

## Aplicación de los productos de la reacción de Maillard en microcápsulas de aceite de semilla de chía con diferentes relaciones núcleo/pared

Claudia N. Copado<sup>a</sup>, Vanesa Y. Ixtaina<sup>a</sup> y Mabel C. Tomás<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CCT La Plata (CONICET), CIC, Facultad de Ciencias Exactas (FCE), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

claudiacopado16@gmail.com; vanesaix@hotmail.com; mabtom@hotmail.com

### Resumen

Se investigó la influencia de los productos de la reacción de Maillard, la concentración de aceite y la relación proteína/carbohidrato en la pared sobre las características fisicoquímicas y estabilidad del aceite de semilla de chía microencapsulado por liofilización. Las microcápsulas, formuladas usando caseinato de sodio y lactosa como material de pared, se almacenaron a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  y se analizaron en función del contenido de humedad (0,31-2,23% b.s.), actividad acuosa ( $\sim 0,500$ ), eficiencia de microencapsulación (41,43 - 83,95 %), densidad aparente (323 - 551  $\text{kg}/\text{m}^3$  y 244 - 301  $\text{kg}/\text{m}^3$  para densidad empacada y aireada, respectivamente), microestructura (SEM), distribución de tamaño de partícula (D [3,2] 0.266 - 16.778) y estabilidad oxidativa (6,73 - 51,96 h). Los resultados sugieren que las microcápsulas son un sistema alternativo potencial para mejorar la estabilidad del aceite de chía frente a la oxidación de lípidos y su posible uso como ingrediente funcional en el desarrollo de alimentos.

**Palabras claves:** Aceite de chía; Ácidos grasos omega-3; Microencapsulación; propiedades fisicoquímicas

### Introducción

La semilla de chía (*Salvia hispanica* L.) contiene  $\sim 32\text{-}38\%$  p/p de aceite (Ayerza & Coates, 2005) siendo una buena fuente de ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs), principalmente  $\omega\text{-}3$  ( $\alpha$ -linolénico  $\sim 60\%$ ), con bajo contenido de ácidos grasos saturados (SFA) (Ixtaina et al., 2011).

El consumo de  $\omega\text{-}3$  PUFAs ofrece múltiples beneficios para la salud, motivo por el cual se recomienda su incorporación en la dieta (Kaushik et al., 2015).

Si bien el perfil de ácidos grasos del aceite de chía le aporta cualidades nutricionalmente favorables, el alto contenido de PUFAs afecta su susceptibilidad a la oxidación (Ixtaina et al., 2012). Así, la microencapsulación es una tecnología interesante para proteger este aceite de la oxidación durante su almacenamiento y/o procesamiento.

La liofilización, debido al uso de bajas temperaturas, podría ser apropiada para aceites susceptibles al deterioro oxidativo (Chen et al., 2013) y constituyen una alternativa a la microencapsulación del aceite de chía.

Los tipos de material de pared utilizados en la microencapsulación proporcionan diferente estabilidad oxidativa, dependiendo principalmente de su capacidad para inhibir la transferencia de oxígeno (Kaushik et al., 2015). Las proteínas e hidratos de carbono son utilizados para la microencapsulación de aceites con alto contenido de  $\omega\text{-}3$  (Sanguansri y Augustin, 2007). Las propiedades emulsificantes del caseinato de sodio (NaCas), ofrecen las características funcionales y físicas necesarias para encapsular los materiales del núcleo lipídico (Hogan, 2001). Por otra parte, la lactosa (L) forma una fase vítrea continua en la que las cadenas de proteínas se dispersan y mejora las propiedades de secado de la pared (Rosenberg y Sheu, 1996).

Los productos de la reacción de Maillard (MRPs), formados cuando interactúan grupos amino (proteínas) y carbohidratos (azúcares reductores) bajo ciertas condiciones de temperatura y tiempo, pueden mejorar la estabilidad oxidativa de aceites con un alto contenido de PUFAs (Augustin et al. 2006).

Recientemente se ha desarrollado una variedad de productos alimenticios enriquecidos con  $\omega$ -3 PUFAs (Jacobsen et al., 2013). Así, las microcápsulas con aceite de chía podrían ser utilizadas como un ingrediente funcional para fortificar alimentos.

### Objetivos

El objetivo fue investigar los efectos de los MRPs, la concentración de aceite y la relación proteína/carbohidrato sobre las características fisicoquímicas y la estabilidad oxidativa del aceite de chía microencapsulado por liofilización, utilizando NaCas y L como material de pared, para su aplicación como ingrediente funcional en alimentos.

### Materiales y Métodos

#### *Diseño experimental*

Se aplicó un diseño factorial (3x2x2), con dos repeticiones. Se prepararon emulsiones a partir de las cuales fueron obtenidas las microcápsulas por liofilización (**Tabla 1**). Las microcápsulas fueron almacenadas a 33% HR, 20±1°C, durante 30 días.

