

tsia

TEMAS SELECTOS DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS



Editorial

Continuando con este ejercicio académico iniciado hace más de 7 años, que es la publicación de la revista Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos, se presenta ahora el número 2 del volumen 8 de esta revista. Este ejercicio académico de escritura, pero también de búsqueda, de reflexión, de análisis, que realizan los estudiantes del posgrado en alimentos del Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental con la supervisión de su asesor, lo consideramos importante en su formación académica y de investigación, pues fortalece, por un lado su capacidad de comunicación contribuyendo a la difusión del conocimiento, pero por otro lado, le permite estar al tanto de los avances y tendencias sobre diversos tópicos de la ciencia de alimentos. Este ejercicio académico se ha venido consolidando, pero también se ha venido adaptando a las tendencias y nuevos retos que va encontrando la ciencia de alimentos, entre los que se encuentran la identificación y satisfacción de los intereses del consumidor, la preocupación por la inocuidad y calidad de los alimentos, así como por la salud de los consumidores, la investigación y desarrollo de ingredientes con determinadas características.

En este número de la revista Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos aparecen tres contribuciones relacionadas a temas de actualidad en la ciencia de alimentos, como son los tópicos de recubrimientos comestibles, el desarrollo de alimentos funcionales empleando suero de leche y la preparación de emulsiones alimentarias como un vehículo para estabilizar y disponer de algunos componentes alimenticios en diferentes aplicaciones; seguramente el lector interesado encontrará información de utilidad en estos artículos.

Esperamos que este ejercicio haya cumplido su función.

Fidel T. Vergara Balderas

Profesor

Departamento de Ingeniería Química,
Alimentos y Ambiental
Universidad de las Américas Puebla

Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Publicación Semestral

Volumen 8, número 2 (agosto - diciembre 2014)

EDITORIA RESPONSABLE

María Eugenia Bárcenas Pozos

CONSEJO EDITORIAL

Emma Mani López

Arlette Santacruz López

María Teresa Jiménez Munguía

Fidel Tomás Vergara Balderas

Certificado de reserva de derechos

04-2010-080615025900-102

Certificado de licitación de título y contenido

15430

DOMICILIO:

Fundación Universidad de las Américas, Puebla

Ex hacienda Sta. Catarina Mártir S/N

San Andrés Cholula, Puebla.

C.P. 72810, México

Teléfono: 222 229 2126

DISTRIBUIDO POR:

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental

Fundación Universidad de las Américas, Puebla

IMPRESIÓN:

Talleres gráficos

Universidad de las Américas Puebla

Ex hacienda Sta. Catarina Mártir S/N

San Andrés Cholula, Puebla. C.P. 72810, México

UDLAP®

Contenido

Volumen 8 / No. 2 agosto - diciembre 2014

EDITORIAL

ARTÍCULOS DE REVISIÓN

**5 Investigaciones recientes en recubrimientos
comestibles aplicados en alimentos**

A. Velázquez-Moreira* y J. A. Guerrero-Beltrán

**13 Suero de leche y su aplicación en la elaboración
de alimentos funcionales**

M. Hernández-Rojas* y J. F. Vélez-Ruiz

23 Métodos de secado de emulsiones alimentarias

N. I. Gómez-Cruz* y M. T. Jiménez-Munguía

Algunas investigaciones recientes en recubrimientos comestibles aplicados en alimentos

A. Velázquez-Moreira* y J. A. Guerrero Beltrán

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla

Ex hacienda Sta. Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

RESUMEN

En la actualidad existen tecnologías para prolongar la vida útil de alimentos frescos, mínimamente procesados y procesados. Entre estas tecnologías destaca el desarrollo y uso de recubrimientos comestibles (RC), los cuales tienen la capacidad de controlar la transferencia de agua y gases como oxígeno y dióxido de carbono, controlar la tasa de crecimiento microbiano y conservar las características de los alimentos. Dichos recubrimientos son elaborados con materiales como polisacáridos, lípidos, proteínas o mezclas de estos compuestos, los cuales confieren características específicas a cada uno de los productos. Actualmente, la investigación se ha centrado en probar nuevos componentes para la elaboración de RC aplicados a diversos alimentos y en la incorporación de aditivos que mejoren la calidad de los productos recubiertos. El objetivo de esta revisión es describir a los recubrimientos comestibles y dar a conocer algunas de las investigaciones recientes en cuanto a los materiales empleados para su preparación, así como los beneficios que éstos aportan a diferentes grupos de alimentos.

Palabras clave: recubrimientos comestibles, frutas, verduras, cárnicos, productos horneados.

ABSTRACT

Nowadays, technologies exist to prolong the storage of fresh minimally processed and processed foods in aim to control the growth of microorganisms and maintain their overall quality. Among these technologies, the development and use of edible coatings (EC) may control the mass transfer such as water and gases (oxygen and carbon dioxide), the rate of microbial growth, and to preserve the food characteristics. Such coatings are made from materials such as polysaccharides, lipids, proteins or mixtures, which may confer specific characteristics to the coated foods. At present, investigations have been focused on testing new components for the production of EC applied to various foods and the incorporation of additives that improve the quality of the coated products. The aim of this review is to describe edible coatings to present some of the recent research regarding the materials used for their preparation, and the benefits they bring to different food groups.

Keywords: edible coatings, fruits, vegetables, meat, bakery.



Programa de Maestría
en Ciencia de Alimentos

Tel.: +52 222 229 2126

Fax: +52 222 229 2727

Dirección electrónica:

adriana.velazquezma@udlap.mx

Introducción

Los recubrimientos comestibles (RC) son definidos como sustancias que se aplican en el exterior de los alimentos de manera que el producto final sea apto para el consumo. Los RC se han utilizado durante siglos en la industria alimentaria, con el objetivo principal de evitar la pérdida de humedad en los alimentos. Estos recubrimientos deben ser legales, seguros para su consumo, aceptables para los consumidores y deben proporcionar un valor agregado al alimento (Baldwin, Hagenmaier y Bai, 2012). Además, los RC disminuyen los daños mecánicos, físicos y químicos que genera el medio ambiente al producto (Falguera, Quintero, Jiménez, Muñoz e Ibarz, 2011). A través de los años, el uso de estos RC ha cobrado gran importancia debido al incremento en la demanda de alimentos frescos.

La composición de los RC es muy variada, los materiales principales utilizados para elaborarlos son proteínas, polisacáridos y lípidos, que poseen características propias que benefician en diferentes aspectos a determinados alimentos. Además de estos componentes básicos, los recubrimientos pueden contener otros ingredientes como agentes antioxidantes, nutrientes adicionales, compuestos antimicrobianos y otros componentes que incrementan la calidad, integridad mecánica, valor nutricional, inocuidad, funcionalidad y aceptabilidad del producto. La aplicación y uso de los RC ha ido evolucionando con el paso de los años y en la actualidad se puede encontrar una gran variedad de productos recubiertos como frutas, verduras, productos cárnicos, productos horneados, entre otros.

El uso de los RC en combinación con otras barreras, métodos de procesamiento, buenas prácticas de higiene y condiciones de almacenamiento adecuadas, puede contribuir a mejorar la calidad e inocuidad en los alimentos frescos, mínimamente procesados y procesados. En la actualidad, la investigación se ha centrado en probar nuevos componentes para la elaboración de RC aplicados a diversos alimentos y en la incorporación de aditivos que mejoren la calidad de los productos recubiertos. La finalidad de esta revisión es describir a los recubrimientos comestibles y dar a conocer algunas de las investigaciones recientes en cuanto a los materiales y aditivos empleados para su preparación, así como los beneficios que aportan a diferentes grupos de alimentos.

Revisión bibliográfica

1. Definición y aspectos generales de los recubrimientos comestibles

Un recubrimiento comestible es definido como una sustancia aplicada en el exterior de los alimentos de manera que el producto final sea apto para el consumo. Estos recubrimientos deben ser legales, inocuos, aceptables sensorialmente y deben proporcionar un valor agregado al alimento (Baldwin *et al.*, 2012). La función principal de los RC es proteger al producto de daños mecánicos, físicos, químicos y actividades microbiológicas que lo deterioren (Falguera *et al.*, 2011). Dependiendo de las características de los RC, éstos pueden ayudar a reducir dichos daños en el alimento mediante un proceso mínimo, retardando su deterioro, aumentando la calidad y mejorando su inocuidad, esto último, gracias a la actividad natural del recubrimiento contra los microorganismos o por la incorporación de compuestos antimicrobianos en la formulación (Rojas-Graü, Oms-Oliu, Soliva-Fortuny y Martín-Belloso, 2009).

El uso de los RC en alimentos y especialmente en productos altamente perecederos está condicionado por parámetros tales como el costo, la disponibilidad, la funcionalidad, las propiedades mecánicas como flexibilidad y tensión, las propiedades ópticas como brillo y opacidad, la barrera que proporcionan contra el flujo de gases, la aceptabilidad sensorial y la resistencia estructural contra agua y microorganismos. Dichas características dependen del tipo de material utilizado como matriz estructural, las condiciones en que se formaron los recubrimientos (tipo de disolvente, pH, concentración de componentes y temperatura) y el tipo y concentración de aditivos (Rojas-Graü *et al.*, 2009). Los aditivos son agregados durante el proceso de elaboración de los recubrimientos comestibles y pueden ser agentes antioxidantes, agentes antimicrobianos, agentes aromatizantes, pigmentos o nutrientes (Pascall y Lin, 2013).

Un RC debe cumplir con exigencias de calidad, seguridad y rendimiento. Uno de los principales propósitos de los recubrimientos es mejorar la apariencia del producto, brindando brillo y a veces color, que debe mantenerse a través de los procesos de transporte, manejo y comercialización. Para que la aplicación sea exitosa en el producto, el recubrimiento debe secar rápidamente, no debe producir espuma y se debe remover fácilmente de los equipos. Una vez aplicado, no debe agrietarse, decolorarse o caerse durante la manipulación. No debe reaccionar de manera adversa con los alimentos ni poner en riesgo la calidad sensorial del producto, pero debe restringir el paso de gases como oxígeno y dióxido de carbono. Durante el

almacenamiento de los productos, el recubrimiento no debe fermentar, coagular, separarse, desarrollar sabores desagradables, entre otras anormalidades (Baldwin *et al.*, 2012).

2. **Tipos de recubrimientos comestibles**

Los polisacáridos, las proteínas y los lípidos son los tres principales ingredientes poliméricos usados para producir RC. En muchos casos, dos o más materiales son mezclados para producir un material compuesto con mejores características físicas. Los RC a base de polisacáridos son hidrofílicos y permiten la formación de enlaces de hidrógeno, que se pueden utilizar para la unión con aditivos. Debido a sus propiedades químicas, estos recubrimientos constituyen una barrera muy eficiente contra el oxígeno, pero deficiente contra la humedad. Los RC a base de lípidos proporcionan una buena barrera contra la humedad debido a su naturaleza hidrofóbica, pero presentan propiedades mecánicas deficientes. Los RC a base de proteínas también son hidrofílicos y tienen una buena resistencia mecánica, por lo que pueden ser utilizados en frutas para reducir las lesiones durante su transporte; sin embargo, proporcionan una pobre barrera contra la humedad. La fabricación y el uso de recubrimientos de mezclas de materiales ayudan a minimizar las desventajas de los componentes individuales, mientras que hacen sinergia de sus propiedades funcionales y físicas (Pascall y Lin, 2013).

3. **Algunas investigaciones recientes en recubrimientos comestibles en alimentos**

Es un hecho que la aplicación de recubrimientos comestibles para proteger los alimentos no es un invento nuevo; sin embargo, dichos recubrimientos recientes todavía no están ampliamente aplicados en la industria de alimentos. En la actualidad, existe una amplia gama de investigaciones dedicadas al análisis de nuevos componentes para la formulación de soluciones de recubrimiento y metodologías más eficientes. Tales investigaciones contribuyen al desarrollo de la tecnología del recubrimiento y, por lo tanto, a un mayor interés por los productos recubiertos (Kokoszka y Lenart, 2007).

3.1. **Recubrimientos comestibles en frutas**

El propósito de los RC en frutas radica en reducir la pérdida de agua, retardar el envejecimiento, impartir brillo y conservar el color, permitiendo así una mejor calidad y precio de estos productos (Baldwin *et al.*, 2012). Es amplio el desarrollo y aplicación de recubrimientos en frutas. El almidón, proveniente de distintas fuentes, ha sido ampliamente probado como componente principal en la elaboración de RC aplicados a diversos

alimentos. Un estudio realizado en gajos de toronjas (*Citrus maxima* Merr.) demostró que la aplicación de RC a base de almidones de yuca y arroz, mantienen la apariencia física, contenido de ácido ascórbico, color característico y peso de la fruta mediante un proceso mínimo, en comparación con la no recubierta. Los autores concluyen que el uso de la solución de almidón de yuca tiene un mayor efecto en la reducción de los cambios de calidad que el uso del recubrimiento de arroz (Kerdchoechuen, Laohakunjit, Tussavil, Kaisangsri y Matta, 2011).

El almidón de papa también ha sido un componente importante en la elaboración de RC. Achipiz, Castillo, Mosquera, Hoyos y Navia (2013) desarrollaron y evaluaron un RC a partir de almidón de papa (*Solanum tuberosum L.*), aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) y cera de carnauba (*Copernicia cerifera*). Se evaluaron cuatro sistemas de frutas (guayabas); una muestra testigo sin almidón y muestras recubiertas con disoluciones con 2, 3 ó 4% de concentración de almidón, almacenadas a temperatura ambiente. Los sistemas presentaron diferencias benéficas en comparación a la muestra testigo, en la que se observó maduración acelerada y pérdida de calidad. Se encontró que el RC de 4% de almidón fue el más eficiente, incrementando 10 días la vida útil de la fruta, en comparación con el testigo. Los cambios presentados en la textura y pérdida de peso mostraron el efecto favorable del recubrimiento, debido a las propiedades de barrera y al retraso en la tasa de respiración, con un menor grado de deterioro como consecuencia (Achipiz, Castillo, Mosquera, Hoyos y Navia, 2013).

Mehyar, Al-qadiri y Swanson (2012) también elaboraron RC con almidones de distintas fuentes. Los autores probaron la adherencia del sorbato de potasio, que posee actividad antifúngica, a recubrimientos de goma guar, almidón de chícharo y almidón de papa, aplicados a manzanas y tomates frescos enteros. Las frutas se almacenaron durante 25 días a 4°C. Los resultados indicaron que los recubrimientos elaborados con goma guar mantuvieron la mayor concentración de sorbato de potasio superficial al igual que los de almidón de chícharo, mostrando ambos la mejor acción antifúngica, a diferencia del elaborado con almidón de papa. Esto indicó que ambos recubrimientos mostraron una buena retención de sorbato de potasio, protegiendo su actividad antifúngica durante el refrigerado.

Las mezclas de componentes en los RC aplicados a frutas son comunes, como es el caso de la combinación de almidón de maíz y quitosano, la cual ha mostrado mejores propiedades, como la permeabilidad al vapor de agua, en comparación con las membranas con sólo uno de los componentes. Además, se demostró que la actividad antibacteriana del quitosano logró

zonas de inhibición en placas de agar que contienen *Escherichia coli* O157: H7 (Liu, Qin, He, y Song, 2009).

