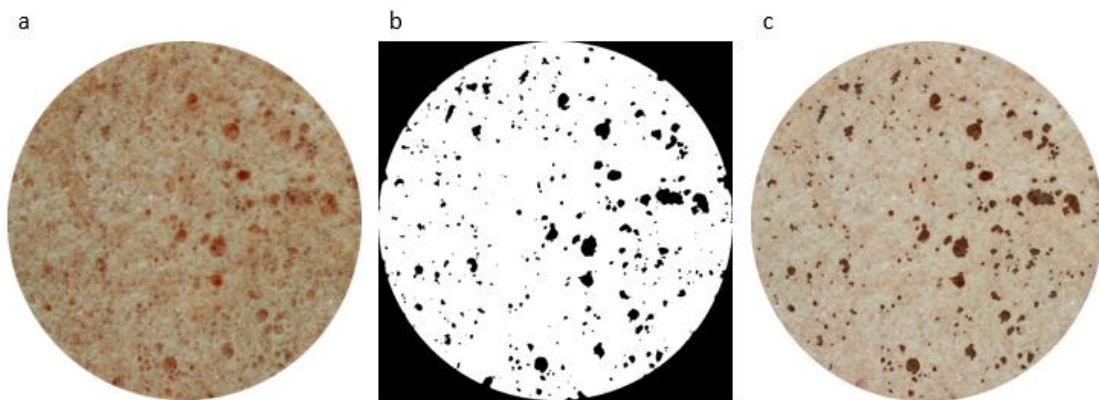


Figura 3. Ejemplo de una muestra de puré de pomelo liofilizado durante 12 h sin biopolímeros añadidos a 40 °C: SB (40) original (a), transformada a escala de grises (b) y tras el proceso de umbralización y reducción del ruido (c)

Los resultados obtenidos se clasificaron y tabularon en una hoja de cálculo Microsoft Excel donde se calculó la distribución de frecuencia en función de una serie geométrica. El área promedio para cada tiempo de liofilización se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\bar{A} = \frac{\sum_i(A * F)}{T} \quad (5)$$

donde  $\bar{A}$  es el área media de los poros ( $\text{mm}^2$ ), A el área de cada poro ( $\text{mm}^2$ ), F la frecuencia del área y T el número total de poros encontrados.

### 3.6. Cinética de secado por liofilización del puré de pomelo

Para el estudio de la cinética de secado se empleó una metodología basada en la pérdida de masa de las muestras. Para ello, se pesaron las muestras antes de congelarse ( $m_i$ ) y después de cada tiempo de liofilización ( $m_f$ ), en una balanza (XS204DR, Mettler Toledo, España) con una precisión

de 0.0001 g. El contenido en humedad residual presente en cada una de las muestras se evaluó a partir de la Ecuación (4) y se utilizó para obtener la relación entre humedades MR (Ec. (5)).

$$X_{wf} = \frac{m_i \times X_{wi} - (m_i - m_f)}{m_f} \quad (4)$$

donde  $X_{wf}$  es la humedad de la muestra liofilizada (g agua/g muestra liofilizada),  $m_i$  a la masa de la muestra inicial (g),  $X_{wi}$  a la humedad de la muestra inicial (g agua/g muestra) y  $m_f$  a la masa final de la muestra liofilizada (g).

$$MR = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{w0} - X_{we}} \quad (5)$$

donde  $X_{wt}$ ,  $X_{w0}$  y  $X_{we}$  representan el contenido en humedad (g agua/g muestra liofilizada) expresado en base seca al tiempo  $t$ , 0 y en equilibrio respectivamente.

Como el valor de  $X_{we}$  normalmente es muy bajo (Calín Sanchez et al., 2015), la Ecuación (5) se simplifica a la Ecuación (6) sin ningún cambio significativo en el valor de MR.

$$MR = \frac{X_{wt}}{X_{w0}} \quad (6)$$

Según pruebas preliminares (Cabrera, 2016) se escogió el ajuste obtenido mediante el modelo de Page modificado (Ec. (7)), para ello se empleó el software Matlab R2015b.

$$MR = a \times e^{-k \times t^n} \quad (7)$$

donde  $a$ ,  $k$  y  $n$  son constantes cinéticas relacionadas con la difusividad, o facilidad con que el agua es eliminada del material, y la geometría de la muestra.

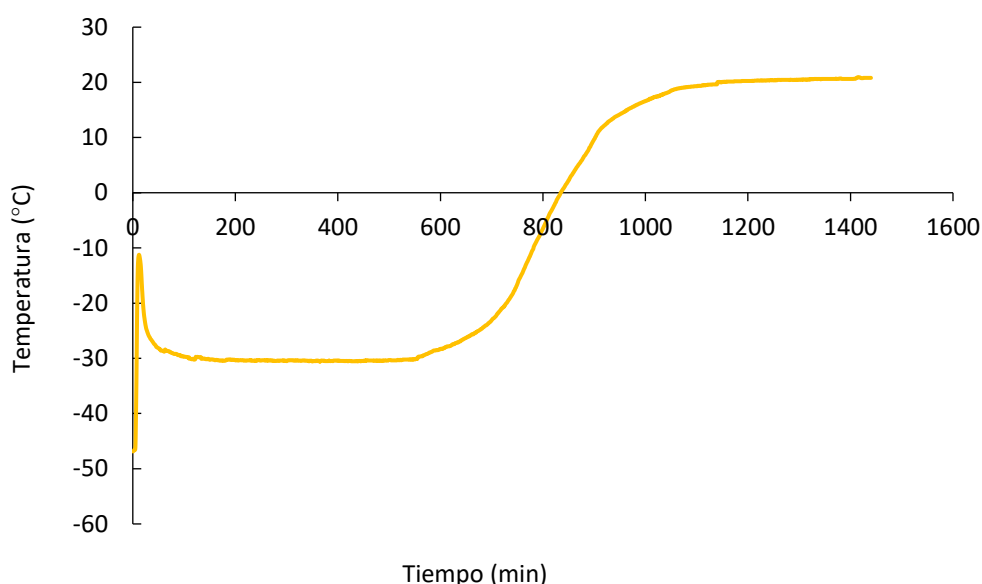
### 3.7. Análisis estadístico de los resultados

Los resultados se analizaron estadísticamente mediante un análisis de varianza (ANOVA) con el software Statgraphics Centurion (versión 17.2.04), el cual permite determinar si las diferencias entre las distintas variables son significativas o no. Para ello se empleó un nivel de confianza del 95%.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como se ha comentado anteriormente, en cada una de las experiencias de liofilización realizadas se registró la temperatura de las muestras durante todo el proceso. En la Figura 4 se muestra, como ejemplo, la evolución de la temperatura de la muestra CB (ST). Todas las curvas progresaron de forma similar, con diferentes tramos que describen las etapas de liofilización. Al principio se puede observar un descenso inicial de la temperatura, que se debe al reajuste de la misma después de la introducción de las muestras en el liofilizador, el cual había sido enfriado previamente. Esta bajada tan brusca se estabiliza, coincidiendo con el momento en que la presión de la cámara desciende hasta el vacío fijado. A partir de un determinado momento la temperatura comienza a aumentar y las curvas adquieren pendientes más o menos acusadas dependiendo de si hay o no aporte de calor. Al final de la liofilización, la temperatura se estabiliza cuando llega a la temperatura ambiente o de la bandeja, dependiendo de las condiciones impuestas en el proceso.



*Figura 4. Curva temperatura-tiempo de la muestra con biopolímeros (CB) y sin (ST) aporte de calor en los estantes del liofilizador, durante la liofilización*

### 4.1. Efecto de la temperatura de bandeja y de la incorporación de biopolímeros en los parámetros de color medidos en las tortas de pomelo liofilizadas

La medida del color es un parámetro muy utilizado en controles de calidad para apreciar diferencias significativas entre muestras, ya que supone una determinación mucho menos laboriosa y costosa que los análisis químicos. Se han publicado múltiples estudios que relacionan el efecto de distintas reacciones sobre el color en frutas procesadas térmicamente, las más frecuentes son las originadas por la degradación de pigmentos como los carotenoides, las reacciones de pardeamiento enzimático, las reacciones de Maillard o la oxidación del ácido ascórbico entre otros (Barreiro et al., 1997; Maskan, 2000).