Aceite de chía (%p/p)	Concentración de lactosa (% p/p)			
	10		20	
	Tratamiento térmico	Tratamiento térmico	Tratamiento térmico	Tratamiento térmico
	Sin	Con	Sin	Con
10	100C 10L	100C10 LHT	100C2 0L	100C20 LHT
15	150C 10L	150C10 LHT	150C2 0L	150C20 LHT
20	200C 10L	200C10 LHT	200C2 0L	200C20 LHT

**Tabla 1.** Formulaciones de emulsiones O/W de aceite de chía previas a la liofilización basadas en un diseño factorial completo 3x2x2. Parámetros experimentales y códigos de muestras

#### *Preparación de las emulsiones*

Las emulsiones se formularon con NaCas (10% p/p), L (10 ó 20% p/p) y 10, 15 ó 20% (p/p) de aceite de chía (**Tabla 1**).

En los sistemas sin tratamiento térmico, la L fue incorporada en la fase acuosa a 25±2°C. En aquéllos con tratamiento térmico, la mezcla de proteína-carbohidrato se calentó a 60±2 °C durante 30 min a fin de promover

la formación de los MRPs (Augustin et al., 2006).

La homogeneización se realizó con un Ultra Turrax T-25 (1 min, 9500 rpm) y posteriormente con un homogeneizador a válvula de alta presión (Panda 2K, GEA Niro Soavi, Parma, Italia) a 600 bar, con 4 ciclos de recirculación.

#### *Distribución de tamaño de partículas y diámetro medio de las emulsiones previo a la liofilización*

La distribución del tamaño de partículas y el diámetro medio de Sauter (D [3, 2]) fueron analizados por difracción láser usando un analizador de tamaño de partícula Malvern Mastersizer 2000E (Malvern Instruments Ltd., Worcestershire, UK).

#### *Preparación de microcápsulas por liofilización*

Aproximadamente 100 g de emulsión fueron congeladas a -20±1 °C y almacenadas a -80±1°C durante las 24 h previas a la liofilización, realizada durante 48 h.

Posteriormente, las muestras fueron molidas y estandarizadas usando una malla de plástico equivalente a ASTM N° 7.

### Caracterización de las microcápsulas

### *Contenido de humedad*

Se determinó gravimétricamente mediante el secado de las muestras (2 g) en una estufa de vacío (24 h, 70°C, 29 in Hg) (Instrumentación Científica S.A., Bs. As., Argentina).

### *Actividad acuosa ( $a_w$ )*

Se determinó utilizando un medidor AquaLab CX2 Decagon (Devices Inc, EE.UU.) a 25 °C.

### *Eficiencia de microencapsulación (EM)*

Se realizó según Augustin et al. (2015) con algunas modificaciones. Se colocó ~1 g de microcápsulas sobre papel de filtro (Whatman N° 4), realizándose 3 lavados con 10 ml de hexano cada uno, el cual fue removido bajo una corriente de N<sub>2</sub>. El contenido de aceite libre se determinó por diferencia de peso. Se consideró que el aceite total fue igual al inicial, ya que trabajos previos mostraron que todo el aceite de chía inicial permanece en las microcápsulas (Ixtaina et al., 2015). La EM se calculó como:

$$EM\% = \left( \frac{\text{Aceite total} - \text{Aceite libre}}{\text{Aceite total}} \right) \times 100 \quad (1)$$

### *Densidad y compresibilidad del polvo*

La densidad aparente se puede clasificar como aireada ( $\rho_A$ ) y empacada ( $\rho_E$ ). Las mismas fueron determinadas de acuerdo a Holgado et al. (2013). Para  $\rho_A$ , se pesaron 25 g de microcápsulas ( $m_0$ ) y se colocaron en un cilindro graduado leyendo posteriormente el volumen ocupado por

el polvo ( $v_0$ ). Para  $\rho_E$  el polvo fue comprimido mediante 20 golpes uniformes, leyendo el volumen correspondiente ( $v_T$ ). Las respectivas densidades se calcularon de acuerdo a las ecuaciones 2 y 3.

$$\rho_A = \frac{m_0}{v_0} \quad (2)$$

$$\rho_E = \frac{m_0}{v_T} \quad (3)$$

La compresibilidad (C) se calculó como:

$$C = \frac{(\rho_T - \rho_A)}{\rho_T} \quad (4)$$

### *Microscopía electrónica de barrido (SEM)*

La morfología de las microcápsulas fue estudiada utilizando un equipo FEI-Quanta 200 en modo de alto vacío operando a 20 Kv.

### *Color*

Se determinó utilizando un colorímetro Minolta (CR-400, Konica Minolta Sensing Inc., Japón) registrando los valores L\* (luminosidad) a\* (componente rojo-verde) y b\* (componente amarillo-azul).

