



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO  
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

**“Evaluación fisicoquímica y de funcionalidad de ingredientes  
utilizados en una fórmula láctea, así como de los parámetros para  
su secado por aspersion”**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencia y  
Tecnología de Alimentos

Presenta:

**IA. Jesús Antonio Rodríguez Alvarado**

Dirigido por:

**Dra. Blanca Estela García Almendárez**

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Noviembre 2020



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de química  
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

**“Evaluación fisicoquímica y de funcionalidad de ingredientes utilizados en una fórmula láctea, así como de los parámetros para su secado por aspersion”**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos

**Presenta:**

IA. Jesús Antonio Rodríguez Alvarado

Dirigido por:

Dra. Blanca Estela García Almendárez

Dra. Blanca Estela García Almendárez

Presidente

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano

Vocal

Dr. Aldo Amaro Reyes

Suplente

Dr. Eleazar Barboza Corona

Suplente

Dr. Carlos Regalado González

Suplente

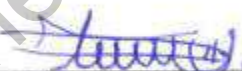
Centro Universitario Querétaro, Qro.

Octubre 2020

**Nota de no plagio, declaración del estudiante.**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE:** Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras. Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

ATENTAMENTE



RODRIGUEZ ALVARADO JESUS ANTONIO

## RESUMEN

La leche es un producto perecedero y un ingrediente importante en la industria alimentaria. Una forma de conservarla es mediante deshidratación. La producción de leche en polvo no cubre los requerimientos del mercado nacional, como resultado surgen las fórmulas lácteas, definidas como el producto elaborado a partir de ingredientes lácteos. La sustitución de estos componentes representa un reto tecnológico para que cumplan las mismas propiedades funcionales. Para ello, existen diversos ingredientes lácteos. Uno de los retos es evitar la modificación de las propiedades funcionales y evitar pérdidas significativas durante el secado por aspersion. Las pérdidas están asociadas a parámetros de temperatura seleccionados y a la velocidad de alimentación durante el secado. El objetivo del presente trabajo fue diseñar y caracterizar una fórmula láctea basada en la evaluación fisicoquímica y de funcionalidad de cinco ingredientes proteicos alternativos, incorporando una grasa vegetal, vitaminas y minerales, así como la determinación de los parámetros para su secado y su escalamiento. Para lograr este objetivo, los ingredientes se caracterizaron mediante análisis fisicoquímicos y por sus propiedades funcionales. Para conocer el perfil de proteínas de los ingredientes se realizó una electroforesis desnaturalizante (15 % acrilamida). El índice de insolubilidad para NFDM (0.11 mL) resultó ser el más bajo de entre todos los ingredientes. El índice de dispersabilidad para el permeado de suero (88.7 %) resultó ser el más alto que el resto de los ingredientes. La humectabilidad para NFDM mostró los mejores resultados de tiempo (28 s). Posteriormente a los ingredientes se les incorporó la grasa vegetal, minerales y vitaminas, la mezcla se homogenizó y se llevó a cabo el secado por aspersion. Los parámetros se determinaron utilizando un diseño experimental 2<sup>2</sup>. Los factores fueron temperatura de entrada y velocidad de alimentación. Las variables respuesta fueron rendimiento, solubilidad, dispersabilidad y humectabilidad. Mediante el análisis del diseño experimental se determinó las condiciones adecuadas para el proceso de secado (160°C y 9 mL/min). Usando las mismas condiciones, el proceso se llevó a un escalamiento a nivel piloto. Esto no afectó a los componentes de la fórmula. Las propiedades funcionales de solubilidad y dispersabilidad, se vieron favorecidas.

**Palabras clave:** fórmula láctea, secado por aspersion, propiedades funcionales

## ABSTRACT

Milk is a perishable product and is an important ingredient in the food industry. A suitable way to preserve fluid milk is by dehydration. Milk powder production is not enough. As a result dairy formulas arise, which could contribute to satisfy milk demand. According to NOM-243-SSA1-2010, dairy formulas are defined as the product made from milk ingredients, such as casein, dairy fat, and whey. Sometimes, the main components of milk such as casein, whey proteins, carbohydrates and lipids, are replaced by other functional ingredients. For this purpose, there is a wide range of ingredients to select such as whey milk, sodium caseinate, whey permeate, nonfat dry milk (NFDM) and milk protein concentrate (MPC); which try to comply with the same function as in milk. One of the main problems is to avoid significant losses during spray drying, associated to temperature and feed rate to the drier, among others. The objective of the present work was to design and characterize a milk formula based on selection of vegetable fat, milk proteins, vitamins and minerals. It is also expected to determine the temperature, and flow parameters during spray drying to obtain and to evaluate the functionality of the dried formula. To achieve this objective, the ingredients were characterized by physicochemical analysis ( $A_w$ , proteins, fat, ash, lactose). Also, denaturing electrophoresis (15 % acrylamide) was carried out to know the proteins profile of the ingredients. In addition, the functional properties of ingredients such as solubility, dispersibility and wettability were measured. Results showed that the insolubility index for NFDM (0.11 mL) turn out to be the lowest among the other ingredients. Meanwhile, the dispersibility index for whey permeate (88.7 %) turned out to be the highest among the rest. As to wettability, NFDM showed the best time results (28 s). Subsequently, the ingredients were mixed and spray dried. Parameters were analyzed using a  $2^2$  experimental design. Response variables were yield, solubility, dispersibility and wettability. The best condition was selected (160 ° C and 9 mL / min) and the formula was scaled. The components of the formula were not affected. Functional properties were favored.

**(Keywords:** milk formula, spray drying, functional properties)

## ÍNDICE

1. INTRODUCCION .....	1
2. ANTECEDENTES .....	2
2.1 Definición de fórmula láctea .....	2
2.2 Mercado de las fórmulas lácteas.....	3
2.3 Componentes de las fórmulas lácteas .....	4
2.4 Leche .....	5
2.4.1 Proteínas de la leche .....	5
2.4.1.1 Propiedades funcionales de las proteínas .....	6
2.4.1.2 Caseínas .....	10
2.4.1.3 Caseínas, caseinatos y productos proteicos de la leche ricos en caseína.....	12
2.4.1.4 Concentrados de proteína de leche (MPC) .....	14
2.4.1.5 Leche en polvo descremada (NFDM) .....	16
2.4.1.6 Proteínas del suero .....	17
2.4.1.7 Aislado de proteína de suero (WPI).....	18
2.4.1.8 Concentrado de proteínas de suero (WPC).....	19
2.4.1.9 Permeado de suero .....	20
2.4.1.10 Suero de leche .....	21
2.5 Lípidos de la leche .....	21
2.6 Grasas vegetales .....	23
2.6.1 Propiedades funcionales de las grasas vegetales .....	24
2.6.2 Oleína de palma.....	25
2.6.3 Emulsificantes .....	26
2.6.3.1 Mono y diglicéridos .....	28
2.6.3.2 Lecitina de soya.....	28
2.7 Carbohidrato en la leche .....	29
2.7.1 Propiedades funcionales de los carbohidratos.....	29
2.7.2 Maltodextrina .....	30
2.8 Vitaminas en la leche .....	33
2.9 Secado por aspersion .....	34
2.9.1 Mecanismo del secado por aspersion.....	35
2.9.2 Parámetros del secado por aspersion.....	37

2.9.3 Ventajas y desventajas del secado por aspersión .....	38
3. JUSTIFICACIÓN .....	40
4. OBJETIVOS .....	41
4.1 Objetivo general .....	41
4.2 Objetivos específicos .....	41
5. METODOLOGÍA.....	42
5.1 Caracterización fisicoquímica del caseinato de sodio, permeado de suero, leche descremada, suero de leche y concentrado de proteína de leche .....	42
5.1.1 Determinación del contenido de proteínas .....	42
5.1.2 Determinación del contenido de grasa.....	43
5.1.3 Determinación del contenido de cenizas.....	44
5.1.4 Determinación del contenido humedad.....	44
5.1.5 Determinación de la actividad de agua .....	45
5.1.6 Determinación del contenido de carbohidratos .....	45
5.2 Determinación de las propiedades funcionales de los ingredientes proteicos de leche .....	46
5.2.1 Determinación del índice de dispersabilidad .....	46
5.2.2 Determinación de índice de insolubilidad .....	46
5.2.3 Determinación de humectabilidad .....	46
5.3 Electroforesis desnaturante SDS-PAGE.....	47
5.4 Diseño de la fórmula láctea.....	48
5.5 Materia prima .....	49
5.6 Secado por aspersión mediante diseño experimental.....	49
5.7 Análisis de la fórmula obtenida .....	50
5.7.1 Determinación de la funcionalidad de la fórmula obtenida.....	50
5.7.1.1 Determinación del índice de dispersabilidad de la fórmula láctea ...	50
5.7.1.2 Determinación de índice de insolubilidad de la fórmula láctea .....	50
5.7.1.3 Determinación de humectabilidad de la fórmula láctea .....	50
5.7.2 Caracterización fisicoquímica de la fórmula obtenida .....	50
5.7.2.1 Determinación del contenido de proteína de la fórmula láctea .....	50
5.7.2.2 Determinación del contenido de grasa de la fórmula láctea .....	50
5.7.2.3 Determinación del contenido humedad de la fórmula láctea .....	51
5.7.2.4 Determinación de la actividad de agua de la fórmula láctea.....	51

5.8 Escalamiento del secado por aspersión de la fórmula láctea a nivel piloto..	51
5.9 Microscopía electrónica de barrido .....	52
5.10 Secado por aspersión de la formula.....	52
5.11 Análisis estadístico.....	52
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
6.1 Caracterización fisicoquímica de los ingredientes proteicos de leche.....	53
6.2 Determinación de las propiedades funcionales de los cinco ingredientes proteicos de leche.....	56
6.2.1 Determinación del índice de insolubilidad .....	56
6.2.2 Determinación del índice de dispersabilidad.....	58
6.2.3 Determinación de humectabilidad .....	61
6.3 Electroforesis SDS PAGE de los cinco ingredientes proteicos de leche.....	63
6.3.1 Análisis densitométrico del gel de electroforesis SDS-PAGE (15 % T)..	64
6.3.2 Análisis densitométrico del gel de electroforesis SDS-PAGE (12 % T)..	67
6.4 Diseño de la fórmula láctea .....	68
6.5. Secado por aspersión de la fórmula láctea .....	70
6.5.1 Análisis estadístico del diseño experimental 2 <sup>2</sup> .....	71
6.6 Determinación de las propiedades funcionales de las fórmulas lácteas .....	73
6.6.1 Determinación del índice de insolubilidad .....	73
6.6.2 Determinación del índice de dispersabilidad.....	76
6.6.3 Determinación de humectabilidad .....	78
6.7 Escalamiento del secado por aspersión de la fórmula láctea a nivel piloto..	83
6.8 Comparación de los polvos obtenidos .....	86
6.8.1 Microscopía electrónica de barrido de la fórmula láctea .....	87
7. CONCLUSIONES .....	90
8. REFERENCIAS.....	91