Con el propósito de comprender el efecto de la adición de biopolímeros y de la aplicación de calor en las bandejas del liofilizador sobre el color del puré de pomelo liofilizado, se midieron para cada una de las muestras las coordenadas de color  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  y se calcularon  $C_{ab}^*$  y  $h_{ab}^*$ , del espacio CIE

L\*a\*b\*. No se observaron diferencias significativas con el tiempo, en ninguno de los parámetros analizados para cada una de las muestras estudiadas, después de realizar un ANOVA ( $p < 0.05$ ). Es por ello que se trabajó con los valores medios obtenidos en cada condición de liofilización (Tabla 1).

**Tabla 1.** Valores medios  $\pm$  desviación estándar de las coordenadas de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $h_{ab}^*$  y  $C_{ab}^*$ ) de las muestras liofilizadas con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador y con (CB) y sin (SB) adición de biopolímeros. Las letras (a, b, c) en los valores indican la diferencia significativa establecida por el ANOVA ( $p < 0.05$ )

| Muestras | $L^*$            | $a^*$            | $b^*$              | $C_{ab}^*$       | $h_{ab}^*$       |
|----------|------------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|
| SB (ST)  | $67 \pm 3^b$     | $19.0 \pm 1.1^a$ | $20.4 \pm 1.2^a$   | $27.9 \pm 1.4^b$ | $47.1 \pm 1.5^a$ |
| CB (ST)  | $67 \pm 3^b$     | $17 \pm 3^b$     | $19.3 \pm 1.5^a$   | $26 \pm 3^a$     | $49 \pm 2^b$     |
| SB (40)  | $64 \pm 3^a$     | $20 \pm 2^a$     | $21.8 \pm 1.4^b$   | $30 \pm 2^c$     | $46.9 \pm 1.7^a$ |
| CB (40)  | $66.9 \pm 1.9^b$ | $16.4 \pm 1.7^b$ | $19.45 \pm 1.14^a$ | $25.4 \pm 1.9^a$ | $50.1 \pm 1.6^b$ |

Al comparar las muestras a las que no se ha aplicado calor (ST) en el proceso de liofilización, se puede observar que la adición de biopolímeros no ejerce ningún efecto significativo ( $p > 0.05$ ) en el valor de su luminosidad (Tabla 1). Sin embargo, al aumentar la temperatura de las bandejas hasta 40 °C a la muestra sin biopolímeros (SB), se aprecia un descenso significativo ( $p < 0.05$ ) en los valores de  $L^*$ . Por otro lado, si se incrementa la temperatura (40) y además se añaden biopolímeros (CB) al puré de pomelo liofilizado, no se encuentra una diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) en el valor de su luminosidad. En general, se puede decir que la incorporación de biopolímeros no afecta significativamente ( $p > 0.05$ ) a la luminosidad del puré de pomelo. Esto se debe a que la adición de goma arábica (GA) y de fibra de bambú (FB) supone una protección frente a la degradación química de la muestra debido a la temperatura, minimizando la formación de compuestos que oscurezcan el producto final (Agudelo, 2017). Sin embargo, cuando la liofilización se realiza a 40 °C y la muestra no lleva biopolímeros, la luminosidad disminuye. Esto se podría atribuir a la aparición de melanoidinas, unos compuestos de color marrón oscuro originados en las reacciones de Maillard, las cuales se ven favorecidas por las altas temperaturas y la eliminación de agua, ya que se produce una mayor concentración de sólidos y con ello, una mayor interacción entre los azúcares reductores y los aminoácidos del pomelo (Wijewickreme y Kitts, 1997; Kim y Lee, 2008).

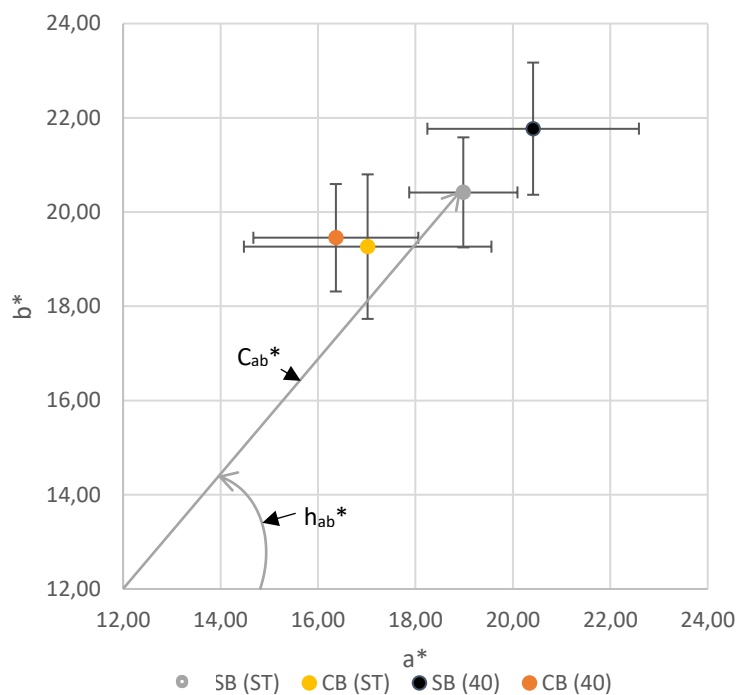
En cuanto a los valores de la coordenada  $a^*$ , al examinar las muestras a las que no se les ha adicionado calor (ST) durante el proceso de liofilización, se puede apreciar un descenso significativo ( $p < 0.05$ ) cuando se incorporan biopolímeros (CB). Por otro lado, la aplicación de calor (40) durante la liofilización del puré de pomelo presenta un aumento no significativo ( $p > 0.05$ ) en el valor de  $a^*$ . Mientras que al aplicar calor (40) e incorporar solutos (CB) al puré de pomelo, se observa un descenso significativo ( $p < 0.05$ ) en los niveles de  $a^*$ .

Por consiguiente, se puede afirmar que la incorporación de biopolímeros en los procesos ST y 40 conlleva una disminución en el valor de la coordenada  $a^*$ , la cual representa el contenido en rojo del puré de pomelo. Estos resultados concuerdan con estudios realizados en pomelo, fresa y borajó liofilizados (Mosquera, 2010; Correia et al., 2013). Este efecto se puede atribuir a que a pesar de que los solutos seleccionados ejercen un efecto protector frente a la degradación térmica de algunos compuestos, no ocurre lo mismo con los carotenoides, cuyo contenido disminuye por efecto de la temperatura y por tanto, la cantidad de rojo de las tortas disminuye (Agudelo, 2017). Sin embargo, los 40 °C aplicados en los estantes del liofilizador no afectan notablemente a su contenido en rojo.

Por otra parte, al evaluar la adición de biopolímeros en las muestras ST, no se observa ninguna diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) en el valor de  $b^*$ . Sin embargo, al aplicar temperatura (40) al puré

de pomelo se puede apreciar un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) de este parámetro. Por último, la incorporación de biopolímeros junto con la aplicación de temperatura en los estantes del liofilizador no conlleva ningún efecto significativo ( $p > 0.05$ ) en los valores de  $b^*$ . Con todo esto, se puede decir que el único factor que afecta a la cantidad de amarillo (coordenada  $b^*$ ) en el color del puré de pomelo es la temperatura.

La Figura 5 presenta el plano cromático ( $a^*$ ,  $b^*$ ) de las cuatro muestras estudiadas. Como cabía esperar, todos los puntos se encuentran en la zona que se corresponde con el color rojizo-amarillento tan característico del pomelo.