### *Distribución del tamaño de partículas y diámetro medio de la emulsión reconstituida*

Se reconstituyeron las emulsiones (10% p/p de sólidos) realizando las determinaciones según lo descrito previamente.

### Dispersabilidad

Se determinó de acuerdo a Klinkesorn et al. (2005) utilizando 0,3 mg de polvo/ml de agua destilada en un instrumento de difracción láser (Malvern Mastersizer 2000 E, Malvern Instruments, Worcestershire, Reino Unido) a 2000 rpm, evaluando los cambios en el D[3,2] y el oscurecimiento en función del tiempo durante 5 min.

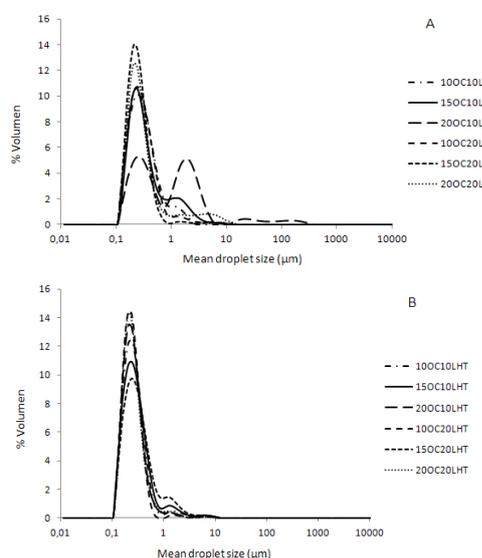
### Estabilidad oxidativa

Se llevó a cabo en un equipo Rancimat (Metrohm 679, Suiza) (AOCS Cd 12b-92, 2013) utilizando 3,0 g de aceite ó 1,5 g de microcápsulas a 98 °C con burbujeo continuo de una corriente de aire a 20 l/h. La estabilidad se expresó como tiempo de inducción ( $t_i$ ), en horas.

## Resultados y Discusión

### Distribución de tamaño de partículas y diámetro medio de las emulsiones previo a la liofilización

La **Figura 1** muestra las curvas de distribución del tamaño de partículas para las emulsiones estudiadas. Los diámetros de las partículas fueron 0,1-10 y 0,1-239  $\mu\text{m}$  para emulsiones con y sin tratamiento térmico, respectivamente. Los perfiles de distribución de tamaño de partículas de las emulsiones de partida fueron bimodales, excepto para 15OC20L que presentó una distribución unimodal. En el caso de emulsiones con una relación proteína/carbohidrato similar y la aplicación de tratamiento térmico, la distribución del tamaño de partículas fue más estrecha. Estos resultados coinciden con los valores de Span, los que disminuyeron con el tratamiento térmico, logrando un menor nivel de polidispersabilidad que aquéllos sin tratamiento térmico (**Figura 1**). Resultados similares fueron obtenidos por Zhang et al. (2015), quienes observaron que la emulsión con MRPs mostró un tamaño de partículas más pequeño y una distribución más estrecha. Este comportamiento puede explicarse por la propiedad emulsionante de los conjugados proteína-polisacárido (Akhtar & Dickinson, 2007).



**Figura 1.** Distribución del tamaño de partículas (% en volumen) de las emulsiones previo a la liofilización: A) sin tratamiento térmico B) con tratamiento térmico

## Caracterización de las microcápsulas

### Contenido de humedad (H)

La **Tabla 2** muestra que la concentración de L y el tratamiento térmico presentaron un efecto altamente significativo sobre H. Además, se encontraron interacciones significativas dobles y triples entre los factores, excepto concentración de L x tratamiento térmico.

Los valores obtenidos oscilaron entre 0,31-2,23% b.s. (**Tabla 3**), los cuales fueron inferiores a los sugeridos para lograr una buena estabilidad durante el almacenamiento (3-4% b.s.) (Klaypradit y Huang, 2008).

Efectos principales	Propiedades			
	EM	D[3,2]	Estabilidad oxidativa	
			Inicial	Final
Contenido de aceite (A)	737.947*	195.168***	567.496***	331.704
Concentración de lactosa (B)	424.89*	30.7361**	480.078***	158.569
Tratamiento térmico (C)	705.944**	58.101***	108.12*	78.156
AxB	224.573	65.4332**	1618.64***	729.329*
AxC	90.1236	115.943***	242.242**	40.815
BxC	583.002**	13.5992	8.37802	62.823
AxBxC	454.96	27.9998*	579.124***	48.16
Error	822.257	41.5738	189.681	1049.95
Total	4043.7	548.554	3793.76	2499.51