Entre los polisacáridos, el quitosano tiene un enorme potencial debido a sus propiedades físicoquímicas, tales como la biodegradabilidad, biocompatibilidad con tejidos humanos, toxicidad nula y especialmente por sus propiedades antibacterianas y antifúngicas (Aider, 2010). La aplicación de recubrimientos elaborados con quitosano retrasa el proceso de maduración de ciertas frutas, como es el caso del plátano Cavendish, uvas de mesa y fruta estrella (*Averrhoa carambola* L.) enteros (Romanazzi, Nigro, Ippolito, Di Venere y Salerno, 2002; Nurul, Halimahton y Zaibunnisa, 2012; Suseno, Savitri, Sapei y Padmawijaya, 2014). En el caso del plátano, se redujo la pérdida de peso y se retrasó la degradación de la vitamina C con un RC preparado con 2% de quitosano (Suseno *et al.*, 2014). En las uvas de mesa se investigó el control de *Botrytis cinerea*, el llamado moho gris responsable de la reducción del agua y aumento del deterioro en uvas de mesa y otras frutas. Se pudo observar que con mayores concentraciones de quitosano, se desarrolló una significativa reducción del daño, además de un aumento de la actividad de la fenilalanina amino-liasa, la cual contribuye a preservar la calidad de la fruta (Romanazzi *et al.*, 2002). En el caso de la fruta estrella, se elaboraron RC a diferentes concentraciones de quitosano adicionando estearina de palma. Los resultados obtenidos mostraron que el recubrimiento redujo la pérdida de peso, mantuvo la firmeza y apariencia, disminuyó la producción de gases y redujo la producción de etileno. La concentración más adecuada fue 1:1 quitosano:estearina, ya que mostró una barrera efectiva contra agua, gases y otras propiedades que extendieron la vida de la fruta hasta 20 días en comparación con la demás muestras (Nurul *et al.*, 2012).

En el 2007, un grupo de investigadores desarrolló los primeros RC adicionados con probióticos basados en alginato y proteína con la adición de bifidobacterias viables, los cuales fueron aplicados en frutas frescas cortadas. Su estudio mostró que estos recubrimientos son adecuados para productos de elevada humedad, tales como manzana y papaya. Los autores concluyeron que los recubrimientos a base de proteína tienen mejores propiedades de barrera contra el agua que los elaborados con alginato y que la incorporación de bifidobacterias a las soluciones abre nuevas posibilidades para el desarrollo de productos elaborados con frutas recién cortadas con probióticos (Tapia, Rojas-Graü, Rodríguez, Ramírez, Carmona, y Martín-Belloso, 2007).

En un estudio elaborado por Adetunji *et al.* (2012) se evaluó el efecto del gel de *Aloe vera* como RC sobre la vida útil

de piña entera (*Ananas comosus* L. Merr.) almacenada a temperatura ambiente ($27 \pm 2^\circ\text{C}$) y una humedad relativa de 55-60%. Se concluyó que el gel de *Aloe vera*, aplicado como RC en piñas, tiene efectos beneficiosos en el retraso del proceso de maduración, en comparación con el testigo. Este tratamiento fue eficaz como una barrera física, ya que redujo la pérdida de peso durante el almacenamiento después de la cosecha, además retrasó el reblandecimiento, conservó el ácido ascórbico y mantuvo la calidad de la fruta.

En cuanto al uso de lípidos vegetales, se han desarrollado tres RC con diferentes concentraciones de aceite vegetal, maltodextrina, goma de algarrobo, goma arábica, alginato, surfactante y carboximetilcelulosa de sodio para aplicarlos en manzanas Golden Delicious enteras. El aumento en la tasa de respiración en el grupo no recubierto ocasionó una disminución de la firmeza y acidez titulable, y al mismo tiempo, un aumento en el color debido al rompimiento de almidón, mientras que el grupo recubierto no presentó estos cambios. La cantidad de sólidos solubles no tuvo cambios considerables entre ambos grupos. Por último, por medio de un análisis sensorial, se determinó que las manzanas recubiertas podrían conservarse durante al menos ocho semanas, sin caer por debajo del punto de aceptabilidad. A partir de estas observaciones, se concluyó que las formulaciones de recubrimientos tuvieron un efecto positivo en el mantenimiento de la calidad de la fruta durante dos meses (Conforti y Totty, 2007).

La zeína, proteína abundante en el maíz, ha sido estudiada junto con la gelatina, en la extensión de la vida útil del mango (*Mangifera indica* L.) entero. Se demostró que los RC elaborados con gelatina y zeína tuvieron un efecto benéfico sobre la pérdida de peso, cantidad de sólidos solubles, acidez titulable, pH, contenido de azúcar y cantidad de carotenoides totales, además se ha observado una alta retención de ácido ascórbico en comparación con el testigo. Retrasaron la maduración de la fruta mediante la disminución de la actividad de enzimas como son poligalacturonasa, pectina metil esterasa, celulasa y β -galactosidasa. En conclusión, la aplicación de un recubrimiento con zeína al 5% y gelatina al 10%, podría ser utilizada en el retraso de la maduración, el mantenimiento de los atributos de calidad y en la extensión de la vida útil del mango, durante el almacenamiento (Gol y Rao, 2013).

3.2. Recubrimientos comestibles en hortalizas

La aplicación de RC en hortalizas ha sido igual de amplia que en las frutas y el quitosano ha sido probado en distintos estudios. Eissa (2008) sugiere que la aplicación de un recubrimiento elaborado a base de quitosano, es beneficiosa y debe ser considerada.

rada para la aplicación comercial en la prolongación de la vida útil de champiñones recién cortados. Por ejemplo, en períodos cortos de transporte y distribución a poca distancia, el uso de un RC a base de quitosano se considera adecuado para retardar el pardeamiento de los champiñones; en períodos prolongados, es útil para controlar la decoloración asociada a actividad enzimática y el deterioro general. El quitosano también ha sido estudiado en combinación con otros componentes. García, Casariego, Díaz y Roblejo (2014) demostraron que la adición de zeolita en una concentración del 3% y Tween 80 al 0.1%, a una solución elaborada a base de quitosano al 1.5% y ácido láctico al 1%, mejoró las propiedades de revestimiento del recubrimiento, conservando los atributos de calidad durante el almacenamiento en refrigeración, al retrasar la maduración de tomates (*Lycopersicon sculentum* cv. FA-180 HAZERA) (García *et al.*, 2014).

En un estudio realizado con recubrimientos comestibles elaborados a base de biopolímeros (pectina, goma arábica y goma xantana), cera de candelilla y aceite de jojoba, aplicados en pimientos verdes, se mejoraron los parámetros fisicoquímicos tales como pérdida de peso, apariencia, cambios de color, pH, cantidad de sólidos solubles totales y textura en dicho producto. Los mejores resultados se obtuvieron con el recubrimiento a base de goma arábica, ya que se presentaron menos daños en la apariencia del pimiento en comparación con los recubrimientos restantes, prolongando la vida útil del vegetal durante el almacenamiento a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ (Ochoa-Reyes *et al.*, 2013).

La adición de calcio y vitamina E a RC, ha permitido incrementar el valor nutricional de zanahorias ("baby" frescas peladas), además de cumplir con su función principal, que es la de proveer una barrera contra la humedad y una superficie hidratante. La integración de calcio y vitamina E no afectó las propiedades funcionales básicas del RC. Todos los tratamientos de recubrimiento mantuvieron una humedad elevada en la superficie de las zanahorias, por lo que se logra un control efectivo de la deshidratación y de la decoloración de la superficie. El tratamiento no afectó significativamente el aroma, el sabor, la dulzura, la frescura y la cantidad de β -caroteno de las zanahorias (Mei, Zhao, Yang y Furr, 2002).

3.3. Recubrimientos comestibles en productos cárnicos

Los alimentos de origen animal son ampliamente consumidos en todo el mundo por su alta disponibilidad de nutrientes, pero debido a ello, pueden proporcionar un ambiente adecuado para el crecimiento de microorganismos patógenos y

deteriorativos (Sánchez-Ortega *et al.*, 2014). Además, la carne y productos cárnicos son altamente susceptibles a la oxidación lipídica, lo que lleva a un rápido desarrollo de sabor rancio. Ciertos RC a base de polisacáridos pueden proporcionar una protección eficaz contra la oxidación de lípidos y otros compuestos de los alimentos de origen animal (Baldwin *et al.*, 2012). De tal forma, el uso de RC es una tecnología prometedora para la conservación de carnes crudas y procesadas, gracias a su efecto de barrera (Sánchez-Ortega *et al.*, 2014).

El uso de RC elaborados con quitosano es una buena alternativa para el control de la microbiota presente principalmente en carnes como salami y hamburguesas de cerdo. En un trabajo elaborado en el 2011, las propiedades antimicrobianas intrínsecas del quitosano se combinaron con las propiedades termoplásticas del caseinato de sodio, para preparar soluciones formadoras de recubrimiento (Moreira, Pereda, Marcovich y Roura, 2011). Se evaluó la eficacia antimicrobiana del caseinato de sodio, quitosano y una mezcla de ambos en la microflora nativa del salami. Las soluciones de quitosano y quitosano/caseinato de sodio ejercieron una acción microbicia significativa en el recuento de mesófilos, psicrotróficos, levaduras y mohos, con una reducción de 2 a 4.5 ciclos logarítmicos. Ese mismo año, se estudió la aplicación de RC elaborados a base de quitosano de alto peso molecular, pero ahora con la incorporación de aceite de girasol. Dicho recubrimiento disminuyó las pérdidas de agua y condujo a la reducción de los recuentos microbianos de las muestras durante el almacenamiento, evitando efectos indeseables en la superficie de las hamburguesas revestidas, en comparación con los recubrimientos con quitosano puro (Vargas, Albors y Chiralt, 2011).

Abdeldaiem (2014) estudió el efecto combinado de un RC adicionado con un extracto etanólico de hojas de papaya (*Carica papaya* L.) al 2% e irradiación gamma de 2, 4 y 6 kGy, sobre las características químicas, microbiológicas y sensoriales de muslos de pollo picados y almacenados a temperatura de refrigeración ($4 \pm 1^\circ\text{C}$). Las muestras fueron divididas en tres grupos: no recubiertas (testigo), recubiertas sin aditivo y recubiertas con aditivo e irradiadas a todos los niveles probados. Los resultados obtenidos mostraron que la irradiación gamma junto con la aplicación del recubrimiento comestible, redujeron el recuento inicial total bacteriano, las bacterias psicrofilas y las bacterias ácido lácticas, prolongando la vida útil de las muestras bajo investigación. En las muestras recubiertas, la irradiación con 2 kGy redujo los recuentos de Enterobacterias, *Staphylococcus aureus* y *Bacillus cereus*, además de eliminar *Salmonella* spp.; mientras que las irradiaciones a 4 y 6 kGy, eliminaron completamente estas bacterias. Además, el trata-

miento combinado no tuvo efectos adversos en las propiedades sensoriales de las muestras.

3.4. Recubrimientos comestibles en productos elaborados con cereales

Las grasas y aceites se han utilizado tradicionalmente en bocadillos o galletas para cumplir con la función de aromatizante o adhesivo de condimentos; sin embargo, como resultado de la creciente demanda de bocadillos bajos en grasa, muchas empresas han introducido productos con recubrimientos comestibles que cumplen con esa función y que además poseen un reducido valor calórico. Los recubrimientos de polisacáridos se han utilizado para reducir la pérdida de color y el ablandamiento en panadería de baja humedad y productos extruidos tales como cereales, galletas y bocadillos que tienen una textura crujiente (Baldwin *et al.*, 2012).

Bravin, Peressini y Sensidoni (2005) evaluaron la eficacia de un recubrimiento comestible compuesto de almidón de maíz, metilcelulosa y aceite de soya, en el control de la transferencia de la humedad de galletas, un alimento a base de cereal con baja actividad de agua (a_w). Observaron que las galletas recubiertas tenían menores tasas de transmisión al vapor de agua que las galletas no recubiertas y, por lo tanto, una mayor vida útil, confirmando el potencial del RC para convertirse en una parte integral del alimento.

En los últimos años, ha surgido el interés por utilizar los RC como vehículo de sabor y olor para los cereales. Laothakunjit y Kerdchoechuen (2007) recubrieron arroz blanco con almidón de arroz plastificado, con un 30% de sorbitol, que contenía 25% de extracto de hoja de pandan (*Pandanus amaryllifolius* Roxb.) natural, que es el principal responsable del aroma a jazmín del arroz aromático. Se recubrieron tres variedades de arroz blanco no aromático y se almacenaron en bolsas de plástico durante seis meses a 25°C, así como un testigo. Con este estudio se estableció que el arroz con el recubrimiento de almidón con extracto de pandan natural presentó aromas similares a los del arroz aromático. Además, el recubrimiento redujo el contenido del n-hexanal de los granos almacenados. Esta técnica de recubrimiento es un enfoque prometedor para mejorar el aroma de cereales y al mismo tiempo, para reducir los procesos perjudiciales que ocurren durante el almacenamiento del grano, tales como la oxidación de lípidos.

Por otra parte, la metilcelulosa (MC) y la hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) han sido utilizadas en formulaciones de recubrimiento para reducir la absorción de aceite en discos de masa de trigo para hornear. En dicho estudio, los revestimientos de MC fueron más eficaces en la reducción de la absorción

de aceite que los elaborados con HPMC. También se evaluó el efecto de la adición de plastificante (sorbitol). La mejor formulación fue la de 0.75% de sorbitol, representando una reducción de absorción de aceite de 35.2%, en comparación con las muestras sin recubrir; el aumento en el contenido de agua fue de 25.7%. No se observaron diferencias significativas en la textura de las muestras con y sin recubrimiento. Aunque se detectaron diferencias de color instrumentales, todas las muestras fueron aceptadas sensorialmente por un panel no entrenado. Este es un resultado favorable, ya que el objetivo fue incorporar el revestimiento para reducir la absorción de aceite sin tener un impacto significativo en las características sensoriales de los productos finales (García, Ferrero, Bértola, Martino y Zaritzky, 2002).

Conclusiones

Los recubrimientos comestibles aplicados a alimentos tienen como objetivo mejorar la calidad de los productos, extendiendo su vida útil y proporcionando en varios casos un valor agregado. Con base en las investigaciones recientes expuestas en esta revisión, se concluye que los materiales estudiados para la elaboración de RC aplicados a diferentes grupos de alimentos, han tenido efectos positivos en varias propiedades de los productos. Los materiales más empleados han sido quitosano, almidones de distintas fuentes y gomas, los cuales han sido ampliamente estudiados con buenos resultados. También se ha estudiado la incorporación de aditivos a los componentes de los RC (con buenos resultados). Es necesario continuar con investigaciones para probar los beneficios de las nuevas formulaciones aplicadas a distintos alimentos.

Agradecimientos

La autora Adriana Velázquez Moreira agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad de las Américas Puebla por el apoyo recibido para el financiamiento de sus estudios de maestría.