**Figura 5.** Plano cromático ( $a^*$ ,  $b^*$ ) de las muestras de puré de pomelo liofilizado con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y con (40) y sin (ST) aporte de calor a los estantes del liofilizador. Para la muestra SB (ST), el  $C_{ab}^*$  y el ángulo de tono  $h_{ab}^*$  aparecen indicados con flechas

La presencia de biopolímeros (CB) disminuye el valor del croma del puré de pomelo liofilizado. Por otro lado, al aplicar calor (40), la pureza de color sufre un aumento significativo ( $p < 0.05$ ), mientras que si además se incorporan biopolímeros (CB), disminuye significativamente ( $p < 0.05$ ) (Tabla 1, Fig. 5). De esta forma, se puede afirmar que tanto la adición de biopolímeros como la aplicación de calor en los estantes del liofilizador afectan al valor del croma del puré de pomelo liofilizado. La temperatura es el factor que más afecta a la pureza del color en las muestras, sobre todo cuando no llevan solutos. Al suministrar los 40 °C el croma aumenta, este impacto puede ser fruto del incremento en el contenido en rojo y amarillo de las muestras relacionado directamente con su pureza, lo que concuerda con lo establecido por Contreras (2006) en manzanas y fresas deshidratadas. Por otro lado, la incorporación de solutos supone una disminución del croma, hecho que también se ve evidenciado por Aznar (2014).

Por otra parte, se puede observar que la adición de biopolímeros conlleva un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) en los valores del tono de las tortas de pomelo liofilizadas ST (Tabla 1, Fig. 5), cosa que no ocurre al aplicar calor en las bandejas del liofilizador. Esto se pueden justificar como consecuencia de los cambios producidos en las coordenadas cromáticas  $a^*$  y  $b^*$  (Contreras, 2006).

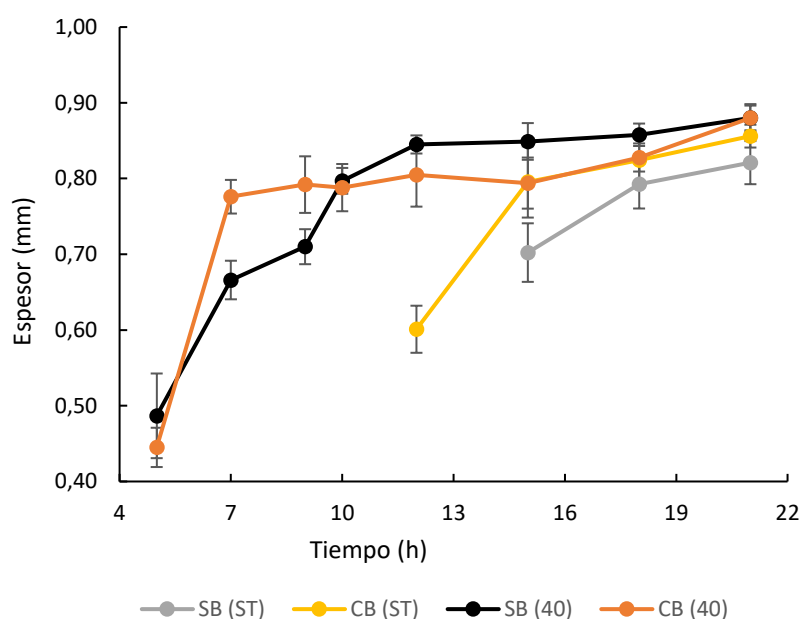
A partir de las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  se calculó la diferencia de color, empleando la Ecuación (3), tal y como se ha comentado en el apartado de materiales y métodos (Tabla 2). Se puede apreciar que, en general, la adición de biopolímeros y la aplicación de calor a los estantes del liofilizador suponen pequeñas diferencias de color con respecto al puré de pomelo liofilizado, en todos los casos, menores a 4 unidades. Estas diferencias se encuentran en el límite de detección por el ojo humano, que se establece en  $\Delta E^* > 2$  según Liao et al. (2007) y en  $\Delta E^* > 3$  según Bodart et al. (2008).

**Tabla 2.** Diferencias de color ( $\Delta E$ ) entre las muestras de puré liofilizadas con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador tomando como referencia la muestra SB (ST)

|                            |      |
|----------------------------|------|
| $\Delta E_{SB(ST)-CB(ST)}$ | 2.29 |
| $\Delta E_{SB(ST)-SB(40)}$ | 3.66 |
| $\Delta E_{SB(ST)-CB(40)}$ | 2.79 |

#### 4.2. Efecto de la temperatura de bandeja y de la incorporación de biopolímeros en el espesor de las tortas de pomelo liofilizadas

En la Figura 6 se presenta la evolución del espesor a lo largo del tiempo de liofilización para los cuatro tipos de muestra: SB (ST), CB (ST), SB (40) y CB (40). Cabe mencionar que en aquellas a las que no se aplicó calor (ST) en el proceso de liofilización, se registraron los valores a partir de las 12 h debido a que fue a partir de ese momento cuando las muestras estaban lo suficientemente secas como para poder tomar las medidas.



**Figura 6.** Evolución del espesor de las muestras liofilizadas con el tiempo con (CB) y sin biopolímeros añadidos (SB) y con (40) y sin (ST) aplicación de temperatura en los estantes del liofilizador

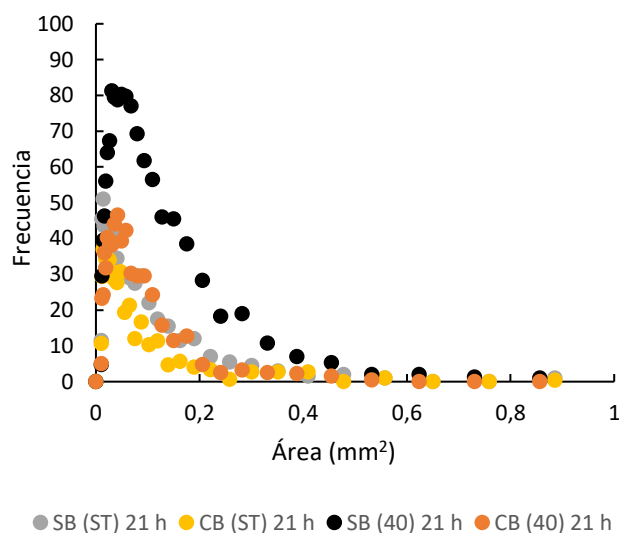
Se puede observar que el espesor de todas las muestras sigue una evolución similar, aumentando significativamente ( $p < 0.05$ ) con el tiempo de liofilización hasta un valor casi constante al final de ésta. Este valor es mayor cuando la muestra sufre un aporte de calor por parte de las bandejas del liofilizador. Cuando no se realiza este suministro, el valor al cual se estabiliza es de aproximadamente 0,8 cm, mientras que en las experiencias en las cuales sí se realiza el espesor es

aproximadamente de 0,9 cm. Las muestras con biopolímeros presentaron un aumento un poco más brusco de este parámetro al inicio del proceso. Los resultados obtenidos concuerdan con los resultados de Cabrera (2016) realizados para la misma fruta. Los cambios de espesor del producto en la última etapa son muy pequeños y no permiten identificar de forma adecuada el punto final.

### 4.3. Efecto de la temperatura de la bandeja y de la incorporación de biopolímeros en el número y tamaño de los poros superficiales de las tortas de pomelo liofilizadas

Como se ha mencionado anteriormente, la liofilización es una técnica que daña mínimamente la estructura celular de los alimentos (Khalloufi y Ratti, 2003). Además, una característica propia de este tipo de productos es su elevada porosidad la cual se ve estrechamente afectada por las condiciones de liofilización empleadas y, es por ello, que su control es fundamental para garantizar la calidad del producto final. La porosidad se define como la relación entre los espacios libres ocupados dentro de un material y su volumen total (Joardder et al., 2016). Desempeña un papel muy importante en la aceptación del alimento por parte del consumidor, ya que está directamente relacionada con las propiedades texturales y sensoriales de los alimentos, atributos muy valorados por los clientes (Vickers y Bourne, 1976; Christensen, 1984). La porosidad superficial, es decir el número y el tamaño de poros observados en la superficie, está relacionada con la porosidad de la muestra y puede proporcionar información sobre el estado del producto durante el proceso de una manera sencilla.