Efectos principales	Propiedades				
	$\rho_A$	$\rho_E$	C	MC	$a_w$
Contenido de aceite (A)	1027.0	23172.3	0.011	0.0366	0.000
Concentración de lactosa (B)	693.4	13254.0	0.000	0.814***	0.002
Tratamiento térmico (C)	126.0	2604.17	0.009	1.591***	0.000
AxB	1348.0	13456.0	0.011	1.205***	0.000
AxC	89.3	25106.3	0.047**	0.700**	0.000
BxC	287.0	5340.17	0.004	0.028	0.000
AxBxC	2093.3	11825.3	0.006	2.792***	0.002
Error	11583.5	43141.0	0.041	0.420	0.007
Total	17246.6	137899.0	0.130	7.588	0.011

**Tabla 2.** ANOVA multifactorial. Suma de cuadrados. H, contenido de humedad;  $a_w$ , actividad acuosa a 25 ° C; EM, eficacia de la microencapsulación;  $\rho_A$ , densidad aireada;  $\rho_E$ , densidad empacada; C, índice de compresibilidad; D [3,2], diámetro medio  
\*  $p \leq 0.05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

#### Actividad acuosa ( $a_w$ )

Todas las muestras evidenciaron valores  $\sim 0,500$ , por lo que considerando además los niveles del contenido de humedad obtenidos, su incorporación sería compatible en matrices de alimentos deshidratados (**Tabla 3**)

#### Eficiencia de microencapsulación (EM)

La EM varió entre 41,43 y 83,95% (**Tabla 3**), valores inferiores a los informados por Ixtaina et al. (2015) ( $\sim 95,0\%$ ) para microencapsulación de aceite de chía por secado por aspersión. Una menor EM para el proceso de liofilización también fue

encontrada por Chen et al. (2013), quien sugirió que este fenómeno podría deberse a la deshidratación de los emulsionantes durante la congelación de la fase acuosa, lo que promovería las interacciones partícula-partícula en la emulsión disminuyendo su estabilidad.

El tratamiento térmico fue el factor más relevante, reduciendo la EM de las diferentes microcápsulas. Una menor influencia del contenido de aceite y de la concentración de L fueron encontradas (**Tabla 2**). En este sentido, se registró una correlación negativa entre el contenido total de sólidos y EM ( $r = -0,52$ ;  $p = 0,0090$ ) y entre el contenido de aceite y EM ( $r = -0,43$ ;  $p = 0,0374$ ). Estos resultados muestran la importancia de tener suficiente cantidad de material de pared para encapsular el aceite. Se encontró una interacción significativa entre la concentración de L y el tratamiento térmico. Así, para las muestras sin tratamiento térmico no se detectaron diferencias para EM entre ambas concentraciones de L estudiadas. Sin embargo, en el caso de muestras con tratamiento térmico, un incremento en la concentración de L provocó una disminución de EM.

Muestra	H (% <sub>w</sub> , b.s.)	a <sub>w</sub> (25°C)	EM (%)	Tiempo de inducción (h)	ρ <sub>A</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>E</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	C	Tamaño de partícula D[3,2] (μm)
100C10L	1.34 <sup>abcd</sup>	0.515 <sup>a</sup>	83.95 <sup>b</sup>	11.91 <sup>ab</sup>	301 <sup>a</sup>	551 <sup>a</sup>	0.435 <sup>b</sup>	0.283 <sup>a</sup>
150C10L	0.73 <sup>abc</sup>	0.483 <sup>a</sup>	74.67 <sup>b</sup>	21.31 <sup>cd</sup>	266 <sup>a</sup>	340 <sup>a</sup>	0.217 <sup>a</sup>	0.450 <sup>a</sup>
200C10L	1.02 <sup>abc</sup>	0.495 <sup>a</sup>	57.40 <sup>ab</sup>	15.23 <sup>abc</sup>	244 <sup>a</sup>	323 <sup>a</sup>	0.244 <sup>a</sup>	5.284 <sup>a</sup>
100C20L	0.77 <sup>abc</sup>	0.500 <sup>a</sup>	73.29 <sup>ab</sup>	25.13 <sup>de</sup>	266 <sup>a</sup>	450 <sup>a</sup>	0.322 <sup>ab</sup>	0.266 <sup>a</sup>
150C20L	0.69 <sup>ab</sup>	0.520 <sup>a</sup>	67.36 <sup>ab</sup>	34.87 <sup>f</sup>	270 <sup>a</sup>	402 <sup>a</sup>	0.265 <sup>a</sup>	0.280 <sup>a</sup>
200C20L	0.31 <sup>a</sup>	0.508 <sup>a</sup>	79.71 <sup>b</sup>	11.74 <sup>ab</sup>	286 <sup>a</sup>	414 <sup>a</sup>	0.230 <sup>a</sup>	16.778 <sup>b</sup>
100C10LHT	1.44 <sup>cd</sup>	0.481 <sup>a</sup>	77.21 <sup>b</sup>	9.62 <sup>a</sup>	260 <sup>a</sup>	351 <sup>a</sup>	0.217 <sup>a</sup>	0.292 <sup>a</sup>
150C10LHT	2.23 <sup>e</sup>	0.488 <sup>a</sup>	72.58 <sup>ab</sup>	20.29 <sup>cd</sup>	261 <sup>a</sup>	359 <sup>a</sup>	0.249 <sup>a</sup>	0.390 <sup>a</sup>
200C10LHT	0.76 <sup>abc</sup>	0.496 <sup>a</sup>	63.78 <sup>ab</sup>	27.73 <sup>def</sup>	255 <sup>a</sup>	352 <sup>a</sup>	0.232 <sup>a</sup>	0.516 <sup>a</sup>
100C20LHT	0.74 <sup>abc</sup>	0.522 <sup>a</sup>	61.68 <sup>ab</sup>	51.96 <sup>g</sup>	290 <sup>a</sup>	430 <sup>a</sup>	0.212 <sup>a</sup>	0.292 <sup>a</sup>
150C20LHT	0.80 <sup>abc</sup>	0.497 <sup>a</sup>	55.14 <sup>ab</sup>	29.33 <sup>ef</sup>	263 <sup>a</sup>	391 <sup>a</sup>	0.264 <sup>a</sup>	0.291 <sup>a</sup>
200C20LHT	1.99 <sup>de</sup>	0.513 <sup>a</sup>	41.43 <sup>a</sup>	6.73 <sup>a</sup>	276 <sup>a</sup>	471 <sup>a</sup>	0.306 <sup>a</sup>	2.889 <sup>a</sup>