Referencias

- Achipiz, S., Castillo, A., Mosquera, S., Hoyos, J. L. y Navia, D. P. (2013). Efecto de recubrimiento a base de almidón sobre la maduración de la guayaba (*Psidium guajava*). *Biología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 2, 92-100.
- Abdeldaiem, M. (2014). Using of combined treatment between edible coatings containing ethanolic extract of papaya (*Carica papaya* L.) leaves and gamma irradiation for extending shelf-life of minced chicken meat. *American Journal of Food Science and Technology*, 2 (1), 6-16.
- Adetunji, C., Fawole, O., Arowora, K., Nwaubani, S., Ajayi, E., Oloke, J. y otros. (2012). Effects of edible coatings from aloe vera gel on quality and postharvest physiology of *Ananas comosus* (L.) fruit during ambient storage. *Global Journal of Science Frontier Research Bio-Tech & Genetics*, 12 (5), 39-43.
- Aider, M. (2010). Chitosan application for active bio-based films production and potential in the food industry: review. *Food Science and Technology*, 12, 837-842.
- Baldwin, E., Hagenmaier, R. y Bai, J. (2012). *Edible coatings and films to improve food quality*. Boca Raton: CRC Press.
- Bravin, B., Paressini, D. y Sensidoni, A. (2005). Development and application of polysaccharide-lipid edible coating to extend shelf-life of dry bakery products. *Journal of Food Engineering*, 76, 280-290.
- Conforti, F. y Totty, J. (2007). Effect of three lipid/hydrocolloid coatings on shelf life stability of Golden Delicious apples. *International Journal of Food Science and Technology*, 42, 1101-1106.
- Eissa, H. A. (2008). Effect of chitosan coating on shelf-life and quality of fresh-cut mushroom. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 58(1), 95-105.
- Falguera, V., Quintero, J. P., Jiménez, A., Muñoz, J. A. e Ibarz, A. (2011). Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use. *Trends in Food Science & Technology*, 22, 292-303.
- García, M. A., Ferrero, C., Bértola, N., Martino, M. y Zaritzky, N. (2002). Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3, 391-397.
- García, M., Casariego, A., Díaz, R. y Roblejo, L. (2014). Effect of edible chitosan/zeolite coating on tomatoes quality during refrigerated storage. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 26(3), 238-246.
- Gol, N. y Rao, R. (2013). Influence of zein and gelatin coatings on the postharvest quality and shelf life extension of mango (*Mangifera indica* L.). *Fruits*, 69(2), 101-115.
- Hardenburg, R.E. (1967). Wax and related coatings for horticultural products. A Bibliography. *Agr. Res. Bull USD*, 51-15.
- Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N., Tussavil, P., Kaisangsri, N. y Matta, F. (2011). Effect of starch-based edible coatings on quality of minimally processed pummelo (*Citrus maxima* Merr.). *International Journal of Fruit Science*, 11, 410-423.
- Kokoszka, S., y Lenart, A. (2007). Edible coatings - Formation characteristics and use - A review. *Polish Journal Of Food and Nutrition Sciences*, 57(4), 399 - 404.
- Laohakunjit, N. y Kerdchoechuen, O. (2007). Aroma enrichment and the change during storage of non-aromatizing milled rice coated with extracted natural flavor. *Food Chemistry*, 339-344.
- Liu, F., Qin, B., He, L. y Song, R. (2009). Novel starch/chitosan blending membrane: antibacterial, permeable and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 1, 146-150.
- Mehyar, G., Al-qadiri, H. y Swanson, B. (2012). Edible coatings and retention of potassium sorbate on apples, tomatoes and cucumbers to improve antifungal activity during refrigerated storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38, 1745-4549.
- Mei, Y., Zhao, Y., Yang, J. y Furr, H. (2002). Using edible coating to enhance nutritional and sensory qualities of baby carrots. *Sensory and Nutritive Qualities of Food*, 67(5), 1964-1968.
- Moreira, M., Pereda, M., Marcovich, N. y Roura, S. (2011). Antimicrobial effectiveness of bioactive packaging materials from edible chitosan and casein polymers: assessment on carrot, cheese, and salami. *Journal of Food Science*, 76(1), 54-63.
- Nurul, M., Halimahton, M. y Zaibunnisa, A. (2012). Effect of chitosan-palm stearin edible coating on the post harvest life of star fruits (*Averrhoa carambola* L.) stored at room temperature. *International Food Research Journal*, 19(4), 1433-1438.
- Ochoa-Reyes, E., Martínez-Vázquez, G., Saucedo-Pompa, S., Montañez, J., Rojas-Molina, R., de Leon-Zapata, M. A., Rodríguez-Herrera, R. y Aguilar, C. N. (2013). Improvement of shelf life quality of green bell peppers using edible coating formulations. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2(6), 2448-2451.

- Pascall, M. y Lin, S.-J. (2013). The application of edible polymeric films and coatings in the food industry. *Food, Processing and Technology*, 4(2), 1-2.
- Rojas-Graü, M. A., Oms-Oliu, G., Soliva-Fortuny, R. y Martín-Belloso, O. (2009). The use of packaging techniques to maintain freshness in fresh-cut fruits and vegetables: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 4, 875-889.
- Romanazzi, G., Nigro, F., Ippolito, A., Di Venere, D. y Salerno, M. (2002). Effects of pre- and postharvest chitosan treatments to control storage grey mold of table grapes. *Food Microbiology and Safety*, 67(5), 1862-1867.
- Sánchez-Ortega, I., García-Almendárez, B., Santos-López, E., Amaro-Reyes, A., Barboza-Corona, E. y Regalado, C. (2014). Antimicrobial edible films and coatings for meat and meat products preservation. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-18.
- Suseno, N., Savitri, E., Sapei, L. y Padmawijaya, K. (2014). Improving shelf-life of cavendish banana using chitosan edible coating. *Procedia Chemistry*, 9, 113-120.
- Tapia, M., Rojas-Graü, M., Rodríguez, F., Ramírez, J., Carmona, A. y Martín- Belloso, O. (2007). Alginate- and gellan-based edible films for probiotic coatings on fresh-cut fruits. *Food Engineering and Physical Properties*, 72(4), 190-196.
- Vargas, M., Albors, A. y Chiralt, A. (2011). Application of chitosan-sunflower oil edible films to pork meat hamburgers. *Procedia Food Science*, 1, 39-43.

Suero de leche y su aplicación en la elaboración de alimentos funcionales

M. Hernández-Rojas* y J.F. Vélez-Ruiz

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla.

Ex hacienda Sta. Catarina Mártir, C.P.72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

RESUMEN

El suero de leche es un producto lácteo obtenido por la precipitación de la caseína en la fabricación de quesos; contiene más del 50% de los sólidos de la leche, incluyendo proteínas, lactosa, minerales y vitaminas. Durante muchos años se consideró como un desperdicio y agente contaminante, sin embargo, este punto de vista ha cambiado radicalmente debido a que este subproducto es una fuente rica en materias primas y cada uno de sus componentes puede ser aprovechado de alguna forma. Por otro lado, los alimentos funcionales son aquellos que pueden contribuir activamente a un buen estado de salud, además de cubrir ciertas necesidades nutricionales. Específicamente, las proteínas del suero de leche están siendo utilizadas en la producción de alimentos funcionales como por ejemplo fórmulas infantiles, bebidas fortificadas, batidos de proteínas de suero, entre otros. El objetivo de este artículo es hacer una revisión sobre la aplicación de este sub-producto y sus proteínas en la elaboración de alimentos funcionales.

Palabras clave: suero de leche, proteínas del suero de leche, alimentos funcionales.

ABSTRACT

Whey is a dairy product obtained in the manufacture of cheese by the precipitation of casein; contains more than 50% of milk solids, including proteins, lactose, minerals and vitamins. For many years it was considered wasteful and polluting, however, this view has changed dramatically because this product is a rich source of raw materials and each one of its components can be exploited in some way. On the other side, functional foods are those that specifically can actively contribute to good health, in addition to satisfy some nutritional needs. Specifically, the whey proteins are currently being used in the production of functional foods such as infant formulas, fortified beverages, and whey protein shakes among others. The objective of this article is to review the application of this sub-product and its proteins in the development of functional foods.

Key words: whey, whey proteins, functional foods.

 Programa de Maestría
en Ciencia de Alimentos
Tel.: +52 222 229 2126
Fax: +52 222 229 2727
Dirección electrónica:
marai.hernandezrs@udlap.mx

Introducción

Un alimento puede ser considerado funcional si además de su valor nutricional intrínseco, ha demostrado también tener un efecto beneficioso sobre una o más funciones selectivas del organismo, de tal modo que resulta apropiado para mejorar el estado de salud y bienestar y/o para la reducción de riesgo de ciertas enfermedades. Un alimento funcional será semejante en apariencia a un alimento convencional, consumido en cantidades habituales y como un componente más de la dieta. El efecto beneficioso de un alimento funcional requiere demostrarse científicamente y producirse en niveles relevantes, lo que supone que los resultados no sólo han de ser estadísticamente significativos, sino que han de tener cierta importancia desde una perspectiva clínica, fisiológica o biológica. Un alimento funcional puede ser natural u obtenido mediante procedimientos tecnológicos o biotecnológicos, englobando consecuentemente alimentos tradicionales siempre que existan evidencias científicas que demuestren su efecto funcional en sujetos con determinadas características o estados patológicos (Begoña y Jiménez, 2014).

El suero de leche líquido es un subproducto que durante muchos años ha sido considerado como un desecho; actualmente es utilizado por sus múltiples nutrientes y propiedades funcionales (Marshall, 2004; Madureira, 2007). Este subproducto está compuesto por agua, lactosa, proteínas, minerales (calcio, fósforo, magnesio) y grasa. Las proteínas son indiscutiblemente el componente de mayor importancia del suero, sus propiedades y aplicaciones son de gran interés en diversas áreas. El espectro de beneficios confirmados y el potencial que presenta la proteína del suero para la salud, cubre todo el ciclo de la vida, desde la nutrición infantil hasta productos para ancianos. Asimismo, está comprobado que la proteína del suero es un ingrediente alimenticio dinámico, capaz de desempeñar un papel fundamental en áreas de la salud tan diversas como integridad y motilidad intestinal, funcionamiento y fortalecimiento del sistema inmunológico, cáncer, sistema cardiovascular, mejoría del desempeño cardiorrespiratorio y participación en el incremento del rendimiento deportivo (Rhône-Poulenc, 1998; Walzem, Dillard, y German, 2002; Guerrero, Ramírez y Puente, 2011; Mendes da Silva, 2011). Existe un interés creciente por la industria de lácteos y otros alimentos e incluso industrias farmacéuticas, por diseñar y formular productos que incorporen componentes bioactivos específicos de proteínas de suero de leche (Mendes da Silva, 2011).

Por todo lo anterior, el objetivo de este artículo es hacer una revisión sobre los aspectos generales del suero de leche y

sobre la aplicación de este sub-producto y sus proteínas en la elaboración de alimentos funcionales.

Revisión Bibliográfica

1. Origen y composición del suero de leche

La leche es la materia prima con la cual se elabora el queso. La producción de quesos demanda gran cantidad de leche. Para obtener un kilogramo de queso, se necesitan aproximadamente 10 litros de leche y se generan 9 litros de lactosuero como subproducto. Jelen (2003), definió al suero de leche como un líquido translúcido verde, obtenido de la leche después de la precipitación de la caseína. Así mismo, Jovanovic, Barac, y Macej (2005), mencionan que el suero o lactosuero de leche es el residuo líquido color amarillento, que se obtiene mayoritariamente después de la separación de la cuajada en la elaboración de quesos.

La composición nutricional del lactosuero puede variar considerablemente dependiendo de las características de la leche utilizada para la elaboración del queso, el tipo de queso producido y el proceso tecnológico empleado en la elaboración del queso. A partir de estas diferencias se encuentran los tipos de lactosuero (Poveda, 2013). Los dos tipos más comunes de suero de leche son el dulce y el ácido. El suero dulce se obtiene de la elaboración del queso mediante el uso de enzimas proteolíticas o cuajo, las cuales actúan sobre las caseínas de la leche y las fragmentan, haciendo que éstas se desestabilicen y precipiten, todo esto bajo condiciones específicas de temperatura, aproximadamente entre 15-50 °C, con un pH ligeramente ácido. Por otro lado, el suero ácido se genera mediante la precipitación ácida de la caseína, la cual se logra disminuyendo el pH de la leche a un valor de 4.5 o 4.6. A este pH se alcanza el punto isoelectrónico de la mayoría de las caseínas presentes; en este punto, la carga eléctrica neta de la proteína es igual a cero, lo cual produce que la micela de caseína se desestabilice y precipite, dejando en solución solamente las proteínas de tipo séricas (Jovanovic *et al.*, 2005). Existe un tercer tipo de suero no tan común, que se produce en Egipto; es un suero de leche con sal que se obtiene en la fabricación de queso Domiati, el principal queso fresco egipcio (Abd El-Salam, El-Shibiny y Salem, 2009).

En términos promedio, el suero de leche contiene más de la mitad de los sólidos presentes en la leche original, incluyendo alrededor del 20% de las proteínas (lactoalbúminas y lactoglobulinas), la mayor parte de la lactosa, minerales (calcio,

Tabla 1. Composición de los sueros de leche dulce y ácido.

Componente (g/L)	Suero de leche dulce	Suero de leche ácido
Sólidos totales	63.0 - 70.0	63.0 - 70.0
Lactosa	46.0 - 52.0	44.0 - 46.0
Grasa	0.0 - 5.0	0.0 - 5.0
Proteína	6.0 - 10.0	6.0 - 8.0
Calcio	0.4 - 0.6	1.2 - 1.6
Fósforo	0.4 - 0.7	0.5 - 0.8
Potasio	1.4 - 1.6	1.4 - 1.6
Cloruros	2.0 - 2.2	2.0 - 2.2

Adaptado de Panesar (2007), Callejas (2012).

fósforo, sodio y magnesio) y vitaminas hidrosolubles (tiamina, ácido pantoténico, riboflavina, piridoxina, ácido nicotínico, cobalamina y ácido ascórbico) (Londoño, 2006; Guerrero *et al.*, 2011).

En la Tabla 1 se muestra la composición detallada de los sueros de leche dulce y ácido, observándose que el dulce tiene mayor concentración de lactosa y proteína, con respecto al ácido. Sin embargo, el suero de leche ácido contiene una mayor cantidad de fósforo y calcio en comparación con el suero de leche dulce.

Debido a sus propiedades nutricionales y funcionales, el lactosuero se ha convertido en una materia prima conveniente para obtener diferentes productos a nivel tecnológico. Se ha establecido que es posible transferir diversas propiedades funcionales identificadas en el suero de leche a nuevos productos alimenticios. Por tal motivo, se ha incrementado el uso de proteínas de suero de leche como ingredientes en alimentos fisiológicamente funcionales (Morr y Ha, 1993). En la Tabla 2 se muestran algunos usos del suero de leche en alimentos, así como el beneficio que proporciona las propiedades fisicoquímicas de éstos.

La utilización del suero en los últimos años va acompañado de la realización de investigaciones en la industria láctea, siendo considerado hoy en día uno de los campos más importantes de investigación y desarrollo de esta industria de alimentos (Guerrero *et al.*, 2011).

2. Proteínas del suero de leche

Las proteínas no constituyen la fracción más abundante en el suero de leche, representa aproximadamente, el 18-20% de las proteínas totales de la leche., sin embargo, sí es la más interesante desde el punto de vista económico y nutricional (Parraga, 2009). Esta fracción contiene cuatro proteínas principales: β -lactoglobulina (β -LG), α -lactoalbúmina (α -La), albúmina de suero sanguíneo (BSA) e inmunoglobulina (Ig). Los componen-

Tabla II. Algunas aplicaciones y beneficios del lactosuero en alimentos.

Aplicaciones en	Algunos beneficios
Productos de panadería	Incrementar el valor nutricional, funcionar como emulgente, reemplazar la adición de huevo, dar cuerpo a la masa
Quesos	Incrementar el valor nutricional, funcionar como emulgente, funcionar como gelificante, mejorar propiedades organolépticas, mejorar consistencia, incrementar la cohesividad
Bebidas	Incrementar el valor nutricional, mejorar la solubilidad, mejorar la viscosidad, mejorar la estabilidad coloidal
Postres	Funcionar como emulgente, dar cuerpo y textura a los productos
Confitería	Funcionar como emulgente y facilitar el batido
Productos cárnicos	Funcionar como pre-emulgantes, funcionar como gelificante, mejorar solubilidad
Otros	Alimentos de mayor valor nutricional y bajo costo, alimentos para deportistas, para personas de la tercera edad, fórmulas nutricionales especiales para mantener peso saludable o aumentar consumo de proteína, fórmulas infantiles, fórmulas especiales para alimentación hospitalaria

Adaptado de Poveda (2013).

tes menores de esta fracción son lactoferrina, transferrina, y la fracción lactolin proteosa-peptona (PP) (Jovanovic *et al.*, 2005).

La β -lactoglobulina representa, aproximadamente, la mitad de las proteínas totales del suero de leche bovino. Está compuesta por 162 aminoácidos residuales; 84 de éstos son aminoácidos esenciales (Jovanovic *et al.*, 2005). El centro de la proteína es hidrofóbico, por lo que es capaz de fijar moléculas hidrófobas como colesterol y retinol. La β -LG presenta alta resistencia a la digestión gástrica en algunos seres humanos, lo que origina intolerancia y/o alergenidad. Sin embargo, tratamientos industriales como esterilización, calentamiento o presión hidrostática alta y la hidrólisis, mejoran la digestibilidad de la β -LG presente en el lactosuero (Pescumma, Hérbet, Mozzi y Font, 2008).