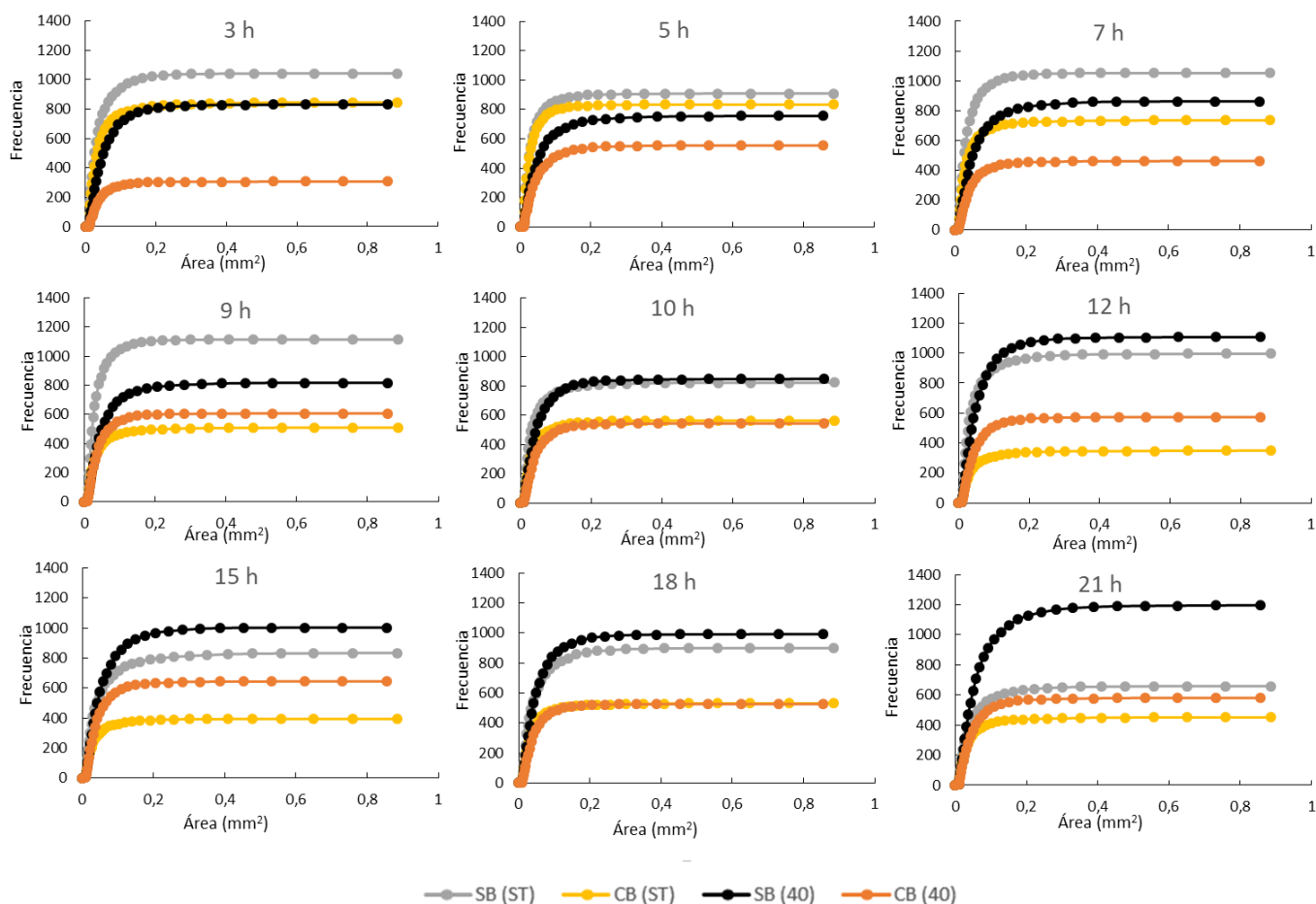
La Figura 7 muestra un ejemplo de la distribución del tamaño de poro superficial de cada una de las muestras estudiadas a un tiempo de liofilización de 21 h. La forma de las curvas para cada una de las muestras y tiempos de liofilización fue similar en todos los casos, siendo siempre la frecuencia mayor para los poros de menor tamaño, con un área comprendida entre 0 y 0.2 mm<sup>2</sup>.



*Figura 7. Ejemplo de la distribución del tamaño de poros de las muestras estudiadas con (CB) y sin (SB) adición de biopolímeros y con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador a un tiempo de proceso de 21 h*

La Figura 8 representa la frecuencia acumulada de poros frente al área, a cada uno de los tiempos de liofilización estudiados, para cada una de las muestras de puré de pomelo CB, SB, 40 y ST. El número mayor de poros (aproximadamente 1000), a tiempos cortos, se presenta para las muestras SB (ST), sin embargo, a partir de las 10 h empieza a descender y a las 21 h esta reducción se incrementa, pasando de 800 poros a 600. En el caso de CB (ST) pasa lo mismo, pero el cambio más brusco es a las 9 h, cuando disminuye el número de poros desde 700 a 500. Por otro lado, las

muestras SB (40) y CB (40) presentan una mayor cantidad de poros a tiempos de proceso más largos, sobre todo a partir de las 12 y las 5 h, respectivamente. Esto coincide con lo descrito por Rahman (2001) y por Joardder et al. (2016), quienes demuestran que la cantidad de poros sigue una tendencia en aumento a medida que se va deshidratando el producto, hasta llegar a un valor de humedad crítico donde existe un punto de inversión donde la porosidad empieza a disminuir. Esto se debe a que la eliminación del volumen de agua incrementa las tensiones intracelulares del alimento, lo que favorece la contracción de las muestras, disminuyendo así la cantidad de poros.

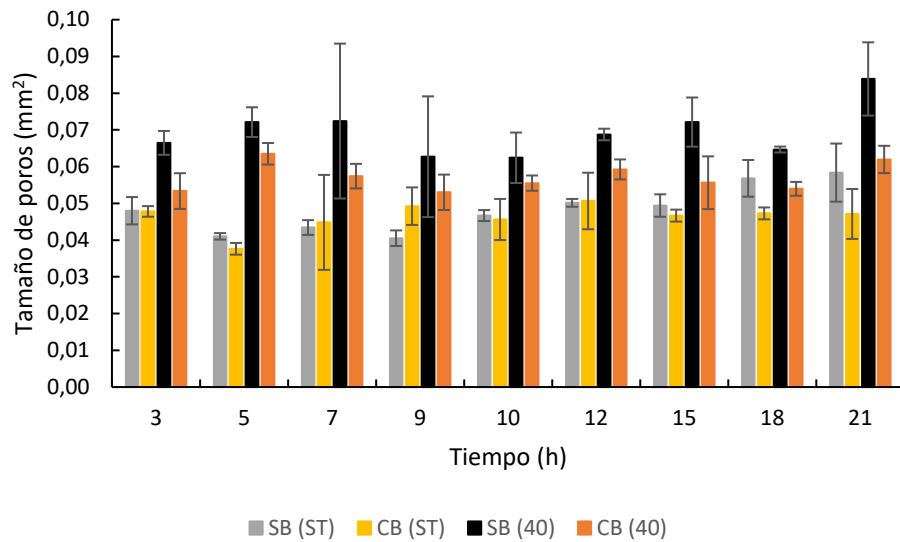


**Figura 8.** Frecuencia de poros acumulados en función de su área, durante todos los tiempos de liofilización estudiados, para cada una de las muestras de puré de pomelo con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y con (40) y sin (ST) aplicación de calor a los estantes del liofilizador

En general, la incorporación de biopolímeros, independientemente de la temperatura de la bandeja, reduce la cantidad de poros durante toda la liofilización. Este resultado coincide con la investigación realizada para un licuado de pomelo atomizado (González et al., 2014) y dicha disminución se puede atribuir a la naturaleza higroscópica de los solutos.