**Tabla 3.** Propiedades fisicoquímicas de las microcápsulas de aceite de semilla de chía en el momento inicial (t = 0 d). Valores medios (n = 3). Los coeficientes de variación fueron inferiores al 10%. Diferentes letras en cada columna indican diferencias en p ≤ 0,05 entre las formulaciones, de acuerdo con la prueba de Tukey (HSD).

### Densidad aparente

No se encontraron diferencias significativas (p > 0,05) para los factores estudiados (**Tabla 2**). La misma varió entre 323-551 kg/m<sup>3</sup> y 244-301 kg/m<sup>3</sup> para ρ<sub>E</sub> y ρ<sub>A</sub>, respectivamente (**Tabla 3**).

La compresibilidad no presentó diferencias significativas (p > 0,05) entre los factores experimentales estudiados, registrándose una interacción significativa contenido de aceite x tratamiento térmico (**Tabla 2**).

### Microestructura (SEM)

En las micrografías electrónicas de barrido (SEM), todas las formulaciones exhibieron una topografía caracterizada por formar láminas y aglomerados con aspecto rugoso sin grietas (datos no mostrados). Los poros registrados en 150C10L, 150C10LHT y 200C10L pueden atribuirse a burbujas de aire retenidas durante la congelación, no afectando los mismos la EM. Las micrografías SEM de las microcápsulas indicaron un mayor tamaño y espesor de las escamas al aumentar la relación núcleo/pared.

### Color

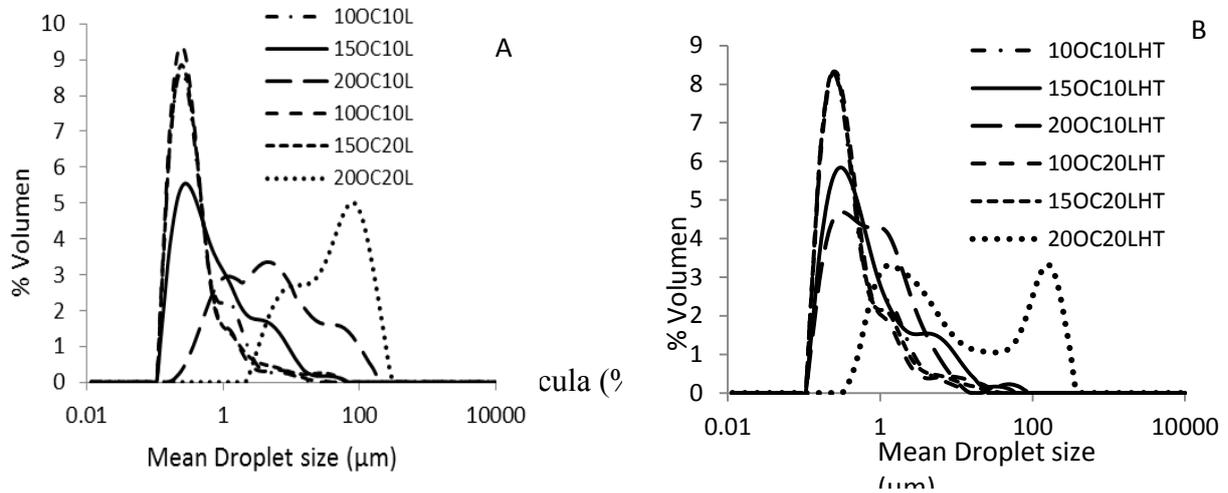
El color del polvo es un parámetro muy importante considerando su potencial inclusión como ingredientes para productos alimenticios. Los resultados obtenidos mostraron altos valores de L\* (blanco y luminoso), que disminuyeron con el almacenamiento (excepto para 150C10L). Con respecto a los valores de a\*, éstos disminuyeron en función del tiempo de almacenamiento, mientras que los valores de b\* aumentaron. Estos cambios en el color mostraron un aspecto más oscuro al final del almacenamiento respecto de las microcápsulas iniciales (datos no mostrados).