Las α -lactoalbúminas son de las principales proteínas que se encuentran en la leche humana y bovina. Comprenden, aproximadamente, del 20 al 25% de las proteínas de suero de leche y contienen una gran variedad de aminoácidos, incluyendo un suministro fácilmente disponible de aminoácidos de cadena ramificada y esenciales (Walzem *et al.*, 2002). La proteína α -La purificada se utiliza muchas veces en fórmulas infantiles para lactantes (Marshall, 2004). También presenta una gran afinidad por el calcio y otros minerales como zinc, manganeso, cadmio, cobre y aluminio (Parra, 2009). Las albúminas de suero sanguíneo se derivan de la circulación sanguínea de la vaca, y no son sintetizadas por la glándula mamaria. La concentración de albúmina de leche aumenta durante la mastitis y durante la involución mamaria. La función de estas proteínas en la leche es desconocida (Walzem *et al.*, 2002).

Las inmunoglobulinas (Ig) son anticuerpos. Existen cinco clases de anticuerpos: IgA, IgD, IgE, IgG e IgM. IgG constituye, aproximadamente, el 75% de los anticuerpos en un adulto; se transfiere de la madre al niño en el útero a través de la sangre y en la lactancia materna, sirve como una primera línea de defensas inmune para el niño, conocida como "inmunidad pasiva". El calostro contiene concentraciones significativamente mayores de inmunoglobulinas, con respecto a la leche madura. Del mismo modo, la fracción de suero de leche contiene una cantidad significativa de inmunoglobulinas, aproximadamente, del 10 al 15 % del total de las proteínas del suero de leche (Marshall, 2004).

La lactoferrina (LF) es un agente antioxidante no enzimático, encontrado en la fracción de suero de la leche, así como en el calostro. La lactoferrina de suero de leche se compone de, aproximadamente, 700 aminoácidos residuales y de una cadena de polipéptidos individuales con dos sitios de unión

para iones férricos. La concentración de lactoferrina en la leche bovina y calostro es de aproximadamente 0.2 mg/mL y 1.5 mg/mL, respectivamente. Las fuentes dietéticas principales de lactoferrina son la leche, el yogur, el queso y otros productos lácteos (Walzem *et al.*, 2002).

2.1. Propiedades nutricionales y funciones biológicas de las proteínas del suero de leche

Las proteínas del suero se han utilizado durante muchos años como suplementos alimenticios de alto valor nutritivo (Rhône-Poulenc, 1998), debido a su capacidad para proporcionar aminoácidos esenciales. El comportamiento de las proteínas de suero de leche en el intestino es muy distinto al de las caseínas. La caseína micelar forma coágulos dentro del estómago, lo que ralentiza su salida y aumenta su hidrólisis antes de entrar en el intestino delgado. Las proteínas de suero de leche son proteínas rápidas, llegan al yeyuno casi inmediatamente después de entrar en el estómago. Sin embargo, su hidrólisis en el intestino es más lenta que la de las caseínas. Esto causa que la digestión y la absorción se produzcan a través de una mayor longitud del intestino (Jovanovic *et al.*, 2005).

Debido a su contenido de aminoácidos esenciales, el valor biológico de las proteínas de suero de leche es alto comparado con el de otras proteínas. La calidad de la proteína se refiere a la capacidad para proporcionar nitrógeno en un patrón equilibrado de aminoácidos esenciales y no esenciales (Jovanovic *et al.*, 2005).

La razón de eficiencia proteica (PER) de una fuente de proteína, mide el aumento de peso de los animales jóvenes por gramo de proteína consumido durante un período de tiempo dado. Las proteínas del suero tienen proporcionalmente más aminoácidos que contienen azufre (cisteína, metionina) que las caseínas, lo que contribuye un mayor PER (3.5) comparado con el de las caseínas (2.6). Cualquier proteína con un PER de 2.5 se considera de buena calidad. Debido a que las proteínas del suero tienen un excedente relativo de algunos aminoácidos esenciales (lisina, treonina, metionina, isoleucina), son complementos eficaces de proteínas vegetales, que a menudo están limitadas en esos aminoácidos. Así, las proteínas de suero de leche tienen efectos favorables en muchas proteínas comunes, cuyo PER es menor a 2.5, como las de los cereales y las leguminosas (Walzem *et al.*, 2002).

Todas las proteínas del suero de leche tienen diferentes funciones biológicas. Entre los principales beneficios se destacan: prevención del cáncer (mama, colon y próstata), incremento de los niveles de glutatión (aumento de la vulnerabilidad de las células tumorales y el tratamiento de los pacientes

Tabla III. Funciones biológicas de las proteínas del suero de leche

Proteína	Función biológica	Referencias
β -Lactoglobulina	Transportador (retinol, palmitol, ácidos grasos, vitamina D y colesterol)	(Chatterton <i>et al.</i> , 2006; Puyol <i>et al.</i> , 1991; Wang <i>et al.</i> , 1997; Perez <i>et al.</i> , 1992; Warme <i>et al.</i> , 1974; Farrell <i>et al.</i> , 2004)
	Aumento de la actividad esterasa pregastrica	
	Transferencia de inmunidad pasiva	
	Regulación de la glándula mamaria en el metabolismo del fósforo	
α -Lactoalbúmina	Prevención del cáncer	(Marshall <i>et al.</i> , 2004; Chatterton <i>et al.</i> , 2006; Smithers, 2008; Markus <i>et al.</i> , 2002; Ganjam <i>et al.</i> , 1997)
	Síntesis de lactosa	
	Tratamiento de la enfermedad inducida por el estrés crónico	
Albuminas del suero	Función antimutagénica	(Walzem <i>et al.</i> , 2002; Marshall <i>et al.</i> , 2004; Madureira, 2007; Bosselaers <i>et al.</i> , 1994; Rodrigues <i>et al.</i> , 2009)
	Prevención del cáncer	
	Immunomodulación	
Inmunoglobulinas	Prevención y tratamiento de diversas infecciones microbianas (infecciones de las vías respiratorias superiores, gastritis, caries dental, diarrea, entre otras)	(Mehra <i>et al.</i> , 2006; Pan <i>et al.</i> , 2006)
Lactoferrina	Actividades antibacterianas, antivirales, antifúngicas.	(El-Fakharany <i>et al.</i> , 2008; Madureira <i>et al.</i> , 2007; Pan <i>et al.</i> , 2006; Rodrigues <i>et al.</i> , 2009; Smithers, 2008; Wakabayashi <i>et al.</i> , 2006)
	Evita varias infecciones microbianas y varios tipos de cáncer	
	Actividad prebiótica	
Lactoperoxidasa	Biocidas y actividades biostáticas	(Boots y Floris, 2006; Smithers, 2008)
	Prevención de cáncer de colon y cáncer de piel	
Glicomacropéptidos	Interacción con toxinas, virus, y bacterias (mediada por la fracción de carbohidratos)	(Thoma-Worringer <i>et al.</i> , 2006; Aimutis <i>et al.</i> , 2004; Matin y Otani, 2000)
	Control de la formación de ácido en la placa dental	
	Actividad inmunomoduladora	
Osteopontina	Mineralización ósea, se utiliza para el tratamiento del cáncer	(Rodrigues <i>et al.</i> , 2009)
Proteasas peptonas	Efectos inmunoestimulantes	(Sugahara <i>et al.</i> , 2005; Aimutis, 2004; Grey <i>et al.</i> , 2003)
Prevención de la caries		

Adaptado de Mendes da Silva (2011).

con VIH), actividades antimicrobianas y antivirales, incremento de la respuesta de saciedad, efectos inmunomoduladores y actividad prebiótica (Marshall, 2004). En la Tabla 3 se presentan las funciones biológicas de las distintas suero proteínas.

Los trabajos realizados en ratas con tumores de colon inducidos con el carcinógeno azoximetano, han demostrado la actividad antitumoral de las proteínas del suero de leche; esto a partir de tratamientos de suplementación de lactoferrina purificada a dosis variables (2.0 y 0.2 g de lactoferrina durante 36 semanas). Los resultados mostraron una reducción en la incidencia de estos tumores, así como en el número de adenocarcinomas. En concreto, la aparición de tumores fue de 15 y 25%, respectivamente, para los tratamientos, frente al 57% en el grupo control (Sekine *et al.*, 1997).

Diversos trabajos han evaluado la capacidad de prevenir la formación de úlceras pépticas en animales por las proteínas del suero y sus péptidos, demostrando de esta manera la actividad gastroprotectora de éstas. Las úlceras se indujeron mediante dosis ulcerogénicas de etanol y de antiinflamatorio indometacina y los tratamientos se aplicaron a grupos de ocho animales. Se demostró que las propiedades inmunomoduladoras de las proteínas del suero dependían fundamentalmente de su estructura primaria (secuencia de aminoácidos) y de la riqueza de cisteína/cistina, principalmente de la lactoalbúmina, inmunoglobulinas, lactoferrina y albúmina de suero bovina (Bertoldo *et al.*, 2006).

La actividad inmunomoduladora de las proteínas del suero de leche se ha evaluado mediante la estimulación en la pro-

ducción de anticuerpos y el aumento de los niveles de glutatión, medidos en el hígado. Los resultados de este estudio confirmaron la habilidad de estas proteínas y sus hidrolizados para estimular la síntesis de glutatión en el hígado de ratones, al igual que la producción de anticuerpos (Bertoldo *et al.*, 2006).

Bounous en el 2000, en un estudio realizado con ratas alimentadas con una dieta con proteínas del suero como fuente proteica, encontró que la respuesta inmune fue cinco veces mayor que en dietas con caseína o caseína con cisteína suplementada. Este estudio demuestra que ese incremento de respuesta inmune está acompañado de un aumento en la producción de glutatión en el bazo durante la expansión linfocitaria.

Se han llevado a cabo muy pocos estudios en humanos. Al contrario que en células normales, las proteínas del suero podrían disminuir las concentraciones de glutatión en células cancerosas, se considera que podría ser útil administrar este tipo de proteínas para disminuir las concentraciones de glutatión y así hacer más vulnerables las células cancerosas a la acción de la quimioterapia. Por otro lado, tras administrar durante tres meses a tres individuos VIH-sero-positivos un suplemento de proteínas de suero de leche, se encontró un incremento de los valores sub óptimos de glutatión de las células mononucleares sanguíneas (Bounous, Baruchel, Falutz y Gold, 1993).

La proteína con mayor número de propiedades es la lactoferrina. Se ha visto que puede presentar actividad bacteriostática frente a un gran número de organismos. Un estudio realizado a partir de 150 individuos infectados con *H. pylori*, demostró que al proporcionarle a los pacientes un tratamiento con dosis variables de antibiótico de 200 mg de lactoferrina encapsulada, durante 7 a 10 días, disminuía hasta un 100% la infección; mientras que con el tratamiento básico la disminución era del 77% (Di Mario, Aragona, y Dal Bo, 2003).

La actividad antiviral de la lactoferrina se evaluó en pacientes portadores de la hepatitis C, donde 11 pacientes infectados recibieron dosis de lactoferrina de 1.8 y 3.6 g por día. Al finalizar el tratamiento (8 semanas), se observó una reducción en la concentración de alanina transferasa y en el ARN del virus de la hepatitis C, en el 75% de los pacientes, los cuales presentaron una elevada concentración al inicio del tratamiento (Sekine *et al.*, 1997).

2.2. Procedimientos para la recuperación de las proteínas del suero

Desde la década de 1990, se ha realizado la separación del conjunto de proteínas de la lactosa, a partir de soluciones de lactosuero, utilizando el proceso filtración tangencial con mem-

branas (Marshall y Harper, 1988; Alkhatim *et al.*, 1998; Brans, Schroën, Sman, y Boom, 2004; Etzel, 2004). Este proceso consiste en concentrar las proteínas y permear la lactosa a través de membranas de microfiltración y ultrafiltración, recuperando en dos corrientes de salida estos componentes. A su vez, las soluciones de lactosa han sido tratadas con membranas de nanofiltración para separar lactosa de las sales minerales, completando el fraccionamiento del lactosuero y recuperando tres productos importantes y reusables en la industria (Muro *et al.*, 2010).

También existen otros métodos de recuperación en los cuales no se utilizan membranas, como el método de intercambio iónico; éste se basa en el uso de resinas especiales con carga iónica inversa a la carga de las proteínas. Una vez que las proteínas han sido atraídas por la resina y separadas así de la grasa, la lactosa y los minerales, la carga de dichas resinas es nuevamente invertida para provocar su separación de las proteínas. Este método genera un producto con alta concentración de proteína (90 - 92%), muy baja en grasa y en lactosa, pero desafortunadamente se pierden una gran parte de las microfracciones bioactivas del suero, especialmente las microfracciones lactoferrina, lactoperoxidasa y lisozima (Acero, Benítez, Leal y Real, 2006). A partir de estos procesos de separación de la proteína, se han creado diversos productos como los concentrados, aislados e hidrolizados de proteínas. Los concentrados de proteína surgen a partir de la ultrafiltración. El concentrado del suero de leche es generalmente clasificado como el más básico de los tipos de proteínas de suero de leche (Muro *et al.*, 2010).

El contenido de proteína en los concentrados puede variar considerablemente, entre el 35 y el 85%, por lo que existe una enorme diferencia en la calidad de los distintos polvos de concentrado de proteína de suero de leche. Esto depende de la magnitud de la filtración. Los más conocidos tienen entre 68 y 80%. Es un producto menos costoso que el aislado de proteínas de suero de leche o que el hidrolizado (Etzel, 2004).

El aislado de proteína de suero se somete a un procesamiento más fino, por lo que la proteína es más pura que la del concentrado. La mejoría en la calidad de la proteína puede ocurrir por un tiempo de filtrado más largo o por el proceso de cromatografía de intercambio iónico (Bounous, 2000). Si el concentrado y el aislado pasan por un proceso de hidrólisis, las cadenas de proteínas más largas se descomponen en péptidos menores. Como se mencionó anteriormente, el suero de leche está formado por polipéptidos bastante cortos, pero esta hidrólisis los hace aún más pequeños y es un proceso semejante a una pre-digestión de las proteínas (Muro *et al.*, 2010).

3. Alimentos funcionales elaborados con proteínas de suero de leche

En la actualidad, la salud es una de las principales razones que determinan la selección de alimentos por los consumidores conscientes de los efectos potenciales de la dieta sobre la prevención de enfermedades y el bienestar (Bogue y Ryan, 2000). Los alimentos que, de manera específica, pueden contribuir activamente a un buen estado de salud, además de cubrir las necesidades nutricionales, se denominan “alimentos funcionales”. El Programa Europeo de la Ciencia de los Alimentos Funcionales, financiado por la Unión Europea (UE) y dirigido por el Instituto Internacional de Ciencias de Vida (ILSI), los define de la siguiente manera (Diplock *et al.*, 1998): “Un alimento puede considerarse “funcional” si está demostrado satisfactoriamente que puede afectar beneficiamente a una o más funciones en el cuerpo más allá de los efectos nutricionales, de manera que sea relevante, como una mejora del estado de salud y bienestar y/o una reducción del riesgo de enfermedad”. Actualmente, la mayoría de los alimentos funcionales disponibles en el mercado son productos con base láctea, a los que se añade un componente funcional o ingredientes procedentes de la leche, obtenidos por concentración, por el metabolismo microbiano o por su transformación enzimática. Su éxito radica en las excelentes propiedades nutricionales de la leche. Los productos lácteos funcionales más comunes son aquellos que contienen bacterias probióticas. Las funciones prebióticas de productos de suero de leche son de importancia crítica para los fabricantes de productos de leche fermentada probióticos o nutracéuticos (Madureira *et al.*, 2007).