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Clasificación de fórmulas lácteas	2
2	Características fisicoquímicas de las proteínas y su concentración en la leche	6
3	Propiedades funcionales de las caseínas de acuerdo con sus interacciones con otras moléculas	9
4	Concentración de caseínas en la leche	11
5	Composición química de ingredientes proteicos de leche	14
6	Concentración, temperatura y tiempo de precalentamiento de tipos de leche descremada en polvo	17
7	Concentración de proteínas en el suero de leche	17
8	Composición de concentrados de proteínas de leche y aislado de proteína de suero	19
9	Concentración de lípidos en la leche	22
10	Composición de los ácidos grasos de la grasa de la leche	22
11	Producción mundial de aceite en millones de toneladas durante el periodo 2008 – 2009	23
12	Emulsificantes y su valor de balance hidrófilo-lipófilo	28
13	Propiedades funcionales de los carbohidratos	31
14	Concentración de las vitaminas de la leche	33
15	Parámetros del secado por aspersion en el diseño experimental	49
16	Caracterización de los ingredientes proteicos de leche	53

17	Índice de insolubilidad de ingredientes proteicos de leche	56
18	Índice de dispersabilidad de ingredientes proteicos de leche	59
19	Humectabilidad de ingredientes proteicos de leche	61
20	Análisis densitométrico del gel de electroforesis SDS–PAGE (15 % T)	65
21	Análisis densitométrico del gel de electroforesis SDS–PAGE (12 % T)	67
22	Fórmula láctea seleccionada	68
23	Rendimientos obtenidos en el secado por aspersión	70
24	Análisis de varianza para rendimiento de fórmulas lácteas	71
25	Índice de insolubilidad de fórmulas lácteas	73
26	Análisis de varianza para índice de solubilidad	74
27	Índice de dispersabilidad de fórmulas lácteas	76
28	Análisis de varianza para índice de dispersabilidad	77
29	Humectabilidad de fórmulas lácteas	78
30	Análisis de varianza para humectabilidad	79
31	Resumen de parámetros usados en el secado por aspersión, variables respuesta y resultados de la caracterización del polvo obtenido	82
32	Resultados obtenidos en dos secadores por aspersión, caracterización del polvo obtenido y resultados de la evaluación de las propiedades funcionales	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Interacciones entre las proteínas y otros ingredientes	8
2	Componentes proteicos funcionales de la leche	13
3	Mecanismo del secado por aspersión	35
4	Índice de insolubilidad de componentes proteicos de leche	57
5	Índice de dispersabilidad de componentes proteicos de leche	59
6	Humectabilidad de componentes proteicos de leche	62
7	Gel de electroforesis SDS - PAGE (15 % T)	64
8	Gel de electroforesis SDS - PAGE (12 % T)	66
9	Rendimientos obtenidos en el secado por aspersión	71
10	Índice de insolubilidad de fórmulas lácteas	74
11	Índice de dispersabilidad de fórmulas lácteas	77
12	Humectabilidad de fórmulas lácteas	79
13	Polvos obtenidos a diferentes escalas	86
14	Comparacion de los polvos obtenidos a diferentes escalas	86
15	Imágenes de microscopía electrónica de barrido de las fórmulas lácteas obtenidas a diferentes escalas	88

## 1. INTRODUCCION

Las fórmulas lácteas son productos adicionados de proteínas de origen lácteo, grasa, vitaminas y minerales, que buscan ser una alternativa al consumo de leche, ofreciendo una opción económica y accesible. El mercado de la leche es muy cambiante, tan solo en México en el año 2017 hubo una producción de 11 millones 807 mil toneladas. Sin embargo, es bien sabido que la leche es un producto perecedero, por lo que su conservación es un aspecto muy importante. Una de las formas más utilizadas en la industria para lograr este fin es deshidratarla. La transformación de la leche en un producto en polvo atrae diversas ventajas como su conservación por un periodo de tiempo mucho más largo. Así mismo, su producción reduce el costo de ciertas operaciones como el empaque, almacenamiento y transporte. Además, es una forma de solucionar los problemas relacionados con la estacionalidad de la producción y la comercialización en regiones de baja producción de leche. Esto se debe a que permite almacenar la leche en forma de polvo en períodos de alta producción, por lo que la demanda se puede satisfacer en los períodos en que existe una falta de leche en el mercado. El secado por aspersion es una de las tecnologías más utilizadas para deshidratar diversos productos incluidos la leche. No obstante, una problemática que se presenta al utilizar el secado por aspersion es la pérdida de proteínas y otros compuestos termosensibles como vitaminas, sabores o lípidos. Para contrarrestar este efecto, es necesario establecer los parámetros adecuados durante el secado por aspersion. Las fórmulas lácteas son productos que buscan sustituir el consumo de leche por un producto más económico y accesible, sin embargo, su elaboración es un reto tecnológico, debido a la selección adecuada de ingredientes. Estos deben cumplir con ciertas propiedades tanto funcionales como fisicoquímicas, tratando en la medida de lo posible, igualar a las de la leche. Para la selección de los ingredientes de la fórmula láctea, se deben tomar en cuenta sus propiedades funcionales, para que estas no se vean afectadas de manera significativa durante el proceso de secado, además de cumplir con los parámetros fisicoquímicos de la normatividad correspondiente.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Definición de fórmula láctea

Una fórmula láctea, según la Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010 es el producto elaborado a partir de ingredientes propios de la leche, tales como caseínas, grasa, lactosueros y agua para consumo humano con un mínimo de 22 g/L de proteínas de la leche y de las cuales el 70 % debe ser caseínas; puede contener grasas de origen vegetal en las cantidades necesarias para ajustarlo a las especificaciones establecidas. La Norma Mexicana NMX-F-026-1997 la define como la leche re combinada obtenida a partir de la composición de ingredientes propios de la leche siendo: caseína en cualquiera de sus formas, lactosa, suero de mantequilla, lactosuero y agua potable o purificada en las cantidades necesarias para ajustarlo a las especificaciones técnicas de la leche que se denomine, debiéndose indicar el origen de la grasa.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-155-SCFI-2003 las fórmulas lácteas pueden dividirse en función de diferentes características tales como el tipo de grasa utilizada, al proceso primario, al proceso secundario y al sabor (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Clasificación de fórmulas lácteas (NOM –155–SCFI –2003).

	Tipo de grasa	Proceso primario	Proceso secundario	Sabor
Fórmula láctea	Fórmula láctea	Rehidratada	Pasteurizada Ultrapasteurizada Microfiltrada	Con sabor a...
	Fórmula láctea con grasa vegetal	Reconstituida	Evaporada Condensada Azucarada	Sabor a ...
		Deslactosada	Deshidratada o en polvo Concentrada	

## 2.2 Mercado de las fórmulas lácteas

Un estudio de mercado realizado en 2019, contemplando un periodo que abarca de los años 2019 al 2025, indica que la demanda global de los productos lácteos aumentará en gran medida. Se estima que habrá un aumento en la demanda de productos. Estos deberán contar con una mejor calidad y mayores valores nutricionales, debido a la adopción de estilos de vida sedentarios, los hábitos alimentarios poco saludables y el aumento de conciencia sobre los productos alimenticios con mayor valor nutricional. Estos productos incluyen leche fortificada, leche desnatada, bebidas bajas en grasa, yogurts de frutas de temporada y cremas. Para satisfacer estas necesidades, las nuevas tecnologías han aumentado la capacidad de producción de los productos lácteos, manteniendo la calidad de su composición mediante el uso de las fórmulas lácteas (Grand View Research, 2019).

En el 2018 el consumo mundial de derivados lácteos se ubicó en 37.3 millones de toneladas. El producto con la mayor demanda fue el queso (52.7 % del consumo total), seguido por la mantequilla (26.5 %) y la leche en polvo (20.8 %). Se estima que en 2019 el consumo de este tipo de productos aumente un 2.2 % con respecto al año anterior (FIRA, 2019).

El aumento en la producción de leche descremada en polvo a un ritmo más rápido que la producción de leche fluída, puede verse reflejado en la disminución del uso de líquidos como la leche descremada (DMI, 2020). De acuerdo con la FAO, solo el 7 % de la leche pasteurizada líquida en los Estados Unidos, es exportada. Los productos lácteos se exportan a las regiones donde las condiciones climáticas, la relación de oferta de demanda insatisfecha y las medidas gubernamentales no son favorables. También se prevé el uso de medidas de transporte tecnológicamente avanzadas para mantener la eficiencia y la calidad de los productos lácteos durante la exportación a larga distancia para impulsar el crecimiento del mercado de productos lácteos (Grand View Research, 2019).

En el caso de México, en el 2018 registró saldo superavitario en el comercio exterior de productos lácteos como leche evaporada, leche condensada, y yogurt. Por el contrario, registró saldo deficitario en el comercio de leche en polvo, quesos y demás derivados lácteos. Entre 2009 y 2018, las importaciones de leche en polvo crecieron a una tasa promedio anual de 7.6 % para ubicarse en un máximo histórico de 362.8 miles de toneladas (FIRA, 2019).

El uso de fórmulas lácteas para diversos productos en México representa uno de los sectores de mayor importancia dentro de la industria alimentaria; en 2018 esta actividad participó con 11.6 % del valor total de la industria de los alimentos. Los derivados lácteos, entre los que se encuentran el queso, crema y yogurt representaron 38.8 % del valor total de la elaboración de productos lácteos, mientras que la elaboración de leche descremada y de sabores, participó con 37.7 % (FIRA, 2019).

### **2.3 Componentes de las fórmulas lácteas**

La Norma Mexicana NMX-F-026-1997 considera que las fórmulas lácteas deben contar con un mínimo de 22 g/L de proteína propia de la leche y ésta debe contener un mínimo de 70 % de proteínas de caseína. La etiqueta de este producto, sólo y únicamente puede ostentar la denominación de fórmula láctea. La información comercial o etiquetado debe especificar que este producto está elaborado específicamente para niños mayores de 1 año, jóvenes y/o adultos.