### Distribución del tamaño de partículas y diámetro medio de las emulsiones reconstituidas (ER)

Todas las ER (10 g de sólidos/100 g de emulsión mostraron una distribución bimodal, excepto 200C10L que fue trimodal (**Figura 2**). Se observó que el tratamiento térmico mejoró la homogeneidad de los sistemas estudiados, en coincidencia con los resultados obtenidos para las emulsiones previo a la liofilización. Así, las propiedades del agente emulsificante no fueron afectadas por el proceso de microencapsulación.

La distribución del tamaño de partículas fue multimodal y más amplia que la de las emulsiones antes de liofilizar. El tamaño de partículas aumentó con una mayor concentración de aceite y L, disminuyendo con la aplicación del tratamiento térmico. Las curvas con mayor

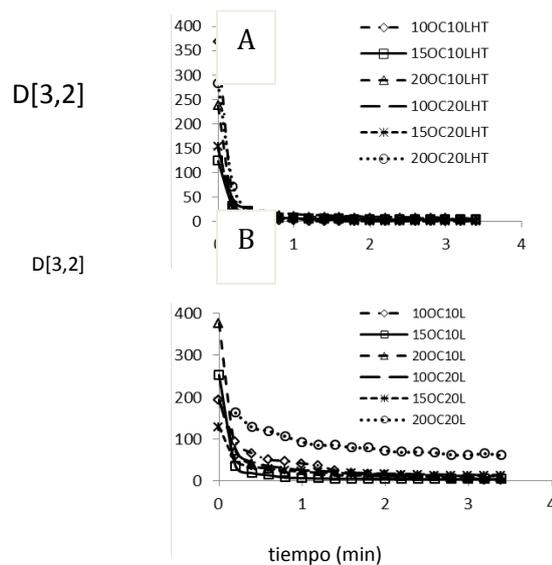
homogeneidad se asociaron a 10-15% de aceite (**Figura 2 A y B**). El análisis estadístico indicó que el D[3,2] presentó interacciones entre los factores (**Tabla 2**). El tamaño de partículas aumentó con una mayor concentración de aceite y L y disminuyó con la aplicación de tratamiento térmico. Esto último puede deberse a las mejores características de la emulsión obtenida, lo que retarda la floculación. Las curvas con mayor homogeneidad se asociaron a 10-15% de aceite (**Figura 3 A y B**).



### Dispersabilidad

A  $t=0$ , el oscurecimiento aumentó rápidamente con la agitación hasta  $\sim 1$  min, y luego se mantuvo constante para la mayoría de las muestras, excepto para 20OC10L y 20OC20L, en las que continuó creciendo ligeramente (datos no mostrados). Las muestras con tratamiento térmico mostraron un comportamiento similar. El  $D[3,2]$  disminuyó rápidamente hasta 0,2 min, luego se mantuvo estable en función del tiempo de la agitación (**Figura 3**).

La rápida reducción del tamaño de partículas y el aumento del oscurecimiento evidenciaron una dispersión rápida de la mayor parte del polvo dando una suspensión homogénea, favorable para la aplicación en alimentos instantáneos.



**Figura 3.** Influencia del tiempo de agitación en el  $D[3,2]$  de las ER de microcápsulas de aceite de chía: A) sin tratamiento térmico B) con tratamiento térmico.

### Estabilidad oxidativa

La estabilidad oxidativa del aceite de chía aumentó con la microencapsulación ya que todos los sistemas presentaron mayores  $t_i$  que los del aceite de chía sin encapsular ( $t_i=2,46 \pm 0,07$  h). A  $t=0$  d, se encontró el mayor  $t_i$  para la muestra 10OC20LHT (**Tabla 3**). Todos los factores afectaron la estabilidad oxidativa, detectándose además interacciones dobles y triples entre los factores (**Tabla 2**). En este sentido, para las muestras con 10 y 15% de aceite, la mayor concentración de L produjo un aumento del  $t_i$ . En contraste, las muestras con un 20% de aceite mostraron un comportamiento inverso. El tratamiento térmico mostró un efecto positivo en el  $t_i$  para sistemas con 20% de aceite de chía, 10% de L y 10% de aceite de chía y 20% de L. Estos resultados sugieren que los MRPs mejoran la estabilidad oxidativa del aceite de chía microencapsulado. Resultados similares fueron obtenidos por Lingnert et al., 1979, McGookin y Augustin, 1991 quienes han demostrado que los MRPs antioxidantes se forman como resultado de la interacción de azúcares con aminoácidos si estos productos están en la interfase o en la matriz continua del polvo. Al final del almacenamiento, el  $t_i$  disminuyó significativamente para todos los sistemas estudiados (datos no mostrados).