Cuando en la década de 1970 aparecieron fórmulas infantiles basadas en lactosuero, simulando la leche humana, la atención giró al desarrollo de estos productos (Wit, 2003). Este fue el inicio de las fórmulas infantiles mezclando cantidades iguales de leche descremada y lactosuero desmineralizado, y otros componentes como vitaminas, minerales, taurina y nucleótidos, entre otros (Sinha, Radha, Prakash y Kaul, 2007).

El principal problema con estos productos ha sido la utilización de la β -lactoglobulina. Esta proteína, ausente en la leche humana, ha demostrado ser una causa importante de alergia infantil, por lo cual limita el uso de la leche de bovinos como materia prima para la producción de leche para infantes. Sin embargo, varios productos comerciales destinados a alimentos infantiles están basados en la caseína de lactosuero y la mayoría de ellos tienen importantes cantidades de β -lactoglobulina (con tratamientos previos como la desnaturalización). Estas fórmulas han sido desarrolladas para infantes cuyo objetivo es bajar de peso, equilibrar balances de aminoácidos

para el crecimiento y regular el metabolismo (Wit, 2003; Sinha *et al.*, 2007).

Un efecto que ha sido observado en ratas alimentadas con proteínas de suero de leche, ha sido una ventaja en la resistencia en el ejercicio físico. Las reservas de glucógeno muscular y los niveles glucémicos fueron preservados después de alcanzarse el agotamiento físico del animal. Esta declaración condujo al descubrimiento de que el consumo de esas proteínas reducía el gasto acelerado de energía y el desgaste de las reservas corporales.

La utilidad de las proteínas del suero como suplemento de la dieta de deportistas está fundamentada en su alto contenido de aminoácidos de cadena lateral ramificada. Estos aminoácidos, son promotores del crecimiento muscular, regeneración de tejidos e incluso, reposición de la masa muscular en pacientes con SIDA (Lollo *et al.*, 2014).

La empresa Nestlé, hace algunos años dirigió estudios como parte del Programa de Nutrición Clínica y Desempeño de la Nutrición en donde se comparó la velocidad de digestión del suero de leche y la caseína en adultos mayores. Estos estudios demostraron que la velocidad de digestión proteica del suero de leche es más alta que la de la caseína. En otro estudio realizado en nueve adultos mayores voluntarios saludables, la síntesis y balance de proteína postprandial eran más altos con el suero de leche que con la caseína. La conclusión de estas pruebas fue que los suplementos a base de suero de leche inducen mayor síntesis y balance de proteína que los suplementos a base de caseína. Investigadores de Nestlé diseñaron para los pacientes con función gastrointestinal complicada un producto alimenticio de patente (Peptamen) a base de péptidos, para nutrición entérica, que contenía proteínas hidrolizadas de suero de leche y triglicéridos de cadena media. El suero de leche se seleccionó por su alto contenido de cisteína (precursor de glutatióna y la glutamina), alto contenido de aminoácidos de cadena ramificada (precursores de glutamina) y bajo contenido de arginina (promueve la síntesis del glutamina) (Lloyd, 2002).

Se han desarrollado varias hipótesis acerca del efecto benéfico de la glutamina en diversas situaciones clínicas. Se sabe que la concentración de glutamina se ve disminuida en estados catabólicos. Otros papeles importantes de la glutamina incluyen ser fuente de energía para las células de rápido reemplazo (células inmunes y células intestinales), y su habilidad de limitar la atrófia de la mucosa y de reforzar la barrera del intestino. Estudios en animales mostraron que el incremento en peso y concentración de la glutamina en el plasma y el músculo, después de una inanición seguida de realimentación, era superior al utilizar los productos de patente a base de suero

de leche en comparación a dietas control a base de soya o de mezclas del aminoácido simple. Según estos estudios, las proteínas del suero de leche, aunque contienen un nivel relativamente bajo de glutamina, son las más eficaces en la mejora del estado de la glutamina (Lloyd, 2002).

Las proteínas de suero hidrolizadas contienen un alto nivel de péptidos bioactivos y complejos minerales de leche. Estos dos ingredientes muestran ciertos componentes promisorios para el desarrollo de alimentos funcionales, destinados a mejorar la salud cardiovascular. Las proteínas de suero de leche pueden ser además utilizadas como componentes en otros alimentos, tales como bebidas lácteas fermentadas o en productos con contenidos altos de ácido linoleico conjugado (CLA por sus siglas en inglés), productos que podrían estar diseñados para una nueva generación de productos lácteos, diseñados para promover la salud cardiovascular (Walzem, 2002).

Conclusión

Debido a las grandes cantidades de queso que son producidas a nivel mundial, el suero de leche ha generado un problema de contaminación ambiental.

Estudios en animales y humanos sugieren que la proteína de suero de leche y sus componentes pueden tener efectos beneficiosos. Éstos incluyen actividad antimicrobiana y antiviral, la actividad inmune-modulación, actividad anti-cáncer y beneficios para la salud cardiovascular. Por tal motivo, el suero de leche puede ser considerado para la elaboración de alimentos funcionales.

Agradecimientos

La autora M. Hernández-Rojas agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP), por el apoyo y financiamiento de sus estudios de posgrado.

Referencias

- Abd El-Salam, M.H., El-Shibiny, S. y Salem, A. (2009). Factors affecting the functional properties of whey protein products: a review. *Food Reviews International*, 25(3), 251-270.
- Acero, J. L., Benítez F. J., Leal A.I. y Real F. J. (2006). Removal of phenolic compounds in water by ultrafiltration membrane treatments. *Journal of Environmental Science*, 40(8), 1585-1603.
- Aimutis, W. (2004). Bioactive properties of milk proteins with particular focus on anticariogenesis. *Journal of Nutrition*, 134(4), 989-995.
- Alkhatim, H.S., Alcaina M.I., Soriano E., Iborra M. I., Lora J. y Arnal J. (1998). Treatment of whey effluents from dairy industries by nanofiltration membranes. *Desalination*, 119(1), 177-183.
- Begoña, A. y Jiménez, F. (2014). Alimentos cárnicos funcionales; desarrollo y evaluación de sus propiedades saludables. *Nutrición Hospitalaria*, 29(6), 1197-1209.
- Bertoldo, P., Bighetti, E., Antônio, M., Carvalho, J., Possenti, A. y Sgarbieri, V. (2006). Antiulcerogenic activity of fraction and hydrolysate obtained from whey protein concentrate. *Brazilian Journal of Food Technology*, 10(2), 15-22.
- Bogue, J. y Ritson, C. (2000). Market-oriented new product development: functional foods and the Irish consumer. *Department of Food Economics, Agribusiness Discussion P*, 27, 1-35.
- Boots, J. y Floris, R. (2006). Lactoperoxidase: from catalytic mechanism to practical applications. *International Dairy Journal*, 16(11), 1272-1276.
- Bosselaers, I., Caessens, P., Van Boekel, M. y Alink, G. (1994). Differential effects of milk proteins, BSA and soy protein on 4NQO- or MNNG- induced SCEs in V79 cells. *Food and Chemical Toxicology*, 32(10), 905-911.
- Bounous, G. (2000). Whey protein concentrate (WPC) and glutathione modulation in cancer treatment. *Anticancer Research*, 20(6C), 4785-4792.
- Bounous, G., Baruchel, S., Falutz, J. y Gold, P. (1993). Whey proteins as a food supplement in HIV-seropositive individuals. *Clinical and Investigative Medicine*, 16(3), 2004-2009.
- Brans, G., Schroën, C.G.P.H., Sman, R.G.M. y Boom, R. (2004). Membrane fractionation of milk: state of the art and challenges. *Journal of Membrane Science*, 243(1-2), 263-272.
- Callejas, J., Prieto, F., Reyes, V. E., Marmolejo, Y. y Méndez, M. A. (2012). Caracterización fisicoquímica de un lactosuero:

- potencialidad de recuperación de fósforo. *Acta Universitaria*, 22(1), 11-18.
- Chartterton, D., Smithers, G., Roupas, P. y Brodkorb, A. (2006). Bioactivity of β -lactoglobulin and α -lactalbumin-technological implications for processing. *International Dairy Journal*, 16(11), 1229-1240.
- Di Mario, F., Aragona, G. y Dal Bo, N. (2003). Use of bovine lactoferrin for *Helicobacter pylori* eradication. *Digestive and Liver Disease*, 35(10), 706-710.
- Diplock, A.T., Charleux, J.L., Crozier-Willi, G., Kok, F.J., Rice-Evans, C., Roberfroid, M., Stahl, W. y Viña-Ribes, J. (1998). Functional food science and defense against reactive oxidative species. *British Journal of Nutrition*, 80(1), 77-112.
- El-Fakharany, E. M., Tabll, A., El-Wahab, A. A., Haroun, B. M. y Redwan, E. (2008). Potential activity of camel milk-amylase and lactoferrin against hepatitis C virus infectivity in HepG2 and lymphocytes. *Hepatitis Monthly*, 8(2), 101-109.
- Etzel, M. R. (2004). Manufacture and use of dairy protein fractions. *The Journal of Nutrition*, 134(4), 996-1002.
- Farrell, H., Jimenez, R., Bleck, T., Brown, E., Butler, J., Creamer, L., Hicks, C., Hollae, C., Ng-Kwai-Hang, K. y Swaisgood, H. (2004). Nomenclature of proteins of cow's milk: sixth revision. *Journal of Dairy Science*, 87(6), 1641-1674.
- Ganjam, L., Thornton, W., Marshall, R. y MacDonald, R. (1997). Antiproliferative effects of yogurt fractions obtained by membrane dialysis on cultured mammalian intestinal cells. *Journal of Dairy Science*, 80(10), 2325-2339.
- Grey, V., Mohamed, S. R., Smountas, A. A., Bahlool, R. y Lands, L. C. (2003). Improved glutathione status in young adult patients with cystic fibrosis supplemented with whey protein. *Journal of Cystic Fibrosis*, 2(4), 195-198.
- Guerrero, J. R., Ramirez, A. L. y Puente, W. (2011). Caracterización del suero de queso blanco del combinado lácteo santiago. *Tecnología Química*, 31(3), 93-100.
- Jelen, P. (2003). Whey processing. Utilization and products. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 4, 2739-2745.
- Jovanovic, S., Barac, M. y Macej, O. (2005). Whey proteins-Properties and Possibility of Application. *Mljekarstvo*, 55(3), 215-233.
- Lloyd, B. B. (2002). *Whey Child Nutrition_Spanish. El suero de leche de los Estados Unidos y la nutrición infantil*. Recuperado el 15 de Octubre del 2014, de U. S. Dairy Export Council: http://www.usdec.org/files/pdfs/2008monographs/wheychildnutrition_spanish.pdf
- Lollo, P.C.B., Amaya-Farfan, J., Faria, I.C., Salgado, J.V.V., Cha- con-Mikahil, M.P.T., Cruz, A.G., Oliveira, C.A.F., Montagner, P.C. y Arruda M. (2014). Hydrolysed whey protein reduces muscle damage markers in Brazilian elite soccer players compared with whey protein and maltodextrin. A twelve-week in-championship intervention. *International Dairy Journal*, 34(1), 19-24.
- Londoño, M. (2006). Aprovechamiento del suero ácido de queso doble crema para la elaboración de queso utilizando tres métodos de complementación de acidez con tres ácidos orgánicos. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 16(1), 11-20.
- Madureira, A. R., Pereira, C., Gomez, A., Pintado, M. y Malcata, F. (2007). Bovine whey proteins: overview on their main biological properties. *Food Research International*, 40(10), 1197-1211.
- Markus, C. R., Oliver, B. y H. F. de Haan, E. (2002). Whey protein rich in α -lactalbumin increases the ratio of plasma tryptophan to the sum of the other large neutral amino acids and improves cognitive performance in stress-vulnerable subjects. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 75(6), 1051-1056.
- Marshall, K. (2004). Therapeutic applications of whey protein. *Alternative Medicine Review*, 9(2), 136-156.
- Marshall, K. R. y Harper W. J. (1988). Whey protein concentrates. *Bulletin of the International Dairy Federation*, 233, 22-32.
- Matin, M. A. y Otani, H. (2000). Release of cytotoxic glycopeptides from human acid casein fraction by the action of stomach proteinases. *Milchwissenschaft*, 55(1), 6-10.
- Mehra, R., Marnila, P. y Korhonen, H. (2006). Milk immunoglobulins for health promotion. *International Dairy Journal*, 16(11), 1262-1271.
- Mendes da Silva, L. (2011). Potential applications of whey proteins in the medical field. En J. S. Reis, J. A. Teixeira, *Engineering Aspects of Milk and Dairy Products* (págs 221-252). Braga, Portugal: Taylor & Francis.
- Morr, C. y Ha, E. Y. (1993). Whey protein concentrates and isolates: processing and functional properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(6), 431-439.
- Muro, C., Díaz, C., García, B., Zavala, R. E., Ortega, R. E., Álvarez, R. y Riera, F. (2010). Recuperación de los componentes del lactosuero residual de una industria elaboradora de queso utilizando membranas. *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada*, 67(547), 212-220.
- Pan, Y., Lee, A., Wan, J., Coventry, M. J., Michalski, W. P., Shieff, B. y Roginski, H. (2006). Antiviral properties of milk proteins and peptides. *International Dairy Journal*, 16(11), 1252-1261.

- Panesar, P., Kennedy, D., Gandhi, D. y Bunko, K. (2007). Bioutilsation of whey for lactic acid production. *Food Chemistry*, 105(1), 1-14.
- Parra, R. A. (2009). Lactosuero: Importancia en la industria de alimentos. *Revista de la Facultad Nacional de Agricultura de Medellín*, 62(1), 4967-4982.
- Perez, M. D., Sanchez, L., Aranda, P., Ena, J., Oria, R. y Calvo, M. (1992). Effect of β -lactoglobulin on the acidity of pre-gastric lipase. *A possible role for this protein rummiant milk*. *Biochim Biophysica Acta*, 1123(2), 151-155.
- Pescumma, M., E. Hérbet, F. Mozzi y G. Font. (2008). Whey fermentation by thermophilic lactic acid bacteria: Evolution of carbohydrates and protein content. *Food Microbiology*, 25(3), 442-451.
- Poveda, E. (2013). Suero lácteo, generalidades y potencial uso como fuente de calcio de alta biodisponibilidad. *Revista Chilena de Nutrición*, 40(4), 397-403.
- Puyol, P., Pérez, M., Ena, J. y Calvo, M. (1991). Interaction of β -lactoglobulin and other bovine and human whey proteins with retinol and fatty acids. *Agricultural and Biological Chemistry*, 55(10), 2515-2520.
- Rhône-Poulenc, M. (1998). Nutritional and functional characteristics of whey proteins in food products. *Journal of Dairy Science*, 81(3), 597-608.
- Rodrigues, L., Teixeira, J., Schmitt, F., Paulsson, M. y Lindmark Masson, H. (2009). Lactoferrin and cancer disease prevention. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(3), 1-15.
- Sekine, K., Ushida, Y., Kuhara, T., Ligo, M., Baba-Toriyama, H., Moore, M. A., Murakoshi, M., Satomi, Y., Nishino, H., Kakinoe, T. y Tsuda, H. (1997). Inhibition of initiation and early stage development of aberrant crypt foci and enhanced natural killer activity in male rats administered bovine lactoferrin concomitantly with azoxymethane. *Cancer Letters*, 143(2), 211-216.
- Sinha, R., C. Radha, J. Prakash y P. Kaul. (2007). Whey protein hydrolysate: Functional properties, nutritional quality and utilization in beverage formulation. *Food Chemistry*, 101(4), 1484-1491.
- Smithers, G. (2008). Whey and whey proteins - From 'gutter-to-gold'. *International Dairy Journal*, 18(7), 695-704.
- Sugahara, T., Onda, H., Shinohara, Y., Horii, M., Akiyama, K., Nakamoto, K. y Hara, K. (2005). Immunostimulation effects of proteose-peptone component 3 fragment on human hybridomas and peripheral blood lymphocytes. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*, 1725(2), 445-499.
- Thoma-Worriinger, C., Sorensen, J. y López-Fandiño, R. (2006). Health effects and technological features of caseinomacopeptide. *International Dairy Journal*, 16(11), 1324-1333.
- Wakabayashi, H., Yamauchi, K. y Takase, M. (2006). Lactoferrin research, technology and applications. *International Dairy Journal*, 16(11), 971-981.
- Walzem, R. L., Dillard, C. J. y German, J. B. (2002). Whey components millenia of evolution create functionalities for mammalian nutrition what we know and what we may be overlooking. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 42(4), 353-375.
- Wang, Q., Allen, J. y Swaisgood, H. (1997). Binding of vitamin D and cholesterol to β -lactoglobulin. *Journal Dairy Science*, 80(6), 1054-1059.
- Warme, P., Momany, A., Rumball, S., Tuttle, R. y Scheraga, H. (1974). Computation of structures of homologous proteins. α -Lactalbumin from lysozyme. *Biochemistry*, 13(4), 768-772.
- Wit, J. (2003). Dairy ingredients in non-dairy foods. En F. Francis, *Encyclopedia of Food Science and Technology* (págs. 718-727). New York: Wiley.