La Figura 9 presenta el área media de cada una de las muestras analizadas a cada tiempo de liofilización. Se puede observar que, para todos los tiempos (3-21 h), la aplicación de calor a los estantes del liofilizador supone un aumento en el tamaño de los poros. Esto se puede deber a que las altas temperaturas favorecen el flujo de agua del interior al exterior de la muestra, disminuyendo la humedad de la muestra de forma más agresiva y, por tanto, dando lugar a poros más grandes (Joardder et al., 2016). En cuanto a la incorporación de biopolímeros, esta disminuye el área de los poros, pero cabe destacar que su efecto se ve afectado por el aumento de la temperatura en el proceso de liofilización, ya que en el proceso 40 las diferencias son más notables

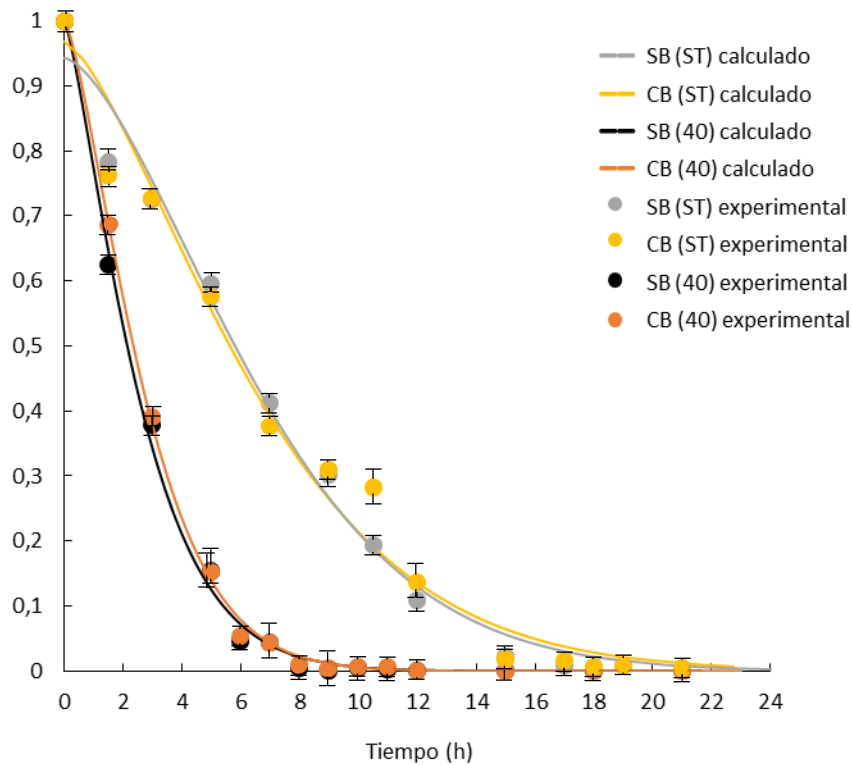
que en el proceso ST, en el cual se empiezan a apreciar a partir de las 18 h de proceso. Por tanto, se puede decir que el tiempo de liofilización afecta al tamaño de los poros cuando se les ha incorporado biopolímeros a las muestras y no se ha aplicado calor a las bandejas del liofilizador.



**Figura 9.** Medidas del área media de las áreas de los poros superficiales obtenidas por análisis de imagen en tortas de puré de pomelo liofilizadas con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos, con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador.

#### 4.4. Cinética de secado

Los valores iniciales de humedad y sólidos solubles ( $^{\circ}$ Brix) del puré de pomelo utilizado fueron  $87,6 \pm 0,4$  g agua / 100 g muestra y  $11,47 \pm 0,12$   $^{\circ}$ Brix. Cambiaron a  $83,0 \pm 0,1$  g de agua / 100 g de muestra y  $15,23 \pm 0,06$   $^{\circ}$ Brix después de adicionar biopolímeros. Para cada muestra, estos valores de humedad fueron los considerados como  $X_{w0}$  (Ec. (5)). El cambio de MR durante la liofilización de las distintas muestras procesadas se presenta en la Figura 10. El tiempo de secado se redujo en gran medida cuando se aplicó calor en los estantes del liofilizador (40  $^{\circ}$ C). Los datos se ajustaron al modelo de Page modificado (Ec. (7)) como se ha mencionado en el apartado de materiales y métodos.



**Figura 10.** Valores calculados (modelo modificado de Page) y experimentales del cociente de humedad (MR) durante la liofilización de puré de pomelo con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y aplicando (40) o no (ST) calor a los estantes del liofilizador. Valores medios ( $n=4$ ) y desviación estándar.

Los datos obtenidos del ajuste realizado se muestran en la Tabla 3. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se encuentra entre 0.985- 0.998, lo que demuestra un buen ajuste de los datos. Los parámetros  $k$  y  $a$  fueron más bajos ( $p<0.05$ ) cuando las bandejas del liofilizador no se calentaron, sin diferencias significativas ( $p>0.05$ ) entre las muestras con y sin biopolímeros añadidos.

**Tabla 3.** Constantes del modelo de Page modificado ( $k$ ,  $n$  y  $a$ ), tiempo necesario para alcanzar 0.02 g de agua / g de muestra en muestras con (CB) y sin (SB) adición de biopolímeros y con (40) y sin (ST) aplicación de temperatura en los estantes del liofilizador

| Muestras | $k$                 | $n$                  | $a$                 | $R^2^*$ | RSME*  | Tiempo (h) |
|----------|---------------------|----------------------|---------------------|---------|--------|------------|
| SB (ST)  | $0.040 \pm 0.015^a$ | $1.57 \pm 0.17^b$    | $0.94 \pm 0.04^a$   | 0.9850  | 0.0424 | 23.4       |
| CB (ST)  | $0.05 \pm 0.020^a$  | $1.44 \pm 0.16^{ab}$ | $0.97 \pm 0.04^a$   | 0.9818  | 0.0463 | 24.3       |
| SB (40)  | $0.28 \pm 0.02^b$   | $1.29 \pm 0.05^a$    | $0.999 \pm 0.013^b$ | 0.9981  | 0.0133 | 10.6       |
| CB (40)  | $0.235 \pm 0.014^b$ | $1.39 \pm 0.04^{ab}$ | $1.000 \pm 0.012^b$ | 0.9986  | 0.0115 | 9.7        |

(\*) Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), raíz del cuadrado medio del error (RMSE).

Asumiendo que la humedad normal en este tipo de productos, *snack* crujiente, es de aproximadamente 0.02 g agua/ g muestra, con las constantes del modelo modificado de Page obtenidas, se calculó el tiempo necesario para que las muestras alcanzaran dicha humedad (Tabla 3). El tiempo estimado fue de 23.4 h para las muestras SB (ST), 24.3 h para las CB (ST), 10.6 h para las SB (40) y 9.7 h para las CB (40). Por tanto, se puede concluir que, al calentar los estantes del liofilizador a 40 °C, se reduce considerablemente el tiempo de proceso, aproximadamente un 50%. Este comportamiento está relacionado con la mayor transferencia de calor promovida por el



calentamiento de los estantes del liofilizador, que a su vez está asociado a una mayor velocidad y un menor tiempo de secado (Azzouz et al., 2002; Benlloch et al., 2013).

La Tabla 4 muestra los valores de los parámetros de color, del espesor y del tamaño y cantidad de poros a los tiempos establecidos por el modelo de Page para un snack con un 0.2% de humedad liofilizado en las diferentes condiciones SB (ST), CB (ST), SB (40) y CB (40).