### Conclusiones

Se investigó la influencia de los MRPs, la concentración de aceite y la relación proteína/carbohidrato en la pared sobre la característica fisicoquímica y la estabilidad del aceite de chía microencapsulado. Los niveles de humedad y  $a_w$  fueron bajos. Las micrografías SEM

indicaron una morfología típica asociada a microcápsulas liofilizadas y modificaciones del color, haciéndose oscuras y amarillas en función del tiempo de almacenamiento. El tamaño de partícula de las ER aumentó con el contenido de aceite y la concentración de L, disminuyendo con la aplicación de tratamiento térmico. Los mayores niveles de homogeneidad de este parámetro se relacionaron con 10-15% de aceite de chía, exhibiendo todas las formulaciones una buena y rápida dispersabilidad.

Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación de tratamiento térmico mejoró la protección del aceite de chia frente a la oxidación de lípidos, en parte debido a las propiedades antioxidantes y emulsionantes de los MRPs. El mayor  $t_i$  se registró en el caso del sistema con 10% de aceite de chía, 20% de L, tratado térmicamente.

Estos resultados demuestran que las microcápsulas podrían constituir un sistema que permita mejorar la estabilidad del aceite de chía a fin de ser utilizado como ingrediente funcional en el desarrollo de alimentos.

### **Bibliografía**

Akhtar M., Dickinson E., (2007). Whey protein–maltodextrin conjugates as emulsifying agents: An alternative to gum Arabic. *Food Hydrocolloids*. 21, 607–616.

Augustin, M. A., Bhail, Cheng, L. J., Shen, Z., Oiseth, S., Sanguansri, L., (2015). Use of whole buttermilk for microencapsulation of omega-3 oils. *Journal of Functional Foods*. 19, 859-867.

Augustin, M. A., Sanguansri, L., Bode, O., (2006). Maillard Reaction Products as Encapsulants for Fish Oil Powders. *Food Engineering and Physical Properties*. 71, 25–32.

Ayerza, R., Coates, W., (2005). Chia: rediscovering a forgotten crop of the Aztecs. *The Arizona Board of Regents* (Eds). Tucson, Arizona.

Calvo, P., Hernández, T., Lozano, M., González-Gómez, D., (2010). Microencapsulation of extra-virgin olive oil by spray-drying: Influence of wall material and olive quality. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 112, 852–858. doi:10.1002/ejlt.201000059.

Chen, Q., Zhong, F., Wen, J., McGillivray, D., Quek, S.Y., (2013). Properties and Stability of Spray-Dried and Freeze-Dried Microcapsules Co-Encapsulated with Fish Oil, Phytosterol Esters, and Limonene. *Drying Technology*. 31, 707–716. doi:10.1080/07373937.2012.755541

Diaz, M., Dunn, C. M., McClements, D. J., Decker, E. A., (2003). Use of Caseinophosphopeptides as Natural Antioxidants in Oil-in-Water Emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51, 2365–2370.

Escalona-García, L.A., Pedroza-Islas, R., Natividad, R., Rodríguez-Huezo, M.E., Carrillo-Navas, H., Perez-Alonso, C., (2016). Oxidation kinetics and thermodynamic analysis of chia oil microencapsulated in a whey protein concentrate-polysaccharide matrix. *Journal of Food Engineering*. 175, 93-103.

Gan, C.Y., Cheng, L.H., Easa, A. M., (2008). Evaluation of microbial transglutaminase and ribose cross-linked soy protein isolate-based microcapsules containing fish oil. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 9, 563–569.

González, A., Martínez, M. L., Paredes, A.J., León, A.E., Ribotta P.D., (2016). Study of the preparation process and variation of wall components in chia (*Salvia hispanica* L.) oil microencapsulation. *Powder Technology*. 301, 868–875.

Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chamin, O., Voilley, A., Saurel, R., (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*. 40, 1107–1121. doi:10.1016/j.foodres.2007.07.004.

Hogan, S. A., McNamee, B.F., O’Riordan, E.D., O’Sullivan, M., (2001). Microencapsulating properties of sodium caseinate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49, 1934–1938. doi:10.1021/jf000276q.