Métodos de secado de emulsiones alimentarias

N.I. Gómez-Cruz* y M.T. Jiménez-Munguía

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla.

Ex hacienda Sta. Catarina Mártir, C.P.72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

RESUMEN

Algunos compuestos alimentarios pueden emulsionarse y posteriormente deshidratarse para mejorar su estabilidad, obteniéndose sólidos encapsulados y estables. Los métodos de secado para emulsiones más empleados son la liofilización y el secado por atomización. En el secado por atomización un producto líquido es atomizado en una corriente de aire caliente produciendo instantáneamente un polvo. La liofilización se fundamenta en la sublimación del disolvente y es un proceso que se divide en tres etapas principales: congelación, secado primario y secado secundario. En esta revisión se presentan las características de los métodos de liofilización y secado por atomización, haciendo énfasis en las condiciones de estos procesos que conllevan a la protección y estabilidad del compuesto emulsionado. Sin embargo, estas condiciones no se pueden generalizar debido a que influyen diversos factores, tanto intrínsecos como extrínsecos, de la emulsión de interés.

Palabras clave: emulsiones, secado por atomización, liofilización, encapsulación.

ABSTRACT

Several food compounds can be emulsified and then dehydrated, to enhance its stability producing encapsulated and stable solids. The most common drying methods for food emulsions are spray-drying and freeze-drying. In spray-drying, a liquid product is atomized in a hot air stream to produce a powder, almost instantly. Freeze-drying is based on the sublimation process of the solvent and is divided into three main steps: freezing, primary drying and secondary drying. This review presents characteristics of freeze-drying and spray-drying techniques, focusing in the operating conditions that influence the final product protection and stability. However, these conditions cannot be generalized since they are closely related to several factors, intrinsic as well as extrinsic, of the studied emulsion.

Keywords: emulsions, spray-drying, freeze-drying, encapsulation.

 Programa de Maestría
en Ciencia de Alimentos
Tel.: +52 222 229 2126
Fax: +52 222 229 2727
Dirección electrónica:
norma.gomezcz@udlap.mx

Introducción

Las emulsiones se han empleado en la vida cotidiana desde hace mucho tiempo aún sin saber que se trataba de este tipo de sistemas, debido a que son de gran utilidad y presentan diversas aplicaciones, siendo el área alimentaria una de las principales.

El secado de emulsiones se ha empleado para la protección y el control de la liberación de componentes alimentarios. Este método permite transformar la emulsión líquida en un polvo fino que contiene al compuesto dentro de las partículas de polvo. Esto se logra mediante la remoción de agua a través de métodos de secado, que son adecuados para emulsiones (Gharsallaoui, Roudaut, Chambin, Voilley y Saurel, 2007). Existen diferentes métodos de secado así como muchas modificaciones de los mismos. El método que se elija depende del tipo de componente alimentario que se va a deshidratar, de la calidad que se puede alcanzar y del costo que se puede justificar (Elías, 2012).

Un ejemplo de la aplicación del secado de emulsiones se tiene en la industria de los sabores, estos compuestos deshidratados presentan una buena estabilidad química y se puede controlar su liberación. Lo mismo aplica para otro tipo de compuestos lipídicos ya que éstos son susceptibles a la auto-oxidación, si no se protegen adecuadamente del ambiente se pueden degradar muy rápido, pueden desarrollar sabores desagradables, reducir su bioactividad o generar compuestos tóxicos. Mediante el secado de estos compuestos presentes en una emulsión se puede retardar la auto-oxidación, incrementar su estabilidad, controlar la liberación de compuestos liposolubles o enmascarar sabores y/o aromas (Fang y Bhandari, 2012).

El objetivo de esta revisión es dar a conocer los principales métodos de secado de emulsiones alimentarias, haciendo énfasis en el secado por atomización y en ciertas condiciones de este proceso que conllevan a la protección y estabilidad del compuesto alimentario de interés que se encuentra emulsionado, así como mencionar las ventajas que tiene el secado de emulsiones en las propiedades del producto final.

rales como procesados, son emulsiones o han estado emulsionados en alguna etapa de su producción. Algunos ejemplos son la leche, la crema, las bebidas de frutas, las fórmulas infantiles, las sopas, las mezclas para panificación, los aderezos, la mayonesa, algunas salsas y algunos postres, los helados, algunos productos untados, la mantequilla y la margarina, por citar algunos (McClements, 2005). Otras de estas aplicaciones se han utilizado para encapsular compuestos como aceites esenciales, por ejemplo el de orégano (Alvarenga *et al.*, 2012), romero (De Barros, Vilela y Alvarenga, 2013) y mandarina (Bringas-Lantigua, Expoósito-Molina, Reineccius, López-Hernández y Pino, 2011). También se considera la microencapsulación de sabores como el de café (Frascareli, Silva, Tonon y Hubinger, 2012), aceite de pescado (Wan, Bankston, Bechtel y Sathivel, 2011) y el *d*-limoneno (Jafari, He y Bhandari, 2007).

Las emulsiones se definen como mezclas coloidales que constan de dos fluidos inmiscibles entre sí, donde uno de ellos se encuentra disperso en el otro en forma de gotas muy finas, y este sistema se encuentra estabilizado mediante un agente emulgente (McClements, 2005; Charcosset, 2009; Quintanilla-Carvajal *et al.*, 2009). La fase que está presente como finas gotas se llama fase dispersa y la fase en la cual están suspendidas las gotas se conoce como fase continua (Singh, Kumar, Bilandji y Sachdeva, 2012). Con base en la naturaleza de las fases (oleosa o acuosa) las emulsiones se dividen comúnmente en dos tipos: aceite en agua (O/W, por sus siglas en inglés) y agua en aceite (W/O, por sus siglas en inglés). Las emulsiones O/W se forman cuando la fase oleosa está dispersa en la fase continua acuosa. Por el contrario, en las emulsiones W/O la fase acuosa está dispersa y la fase oleosa sirve como fase continua. También existen las emulsiones múltiples, las cuales son sistemas de dispersiones más complejas. Este tipo de emulsiones se obtienen mediante un proceso llamado de doble emulsificación por lo tanto, estos sistemas también se pueden llamar emulsiones dobles y pueden ser de dos tipos: aceite en agua en aceite (O/W/O) y agua en aceite en agua (W/O/W) (Mahato, 2007; Singh *et al.*, 2012).

Tomando en cuenta el tamaño de gota de la fase dispersa, las emulsiones se pueden clasificar en micro (10-100 nm), mini (100-1000 nm) y macroemulsiones (0.5-100 μ m) (Windhab, Dressler, Fiegl, Fischer y Megias-Alguacil, 2005). La conversión de dos fases inmiscibles en una emulsión, o bien la reducción del tamaño de gota de la fase dispersa, se alcanza por el proceso de homogenización. Algunos métodos convencionales que se emplean para su preparación son básicamente equipos de agitación, molinos coloidales, homogeneizadores, ultrasonidos o microfluidizadores (Charcosset, 2009).

Revisión bibliográfica

1. Importancia de las emulsiones en los productos alimenticios

Las emulsiones tienen aplicaciones importantes en la industria alimentaria, ya que un gran número de alimentos, tanto natu-

Una de las principales características de las emulsiones alimentarias es su estabilidad, la cual se refiere a la capacidad de resistir cambios en sus propiedades al transcurrir el tiempo. La estabilidad se puede perder por diversos factores ambientales, químicos, físicos y microbiológicos (Donz, Boiron y Courthaudon, 2014), aunque algunas emulsiones alimentarias se forman sólo como paso intermedio de algún proceso de manufactura, entonces sólo necesitan permanecer estables, algunos segundos minutos u horas, en cambio otras deben permanecer estables durante todo el tiempo de su vida útil. El periodo en el que una emulsión puede mantenerse estable depende de la naturaleza del producto alimenticio (McClements, 2005). Es difícil mantener la estabilidad de una emulsión y se han realizado intentos para mejorar su estabilidad, utilizando emulgentes, sales y polímeros en su preparación (Márquez, Medrane, Panizzolo y Wagner, 2010). Entre los mecanismos físicos de desestabilización se encuentran fenómenos como la migración de partículas (cremado o sedimentación) y la variación del tamaño de partícula o agregación (coalescencia o floculación). Aunque la tendencia natural de las emulsiones es la coalescencia, la velocidad de este fenómeno dependerá principalmente del tamaño de gota de la emulsión y de la composición de las fases (Windhab *et al.*, 2005; Thivillieris, Drelon, Schmith y Leal-Calderon, 2006; Herrera, 2012). Como las mini y microemulsiones han alcanzado una estabilidad en almacenamiento muy satisfactoria, se ha tenido un interés particular de utilizarlas como sistemas para la encapsulación y liberación de sustancias bioactivas (Herrera, 2012).

2. **Métodos de secado de las emulsiones alimentarias**

El secado de las emulsiones alimentarias es un proceso de gran importancia primordialmente desde el punto de vista de la encapsulación de compuestos (Gouin, 2004). Las técnicas más comunes para estos fines involucran la preparación de una emulsión de aceite en una fase acuosa que incluye agua y materiales solubles, seguido de algún proceso físico como el secado, para convertir esta suspensión a una forma estable y seca. Las cápsulas obtenidas se pueden clasificar de acuerdo al tamaño de partícula, siendo macrocápsulas cuando son mayores de 5000 μm , microcápsulas cuando se encuentran entre 0.1 y 5000 μm y nanocápsulas cuando son menores de 0.1 μm (Murugesan y Orsat, 2012). Los métodos de secado que se emplean comúnmente son la liofilización y el secado por atomización (Choi, Briancon, Andrieu, Min y Fessi, 2004; Abdelwahed, Degobert, Trainmesse y Fessi, 2006; Kaushik y Roos, 2008).

2.1. **Liofilización**

La liofilización es un proceso de secado multi-etapa y se divide en tres etapas principales: congelación, secado primario (sublimación) y secado secundario (etapa de desorción) (Oetjen y Haseley, 2004; Figueiredo, Polakiewicz y Nogueir, 2008; Singh y Heldman, 2009).

Antes del secado, el compuesto de interés se emulsifica. En este método de secado el material de cobertura no debe perjudicar su misma solución antes de congelarse; debe mantener las propiedades deseadas aun después de la congelación y secado; y su vida de almacenamiento debe ser adecuada bajo condiciones convencionales. Los materiales de cobertura utilizados comúnmente son proteínas, maltodextrinas, disacáridos, gomas y quitosano. Además de éstos, se emplean también crioprotectores como sacarosa, trealosa y manitol para conservar el tamaño de partícula y también evitar la agregación durante el secado. La emulsión formada se congela a temperaturas entre -20 °C y -40 °C para alcanzar la máxima cristalización del agua junto con algunos sólidos solubles y componentes lipídicos (Fang y Bhandari, 2012; Ezhilarasi, Karthik, Chanwal y Anandharamakrishnan, 2013).

La etapa de secado primario se realiza para transmitir la energía necesaria y transformar el hielo en vapor de agua en condiciones de baja presión. El vapor de agua formado se remueve de la superficie del producto mediante sublimación, desde la cámara de secado hacia el sistema de condensación (serpentín de condensación). En la etapa de secado secundario se transmite la energía para remover el agua residual absorbida (ligada, incongelable) en los sólidos, la cual no se separó como hielo durante la congelación y tampoco se sublimó (Oetjen y Haseley, 2004).

Las condiciones de operación del proceso son determinantes para la calidad del producto final. La etapa de congelación puede afectar la textura de la matriz congelada y por lo tanto afecta las características morfológicas del polvo obtenido. A altas velocidades de enfriamiento se observa la formación de cristales pequeños de hielo, aunque no siempre es deseable porque podría causar una desestabilización de las partículas formadas en la emulsión, lo que puede generar problemas de redispersión del producto final. En la etapa primaria se deben controlar la presión y temperatura para evitar un colapso del producto. El periodo de mantenimiento de la segunda etapa es crucial para obtener un producto con un adecuado contenido de humedad, generalmente dura la mitad o el mismo tiempo que la etapa primaria (Oetjen y Haseley, 2004; Abdelwahed *et al.*, 2006; Fang y Bhandari, 2012).

Esta técnica de secado se utiliza para la deshidratación de la mayoría de materiales sensibles al calor y compuestos bioactivos, debido a las bajas temperaturas que se manejan (Anandharamakrishnan, Rielly y Stapley, 2010; Ezhilarsi *et al.*, 2013). Los productos liofilizados presentan una alta calidad, se reconstituyen fácilmente y conservan su vida por más tiempo. Sin embargo, el alto consumo de energía, el largo tiempo de procesamiento (alrededor de 20 horas) y los poros abiertos que se presentan en la estructura de estos productos, son los principales inconvenientes que resultan de la liofilización. Además, las estructuras irregulares y aplanasadas que favorecen la reconstitución de la emulsión también podrían comprometer la estabilidad oxidativa de los lípidos durante el almacenamiento (Figueiredo *et al.*, 2008; Singh y Heldman, 2009; Anwar y Kunz, 2011). Comparado con el secado por atomización, la liofilización es de 30-50 veces más costosa para la encapsulación de β -caroteno, por ejemplo, aunque el costo varía dependiendo del material a secar. Se ha probado que la liofilización convencional se usa ampliamente para remover agua de nanoemulsiones y formar nanocápsulas sin cambiar su estructura y forma (Claussen, Ustad, Strommen y Walde, 2007; Anandharamakrishnan *et al.*, 2010; Fang y Bhandari, 2012).

Algunos autores han utilizado la liofilización para secar emulsiones O/W, principalmente para la encapsulación de diferentes compuestos, por ejemplo oleoresinas de hinojo (fenchona, estargol, *trans*-anetol y *d*-limoneno) (Chranioti y Tzia, 2014), *R*-carvona (Kaasgaard y Keller, 2010), *d*-limoneno (Figueiredo *et al.*, 2008), entre otros.

2.2. Secado por atomización

El secado por atomización es utilizado ampliamente para producir alimentos como proteína de suero de leche, café instantáneo, leche, té, sopas, etc. Además, es la forma más común para la encapsulación de sabores, ingredientes alimenticios, compuestos bioactivos como las vitaminas y aceites esenciales (Soottitantawat *et al.*, 2004; Anandharamakrishnan, Rielly y Stapley, 2007; Sosa, Schebor y Pérez, 2014).

El secado por atomización es una operación unitaria mediante la cual un producto líquido se atomiza en una corriente de aire caliente para producir instantáneamente un polvo. Para el secado de emulsiones, previamente se necesita la formación de una emulsión de alimentación estable y esto depende de la naturaleza de los materiales con los que se forme la emulsión (Desai y Park, 2005; Augustin y Hemar, 2009; Zuidam y Shimoni, 2010).