Las fórmulas lácteas contienen cuatro componentes básicos: carbohidratos, proteínas, grasas, vitaminas y minerales. Algunas de ellas podrían contener sustancias adicionales como prebióticos, así como ácidos grasos tales como docosahexaenoico (DHA) y ácido araquidónico (ARA) (Traves, 2019).

## **2.4 Leche**

La Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010, define a la leche como la secreción natural de las glándulas mamarias de las vacas sanas o de cualquier otra especie animal, esta definición no incluye al calostro.

La leche bovina contiene los nutrientes necesarios para el crecimiento y el desarrollo del ternero, además, es muy buena fuente de lípidos, proteínas, carbohidratos, aminoácidos, vitaminas y minerales. Por otra parte, contiene inmunoglobulinas, hormonas, factores de crecimiento, nucleótidos, enzimas, entre otros compuestos. Los lípidos en la leche se encuentran emulsificados en glóbulos recubiertos por membranas, mientras que, en el caso de las proteínas, éstas se encuentran en dispersiones coloidales, conocidas como micelas. Las micelas de caseína se producen como complejos coloidales de proteínas y sales, principalmente el calcio. Los carbohidratos (lactosa principalmente), así como la mayoría de los minerales están en solución (Foroutan et al., 2019; Boland & Hill, 2020).

### **2.4.1 Proteínas de la leche**

La leche de bovino contiene aproximadamente 32 g/L de proteína. Las dos proteínas principales de la leche son las caseínas y las proteínas del suero (Cuadro 2). La Asociación Americana de Ciencia Lechera (ADSA, por sus siglas en inglés) clasifica a las proteínas de la siguiente manera: caseínas, las cuales representan alrededor del 78–80 % p/p de las proteínas totales de la leche y proteínas de suero, que representan aproximadamente el 20 % p/p del total de las proteínas de la leche. Las caseínas son proteínas menos solubles, a diferencia de las proteínas del suero que son más solubles (Haug et al., 2007; Traves, 2019).



**Cuadro 2.** Características fisicoquímicas de las proteínas y su concentración en la leche (Jensen et al., 2012; Wusigale y Luo, 2020).

Proteína	Variante	Peso molecular (kDa)	Punto isoeléctrico
Caseína $\alpha$ 1	B	23.61	4.44 – 4.76
	C	23.54	
Caseína $\alpha$ 2	A	25.22	4.44 – 4.76
Caseína $\beta$	A <sup>1</sup>	24.02	4.83 – 5.07
	A <sup>2</sup>	23.98	
Caseína k	A	19.03	5.45 – 5.77
	B	19.00	
Lactoferrina		76.11	7.80 – 8.81
$\alpha$ – Lactoalbúmina	B	14.17	4.20 – 4.80
$\beta$ – Lactoglobulina	A	18.36	5.13
	B	18.27	

La fracción proteica de la leche representa el componente con mayor valor agregado debido a su alto valor biológico, así como funcional. A causa de esto, su aceptación ha ido en aumento en comparación con otras fuentes de proteínas convirtiéndose en los principales componentes funcionales de la leche. De acuerdo con su valor biológico, las proteínas son, por lo tanto, una muy buena fuente de aminoácidos esenciales como leucina, valina, metionina, fenilalanina, triptófano, por mencionar algunos. La leche posee una amplia gama de proteínas biológicamente activas y otras que facilitan la absorción de otros nutrientes (Singh, 2011; Goulding et al., 2020).

#### 2.4.1.1 Propiedades funcionales de las proteínas

El término de funcionalidad es aplicado a ingredientes o componentes alimenticios. La funcionalidad se define como alguna propiedad, aparte de los atributos nutricionales que influyen en la utilidad de éstos y que, en la concentración

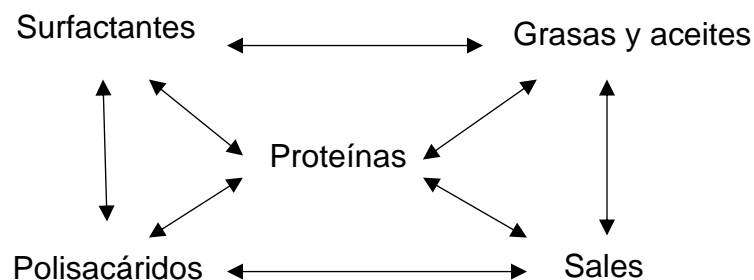
adecuada, así como en las condiciones apropiadas otorgan características sensoriales deseables a los sistemas alimentarios, tales como viscosidad, cuerpo, textura (Fennema, 1985; Tigue–Neira et al., 2017; Barberis et al., 2018; Awuchi et al., 2019)

Las proteínas en los alimentos tienen un doble papel como nutrientes y componentes estructurales. Históricamente, el concepto de funcionalidad proteica se ha restringido a funciones no nutritivas, como la creación de emulsiones, espumas y geles (Foegeding, 2015).

Las proteínas más utilizadas en los sistemas alimentarios incluyen proteínas vegetales (soja, trigo, arroz, papa, maíz, entre otras) proteínas de la leche (caseína micelar, caseína, caseinatos, proteínas de suero y concentrados y aislados de proteínas de la leche (tanto caseínas como proteínas de suero), proteínas de huevo (proteínas de clara de huevo y yema de huevo), proteínas de carne, proteínas de pescado, proteínas de algas y proteínas de insectos. Cada tipo de proteína presenta diferentes propiedades funcionales y tiene aplicación en diferentes tipos de productos alimenticios (Harper et al., 2020).

Es importante señalar que los factores que pueden modificar las propiedades funcionales de las proteínas pueden ser la temperatura, pH, concentración de sales, presión y modificación enzimática (Ho et al., 2018).

Las interacciones entre los ingredientes (Figura 1), así como las modificaciones causadas por el procesamiento son las dos razones principales por las que la funcionalidad de las proteínas no se puede predecir en los sistemas alimentarios. La figura siguiente proporciona una visión general de las posibles interacciones que pueden ocurrir entre las proteínas y algunos ingredientes en un producto alimenticio (Foegeding, 2015).



**Figura 1.** Interacciones entre las proteínas y otros ingredientes (Harper et al., 2020).

Las propiedades funcionales de las proteínas se pueden definir como aquellas características, sin tomar en cuenta la nutrición, que determinan su uso satisfactorio en productos alimenticios. Dentro de estas características están las de incluir estructura, apariencia, textura, viscosidad y sensación en la boca a los sistemas alimentarios. Las propiedades funcionales de las proteínas dependen de propiedades intrínsecas, es decir, su capacidad funcional depende de sus características estructurales, como por ejemplo tamaño, carga e hidrofobicidad. Las proteínas de leche poseen propiedades funcionales que proporcionan características deseables al producto final (Singh, 2011; Li-Chan & Lacroix, 2018).

Las propiedades funcionales de las proteínas pueden ser clasificadas en tres grupos de acuerdo con las interacciones con otras moléculas (Kinsella & Melachouris, 1976; Foegeding, 2015) (Cuadro 3):

- a) Propiedades de hidratación (depende de las interacciones de las proteínas con el agua) incluye absorción de agua, retención de agua, humectabilidad, adhesión, dispersabilidad, solubilidad y viscosidad.
- b) Propiedades relacionadas con las interacciones proteína - proteína, incluye precipitación, gelificación y la formación de otras estructuras.
- c) Propiedades de superficie, incluye tensión superficial, emulsificación y formación de espumas).

**Cuadro 3.** Propiedades funcionales de las caseínas de acuerdo con sus interacciones con otras moléculas (Sikorski, 2007; Li-Chan & Lacroix, 2018).

<b>Interacciones</b>		
<b>Con agua e iones</b>	<b>Con agua, iones y macromoléculas</b>	<b>Con la superficie</b>
Humectabilidad	Formación de fluidos	Formación de
Hinchazón	viscosos	emulsiones
Absorción de agua	Gelificación	Formación de
Retención de agua	Formación de películas	espumas
Formación de	Formación de fibras	Estabilización de
dispersiones	Formación de masas	espumas
Solubilidad		Unión de compuestos de sabor

Como se mencionó anteriormente, las caseínas forman parte de las proteínas de la leche. Dentro de las propiedades funcionales de la caseína, se encuentran algunas como solubilidad, viscosidad, humectabilidad, hinchazón, formación de espuma, gelificación, formación de películas, batido, adsorción de agua y emulsificación. La solubilidad depende de la conformación, pH, fuerza iónica, temperatura, entre otros factores; la viscosidad, se refiere a la propiedad de espesamiento de la proteína. La humectabilidad está, en gran parte, determinada por la parte hidrofílica e hidrofóbica de las proteínas. La hinchazón, es causada por la captación de agua por la matriz proteica y depende de fuerzas intermoleculares dentro de la matriz. Las caseínas también imparten textura y propiedades de coagulación a los alimentos, incluso son utilizadas como películas protectoras (Farkye & Shah, 2015; Wusigale & Luo, 2020).

Por otra parte, los consumidores por lo general asocian la adición de proteínas lácteas en los alimentos con una nutrición de alta calidad. Sin embargo, la adición de proteínas también va encaminada a proporcionar estabilidad física y

textura a los productos. Esto es importante, particularmente para los sistemas de alimentos coloidales en los que las proteínas de leche abarcan varias funciones como viscosidad, gelificación, emulsificación, así como la unión al aceite y al agua. La funcionalidad de las proteínas lácteas en los productos alimenticios depende de varios factores. Dentro de éstos se pueden mencionar la concentración de proteínas, el efecto de las condiciones de procesamientos de dichas proteínas (que generalmente son térmicas, pero también incluyen efectos de alta presión y corte), la concentración de calcio y de otros iones polivalentes. Además de las interacciones con otros componentes de la formulación alimenticia. Es importante mencionar que se deben tomar en cuenta estos parámetros para la selección del tipo de proteína de la leche que le conferirá atributos deseables al producto alimenticio. Para composiciones de emulsión líquida estables apropiadas que requieran altos niveles de proteína, el caseinato de calcio o el uso de MPC (concentrado de proteína de leche, por sus siglas en inglés) puede ser una muy buena opción (Kinsella & Mor, 1984; Carr & Golding, 2016).