Holgado, F., Márquez-Ruiz, G., Dobarganes C., Velasco, J., (2013). Influence of homogenization conditions and drying method on physicochemical properties of dehydrated emulsions containing different solid components. *International Journal of Food Science and Technology*. 48, 1498–1508.

Ixtaina, V.Y., Julio, L.M., Wagner, J.R., Nolasco, S.M., Tomás, M.C., (2015). Physicochemical characterization and stability of chia oil microencapsulated with sodium caseinate and lactose by spray-drying. *Powder Technology*. 271, 26–34. doi:10.1016/j.powtec.2014.11.006.

- Ixtaina, V.Y., Martínez, M.L., Spotorno, V., Mateo, C.M., Maestri, D.M., Diehl, B.W.K., Nolasco, S.M., Tomás, M.C., (2011). Characterization of chia seed oils obtained by pressing and solvent extraction. *Journal of Food Composition and Analysis*. 24, 166–174. doi:10.1016/j.jfca.2010.08.006.
- Ixtaina, V.Y., Nolasco, S.M., Tomás, M.C., (2012). Oxidative stability of chia (*Salvia hispanica* L.) seed oil: Effect of antioxidants and storage conditions. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 89, 1077-1090. doi:10.1007/s11746-011-1990-x.
- Jacobsen, C., Sørensen, A.-D. M., Nielsen, N. S., (2013). Stabilization of omega-3 oils and enriched foods using antioxidants in: *Food enrichment with omega-3 fatty acids*, Jacobsen C., Nielsen, N. S, Horn A. F., Sørensen, A.-D. M. (Eds), pp 130-146. doi: 10.1533/9780857098863.2.130. Cambridge, UK.
- Kaushik, P., Dowling, K., Barrow, C.J., Adhikari, B., (2015). Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of Functional Foods*. 19, 868–881. doi:10.1016/j.jff.2014.06.029
- Klaypradit , W., Huang, Y-W., (2008). Fish oil encapsulation with chitosan using ultrasonic atomizer. *LWT-Food Science and Technology*. 41, 1133–1139. doi:10.1016/j.lwt.2007.06.014
- Klinkesorn, U., Sophanodora, P., Chinachoti, P., McClements, D. J., Decker E. A., (2005). Stability of Spray-Dried Tuna Oil Emulsions Encapsulated with two-Layered Interfacial Membranes. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. 53, 8365–8371.
- Lingnert, H., Vallentin, K., Erikssonsik, C. E., (1979). Measurement of antioxidative effect in model system. *Journal of Food Processing and Preservation*. 3, 87-103.
- Martínez, M.L., Curti, M.I., Roccia, P., Llabot, J.M., Penci, M.C., Bodoira, R.M., Ribotta, P.D., (2015). Oxidative stability of walnut (*Juglans regia* L.) and chia (*Salvia hispanica* L.) oils microencapsulated by spray drying. *Powder Technology*. 270, 271–277. doi: 10.1016/j.powtec.2014.10.031.
- McGookin, B.J., Augustin, M.A., (1991). Antioxidant activity of casein and Maillard reaction products from casein-sugar mixtures. *Journal of Dairy Research*. 58, 313-320.
- Onwulata, C.I., Konstance, R.P., Holsinger, V.H., (1996). Flow Properties Of Encapsulated Milkfat Powders as Affected by Flow Agent. *Journal of Food Science*. 61, 1211-1215.
- Quispe-Condori, S., Saldaña, M.D.A., Temelli F., (2011). Microencapsulation of flax oil with zein using spray and freeze drying. *LWT - Food Science and Technology*. 44, 1880-1887.
- Rodea-González, D. A., Cruz-Olivares, J., Román-Guerrero, A., E.Rodríguez-Huezo, M., Vernon-Carter, E.J., Pérez-Alonso, C., (2012). Spray-dried encapsulation of chia essential oil (*Salvia hispanica* L.) in whey protein concentrate-polysaccharide matrices. *Journal of Food Engineering*. 111, 102–109.
- Rosenberg, M., Sheu T-Y., (1996). Microencapsulation of Volatiles by Spray-Drying in Whey Protein-Based Wall Systems. *International Dairy Journal*. 6, 273-284.
- Sanguansri, L., Augustin, M.A., (2007). Processing Technologies in Microencapsulation and Delivery of Omega-3 Fatty Acids in: J. Shi (Eds), *Functional Food Ingredients and Nutraceuticals: Processing Technologies*, pp 297–327. doi:10.1201/9781420004076
- Velasco, J., Marmesat, S., Dobarganes, C., Márquez-Ruiz, G., (2006). Heterogeneous Aspects of Lipid Oxidation in Dried Microencapsulated Oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54, 1722-1729.
- Zhang Y., Tan C., Abbas S., Eric K., Xia S., Zhang X., (2015). Modified SPI improves the emulsion properties and oxidative stability of fish oil microcapsules. *Food Hydrocolloids*. 51, 108-117.