*Tabla 4. Condiciones establecidas para el tiempo óptimo de liofilización de las distintas muestras con (CB) y sin (SB) biopolímeros añadidos y con (40) y sin (ST) aplicación de calor a los estantes del liofilizador*

| <b>Muestras</b>                             | <b>SB (ST)</b> | <b>CB (ST)</b> | <b>SB (40)</b> | <b>CB (40)</b> |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Tiempo óptimo (h)</b>                    | 23.4           | 24.3           | 10.6           | 9.7            |
| <b>L *</b>                                  | 66.6 ± 1.9     | 69.4 ± 0.7     | 63.4 ± 0,2     | 70.9 ± 1.6     |
| <b>a*</b>                                   | 19.5 ± 0.6     | 18.9 ± 0.7     | 21.4 ± 0.3     | 14 ± 2         |
| <b>b*</b>                                   | 21.2 ± 0.6     | 20.7 ± 0.4     | 21.8 ± 0.4     | 17.7 ± 1.2     |
| <b>C<sub>ab</sub>*</b>                      | 28.8 ± 0.8     | 28.1 ± 0.7     | 30.5 ± 0.5     | 22.5 ± 2.3     |
| <b>h<sub>ab</sub>*</b>                      | 47.3 ± 0.5     | 47.6 ± 0.9     | 45.64 ± 0.08   | 52.0 ± 2.3     |
| <b>Espesor (mm)</b>                         | 0.82 ± 0.03    | 0.86 ± 0.02    | 0.83 ± 0.02    | 0.79 ± 0.03    |
| <b>Área media de poros (mm<sup>2</sup>)</b> | 0.058 ± 0.008  | 0.047 ± 0.007  | 0.065 ± 0.010  | 0.056 ± 0.002  |
| <b>Cantidad de poros</b>                    | 659 ± 49       | 451 ± 168      | 797 ± 110      | 545 ± 183      |

Los valores de los parámetros estudiados para cada una de las muestras en su punto óptimo de liofilización son similares. Las condiciones de liofilización de la muestra CB (40) podrían ser una alternativa interesante ya que, además de que el tiempo de liofilización se reduce en un 50% aproximadamente, se obtiene una mayor pureza de color y un tono más anaranjado típico del pomelo. Por otra parte, tanto el tamaño como el número de poros son intermedios si se comparan con las otras muestras.

## 5. CONCLUSIONES

Todas las propiedades medidas en las muestras permiten seguir la evolución del producto a lo largo del proceso.

En la última etapa de la liofilización, la incorporación de biopolímeros afecta a las propiedades estudiadas en las muestras, otorgando un color menos anaranjado, aunque por las diferencias de color calculadas, en el límite de percepción por el ojo humano. Estas muestras también presentan una textura más dura, crujiente y con un corte más limpio y fácil, sobre todo cuando además se aplica calor a las bandejas del liofilizador. Estos resultados están relacionados con la evaluación visual y táctil de las muestras, además de con los resultados del tamaño y número de poros superficiales.

La temperatura aumenta la velocidad de secado disminuyendo aproximadamente un 50% el tiempo de liofilización sin alterar significativamente los parámetros de calidad estudiados. Por otra parte, éste fue el único factor que afectó al espesor de las muestras aumentándolo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

ABRÀMOFF, M. D., MAGALHÃES, P. J. Y RAM, S. J. (2004). Image Processing with ImageJ. *Biophotonics international*, 11 (7): 36-42.

AGUDELO STERLING, C. M. (2017). *Selección del mejor proceso para la obtención de pomelo en polvo (Citrus paradisi) de alta calidad nutritiva, funcional y sensorial*. Tesis doctoral en el Departamento de Tecnología de Alimentos. Universitat Politècnica de València. 241 pp.

ALCALÁ VAQUER, M. C. (2017). *Impacto de la goma arábiga y fibra de bambú en la rehidratación del pomelo liofilizado*. Trabajo de Fin de Máster Universitario en Ciencia e Ingeniería de los Alimentos. Universitat Politècnica de València. 18 pp.

AZNAR LLUCH, M. (2014). *Optimización de las condiciones de almacenamiento y rehidratación del pomelo liofilizado*. Trabajo de Fin de Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Universitat Politècnica de València. 40 pp.

AZZOUZ, S., GUIZANI, A., JOMAA, W., Y BELGHITH, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, 55 (4): 323–330.

BADUI DERGAL, S. (2013). *Química de los alimentos*. Editorial Pearson Addison Wesley. México. 4ª Edición. 738 pp.

BARBOSA CANOVAS, G. V., ORTEGA RIVAS, E., JULIANO, P. Y YAN, H. (2005). *Food Powders. Physical Properties, Processing, and Functionality*. Springer. Nueva York. 1ª Edición. 372 pp.

BARREIRO, J. A., MILANO, M. Y SANDOVAL, A. J. (1997). Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering* 33 (3-4): 359-371.

BENLLOCH TINOCO, M., MORAGA, G., DEL MAR CAMACHO, M., Y MARTÍNEZ NAVARRETE, N. (2013). Combined Drying Technologies for High-Quality Kiwifruit Powder Production. *Food and Bioprocess Technology*, 6 (12): 3544–3553.

BODART, M., DE PEÑARANDA, R., DENEYER, A. Y FLAMANT, G. (2008). Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools. *Building and Environment*, 43 (12): 2046-2058.

CABRERA GÓMEZ, A. (2016). *Identificación de las etapas de secado durante el proceso de liofilización*. Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural. Universitat Politècnica de València. 45 pp.

CALÍN SÁNCHEZ, A., KHARAGHANI, A., LECH, K., FIGIEL, A., CARBONELL BARRACHINA, A. A. Y TSOTSAS E. (2015). Drying Kinetics and Microstructural and Sensory Properties of Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as Affected by Drying Method. *Food and Bioprocess Technology*, 8 (1): 63-74.

CASP, A. Y ABRIL, J. (2003). *Procesos de conservación de alimentos*. Editorial Antonio Madrid Vicente. Madrid. 2ª Edición. 494 pp.

CHARBONNIER, L., VAN MEER, F., VAN DER LAAN, L. N. Y VIERGEVER, M. A. (2015). Standardized food images: A photographing protocol and image database. *Appetite*, 96: 166-173.

CHIRALT BOIX, A., MARTÍNEZ NAVARRETE, N., GONZÁLEZ MARTÍNEZ, C., TALENS OLIAG, P. Y MORAGA BALLESTEROS, G. (2012). *Propiedades físicas de los alimentos*. Editorial Universitat Politècnica de València. Valencia. 1ª Edición. 91-124.

CHRISTENSEN, C. M. (1984). Food texture perception. *Advances in Food Research*, 29: 159-199.

CONTRERAS MONZÓN, C. (2006). *Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de la manzana y fresa deshidratadas*. Tesis doctoral en el Departamento de Tecnología de Alimentos. Universitat Politècnica de València. 233 pp.

CORONADO H., M., VEGA Y LEÓN, S., GUTIÉRREZ T., R., VÁZQUEZ F., M. Y RADILLA V., C. (2015). Antioxidantes: perspectiva actual para la salud humana. *Revista chilena de nutrición*, 42 (2): 206-212.

CORREIA CALPE, E., IGUAL, M., GARCÍA MARTÍNEZ, E., MORAGA, G. Y MARTÍNEZ NAVARRETE, N. (2013). *Efecto de la adición de solutos en propiedades fisicoquímicas relacionadas con la calidad y estabilidad de pomelo liofilizado en polvo*. Universitat Politècnica de València. 24 pp.

DATTA, R., JOSHI, D., LI, J. Y WANG, J. Z. (2008). Image Retrieval: Ideas, Influences, and Trends of the New Age. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 40 (2): 1-60.

DEHNAD, D., MAHDI-JAFARI, S. Y AFRASIABI, M. (2016). Influence of drying on functional properties of food biopolymers: From traditional to novel dehydration techniques. *Trends in Food Science & Technology*, 57: 116-131.

FAO. (2017). *Citrus fruit fresh and processed. Statistical bulletin 2016*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, visto el 19 de Junio de 2018, <http://www.fao.org/3/a-i8092e.pdf>

FITO MAUPOEY, P., ANDRÉS GRAU, A. M., BARAT BAVIERA, J. M., ALBORS SOROLLA, A. M. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Editorial Universitat Politècnica de València. Valencia. 211 pp.