Las interacciones de las proteínas en la leche ocurren en dos niveles: el primero, durante el procesamiento de la leche para la producción de los productos proteicos, este proceso altera las estructuras nativas de las proteínas. Además, induce interacciones proteicas que ejercen un efecto negativo o positivo en las propiedades funcionales. En segundo lugar, las proteínas de leche interactúan con otros componentes de los alimentos durante la adición de éstas en la fabricación de productos alimenticios. Las propiedades funcionales de las proteínas de leche pueden clasificarse en dos grupos, hidrodinámicos o relacionados con la hidratación como la absorción de agua, la solubilidad, la viscosidad y la gelificación. La otra clasificación incluye la emulsificación, la formación de espumas y la formación de películas, que están relacionadas con las propiedades tensoactivas de las proteínas (Singh & Ye, 2020).

#### **2.4.1.2 Caseínas**

Las caseínas están definidas como aquellas fosfoproteínas que precipitan de la leche desnatada cruda por acidificación a un pH de 4.6 y a una temperatura de

20 °C. La concentración de caseína en la leche es de aproximadamente 2.5 g/100 g de leche y ésta depende de la raza de la vaca, el periodo de lactancia, así como de la temporada. Las caseínas son fosfoproteínas que están en suspensión en la leche como partículas coloidales. Entre ellas existe una fuerte asociación que les permite formar partículas con forma esférica conocidas como micelas de caseína. Una de las principales funciones biológicas de las caseínas es transportar tanto el calcio como fosfatos además de formar un coágulo en el estómago para una digestión eficiente (Haug et al., 2007; Farkye & Shah, 2015; Kern et al., 2020).

Dentro de las caseínas que se encuentran en la leche están: caseínas  $\alpha$ 1-, caseínas  $\alpha$ 2, caseína  $\beta$ , caseína  $\kappa$  (Cuadro 4) y sus variantes genéticas (Hazlett et al., 2018).

**Cuadro 4.** Concentración de caseínas en la leche (Kailasapathy, 2015).

Componente proteico	g/kg
Caseína $\alpha$ 1	11.5
Caseína $\alpha$ 2	3.00
Caseína $\beta$	9.50
Caseína $\kappa$	3.40
Caseína $\gamma$	1.20

Dentro de los ingredientes proteicos alternativos más recientes se encuentran aquellos que contienen tanto caseínas como proteínas de suero en una proporción 80:20, éstos se obtienen a través de tecnologías de filtración por membrana. Estos productos incluyen los concentrados de proteínas de leche los cuales están identificados por el contenido de proteína numérico por ejemplo (concentrado de proteína de leche, MPC70 o MPC85, que contienen 70 % p/p y 85 % p/p de proteína, respectivamente) y MPI (aislado de proteína de leche, por sus siglas en inglés) que contiene  $\geq 90$  % p/p de proteína, entre otros (Singh, 2011; Huppertz et al., 2018).

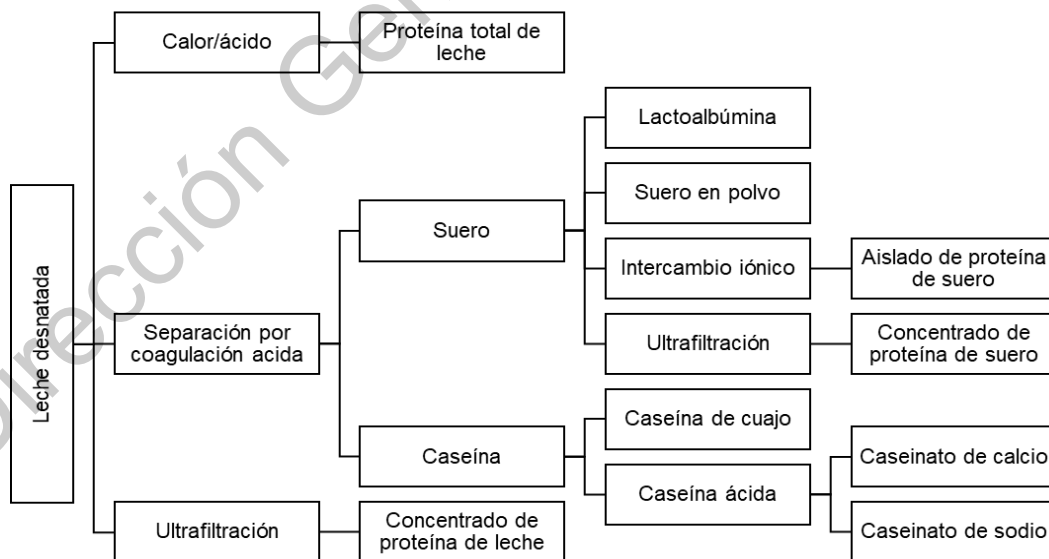
### **2.4.1.3 Caseínas, caseinatos y productos proteicos de la leche ricos en caseína**

La industria láctea fabrica una gran variedad de productos a base de proteínas lácteas diseñados particularmente para aplicarse en sistemas alimentarios, debido a su funcionalidad, nutrición y propiedades sensoriales (Singh, 2011; Kelly & Fox, 2016).

En el caso de productos que incluyan caseínas, estos se pueden fabricar de diferentes tipos y grados de caseínas, así como de caseinatos. En el mercado existen varios productos que van desde coprecipitados de caseína de cuajo, caseína micelar hasta caseína ácida, dependiendo del método utilizado para extraerlas de la leche. La caseína ácida que se obtiene por precipitación de la caseína en leche desnatada en su punto isoelectrico de pH 4.6 a 40°C usando ácido clorhídrico o ácido sulfúrico. En otros casos, se obtiene por producción *in situ* a causa de producción de ácido láctico por bacterias ácido lácticas. Por otro lado, la caseína de cuajo se obtiene por coagulación de la leche descremada con cuajo (quimosina). La caseína micelar nativa (CMN) es básicamente un concentrado de proteína de leche libre de suero obtenido por microfiltración y diafiltración (DF), seguida por un secado por aspersión. En comparación con la caseína ácida y los caseinatos, la caseína de cuajo tiene un mayor contenido de minerales, debido a que su producción no implica acidificación y, por lo tanto, la fracción de minerales se mantiene en el producto. Sin embargo, la caseína de cuajo contiene micelas de caseína agregadas, a causa de esto, es insoluble en agua. Los coprecipitados, son productos de caseína obtenidos por coagulación ácida adicionada de calor; contienen tanto caseínas como proteínas de suero (Cuadro 5).

En el caso de los caseinatos, estos suelen tener una alta solubilidad en agua. Entre ellos se pueden mencionar el caseinato de sodio, de potasio, de magnesio y de calcio. Las soluciones de caseinato de magnesio y especialmente de caseinato de calcio, son más turbias y menos translúcidas, lo que indica la presencia de partículas más grandes. Es importante señalar que las soluciones de caseinato de

calcio y caseinato de magnesio tienen una viscosidad más baja que el caseinato de sodio y caseinato de potasio. Esto puede atribuirse principalmente a la asociación de iones  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  con residuos de serina, lo que reduce la hidratación de las partículas de caseinato (Farkye & Shah, 2015; Huppertz et al., 2018). Otros productos a base de proteína de leche con alto contenido de caseína son: leche en polvo descremada (NFDM), aislado de proteína de leche (MPI) y concentrado de proteína de leche (MPC) (Cuadro 5). En el caso de la NFDM, ésta se obtiene eliminando el agua de la leche pasteurizada que se utiliza como materia prima. Generalmente el proceso de eliminación de agua se lleva a cabo a través del secado por aspersión. Tanto la NFDM, como los MPI y los MPC son una clase de ingredientes que están tomando importancia debido a que, a diferencia de las caseínas y los caseinatos, las micelas de caseína se retienen en una forma casi nativa. Para lograr esto, se aplican tecnologías de separación como la filtración por membranas. Para los MPC y los MPI se utiliza la ultrafiltración (UF), como una herramienta para concentrar las caseínas y las proteínas de suero con la finalidad de eliminar la lactosa y/o las sales solubles. Los valores de corte de las membranas utilizadas para UF van de 5 a 20 kDa, seguido de un lavado adicional por diafiltración (DF), en donde se elimina la lactosa, así como las sales solubles y se obtiene productos con un 90 % de proteína en materia seca (Figura 2).



**Figura 2.** Productos proteicos funcionales de la leche (Singh, 2011; Schuck, 2014).



**Cuadro 5.** Composición química (porcentaje en peso seco) de productos proteicos de leche (Farkye & Shah, 2015).

Producto	Proteína (%)	Grasa (%)	Lactosa (%)	Ceniza (%)	Humedad (%)	pH
NFDM	36.00	0.80	52.2	8.00	3.20	-
MPC56	56.00	1.20	30.0	8.00	4.80	6.80 – 8.00
MPC70	70.00	1.40	16.8	7.60	4.20	6.00 – 8.00
MPC80	80.00	1.50	5.80	7.40	4.80	6.80 – 8.00
MPI	90.00	2.00	1.00	2.00	4.30	6.70 – 7.20
Caseína micelar	85.00	2.00	<0.50	8.00	5.00	6.70 – 7.10
Caseína ácida	85.20	2.00	<0.50	2.80	10.0	4.20 – 5.20
Caseína de cuajo	84.00	2.00	1.60	4.20	10.0	4.60 – 5.10
Coprecipitados	89.00-94.00	1.50	1.50	4.50	5.00	~6.80
Caseinato de sodio	89.00	2.50	1.00	5.00	4.00	6.60 – 7.30
Caseinato de potasio	89.00	2.50	1.50	5.00	4.00	5.60 – 6.90
Caseinato de calcio	88.00	2.50	1.00	6.00	4.00	6.60 – 7.30
Caseinato de amonio	90.00	2.00	1.00	2.50	4.00	6.00 – 6.50

#### 2.4.1.4 Concentrados de proteína de leche (MPC)

Los MPC son proteínas lácteas en polvo con un contenido de proteínas de aproximadamente 50 a 85 % p/p. Son fabricados por pasteurización, UF y DF. Posteriormente se elimina el agua por evaporación al vacío para finalizar con un secado por aspersion, eliminando de manera parcial la lactosa, así como los minerales. El contenido de proteína de los polvos varía dependiendo del grado de la UF o DF. Los MPC contienen proteínas de suero, así como caseínas en las mismas proporciones que en la leche utilizada para su fabricación (Kieferle, et al., 2018).

Los MPC se han estado utilizando en varios productos como queso, fórmula de leche infantil, helado, bebidas lácteas, bebidas deportivas, productos relacionados con la salud, entre otros (Meena et al., 2017).

En los MPC, la caseína se encuentra en forma micelar, semejante a la que se encuentra en la leche. De la misma manera, las proteínas del suero también están en su forma nativa, es decir, sin desnaturalizar (Singh et al., 2019).