Para obtener un proceso de secado exitoso es necesario tomar en cuenta diferentes parámetros o condiciones que

determinan en cierta medida su eficacia. Se ha investigado la relación entre los parámetros de proceso y la estabilidad del producto final, confirmando que las condiciones de operación son significativamente importantes (Anandharamakrishnan, Rielly y Stapley, 2008; Nakagawa, Surassmo, Min y Choi, 2011).

2.2.1. Factores a considerar en el proceso de secado

Antes de la etapa de secado, la emulsión formada debe ser estable en un cierto lapso, las partículas de aceite deben de ser pequeñas y debe tener una baja viscosidad para prevenir la inclusión de aire en la partícula. La viscosidad de la emulsión y su distribución del tamaño de partícula tienen efectos físicos significativos en el proceso de secado (Drusch, 2006; Gharshalaui *et al.*, 2007; Jafari, Assadpoor, He y Bhandari, 2008).

Las propiedades físicas del polvo obtenido se ven influenciadas por la naturaleza de la emulsión (contenido de sólidos, viscosidad y temperatura), tipo de atomizador, velocidad de operación y presión, y temperaturas de entrada y salida, entre otros (Reineccius, 2004; Yousefi, Emam-Djomeh y Mousavi, 2011; De Barros *et al.*, 2013). En la Tabla I se muestran algunas condiciones del proceso de secado que se consideran importantes, tales como el tipo de material de cobertura, la cantidad de la fase oleosa, la cantidad de sólidos totales en la emulsión, el tipo de compuesto de interés en la emulsión y las temperaturas de entrada y salida del proceso.

2.2.1.1. Contenido de sólidos totales

La influencia del contenido de sólidos en la emulsión de alimentación al secador se observa principalmente afectando su viscosidad (Reineccius, 2004); ésta puede influir en las corrientes de circulación de las gotas atomizadas, dichas corrientes permiten una formación más o menos rápida de una membrana semipermeable alrededor de las gotas durante el secado. En la encapsulación de compuestos un contenido alto de sólidos es recomendable, ya que así se disminuye la cantidad de agua a evaporar y es un aspecto económicamente importante, además se incrementa la retención de compuestos volátiles debido a la formación rápida de una membrana (Fernandes *et al.*, 2008). La viscosidad también puede afectar la capacidad de bombeo de la emulsión hacia el atomizador y por lo tanto afecta la velocidad de secado.

A pesar de que no existe una cantidad de sólidos estrictamente definida, se puede considerar que un valor adecuado de sólidos totales puede estar entre 20% y 40% para cada material de cobertura que forma parte de la emulsión. Cabe mencionar que los sólidos seleccionados para el proceso deben ser solubles en agua a un nivel aceptable, al menos 80%. La cantidad de só-

Tabla I. Condiciones del proceso de secado por atomización de emulsiones reportadas en los últimos años

Compuesto lipídico	% total de la fase olesoa	% sólidos totales en la emulsión	Material de cobertura	Temperatura (°C)		Referencia
				Te	Ts	
Aceite esencial de orégano	1	9	Almidón modificado, goma arábica y maltodextrina	185	NR	Alvarenga <i>et al.</i> , 2012
Aceite esencial de romero	6	24	Goma arábica	135	NR	De Barros <i>et al.</i> , 2013
Aceite esencial de mandarina	7	28	Goma arábica y maltodextrina	200	89	Bringas-Lantigua <i>et al.</i> , 2011
Aceite esencial de limón	7.5	30.5	Goma arábica y maltodextrina	220	85	Bringas-Lantigua <i>et al.</i> , 2012
Aceite esencial de alecrim-pimenta (<i>Lippia sidoides</i>)	10	50	Goma arábica y maltodextrina	160	NR	Fernandes <i>et al.</i> , 2008
Aceite de café	4.5	30	Goma arábica	170	NR	Frascarelli <i>et al.</i> , 2012
Aceite de pescado	6.7	11.1	Fibra soluble de arroz integral y caseinato de sodio	180	NR	Wan <i>et al.</i> , 2011
Aceite de girasol	10	20	Caseinato de sodio y lactosa; sacarosa, maltodextrina y gelatina	220	90	Holgado, Márquez-Ruiz, Docabarganes y Velasco, 2013
Extracto de semillas de calabaza (<i>Cucurbita pepo L.</i>)	33	37	Goma arábica y maltodextrina	180	90	López-Hernández <i>et al.</i> , 2009
Limoneno	10	40	Maltodextrina con almidón modificado o proteína de suero de leche o Tween 20	180	65	Jafari <i>et al.</i> , 2007
Citral	12.5	40	Almidón o maltodextrinas y sacarosa o trealosa	175	83	Sosa <i>et al.</i> , 2014

NR: No reportada

Te: Temperatura de entrada

Ts: Temperatura de salida

lidos totales en la emulsión puede variar dependiendo del tipo de material de cobertura que se haya seleccionado y la viscosidad que este aporte a la solución, además, depende del tipo de compuesto que se desea encapsular. Existen cantidades reportadas por algunos autores que pueden servir como guía, por ejemplo: 9% (Alvarenga *et al.*, 2012), 11.1% (Wan *et al.*, 2011), 24% (De Barros *et al.*, 2013), 37% (López-Hernández, Márquez, Mayo, Toledo y Pérez, 2009) y 50% (Fernandes *et al.*, 2008).

2.2.1.2. Agentes encapsulantes o material de cobertura

En el secado por atomización la elección de los agentes encapsulantes o material de cobertura es crítica, ya que pueden intervenir en las propiedades de la emulsión antes del secado, tamaño de partículas y propiedades de flujo, así como en

la retención de volátiles durante el proceso y en la vida útil del polvo después del secado. De entre todos los ingredientes disponibles, los más utilizados en este tipo de secado son los carbohidratos que incluyen almidones modificados e hidrolizados, derivados de celulosa, gomas y ciclodextrinas; en el caso de las proteínas las más utilizadas son las proteínas del suero de leche, caseinatos y gelatina. También se emplean nuevos biopolímeros emergentes para este proceso, tal es el caso de alginatos, quitosano, polisacáridos solubles de soya, productos de la reacción de Maillard y celulosa modificada; sin embargo, se necesita más investigación en esta área de biopolímeros (Jafari *et al.*, 2008). En la Tabla I se presentan los materiales de cobertura empleados por diferentes autores en investigaciones recientes.

Para la preparación de las emulsiones, el material de cobertura ideal debe tener ciertas características como: propiedades emulgentes, tener la capacidad para formar una película, presentar una baja viscosidad a alto contenido de sólidos, tener baja higroscopidad, poder liberar el sabor o compuesto cuando se reconstituye el producto final, tener bajo costo y sabor ligero, ser estable y proveer buena protección al compuesto de interés durante y después del secado. Además se deben considerar otras propiedades fisicoquímicas como solubilidad, peso molecular, cristalinidad, difusividad, entre otras. Como cada material de cobertura no presenta todas las características deseadas se ha optado por utilizarlos en combinación con otros (Gouin, 2004; Jafari *et al.*, 2008).

Los almidones hidrolizados son ingredientes producidos por la hidrolisis del almidón con ácido y/o enzimas. Estos materiales presentan la mayoría de las características deseadas, sin embargo carecen de propiedades emulgentes y resultan en una baja retención de sabores durante el secado. Por lo tanto, es recomendable combinarlo con otro biopolímero tensoactivo, como almidones modificados esterificados, goma arábiga o proteínas (Shaikh, Bhosale y Singhal, 2006).

La goma arábiga, o de acacia, se utiliza en la industria de los sabores en el secado por atomización debido a que protege al compuesto de interés de la oxidación y volatilización. Ésta tiene una alta solubilidad y baja viscosidad, y excelentes propiedades emulgentes en comparación con otras gomas lo que facilita el proceso de secado (Jafari *et al.*, 2008; De Barros *et al.*, 2013; Chranioti y Tzia, 2014). Su alto costo y la variabilidad de la protección contra la oxidación han llevado a considerar otros materiales alternativos como las maltodextrinas y los almidones modificados para reemplazar total o parcialmente a este tipo de goma. La goma de mesquite también se ha probado como una alternativa de material de cobertura debido a su buena propiedad emulgente y capacidad de encapsulación (Baranauskiene, Bylaite, Zukauskaite y Venskutonis, 2007; Bringas-Lantigua *et al.*, 2011; Bringas-Lantigua, Valdés y Pino, 2012).

Por otra parte, las ciclodextrinas también se han utilizado como material de cobertura para la encapsulación de aceites alimenticios y sabores. Las ciclodextrinas son moléculas cílicas que contienen seis (α -), siete (β -) u ocho (γ -) monómeros de glucosa que son producidas del almidón. Se ha encontrado que las γ -ciclodextrinas generalmente funcionan mejor que las α - y β -ciclodextrinas en términos de retención inicial del sabor, lo que es contrario durante su almacenamiento (Desai y Park, 2005; Jafari *et al.*, 2008).

Las pectinas pueden producir emulsiones estables a baja concentración (1-2%). Las propiedades emulgentes de la pec-

tina se deben a los residuos de proteínas presentes en su cadena (Drusch, 2006).

Las proteínas también muestran propiedades adecuadas para el secado por atomización, las más comunes para la encapsulación son las de la leche o suero y la gelatina (Ghars-hallaoui *et al.*, 2007). Recientemente se ha utilizado directamente el suero de leche para formar emulsiones con aceite como la fase dispersa. Se ha demostrado que las proteínas del suero forman emulsiones físicamente estables formando empacados de proteínas globulares en la interfaz. Estas proteínas, junto con la lactosa, evitan la coalescencia de la emulsión durante el secado y la redispersión (Donz *et al.*, 2014).

2.2.2. La atomización de la emulsión

Para dispersar la emulsión en microgotas se utilizan atomizadores; los que se usan comúnmente son los atomizadores de presión, centrífugos y neumáticos. La característica más importante de un atomizador es la uniformidad y homogeneidad del tamaño de las partículas del producto final. En la etapa de atomización, el objetivo es crear una máxima área de trasferencia entre el aire seco y la gota para optimizar la trasferencia de calor y masa. Se debe tener precaución en el caso de atomizar una emulsión con sólidos de tamaño de partícula muy grande o muy viscosa, debido a que puede bloquear la tobera. El tamaño de las gotas atomizadas depende de la tensión superficial y de la viscosidad de la emulsión, la presión y la velocidad a través de la tobera. A su vez, el tamaño de las gotas atomizadas determina el tiempo de secado y el tamaño de partícula del polvo obtenido (Bhandari, Patel y Chen, 2008; Fang y Bhandari, 2012).

2.2.3. El proceso de secado de la emulsión

El inicio del secado como tal, está dado por el contacto de las gotas atomizadas con el aire caliente, lo cual ocurre en la cámara de secado. El tipo de contacto puede ser co-corriente (misma dirección) o contra-corriente (dirección opuesta) del flujo del líquido comparado con la entrada de aire caliente. En el secado de emulsiones es más común emplear el secado co-corriente. Las temperaturas de secado oscilan entre 150 °C y 220 °C en la entrada y los polvos en la cámara de secado se exponen a temperaturas moderadas (50 - 80 °C), las cuales son más bajas que la temperatura del aire de salida, disminuyendo la degradación térmica del producto. En el momento en que las gotas atomizadas y el aire caliente entran en contacto, tenderán al equilibrio la temperatura y la presión parcial de vapor entre la fase líquida y el gas. Entonces ocurre una transferencia de calor del aire hacia el producto, debido a una diferencia de temperatura y al mismo tiempo se lleva a cabo la transfe-

rencia de masa (agua) del producto húmedo al aire, debido a una diferencia en la presión de vapor. El polvo es liberado de la cámara de secado hacia un separador por una corriente de aire húmedo, la cual se utilizó para secar el producto, utilizando un ciclón o recuperando las partículas densas en la base de la cámara de secado (Gharsalloui *et al.*, 2007; Fang y Bhandari, 2012). Este proceso puede producir polvos muy finos (10-50 μm) o partículas muy grandes (2-3 mm), dependiendo de las características del material de alimentación y las condiciones de operación (Gharsallaoui *et al.*, 2007; Anandharamakrishnan *et al.*, 2007).

El secado por atomización se recomienda ampliamente como método de secado para líquidos debido a su corto tiempo de contacto con el aire a alta temperatura y debido a la alta velocidad de evaporación; resultando en una alta calidad, estabilidad, funcionalidad y contenido bajo de humedad del producto final (Sarala, Velu, Anandharamakrishnan y Singh, 2012). Es una técnica eficiente de secado para estabilizar cápsulas, económico, rápido y con equipos fácilmente disponibles; además produce partículas esféricas que tienen una completa protección del material encapsulado en su interior contra reacciones degradativas, previene la pérdida de sabor y también puede controlar mejor su liberación (Baranauskiene, Venskutonis, Dewettinck y Verhé, 2006; Ezhilarasi, *et al.*, 2013; Sosa *et al.*, 2014).

La temperatura del proceso de secado por atomización es de gran importancia para optimizar el proceso y obtener un producto final de alta calidad. El control de la temperatura se realiza en tres puntos: antes del secado en la solución de alimentación, a la entrada de aire en el secador y en la salida del mismo. La temperatura de la emulsión en la entrada modifica su viscosidad por lo tanto su fluidez y su capacidad para atomizarse de forma homogénea. Al incrementar esta temperatura, la viscosidad y el tamaño de gota decrecen, pero a altas temperaturas puede causar volatilización o degradación de algunos ingredientes termosensibles (Gharshalloui *et al.*, 2007). Algunos reportes muestran que la temperatura de alimentación se puede aumentar hasta la temperatura donde se presentó la mayor solubilidad de los sólidos antes de formar la emulsión, resultando en una mejor retención de los mismos (Jafari *et al.*, 2008).

Cuando la temperatura del aire en la entrada es baja (menor a 140 °C), la velocidad de evaporación disminuye y produce encapsulados con membranas de alta densidad, alto contenido de agua, poca fluidez y facilidad de aglomeración. Se ha observado que a temperaturas suficientemente altas (160 - 220 °C) se forma rápidamente una membrana semipermeable en

la superficie de la gota que le brinda una retención óptima del sabor, a temperaturas más altas podría causar daño térmico al polvo, hinchamiento o crecimiento excesivo de la burbuja y causar imperfecciones en la superficie durante el secado. El hinchamiento puede deberse a la formación de vapor en la gota seca por la exposición a altas temperaturas produciendo una partícula con una capa delgada de recubrimiento, propiciando la liberación adelantada y la degradación del compuesto encapsulado; sin embargo, esto también involucra al material con que se realizó la emulsión. En algunos estudios realizados del secado de emulsiones con fines de encapsulación, se ha comprobado que la eficiencia de encapsulación es alta a temperaturas entre 150 - 170 °C. La eficiencia de encapsulación disminuye con el incremento de la temperatura, relacionándolo con el hecho de que a altas temperaturas se afecta el balance entre la velocidad de evaporación de agua y la formación de película, lo que conlleva a la ruptura de la membrana formada (Gharshalloui *et al.*, 2007; Bringas-Lantigua *et al.*, 2011; Wan *et al.*, 2011; Frascareli *et al.*, 2012). El contenido de humedad del polvo obtenido es otra respuesta importante en este proceso, y la temperatura del aire en la entrada es una variable que presenta gran influencia en la humedad de la partícula seca. Se ha verificado que cuando la temperatura de entrada aumenta y la velocidad de flujo disminuye, el contenido de humedad del polvo es menor (De Barros *et al.*, 2013).