Franquesa, M. (2018). *Todo lo que necesitas saber sobre la gomosis*. Blog de Agricultura Profesional, visto el 17 de Julio de 2018, <https://www.agroptima.com/blog/gomosis/>

GABAS, A. L., TELIS, V. R. N., SOBRAL, P. J. A. Y TELIS ROMERO, 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 (2): 246–252.

GONZÁLEZ ZAMORA, F., IGUAL, M. Y MARTÍNEZ NAVARRETE, N. (2014). *Efecto de la goma arábica y de la carboximetilcelulosa en las propiedades fisicoquímicas del licuado de pomelo atomizado*. Trabajo de Fin de Máster en Ciencia e Ingeniería de los Alimentos. Universitat Politècnica de València. 18 pp.

IGUAL, M., CONTRERAS, C. Y MARTÍNEZ NAVARRETE, N. (2014). Colour and rheological properties of non-conventional grapefruit jams: Instrumental and sensory measurement. *Food Science and Technology*, 56 (1): 200-206.

INFOAGRO. (2018). Agroalimentación - *El cultivo del pomelo*. Infoagro, visto el 17 de Junio de 2018, <http://www.infoagro.com/citricos/pomelo.htm>

INFORETAIL. (2014). *Los snacks saludables penetran en España*. Info retail, visto el 19 de Junio de 2018,

<https://www.revistainforetail.com/noticiadet/los-snacks-saludables-penetran-en-espana/5d5abf2baee3bf8b777e3d4eb95deffe>

JHA, D., KIM, J., CHOI, M. Y KWON, G. (2017). Pathological Brain Detection Using Weiner Filtering, 2D-Discrete Wavelet Transform, Probabilistic PCA, and Random Subspace Ensemble Classifier. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2017: 1-11.

JOARDDER, M. U. H., KARIM, A., KUMAR, C. Y BROWN, J. (2016). *Porosity Establishing the Relationship between Dryig Parameters and Dried Food Quality*. Editorial Springer. EE.UU. 11-81.

KHALLOUFI, S. Y RATTI, C. (2003). Quality deterioration of freeze-dried foods as explained by their glass transition temperature and internal structure. *Journal of Food Science*, 68 (3): 892-903.

KIM, J. S. Y LEE, Y. S. (2008). Effect of reaction pH on enolization and racemization reactions of glucose and fructose on heating with amino acid enantiomers and formation of melanoidins as result of the Maillard reaction. *Food Chemistry*, 108 (2): 582-592.

KIMBALL, D. A. (1999). *Procesado de cítricos*. Editorial Acribia Editorial. Zaragoza. 496 pp.

KINSELLA, J. E. (1979). Functional properties of soy proteins. *Journal of American Oil Chemists' Society*, 56 (3): 242-258.

LIAO, H., SUN, Y., NI, Y., LIAO, X., HU, X., WU, J. Y CHEN, F. (2007). The effect of enzymatic mash treatment, pressing, centrifugation, homogenization, deaeration, sterilization and storage on carrot juice. *Journal of Food Process Engineering*, 30 (4): 421-435.

MARTÍNEZ NAVARRETE, N., ANDRÉS GRAU, A. M., CHIRALT BOIX, A. Y FITO MAUPOEY, P. (2011). *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. Editorial Universitat Politècnica de València. Valencia. 2ª edición. 221-257.

MASKAN, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48 (2): 169-175.

MOSQUERA MOSQUERA, L. H. (2010). *Influencia de la humedad y de la adición de solutos (maltodextrina o goma arábica) en las propiedades fisicoquímicas de borjón y fresa en polvo*. Tesis doctoral en el Departamento de Tecnología de Alimentos. Universitat Politècnica de València. 247 pp.

OLEARTE, C., PELEGRÍN, J. Y REINARES, E. (2017). Model of acceptance of a new type of beverage: application to natural sparkling red wine. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15 (1): 1-11.

PROCHILE. (2011). *Estudio de mercado snacks de Fruta Deshidratada en el Mercado de EE.UU.* Prochile. 53 pp.

RAHMAN, M. S. (2001). Towards prediction of porosity in food foods during drying: a brief review. *Drying Technology*, 19 (1): 1-13.

SIGMA. (2017). *La industria cárnica cada vez más adaptada a las nuevas tendencias*. Sigma, visto el 20 de Junio de 2018,

<http://sigmabiotech.es/la-industria-carnica-cada-vez-mas-adaptada-a-las-nuevas-tendencias/>

SILVA, M. A, AGUDELO, C., CAMACHO, M. M. Y MARTÍNEZ NAVARRETE, N. (2015). *Estudio del comportamiento reológico de zumo de fruta obtenido a partir de pomelo liofilizado*. Trabajo de Fin de Máster en Gestión de la Seguridad y Calidad Alimentaria. Universitat Politècnica de València. 19 pp.

SOLEDAD ABILÉS, J. (2018). *Estrés oxidativo y su relación con el aporte de antioxidantes nutricionales en el paciente cítrico*. Tesis Doctoral en el Departamento de Fisiología. Universidad de Granada. 123 pp.

TELIS, V. R. N. Y MARTÍNEZ NAVARRETE, N. (2009). Collapse and Color Changes in Grapefruit Juice Powder as Affected by Water Activity, Glass Transition, and Addition of Carbohydrate Polymers. *Food Biophysics*, 4 (2): 83-93.

THE NIELSEN COMPANY. (2014). *Los snacks en la dieta*. Nielsen.

VICKERS, Z. Y BOURNE, M. C. (1976). A psychoacoustical theory of crispness. *Journal of Food Science*, 41 (5): 1158-1164.

VITACEL®. (2018). *Vitacel® Fibras insolubles*. Vitacel® Fibras de bambú. *Producto DEIA*. Vitacel, visto el 17 de Julio de 2018, <http://www.especialidadalimentaria.com/vitacel-fibras-insolubles-5685-4#inicio>

VIVIAN, V. (2007). Snacks saludables: una novedosa tendencia. *La Alimentación Latinoamericana*, 1: 1-4.

VODA, A., HOMAN, N., WITEK, M., DUIJSTER, A., VAN DALEN, G., VAN DER SMAN, R., NIJSSE, J., VAN VLIET, L., HENK, V. A. Y VAN DUYNHOVEN, J. (2012). The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot. *Food Research International*, 49 (2): 687-693.

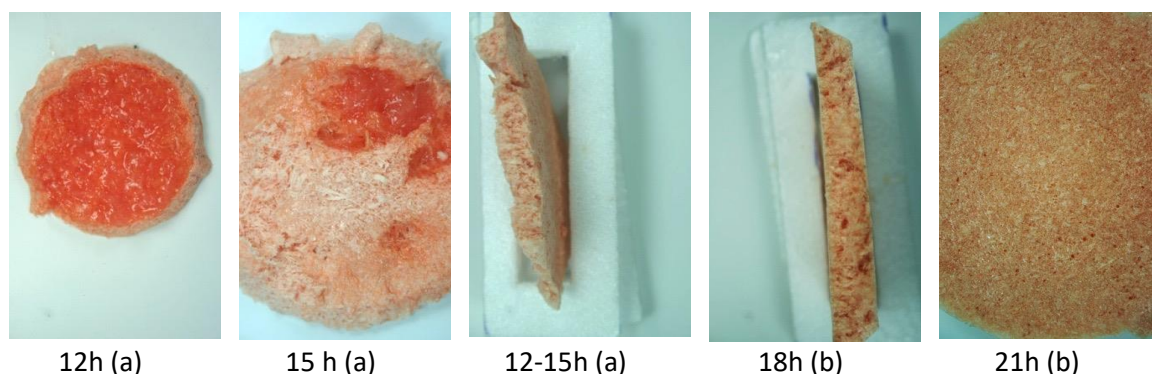
WIJEWICKREME, A. N. Y KITTS, D. D. (1998). Modulation of Metal-induced Genotoxicity by Maillard Reaction Products Isolated from Coffee. *Food and Chemical Toxicology*, 36 (7): 543-553.