Si se compara los MPC con la leche desnatada en polvo (SMP) o la leche entera en polvo (WMP) los MPC son más altos en cuanto al contenido de proteínas y más bajos en lactosa. Por lo tanto, proporcionan una fuente de proteína concentrada, agregando propiedades sensoriales y funcionales en aplicaciones finales (Agarwal et al., 2015).

De acuerdo con el contenido de proteínas, los MPC se pueden clasificar en 3 tipos principales: polvo con bajo contenido de proteínas ( $\leq 40$  % p/p de proteína), polvo de proteína media (60–70 % p/p) y polvo con alto contenido de proteínas ( $\geq 80$  % p/p de proteína). La fabricación de los MPC provoca el aumento de la concentración de proteínas, así mismo provoca la disociación de la caseína individual de sus estructuras micelares. Los fragmentos de micelas de caseína podrían predisponer al sistema de la leche a otras interacciones proteína-proteína durante el secado por pulverización y afectar la funcionalidad del polvo. Todos estos cambios contribuyen a la lenta rehidratación de los polvos de MPC (Sikand, et al., 2011).

De este modo, la disolución de los polvos con un alto contenido de proteína es mucho más lenta con el aumento del tiempo de almacenamiento y con una temperatura, particularmente elevada (Crowley et al., 2015).

Es importante señalar que la actividad de los iones de calcio se considera mayor en las MPC altas en proteínas debido a la fuerza iónica reducida. Esto resulta en una estabilidad térmica reducida, lo cual es importante ya que afecta la estabilidad durante el secado de los MPC y esto puede conducir a la insolubilidad de los productos en polvo. La insolubilidad de los MPC ocurre en los productos con

alto contenido de proteínas. Otro factor que influye en la insolubilidad es la temperatura durante el secado (Fang et al., 2012; Huppertz et al., 2018)

#### **2.4.1.5 Leche en polvo descremada (NFDM)**

La leche en polvo descremada es utilizada como un valioso alimento o ingrediente, debido a que posee proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales. Además de mejorar las propiedades funcionales como la formación de espuma, gelificación, emulsificación y estabilidad térmica. Ésta se obtiene después de la eliminación de la grasa de la leche pasteurizada que se utiliza como materia prima, generalmente la eliminación de agua se lleva a cabo a través del secado por aspersion.

La leche en polvo descremada se clasifica de acuerdo con el tratamiento térmico recibido y de acuerdo con la cantidad de proteína de suero de leche que permanece sin desnaturizar. Así se tiene la de temperatura alta (HH) la cual es menos soluble, la de temperatura media (MH) y la de temperatura baja (LH) que son más solubles (Cuadro 6).

El calentamiento durante el secado afecta la estructura de las proteínas lo que podría generar desnaturación, agregación o incluso insolubilidad.

Es importante señalar que el proceso térmico aplicado a la leche descremada líquida antes del secado por aspersion repercute en el estado de desnaturación de las proteínas del suero (WP) y esto, a su vez, repercute en sus propiedades funcionales. Por ejemplo, cuando la leche descremada se trata a 70 °C por 15 s, se obtiene un LH que posee mayor solubilidad que la HH la cual se somete a 120 °C durante 1 a 5 minutos.

Lo que resulta en un polvo con mayores propiedades de gelificación, estabilidad térmica y absorción de agua (Alan et al., 2018; ADPI, 2019).

**Cuadro 6.** Concentración, temperatura y tiempo de precalentamiento de tipos de leche en polvo descremada (**NFDM**) (Olson & Aryana, 2008).

Clasificación de <b>NFDM</b>	Temperatura y tiempo de precalentamiento	Concentración de proteína de suero sin desnaturalizar
LH*	71 °C por 2 min.	> 6.0 mg/g
MH**	71 – 79 °C por 20 min.	1.51 – 5.99 mg/g
HH***	88 °C por 30 min.	< 1.5 mg/g

\*Temperatura baja, \*\*Temperatura media, \*\*\*Temperatura alta.

#### 2.4.1.6 Proteínas del suero

En el caso de las proteínas del suero, éstas se han utilizado para clasificar al grupo de proteínas de la leche que permanecen solubles en ella, es decir, son más solubles en agua que las caseínas. Las proteínas de suero no están asociadas con la micela de caseína u otras partículas de la leche. Éstas son proteínas globulares y son consideradas como proteínas de rápida digestión. Dentro de este grupo se encuentran las  $\beta$ -lactoglobulina, la cual es la proteína principal en el suero. La  $\alpha$ -lactalbumina, la seroalbumina, inmunoglobulinas y lactoferrina, así como sus variantes genéticas (Cuadro 7) (Haug et al., 2007; Deeth, & Bansal, 2019).

**Cuadro 7.** Concentración de proteínas en el suero de leche (Kailasapathy, 2015).

Componentes del suero	mg/kg
$\beta$ -Lactoglobulina	3.20
$\alpha$ -Lactalbumina	1.20
Glicomacropéptidos	1.20
Proteosa peptona	1.10
Inmunoglobulina G	0.70
Albumina sérica	0.40
Lactoferrina	0.06
Inmunoglobulina A	0.04
Inmunoglobulina M	0.04
Lactoperoxidasa	0.03

Sin embargo, se reconoce que las proteínas en el suero, particularmente del queso, difieren de las del suero de la leche. Esto debido a que incluyen a algunas proteínas de las bacterias iniciadoras, metabolitos bacterianos y glicomacropéptidos (GMP) el cual es un producto de la acción del cuajo sobre la k-caseína. Por esta razón, el suero de leche concentrado en proteínas comercialmente disponible, elaborado a partir de leche descremada, difiere en composición con respecto al concentrado de proteína de suero, la cual está elaborado de suero de quesos.

Dentro de las aplicaciones industriales más comunes para la proteína de suero se tiene a las fórmulas infantiles (FI) como fuente de aminoácidos esenciales y otros nutrientes (Fenelon et al., 2019).

#### **2.4.1.7 Aislado de proteína de suero (WPI)**

El WPI según el Instituto Americano de Productos Lácteos (ADPI, por sus siglas en inglés), se obtiene mediante la eliminación de suficientes componentes no proteicos del suero de leche, de modo que el producto seco final contiene no menos del 90 % de proteína en base a materia seca. Se produce mediante procesos de filtración por membrana e intercambio iónico (ADPI, 2019).

El WPI es un subproducto de la industria del suero de queso. Debido a su alto valor nutricional y buenas propiedades funcionales, tiene un gran potencial en la industria alimentaria (Chen et al., 2019).

Las proteínas del suero tienen propiedades únicas de gelificación, espumado, emulsificación y estabilización. WPI se utiliza como un ingrediente funcional clave en productos lácteos, cárnicos y de panadería. Es una mezcla de proteínas globulares como la  $\alpha$ -lactoglobulina ( $\alpha$ -lg),  $\beta$ -lactalbúmina ( $\beta$ -la), albumina de suero bovino (BSA), inmunoglobulina (IMG) y varias otras proteínas menores. Las propiedades funcionales de WPI dependen de su composición y del grado de desnaturalización de las proteínas durante la producción. El proceso térmico de la proteína de suero, así como las condiciones de calentamiento (temperatura y tiempo de retención) también pueden influir en sus funcionalidades (Khalesi et al., 2016).

El nivel de enriquecimiento de proteínas, que va del 35 % (concentrado de proteína de suero de leche 35, WPC35) al 80 % (WPC80) depende directamente del factor de concentración de volumen aplicado. Las composiciones aproximadas de WPC35, WPC80 y WPI se comparan en el Cuadro 8 (Kelly, 2019).

**Cuadro 8.** Composición de WPCs y WPI (Kelly, 2019).

<b>Composición (%)</b>	<b>WPC35</b>	<b>WPC80</b>	<b>WPI</b>
Proteína (base seca)	35	80	90
Grasa *	4	8	1
Ceniza *	6	3	4
Lactosa *	60	3	1
Humedad *	5	6	6

\* Base húmeda

#### **2.4.1.8 Concentrado de proteínas de suero (WPC)**

El WPC es otro producto a base de proteína de suero. El WPC, según el Instituto Americano de Productos Lácteos, se obtiene mediante la eliminación de suficientes componentes no proteicos del suero mediante técnicas de separación física tales como como filtración por membrana (ADPI, 2016).

Las proteínas del suero se caracterizan por sus propiedades funcionales debido a sus características físicas, químicas y estructurales. Una de las propiedades más importante es la capacidad de formar geles que pueden contener agua, lípidos y otros componentes que actúan como emulsionantes; además proporcionan propiedades de textura. Otro aspecto es su propiedad espumante, que depende principalmente del grado de desnaturalización de las proteínas (Bacenetti et al., 2018).

Estas habilidades también están influenciadas por el grado de concentración de proteínas en el WPC. Por ejemplo, el WPC que contiene 34–35 % de proteínas (WPC35) tiene buenas propiedades de emulsificación, es altamente soluble y tiene un sabor lácteo suave. Se utiliza en la fabricación de yogurt, queso procesado y

fórmulas infantiles. El WPC con aproximadamente 80 % de proteína (WPC80) tiene un contenido de carbohidratos más bajo, en comparación con WPC35. Éste se caracteriza por sus buenas propiedades de gelificación, emulsificación y espumado. El WPC80 es un excelente ingrediente para la nutrición deportiva y los productos para el control de peso gracias a su alta resistencia del gel y sus buenas propiedades de unión al agua (Bacenetti et al., 2018).

#### **2.4.1.9 Permeado de suero**

El permeado de suero (WP), también conocido como suero de leche, suero desproteinizado o sólidos de productos lácteos es un efluente de desecho rico en lactosa, generado durante la fabricación de queso y otros pasos del proceso, como la extracción de proteínas (Smith et al., 2016; Pasotti et al., 2020).

El WP contiene aproximadamente 65 a 85 % de lactosa, de 8 a 20 % de cenizas o minerales y 3.0 a 8.0 % de proteínas y no más de 1.5 % de grasa. El WP funciona bien en productos horneados debido a su alto contenido de lactosa la cual, se utiliza en la reacción de Maillard para producir un color marrón y un sabor caramelizado. El WP también se usa en glaseados, recubrimientos de confitería, mezclas secas para salsas y como agente de carga o sustituto de sólidos lácteos (Smith et al., 2016).