La temperatura al final de la zona de secado o temperatura de salida, se puede considerar como el índice de control del secado por atomización. Es muy difícil predecir la temperatura de salida para un producto determinado, ya que depende de las características de secado del material. Esta temperatura no se controla directamente ya que depende de la temperatura de entrada del aire. La influencia de esta temperatura en la eficiencia de encapsulación de sabores y aceites aún es controvertida y no está bien documentada, aun así se han reportado temperaturas de salida ideales entre 50 y 80 °C. También se ha encontrado que la retención de volátiles solubles se mejora con el incremento de la temperatura de salida, probablemente debido a la baja humedad relativa a altas temperaturas. Se ha observado que este efecto es menos significativo cuando el compuesto presenta una menor volatilidad, como en los aceites esenciales (Jafari *et al.*, 2008; Bringas-Lantigua *et al.*, 2011). Por el contrario, se ha validado también que con el aumento en la temperatura de salida, la retención de volátiles es muy poca y que la superficie de las partículas se torna grasosa, esto debido probablemente al efecto de hinchamiento (Huynh, Caffin, Dykes y Bhandari, 2008). En el estudio de Bringas-Lantigua *et al.* (2011) donde se optimizaron las condiciones del proceso

de secado por atomización se indica que a una temperatura del aire en la entrada de 200 °C y en la salida de 80 °C, se obtienen las mejores respuestas de velocidad de evaporación, retención de lípidos volátiles y eficiencia de encapsulación de aceite de mandarina.

En la Tabla I se incluyen los principales valores de temperatura del aire en la entrada y en la salida en el proceso de secado por atomización, que emplean diferentes autores en investigaciones recientes. En esta tabla se observa una notable variación de las temperaturas de secado reportadas en los diferentes estudios. Dicha variabilidad se debe a los factores intrínsecos de la solución de alimentación (formulación, viscosidad, etc.), así como el modelo del equipo de secado y/o el flujo de alimentación, sin dejar de lado las condiciones ambientales (presión atmosférica o no).

3. Ventajas del secado de emulsiones

El proceso de secado disminuye el contenido de agua del producto original, por lo tanto disminuye la actividad de agua, con lo que asegura una estabilidad microbiológica de los productos, reduce el riesgo de degradaciones químicas o biológicas; lo cual conlleva a prolongar su vida de anaquel. Además, este proceso reduce los costos de almacenamiento y transporte, y el producto final adquiere propiedades específicas como alta solubilidad (Gharsallaui *et al.*, 2007; Pillai, Prabhakar, Jena y Anandharamakrishnan, 2012).

El secado ofrece numerosos beneficios a los ingredientes alimentarios, puede cambiar varias propiedades del compuesto, primordialmente las de manejo o flujo. Los materiales higroscópicos se protegen de la humedad y se brinda mayor estabilidad a los ingredientes que son volátiles o sensibles al calor, a la luz o a la oxidación. Los compuestos que son incompatibles se pueden mezclar y emplear juntos de forma segura. Existen muchos tipos diferentes de microcápsulas que se utilizan como aditivos alimentarios, por ejemplo algunos sabores y aceites encapsulados. Cabe mencionar que la mayoría de estos compuestos se han empleado comúnmente en la industria de forma líquida. También existe la necesidad de incorporar algunos aceites comestibles como el aceite de pescado, los ácidos grasos y aceites vegetales en los productos alimenticios para incrementar el valor nutrimental de esos productos (Kolawowski y Laufenberg, 2006; Jafari *et al.*, 2008).

Conclusiones y comentarios finales

El secado por atomización y la liofilización son los métodos más comunes para el secado de emulsiones alimentarias, ambos presentan sus ventajas y desventajas. El secado por atomización resulta ser la mejor alternativa para el secado de emulsiones, debido al bajo costo en comparación con la liofilización. En el secado por atomización se obtiene un polvo con calidad satisfactoria ya que sufre un daño mínimo de procesamiento. Es de gran importancia tener bien definidas las condiciones del proceso de secado para obtener un producto con características deseables, pero cabe resaltar que estas condiciones no se pueden generalizar para todas las emulsiones alimentarias, ya que dependen de factores tanto intrínsecos como extrínsecos de dichas emulsiones, por ejemplo el compuesto que se quiere emulsificar, las variaciones en los equipos de secado y el ambiente en el que se lleva a cabo el proceso. El proceso de secado de emulsiones incrementa la estabilidad del compuesto emulsionado inicialmente, debido a la protección que se brinda por medio de la encapsulación.

Agradecimientos

La autora N. Ivonne Gómez Cruz agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el apoyo brindado para sus estudios de posgrado.

Referencias

- Abdelwahed, W., Degobert, G., Trainmesse, S. y Fessi, H. (2006). Freeze-drying of nanoparticles: formulation, process and storage considerations. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 58, 1688-1713.
- Alvarenga, D., Vilela, S., De Barros, V., Dantas, A., Gomes, G. y Reginaldo, G. (2012). Evaluation of spray drying conditions on properties of microencapsulated oregano essential oil. *International Journal of Food Science and Technology*, 47, 2289-2296.
- Anandharamakrishnan, C., Rielly, C. D. y Stapley, A. G. F. (2007). Effects of process variables on the denaturation of whey proteins during spray drying. *Drying Technology*, 25, 799-807

- Anandharamakrishnan, C., Rielly, C. D. y Stapley, A. G. F. (2008). Loss of solubility of lactalbumin and β -lactoglobulin during spray drying of whey proteins. *Food Science and Technology*, 41, 270-277.
- Anandharamakrishnan, C., Rielly, C. D. y Stapley, A. G. F. (2010). Spray-freeze- drying of whey proteins at sub-atmospheric pressures. *Dairy Science and Technology*, 90, 321-334.
- Anwar, S. H. y Kunz, B. (2011). The influence of drying methods on the stabilization of fish oil microcapsules: comparison of spray granulation, spray drying, and freeze drying. *Journal of Food Engineering*, 105, 367-378.
- Augustin, M. A. y Hemar, Y. (2009). Nano and micro structured assemblies for encapsulation of food ingredients. *Chemical Society Reviews*, 38, 902-912.
- Baranauskiene, R., Venskutonis, P. R., Dewettinck, K. y Verhé, R. (2006). Properties of oregano (*Origanum vulgare* L.), citronella (*Cymbopogon nardus* G.) and marjoram (*Majorana hortensis* L.) flavors encapsulated into milk protein-based matrices. *Food Research International*, 39, 413-425.
- Baranauskiene, R., Bylaite, E., Zukauskaite, J. y Venskutonis, R. P. (2007). Flavor retention of peppermint (*Mentha piperita* L.) essential oil spray-dried in modified starches during encapsulation and storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 3027-3036.
- Bhandari, B., Patel, K. y Chen, X. D. (2008). Spray drying of food materials: process and products characteristics. En X. D. Chen y A. Mujumdar, *Drying Technology in Food Processing* (págs. 113-159). E.U.A.: Blackwell Publishing.
- Bringas-Lantigua, M., Expoósito-Molina, I., Reineccius, G., López-Hernández, O. y Pino, J. (2011). Influence of spray-dryer air temperatures on encapsulated mandarin oil. *Drying Technology*, 29, 520-526.
- Bringas-Lantigua, M., Valdés, D. y Pino, J. (2012). Influence of spray-dryer air temperatures on encapsulated lime essential oil. *International Journal of Food Science and Technology*, 47, 1511-1517.
- Charcosset, C. (2009). Preparation of emulsions and particles by membrane emulsification for the food processing industry. *Journal of Food Engineering*, 92(3), 241-249.
- Choi, M. J., Briancon, S., Andrieu, J., Min, S. G. y Fessi, H. (2004). Effect of freeze-drying process conditions on the stability of nanoparticles. *Drying Technology*, 22, 335-346.
- Chranioti, C. y Tzia, C. (2014). Arabic gum mixtures as encapsulating agents of freeze-dried fennel oleoresins products. *Food Bioprocess Technology*, 7, 1057-1065.
- Claussen, I. C., Ustad, T. S., Strommen, I. y Walde, P. M. (2007). Atmospheric freeze drying-a review. *Drying technology*, 25, 957-967.
- De Barros, R., Vilela, S. y Alvarenga, D. (2013). Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 33, 171-178.
- Desai, K. G. H. y Park, H. J. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying Technology*, 23, 1361-1394.
- Donz, E., Boiron, P. y Courthaudon, J. (2014). Characterization of industrial dried whey emulsions at different stages of spray-drying. *Journal of Food Engineering*, 126, 190-197.
- Drusch, S. (2006). Sugar beet pectin: A novel emulsifying wall component for microencapsulation of lipophilic food ingredients by spray-drying. *Food Hydrocolloids*, 21(7), 1223-1228.
- Elías, X. (2012). Sistemas de tratamiento térmico. Procesos a baja temperatura: secado. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Ezhilarasi, P. N., Karthik, P., Chanwal, N. y Anandharamakrishnan, C. (2013). Nanoencapsulation techniques for food bioactive components: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(3), 628-647.
- Fang, Z. y Bhandari, B. (2012). Spray drying, freeze drying and related processes for food ingredient and nutraceutical encapsulation. En N. Garti y J. McClements, *Encapsulation technologies and delivery systems for food ingredients and nutraceuticals* (págs. 92-121). Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited.
- Fernandes, L., Turatti, I., Lopes, N., Ferreira, J., Cândido, R. y Oliveira, W. (2008). Volatile retention and antifungal properties of spray-dried microparticles of *Lippia sidoides* essential oil. *Drying Technology*, 26, 1534-1542.
- Figueiredo, C., Polakiewicz, B. y Nogueir, R. (2008). Moisture sorption isotherm characteristics of freeze-dried d-limonene emulsions in modified chitosan and maltodextrin. *Drying Technology*, 26, 956-962.
- Frascareli, E., Silva, V., Tonon, R. y Hubinger, M. (2012). Effect of process conditions on the microencapsulation of coffee oil by spray drying. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 413-424.
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A. y Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107-1121.
- Gouin, S. (2004). Microencapsulation: industrial appraisal of

- existing technologies and trends. *Trends in Food Science and Technology*, 15, 330-347.
- Herrera, M. (2012). *Analytical techniques for studying the physical properties of lipid emulsions*. Nueva York: Springer.
- Holgado, F., Marquez-Ruiz, G., Dobarganes, C. y Velasco, J. (2013). Influence of homogenisation conditions and drying method on physicochemical properties of dehydrated emulsions containing different solid components. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 1498-1508.
- Huynh, T. V., Caffin, N., Dykes, G. A. y Bhandari, B. (2008). Lemon myrtle oil using response surface methodology. *Drying Technology*, 26, 357-368.
- Jafari, S. M., He, Y. y Bhandari, B. (2007). Encapsulation of nanoparticles of *d*-limonene by spray drying: role of emulsifiers and emulsifying techniques. *Drying Technology*, 25, 1079-1089.
- Jafari, S. M., Assadpoor, E., He, Y. y Bhandari, B. (2008). Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Drying Technology*, 26, 816-835.
- Kaasgaard, T. y Keller, D. (2010). Chitosan coating improves retention and redispersibility of freeze-dried flavor oil emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 2446-2454.
- Kaushik, V. y Roos, Y. H. (2008). Lipid encapsulation in glassy matrices of sugar-gelatin systems in freeze-drying. *International Journal of Food Properties*, 11(2), 363-378.
- Kolanowski, W. y Laufenberg, G. (2006). Enrichment of food products with polyunsaturated fatty acids by fish oil addition. *European Food Research and Technology*, 222 (3), 472-477.
- López-Hernández, O., Márquez, T., Mayo, O., Toledo, C. y Pérez, E. (2009). Características del aceite de semillas de *Cucurbita pepo* L. microencapsulado mediante secado por aspersión con maltodextrina y goma arábiga. *Latin American Journal of Pharmacy*, 28(4), 628-632.
- Mahato, R. I. (2007). *Pharmaceutical dosage forms and drug delivery*. Florida, E.U.A.: CRC Press.
- Márquez, A. L., Medrane, A., Panizzolo, L. A. y Wagner, J. R. (2010). Effect of calcium salts and surfactant concentration on the stability of water-in-oil (W/O) emulsions prepared with polyglycerol polyricinoleate. *Journal of Colloids Interface Science*, 341, 101-108.
- McClements, D. J. (2005). *Food emulsions, principles, practices, and techniques* (2a ed.). Florida, E.U.A.: CRC Press.
- Murugesan, R. y Orsat, V. (2012). Spray drying for the production of nutraceutical ingredients: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 3-14.
- Nakagawa, K., Surassmo, S., Min, S. G. y Choi, M. J. (2011). Dispersibility of freeze-dried poly (epsilon-caprolactone) nanocapsules stabilized by gelatin and the effect of freezing. *Journal of Food Engineering*, 102(2), 177-188.
- Oetjen, G. W. y Haseley, P. (2004). *Freeze-drying*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
- Pillai, D. S., Prabhakar, P., Jena, B. S. y Anandharamakrishnan, C. (2012). Microencapsulation of *Garcinia cowa* fruit extract and effect of its use on pasta process and quality. *International Journal of Food Properties*, 15(3), 590-604.
- Quintanilla-Carvajal, M., Camacho-Díaz, B., Meraz-Torres, L., Chanona-Pérez, J., Alamilla-Beltrán, L., Jimenez-Aparicio, A. y Gutierrez-López, G. (2009). Nanoencapsulation: a new trend in food engineering processes. *Food Engineering Reviews*, 2, 39-50.
- Reineccius, G. A. (2004). The spray drying of food flavors. *Drying Technology*, 22(6), 1289-1324.
- Sarala, M., Velu, V., Anandharamakrishnan, C. y Singh, R. P. (2012). Spray drying of *Tinospora cordifolia* leaf and stem extract and evaluation of antioxidant activity. *Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 119-122.
- Shaikh, J., Bhosale, R. y Singhal, R. (2006). Microencapsulation of blackpepper oleoresin. *Food Chemistry*, 94(1), 105-110.
- Singh, R. P. y Heldman, D. R. (2009). *Introduction to food engineering* (4a ed.). Nueva York, E.U.A.: Academic Press.
- Singh, V., Kumar, M., Bilandi, A. y Sachdeva, V. (2012). Recent advances in pharmaceutical emulsion technology. *Journal of Pharmacy Research*, 5(8), 4250-4258.
- Sootititawat, A., Yoshii, H., Furuta, T., Ohgawara, M., Forssell, P., Partanen, R., Poutanen, K. y Linko, P. (2004). Effect of water activity on the release characteristics and oxidative stability of *d*-limonene encapsulated by spray drying. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 1269-1276.
- Sosa, N., Schebor, C. y Perez, O. (2014). Encapsulation of citral in formulations containing sucrose or trehalose: emulsions properties and stability. *Food and Bioproducts Processing*, 92, 266-274.
- Thivillieris, F., Dreton, N., Schmith, V. y Leal-Calderon, F. (2006). Bicontinuous emulsion gels induced by partial coalescence: kinetics and mechanism. *Europhysics Letters*, 76, 332-338.

- Wan, Y., Bankston, J., Bechtel, P. y Sathivel, S. (2011). Micro-encapsulation of menhaden fish oil containing soluble rice bran fiber using spray drying technology. *Journal of Food Science*, 76(4), E348-E356.
- Windhab, E., Dressler, M., Fiegl, K., Fischer, P. y Megias-Alguacil, D. (2005). Emulsion processing-from single drop deformation to design of complex processes and products. *Chemical Engineering Science*, 60, 210-213.
- Yousefi, S., Emam-Djomeh, Z. y Mousavi, S. M. (2011). Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (*Punica granatum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 48(6), 677-684.
- Zuidam, N. J. y Shimon, E. (2010). Overview of microencapsulate for use in food products or processes and methods to make them. En N. J. Zuidam y E. Shimon, *Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing* (págs. 74-101). Nueva York, E.U.A.: Springer.

Artículos de Revisión

Investigaciones recientes en recubrimientos comestibles aplicados en alimentos

A. Velázquez-Moreira* y J. A. Guerrero-Beltrán

Suero de leche y su aplicación en la elaboración de alimentos funcionales

M. Hernández-Rojas* y J. F. Vélez-Ruiz

Métodos de secado de emulsiones alimentarias

N. I. Gómez-Cruz* y M. T. Jiménez-Munguía

UDLAP[®]

Departamento de Ingeniería
Química, Alimentos y Ambiental
Universidad de las Américas Puebla