WU, H., WANG, Q., MA, T. Y REN, J. (2009). Comparative studies on the functional properties of various protein concentrate preparations of peanut protein. *Food Research International*, 42 (3): 343-348.

## 7. ANEXOS:

### 7.1. Anexo I: análisis personal de las características de las tortas de pomelo a lo largo de los tiempos de liofilización

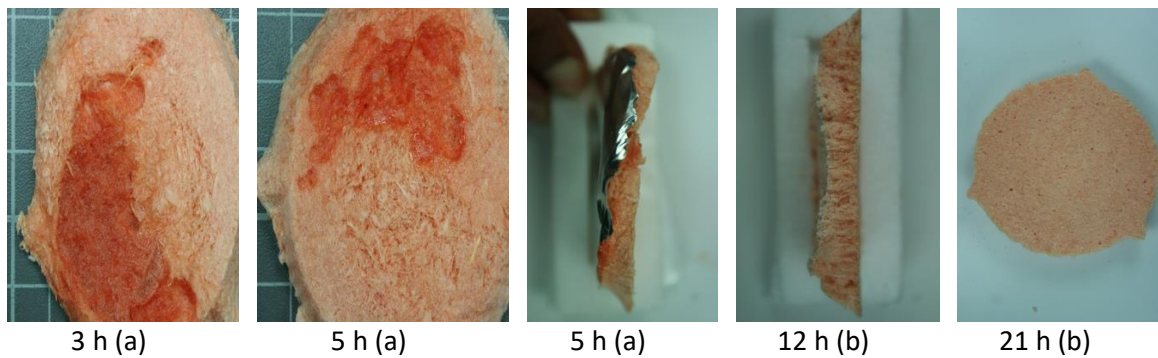
En la Tabla 5 se recogen las apreciaciones visuales y táctiles de las muestras a distintos tiempos. Las muestras SB (ST) no presentaban humedad en la superficie a partir de las 12 h de liofilización y humedad en la base o el interior de la muestra, a partir de las 18 h. Entre las 12 y las 15 h las muestras tenían una apariencia gomosa, suave al tacto, adherida a la bandeja y pegajosa, además de presentar una textura blanda (Fig. 11a). A medida que el tiempo de liofilización se incrementó las muestras dejaron de estar pegajosas (18 h), no se adherían a la bandeja, la ruptura era fácil y su textura era dura (18-21 h) (Fig. 11b).



*Figura 11. Ejemplo de la evolución de la apariencia y textura en muestras SB (ST) durante la liofilización*

Las muestras CB (ST) no presentaban humedad en la superficie a partir de las 12 h de liofilización y humedad en la base o el interior de la muestra, a partir de las 18 h. Entre las 12 y las 15 h las muestras tenían una apariencia gomosa con una textura blanda (Fig. 11a), además, tan solo a las 12 h se encontraban adheridas a las bandejas y eran pegajosas. A medida que el tiempo de liofilización se incrementaba las muestras dejaron de ser pegajosas (15 h), no se adherían a las bandejas, la ruptura era fácil y su textura era dura (18-21 h) (Fig. 11b). Cabe destacar que durante todos los tiempos (12 – 21 h) la superficie de las muestras era suave al tacto.

Sin embargo, para las muestras de la experiencia SB (40) estos tiempos se redujeron, siendo 5 h el intervalo necesario para reducir la humedad superficial e interior y 9 h para eliminar la humedad en la base (Fig. 12a). A medida que la humedad presentaba unos valores más bajos, las muestras dejaban de estar pegajosas, en este caso el tiempo necesario fueron 12 h. En cuanto a su textura, para todos los tiempos (5 - 21 h) las muestras presentaban una superficie suave al tacto, pero fue a partir de las 10 h cuando las muestras empezaron a tener una textura dura, crujiente y con un corte fácil y limpio (Fig. 12b).



*Figura 12. Ejemplo de la evolución de la apariencia y textura en muestras SB (40) durante la liofilización*

Con respecto a las muestras de la experiencia CB (40), las características de humedad fueron muy similares a las de SB (40), sin embargo, los cambios más notables tuvieron lugar en cuanto a sus características de textura. Las muestras con biopolímeros (CB) estaban más compactas y duras, con un corte más limpio y fácil que las SB. En cuanto a la suavidad en la superficie, las muestras a todos los tiempos de liofilización (5 – 21 h) presentaron un toque fino, lo que genera una percepción más agradable al tacto. Otro factor que se puede percibir es que la incorporación de biopolímeros reduce la gomosidad y la pegajosidad de las muestras, esto se debe a que los solutos de alto peso molecular aumentan de manera eficaz la  $T_g$  del producto, y por tanto, adquiere una estructura más estable (Martínez et al., 2011; Agudelo, 2017).

Por tanto, la aplicación de temperatura (40) en el proceso de liofilización reduce los tiempos de secado de las muestras, mientras que la incorporación de biopolímeros (CB) endurece y hace más consistente su textura.

Cabe destacar, que los datos aportados en la Tabla 5 son fruto de una evaluación sensorial realizada empíricamente y de manera subjetiva, para futuras investigaciones sería interesante realizar un análisis más detallado con catadores expertos en la materia.



| Muestras | Tiempo (h) | CARACTERÍSTICAS VISUALES |                       |                   |        |                |                       |          | CARACTERÍSTICAS TÁCTILES |              |           |              |              |
|----------|------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|--------|----------------|-----------------------|----------|--------------------------|--------------|-----------|--------------|--------------|
|          |            | Humedad en la superficie | Húmeda en el interior | Húmeda en la base | Gomosa | Suave al tacto | Adherida a la bandeja | Pegajosa | Textura blanda           | Textura dura | Crujiente | Rotura fácil | Corte limpio |
| SB (ST)  | 12         | -                        | X                     | X                 | X      | X              | X                     | X        | X                        | -            | -         | -            | -            |
|          | 15         | -                        | X                     | X                 | X      | X              | X                     | X        | X                        | -            | -         | -            | -            |
|          | 18         | -                        | -                     | -                 | X      | X              | -                     | -        | X                        | -            | -         | X            | -            |
|          | 21         | -                        | -                     | -                 | -      | -              | -                     | -        | -                        | X            | -         | X            | -            |
| CB (ST)  | 12         | -                        | -                     | X                 | X      | X              | X                     | X        | X                        | -            | -         | -            | -            |
|          | 15         | -                        | -                     | X                 | X      | X              | -                     | -        | X                        | -            | -         | -            | -            |
|          | 18         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |
|          | 21         | -                        | -                     | -                 | -      | -              | -                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |
| SB (40)  | 5          | -                        | -                     | X                 | X      | X              | X                     | -        | X                        | -            | -         | -            | -            |
|          | 7          | -                        | -                     | X                 | X      | X              | -                     | -        | X                        | -            | -         | -            | -            |
|          | 9          | -                        | -                     | -                 | X      | X              | -                     | -        | X                        | -            | -         | -            | -            |
|          | 10         | -                        | -                     | -                 | X      | X              | -                     | -        | X                        | -            | -         | -            | -            |
|          | 12         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | -                        | X            | X         | -            | X            |
|          | 15         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |
|          | 18         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |
|          | 21         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |
| CB (40)  | 5          | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | X                        | -            | X         | X            | X            |
|          | 7          | -                        | -                     | X                 | X      | X              | -                     | -        | X                        | -            | -         | -            | -            |
|          | 9          | -                        | -                     | -                 | X      | X              | -                     | -        | -                        | X            | -         | -            | X            |
|          | 10         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |
|          | 12         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |
|          | 15         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | X                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |
|          | 18         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |
|          | 21         | -                        | -                     | -                 | -      | X              | -                     | -        | -                        | X            | X         | X            | X            |

**Tabla 5.** Características visuales y táctiles a diferentes tiempos de liofilización en tortas de puré de pomelo liofilizadas con (CB) y sin (SB) adición de biopolímeros y con (40) y sin (ST) aplicación de calor en los estantes del liofilizador. Dónde: X= Sí presenta la característica; — = No presenta la característica