Aproximadamente el 90 % de la leche usada se convierte en suero, que retiene aproximadamente la mitad del contenido nutricional de la leche. Esta carga nutricional convierte al suero en un problema ambiental, por lo que, mediante la extracción de moléculas de alto valor tales como proteínas que se utilizan para dieta de animales o humanos (Prazeres et al., 2012). Después de este proceso, llevado a cabo mediante ultrafiltración, se genera un líquido residual llamado permeado de suero (WP), que retiene toda la lactosa inicial (Okamoto et al., 2019).

El WP puede descartarse o procesarse adicionalmente para obtener moléculas de valor agregado directamente contenidas en WP, como la lactosa, o como resultado de su transformación química o biológica. El volumen de WP puede

reducirse mediante ósmosis inversa para eliminar el agua (obteniendo permeado de suero concentrado o CWP) (Lindsay et al., 2018).

#### **2.4.1.10 Suero de leche**

El suero es la parte acuosa de la leche que queda después de la separación de la cuajada (es decir, la caseína de la leche) de la parte sólida resultante de la coagulación de la leche por enzimas ácidas o proteolíticas. Representa el 85-95 % del volumen de la leche y retiene aproximadamente el 55 % de sus nutrientes, entre los que se pueden mencionar lactosa (63–75 % p/v), proteínas solubles (0.6–0.8 % p/v), lípidos (0.4–0.5 % p/v), sales minerales (8–10 % de extracto seco) y otros componentes menores. Su composición varía según el origen de la leche (oveja, cabra o vaca) y según la técnica de transformación empleada.

Dependiendo del procedimiento utilizado para la precipitación de caseína, se pueden producir dos variedades principales de suero: suero ácido (de fabricación de requesón y yogurt griego, pH <5) y suero dulce (de fabricación de queso y yogurt, pH 6–7). El suero ácido típicamente tiene mayor cantidad de minerales, menor contenido de lactosa y proteínas que el suero dulce. Generalmente el suero en polvo se concentra por medio de ultrafiltración (Bentahar et al., 2019).

La mayoría de los polvos de proteína de suero provienen del suero dulce de quesos cuajados como el queso cheddar o mozzarella (Wherry et al., 2019).

Las aplicaciones alimentarias del suero de leche en polvo son variadas, se utiliza confitería, panadería, yogures, salsas, productos cárnicos, helados, sopas entre otros. Con el aumento de proteínas en el suero de leche, además de aportar un mayor valor nutricional, así como propiedades funcionales mejoradas, como viscosidad, emulsificación, formación de espuma, gelificación, entre otras (Augustin & Margetts, 2003).

### **2.5 Lípidos de la leche**

La grasa es la fracción más variable de todos los componentes de la leche. Aproximadamente, la leche contiene 33 g/L de lípidos. La fracción lipídica de la



leche está compuesta principalmente de una mezcla de triglicéridos (95 % p/p) y el resto está compuesta por fosfolípidos (alrededor del 1 % p/p), colesterol (menos del 2 % p/p) esteroides, carotenoides y vitaminas liposolubles (A, D, E y K). Así como de ácidos grasos libres (FFA) que representan menos del 0.5 % p/p del total de la fracción lipídica de la leche (Cuadro 9). Cabe mencionar que más de la mitad de los ácidos grasos de la leche son saturados (Haug, 2007; Kailasapathy, 2015).

**Cuadro 9.** Concentración de lípidos en la leche (Kailasapathy, 2015).

<b>Tipos de lípidos</b>	<b>g/100g</b>
Fosfolípidos	1.11
Colesterol	0.46
Triglicéridos	95.8
1,2 diacilglicerol	2.25
Ácidos grasos libres	0.28
Monoacilglicerol	0.08

**Cuadro 10.** Composición de los ácidos grasos de la grasa de la leche (Kailasapathy, 2015).

<b>Ácido graso</b>	<b>Nombre común</b>	<b>%</b>
4:0	Ácido butírico	3.32
6:0	Ácido caproico	2.34
8:0	Ácido caprílico	1.19
10:0	Ácido cáprico	2.81
12:0	Ácido láurico	3.39
14:0	Ácido mirístico	11.4
14:1	Ácido miristoleico	2.63
16:0	Ácido palmítico	3.38
18:0	Ácido esteárico	9.84
18:1	Ácido oleico	27.3
18:2	Ácido linoleico	2.78
18:3	Ácido linolénico	0.59

La grasa en la leche está presente en forma de pequeños glóbulos formando una emulsión. Cada glóbulo de grasa está rodeado de otros componentes de la leche, principalmente de proteínas y fosfolípidos, lo que estabiliza la emulsión y evita que la grasa se separe (Kailasapathy, 2015).

En el caso de los ácidos grasos, la leche contiene alrededor de doce en cantidades superiores al 1 % p/p (Cuadro 10) de diferente longitud y saturación.

## 2.6 Grasas vegetales

La Norma Oficial Mexicana NOM-155-SCFI-2003 define a la grasa vegetal como el producto obtenido de la extracción de los aceites comestibles de las plantas permitidas para consumo humano, que haya sido sometido a extracción y, en su caso, refinación, lavado, deodorizado, blanqueo, hibernación o desencerado, winterización, entre otros procesos. La misma norma define a la leche con grasa vegetal como la elaborada a partir de leche, a la cual se le sustituye la mayor parte de la grasa butírica por grasa vegetal comestible, en las cantidades necesarias para ajustar el producto a las especificaciones. La importancia de las grasas y los aceites recae en las propiedades funcionales que estos le pueden conferir a los alimentos a causa de su naturaleza química y características estructurales (Devi & Khatkar, 2016). Dentro de las grasas y aceites más importantes en la industria alimentaria se pueden mencionar la de palma, canola, soya, girasol, coco, semilla de algodón, cacahuete y oliva (Cuadro 11) (USDA, 2018).

**Cuadro 11.** Producción mundial de aceite en millones de toneladas en el 2018 (USDA, 2018).

<b>Aceite</b>	<b>Producción (millones de toneladas)</b>
Palma	69.3
Soya	56.2
Canola	28.5
Girasol	17.7
Oliva	2.70

### 2.6.1 Propiedades funcionales de las grasas vegetales

La característica clave para la funcionalidad de las grasas vegetales es su relativa insolubilidad en agua, a causa de que las moléculas lipídicas tienen la característica de contener una gran región no polar. Sin embargo, también contienen grupos funcionales con cierto grado de polaridad. Esta combinación de polar y no polar, así como las variaciones que son posibles, es lo que le da la funcionalidad. El grupo polar es muy importante debido a la interacción del lípido con el agua. Los grupos altamente polares tenderán a ser de naturaleza hidrofílica, y por lo tanto, tenderán a orientarse hacia el agua, mientras que los grupos hidrófobos tenderán a orientarse hacia las regiones no polares. Estos efectos competitivos dan lugar a la formación de estructuras como las micelas y las bicapas (Belton, 2000; Santos et al., 2016).

Los aceites vegetales son una muy buena fuente de grasas insaturadas y generalmente no contiene colesterol, por lo tanto, la sustitución de la grasa láctea por aceites vegetales en la leche es una muy buena opción para obtener un balance de grasas saturadas e insaturadas (Baraka & Abd, 2015).

Por otra parte, los monoacilglicéridos (MAG) poseen propiedades tensoactivas y se utilizan en la industria alimentaria como emulsionantes. En el caso de los diglicéridos (DAG) sus propiedades como agentes tensoactivos son mucho más débiles que las de los MAG. En los alimentos, los DAG se utilizan como agentes emulsificantes en la producción de productos horneados finos, entre otros y en reemplazo de las grasas (Loi et al., 2019).

Los aceites vegetales pueden incorporarse a los productos alimenticios como sustituto de la grasa láctea. Existen leches que están hechas de leche desnatada reconstituida con un aceite vegetal apropiado, este aceite debe estar libre de ácido linolénico y debe tener solo un bajo contenido de ácido linoleico, de igual manera es recomendable la adición de antioxidantes para que sea estable a la oxidación. Dentro de los aceites más utilizados para sustituir la grasa láctea están el aceite de palma y el aceite de coco ya que estos pueden hidrogenarse parcialmente para

proporcionar una estabilidad adicional contra la oxidación (Gunstone & Hamilton, 2004; Ejeahalaka & On, 2019).

Además, las grasas vegetales como el aceite de palma y el aceite de coco son menos variables comparándola con la grasa láctea ya que ésta varía con la estacionalidad y la dieta del animal (Hanus et al., 2018).

### **2.6.2 Oleína de palma**

El aceite de palma ha sido comercializado durante mucho tiempo. Su composición más o menos equilibrada de ácidos grasos insaturados y saturados, el bajo nivel de ácido linoleico, así como la casi ausencia de ácido linolénico hacen que el aceite sea relativamente estable al deterioro oxidativo (Gunstone, 2011).

El aceite de palma puede ser fraccionado y obtener una parte líquida llamada oleína de palma y una parte más sólida, a la que se le puede llamar estearina. Las fracciones como la oleína y la estearina están disponibles comercialmente. Entonces se podría decir que la oleína de palma es la fracción líquida que se obtiene del fraccionamiento del aceite de palma y representa aproximadamente el 85 % de éste. Su obtención de basa en la cristalización del aceite a temperatura controlada y la eliminación de los cristales por filtración. Dentro de las características de la oleína de palma se encuentra que ésta contiene mayores cantidades de ácidos oleico (39–45 %) y linoleico (10–13 %) en comparación con el aceite de palma. La oleína de palma tiene un punto de fusión de 18–20 °C, por consiguiente, se comporta como un líquido a temperatura ambiente (25 °C) (Siew, 2002; Pande et al., 2012).

Dentro de las aplicaciones que se le pueden dar a la oleína de palma es como sustituto de la grasa butírica de la leche en las fórmulas lácteas. Para poder hacer la elección de los aceites vegetales para la producción de fórmulas lácteas, se hace debe tomar en cuenta el perfil de ácidos grasos. En el caso de la leche materna humana, el 60 % del ácido palmítico está esterificado en la posición sn-2 del glicerol, por otro lado, el aceite de palma y su fracción de oleína están esterificados en las posiciones sn-1 y sn-3 del glicerol. La diferencia entre las esterificaciones hace que

no sean adecuados para poder ser utilizadas en una fórmula láctea infantil ya que la lipasa pancreática hidroliza específicamente ácidos grasos en las posiciones sn-1 y sn-3 dejando los ácidos grasos saturados, como el palmítico y el esteárico, sin hidrolizar. Entonces, si el ácido palmítico está esterificado en la posición sn-1 y sn-3 como lo está en el aceite de palma y su fracción de oleína de palma, se formarán complejos de calcio y no podrán ser absorbidos por el organismo generando un bajo nivel de calcio, así como la dureza de las heces (Pande et al., 2012).

### **2.6.3 Emulsificantes**

Dado que los emulsificantes alimenticios hacen más que estabilizar las emulsiones, se denominan también surfactantes o compuestos tensoactivos. Los compuestos tensoactivos operan a través de un grupo principal hidrófilo que se siente atraído por la fase acuosa y una parte lipofílica generalmente más grande que prefiere estar en la fase oleosa. Por lo tanto, el surfactante se posiciona en la interfaz aire/agua o aceite/agua, donde puede actuar para disminuir la tensión superficial o interfacial, respectivamente. Las colas lipofílicas están compuestas de ácido palmítico o ácidos grasos más largos. Las cadenas más cortas, como la de ácido láurico, aunque pueden ser excelentes emulsionantes, pueden hidrolizarse y dar como resultado sabores indeseables. Los grupos de cabeza polar pueden estar presentes en una variedad de grupos funcionales. Pueden incorporarse para producir surfactantes aniónicos, catiónicos, anfóteros o no iónicos. Los mono y diacilgliceroles (más comúnmente conocidos como mono y diglicéridos), que contienen un grupo funcional -OH, son los emulsionantes no iónicos más utilizados, sin embargo, existen otros igual de importantes. La lecitina, cuyo grupo principal es una mezcla de fosfátidos, puede visualizarse como anfótero o catiónico, dependiendo del pH del producto. Las proteínas también pueden ser tensioactivas debido a la aparición de aminoácidos lipófilos como la fenilalanina, la leucina y la isoleucina. Los emulsificantes generalmente reconocidos como seguros (GRAS) por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) son: ésteres diacetiltartáricos de monoglicéridos (DATEM), lecitina, mono y diglicéridos y derivados de fosfato monosódico de mono y diglicéridos (Hasenhuettl, 2008; Chen, 2015).

El número y la polaridad relativa de los grupos funcionales determinan si la molécula será soluble en agua o aceite (o dispersable). Una herramienta conceptual muy útil es el balance hidrófilo-lipófilo (HLB). Una forma alternativa de clasificar los emulsionantes de alimentos es usar el número HLB para el emulsionante. El número de HLB es una figura numérica que representa información sobre las propiedades fundamentales de la sustancia (por ejemplo, cómo actúa en el agua) además de que es una funcionalidad simplificada que caracteriza el equilibrio entre las propiedades hidrofílicas y lipofílicas del emulsionante.

Por lo tanto, un número bajo de HLB indica una molécula con una alta hidrofobicidad, mientras que un valor alto expresa una estructura con una fuerte naturaleza hidrofílica. Los valores altos de HLB se asocian con una fácil dispersabilidad de agua. Dado que la práctica convencional consiste en dispersar el surfactante en la fase continua, los emulsionantes con alto HLB son útiles para preparar y estabilizar emulsiones de aceite en agua (O/W). Los emulsionantes de bajo HLB son útiles para la formulación de emulsiones de agua en aceite (W/O), como la margarina. Los valores muy altos o bajos no son funcionales como emulsionantes, ya que casi toda la molécula se solubilizará en la fase continua (Cuadro 12).

Además de su función principal de producir y estabilizar emulsiones, los emulsionantes de alimentos (o surfactantes) contribuyen a muchos otros roles funcionales como el de proporcionar estabilidad a la emulsión y modificar la viscosidad (Frank, 2002; Whitehurst, 2008; Lamothe et al., 2019).

El valor HLB se puede usar como una guía para la selección del emulsionante para un sistema coloidal. Una regla general es que los valores en el rango de 2 a 6 se elegirán para los sistemas de agua en aceite (es decir, las emulsiones con aceite en la fase continua), mientras que los emulsionantes con un valor en el rango de 8 a 18 serán adecuados para uso en sistemas de aceite en agua, donde la fase continua es acuosa (Whitehurst, 2008).

**Cuadro 12.** Emulsificantes y su valor HLB (Whitehurst, 2008).

<b>Tipo de emulsificante</b>	<b>Valor HLB</b>
Diglicéridos	2 – 3
Monoglicérido	3 – 4
Lactilato de calcio	7 – 9
Lactilato de sodio	18 – 21
Poligliceroléster	6 – 11
Propilenglicoléster	2 – 3

### **2.6.3.1 Mono y diglicéridos**

Los mono y diglicéridos, así como sus derivados representan aproximadamente el 70 % de la producción mundial de emulsificantes para alimentos por lo que se consideran el grupo más importante. Tienen múltiples aplicaciones como en las margarinas, helados y productos masticables. Los glicéridos tienen múltiples funciones tales como aireación emulsificación y desemulsionante (Norn, 2015).

Durante la fabricación de fórmulas lácteas en polvo, la emulsión se logra mediante la adición de proteínas y emulsificantes por lo que será necesario evaluar la estabilidad de ésta por algunos métodos como el tamaño de partícula de la emulsión, la capacidad de la emulsión y la estabilidad (Masum et al., 2019).

### **2.6.3.2 Lecitina de soya**

La lecitina de soya es un importante estabilizador natural que se ha empleado extensamente en la emulsión de alimentos. Esta función puede atribuirse a la estructura molecular anfifílica que contiene una parte lipófila en forma de grupos de ácidos grasos y un grupo hidrófilo en forma de ésteres con base fosfórica. La lecitina influye en la formación de las emulsiones y forma una película protectora gruesa en la superficie de las gotitas de aceite. El sistema no solo puede disminuir la tensión

interfacial sino también prevenir la coalescencia y, por lo tanto, mejorar la estabilidad de la emulsión (Wang et al., 2017).

La lecitina generalmente se utiliza en la fabricación de leche en polvo, como resultado final se obtiene un recubrimiento alrededor de la superficie de las partículas de leche (que contiene grasa) aumentando su afinidad por el agua y por ende la solubilidad (Hammes et al., 2015).

## **2.7 Carbohidrato en la leche**

La lactosa es el mayor carbohidrato presente en la leche, su concentración es de aproximadamente 5 %. Es un disacárido que comprende una molécula de glucosa unida a una molécula de galactosa. Existen tres formas sólidas de la lactosa,  $\alpha$ -lactosa, lactosa anhidra y  $\beta$ -lactosa. La forma  $\beta$  es la que contiene mayor solubilidad, pero a través de la mutarrotación se pueden encontrar ambas formas en solución. La lactosa es un azúcar reductor y experimenta reacciones de Maillard en la leche lo que provoca un color pardo o quemado. La lactosa es uno de los azúcares comunes menos solubles, con una solubilidad en agua de solo 17.8 % a 25 °C. Esta baja solubilidad tiene consecuencias durante la producción de leche concentrada y productos lácteos congelados por lo que es necesario inducir la cristalización para producir una gran cantidad de pequeños cristales con el fin de evitar el defecto de “solidez”. En productos tales como en polvos formulados, los cristales de lactosa absorben la humedad de una manera muy lenta, por lo tanto, existen menos apelmazamiento o agrupamiento del polvo. Los cristales formados son duros y no son muy solubles. Durante el secado rápido, se forma lactosa amorfa. Esta forma de lactosa es muy higroscópica y causa apelmazamiento en productos secos que contienen niveles de humedad del 8 % o más (Ganzle et al., 2008; Kailasapathy, 2015).

### **2.7.1 Propiedades funcionales de los carbohidratos**

Los carbohidratos se utilizan como ingredientes alimentarios principalmente debido a las funcionalidades que imparten (Cuadro 13). Cada componente o



ingrediente a base de carbohidratos en un producto alimenticio (monosacáridos, sacarosa, oligosacáridos, jarabes a base de almidón, polioles, almidones y productos modificados) tienen características y propiedades funcionales únicas (BeMiller, 2019).

Dentro de las propiedades funcionales más importantes de los carbohidratos están las de proporcionar sabor a los alimentos. Los sacáridos generalmente están asociados con el sabor dulce, uno de ellos, por ejemplo, es la D-glucosa que, debido a la rápida reabsorción, es una fuente de energía disponible inmediatamente. Otro sacárido muy importante es la D-fructosa, ésta es el azúcar más fácilmente soluble en agua, además retiene la humedad en los alimentos. Por otro lado, la lactosa, se utiliza como portador de otros edulcorantes, además de que mejora el sabor de los productos lácteos. La sacarosa es la más utilizada debido a su agradable sabor y por último la maltosa, la cual es un disacárido ligeramente higroscópico de impresión dulce, suave y pura. Otra de las propiedades funcionales de los carbohidratos es que estos se utilizan como colorantes, ya que se utilizan para la generación de caramelo, el cual es un colorante marrón para los alimentos. Además, los carbohidratos otorgan aroma y textura a los sistemas alimentarios. Las soluciones acuosas de varios carbohidratos forman líquidos viscosos. Los carbohidratos son también utilizados como encapsulantes debido a que, algunos compuestos volátiles se pierden durante el procesamiento de alimentos haciéndoles perder su sabor y color originales (Tomasik, 2007; Lacerda et al., 2016).

### **2.7.2 Maltodextrina**

Las maltodextrinas son una clase de carbohidratos extraídos de diversas fuentes botánicas. Son compuestos derivados de la hidrólisis ácida o enzimática del almidón, seguido de purificación y secado por aspersión. Durante el proceso de producción, el almidón nativo se calienta en presencia de agua, lo que hace que la estructura cristalina de los gránulos de almidón se hinche y se rompa irreversiblemente. El proceso de gelatinización hace que el almidón esté disponible para la degradación enzimática o ácida, o una combinación de ambos. Las diferencias en la composición de la maltodextrina se expresan mediante el

equivalente de dextrosa (DE). Esta medida relativamente simple se usa para expresar el grado de hidrólisis del almidón; cuanto mayor sea el grado de hidrólisis, mayor será el equivalente de dextrosa. La DE corresponde a la cantidad de azúcares reductores (en g) expresados como dextrosa en 100 g de materia seca. (Hofman et al., 2015). Las características funcionales de las maltodextrinas están relacionadas con el grado de DE y sirven como una guía para determinar sus aplicaciones (Cuadro 13).

**Cuadro 13.** Propiedades funcionales de los carbohidratos (BeMiller, 2019).

<b>Funcionalidad o aplicación</b>	<b>Carbohidrato</b>
Acidificación	Glucono Delta-lactona (GDL)
Antiaglomerante	Celulosa microcristalina (MCC)
Cuerpo	Maltodextrinas, almidones
Volumen	Maltodextrinas, almidones
Acarreador de sabores	Ciclodextrinas, maltodextrinas
Compatibilidad con altas temperaturas durante el proceso	Goma xantana
Compatibilidad con productos lácteos	Carragenanos
Compatibilidad con sales	Gomas (guar, xantana)
Emulsificación	Goma arábica, almidón
Estabilización de emulsiones	Goma arábica, almidón, celulosa microcristalina
Formación de películas	Hidroxipropilcelulosa
Estabilización de películas	Hidroxipropilcelulosa, gomas (xantana)
Gelificación	Alginatos de sodio, alginato de calcio
Formación de cristales	Sorbitol, sucrosa, xilitol
Inhibición de sinéresis	Goma guar, carboximetilcelulosa
Unión al agua	Alginatos, carragenanos, goma guar

Por ejemplo, las maltodextrinas con DE10 se aplican generalmente como vehículos de sabor, la encapsulación de aromas, las salsas instantáneas y los productos dietéticos. Las maltodextrinas DE15 se emplean para bebidas isotónicas,

sopas deshidratadas y las maltodextrinas DE20 se utilizan para el polvo de chocolate, postres lácteos, productos horneados bebidas en polvo, y premezclas de panadería industrial. Las variaciones en los valores de DE dan como resultado maltodextrinas con diferentes propiedades físicoquímicas, tales como higroscopicidad, viscosidad y cohesividad. Las maltodextrinas comerciales generalmente informan su valor DE como la única referencia (Takeiti et al., 2010; Castro et al., 2016).

Las maltodextrinas contienen oligómeros y polímeros de  $\alpha$  (1, 4) D-glucosa. La maltodextrina mejorara la calidad de los productos deshidratados, aumentando la estabilidad de los productos alimentarios y disminuyendo su adherencia. Esto se debe a la propiedad de la maltodextrina de absorber el agua, ya que forma una barrera protectora contra la humedad en la superficie de las partículas higroscópicas, además, aumenta la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). (Valenzuela & Aguilera, 2015). La maltodextrina es el agente acarreador más utilizado durante el secado por aspersion debido a que evita el colapso y la adherencia de la mezcla a la cámara de secado. Asimismo, protege al alimento de las reacciones oxidativas resultantes del proceso térmico a través de la formación rápida de una corteza durante el secado. La maltodextrina destaca por su buena solubilidad en agua, baja viscosidad a altas concentraciones de sólidos y bajo costo (Marques et al., 2014; Zhang et al., 2018). Las maltodextrinas brindan diversas funciones en los sistemas alimentarios como la resistencia al apelmazamiento, la modificación de textura, la capacidad de dispersión y la solubilidad, evitando la cristalización y reduciendo las reacciones de Maillard. Además, se usan como agentes gelificantes, sustitutos de grasa y mejoradores de volumen. La cristalización de la lactosa durante el almacenamiento puede provocar algunos efectos perjudiciales en los polvos lácteos, es decir, apelmazamiento, deterioro del sabor, mayor contenido de grasa libre y pardeamiento no enzimático. La incorporación de maltodextrina a productos lácteos en polvo aumenta la temperatura de transición vítrea, reduce la higroscopicidad y evita la cristalización de los polvos finales lo que mejora la estabilidad de almacenamiento. Las maltodextrinas pueden utilizarse como sustituto de la lactosa para proporcionar

energía. También se utilizan como fuente de carbohidratos en fórmulas infantiles no alérgicas que contienen proteínas no lácteas (soya) o proteínas hidrolizadas (fórmulas hipoalérgicas) (Hofman et al., 2015; Masum et al., 2019).

## 2.8 Vitaminas en la leche

En la leche se pueden encontrar tanto vitaminas liposolubles como vitaminas hidrosolubles (Cuadro 14). La leche entera es una buena fuente de vitamina A, pero el descremado reduce la cantidad de dicha vitamina. Debido a esto, la FDA exige la fortificación de la leche descremada y la leche baja en grasa para hacer que el contenido de vitamina A sea equivalente con el contenido de esta vitamina en la leche entera. La vitamina D es importante para el mantenimiento de la salud ósea, la vitamina K está presente pero su actividad nutricional en la dieta es menor y en el caso de la vitamina E, ésta es un antioxidante. En el caso del contenido de la vitamina C, éste es muy bajo, además, parte del contenido de esta vitamina se destruye a través de la pasteurización (Kailasapathy, 2015).

**Cuadro 14.** Concentración de las vitaminas de la leche. (Kailasapathy, 2015).

Vitaminas	Por 100 g de leche
Tiamina (B1)	45 µg
Riboflavina (B2)	175 µg
Niacina	90 µg
Piridoxina (B6)	50 µg
Ácido pantoténico	350 µg
Biotina	3.5 µg
Ácido fólico	5.5 µg
Vitamina B12	0.45 µg
Vitamina C	2 mg
Vitamina A	40 µg
Vitamina D	4 µg
Vitamina E	100 µg
Vitamina K	5 µg

## 2.9 Secado por aspersión

La leche es extremadamente perecedera, por lo que es necesario conservarla para su consumo posterior. La deshidratación es una alternativa para estabilizar a la mayoría de los ingredientes lácteos para su almacenamiento y su posterior uso. El secado por aspersión es la técnica más utilizada para la deshidratación de productos lácteos y derivados (Schuck et al., 2016).

La tecnología de secado por aspersión es muy conocida y utilizada para transformar soluciones, emulsiones, suspensiones, etc. de manera rápida y eficiente. El secado por aspersión incluso es usado en productos sensibles a la temperatura sin causarles degradación química ni biológica. Comparándolo con la liofilización, el método de secado por aspersión es de 30 a 50 veces más económico (Dyvelkov & Sloth, 2014; O'Sullivan et al., 2018). El secado por aspersión es definido como una operación unitaria mediante la cual un producto líquido o suspensión es atomizado a través de una corriente de gas caliente, obteniéndose un polvo seco instantáneamente (Mujumdar, 2007; Jacobs, 2014).

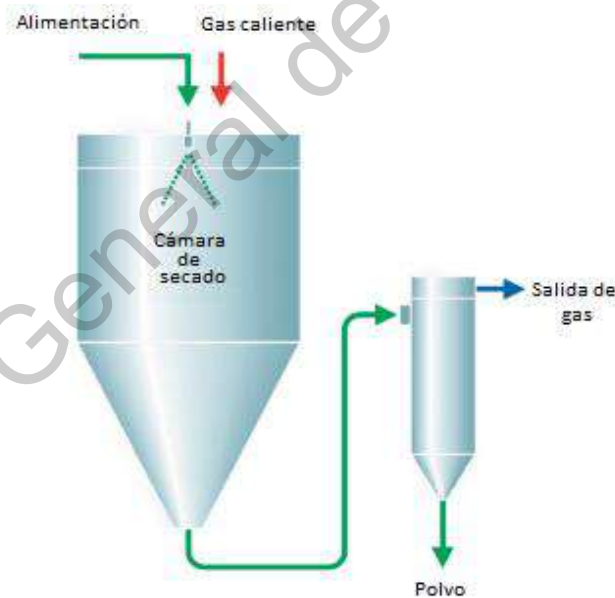
Los secadores por aspersión son utilizados en una amplia gama de procesos, entre los cuales destacan los relacionados con alimentos, detergentes, productos farmacéuticos, entre otros, para mejorar la conservación de ingredientes, su manejo, su transporte y su almacenamiento. De igual manera, se utilizan para obtener un producto con propiedades específicas como solubilidad instantánea (Fletcher et al., 2006; Li et al., 2010; Samantha et al., 2015).

Durante el secado por aspersión la mezcla húmeda es preparada disolviendo varios ingredientes en agua, se calienta, se homogeneiza, se evapora y se seca para producir los polvos (McCarthy et al., 2013). Uno de los efectos más significativos del calentamiento sobre la proteína de suero es la variación de las propiedades funcionales por lo que es necesario evaluar el perfil de las proteínas del polvo obtenido para identificar la presencia de proteínas que le otorgan estas propiedades. Una técnica recomendada es la electroforesis en gel de poliacrilamida

con dodecilsulfato sódico (SDS-PAGE), la cual es un método que permite la separación de proteínas por masa molecular (Masum et al 2019).

### 2.9.1 Mecanismo del secado por aspersión

El mecanismo del secado por aspersión es el siguiente: el líquido se atomiza en pequeñas gotas en la parte superior de la cámara. Las gotas viajan a través del flujo turbulento de aire caliente hasta la parte superior de la cámara junto con las gotas, fluyendo en la misma dirección, a esto se le conoce como flujo en paralelo (Figura 3). La fase líquida se calienta rápidamente y las moléculas del líquido se mueven a la superficie de la gota y se transfieren a la fase gaseosa. A medida que las gotas se vuelven sólidas, son transportadas por el flujo del aire calentado y se transfieren a una cámara de flujo ciclónica donde los sólidos salen de la cámara, son recolectados y el aire es expulsado a la atmósfera (Mujumdar, 2007; Jacobs, 2014; Liu et al., 2016).



**Figura 3.** Mecanismo del secado por aspersión (Jacobs, 2014).

La estabilidad de flujo es el punto clave en el buen funcionamiento del secador. Si el flujo se vuelve altamente inestable, se corre el riesgo de la deposición del producto en las paredes del secador. Este material podría quemarse debido al sobrecalentamiento, lo que provocaría pérdidas de producto, que a su vez causarían

bloqueos en la tubería de salida y contaminación del producto final (Fletcher et al., 2006).

Los secadores por aspersion utilizan un atomizador para transformar la solución, suspensión o emulsión en gotas de un tamaño determinado. Los atomizadores que generalmente se utilizan son: de boquillas rotativas de alta presión de un solo fluido y de boquillas de dos fluidos, que utilizan aire o nitrógeno para atomizar el líquido en gotas. La cantidad de líquido a atomizar, el tamaño de la gota, la viscosidad del líquido, las cantidades de partículas en suspensión y el diseño de la cámara son factores que pueden influir en la decisión sobre el tipo de atomizador a utilizar (Jacobs, 2014).

El secado por aspersion es un proceso escalable que cuenta con multiples aplicaciones. Desde desarrollo de ingredientes farmacéuticos hasta aplicaciones en la industria alimentaria. Además, funciona como una evaluación temprana de la formulación hasta el aumento de llegar a una escala piloto y, posteriormente, la producción a escala industrial donde lotes de varias toneladas se pueden producir al día (Ousset et al., 2018).

Es importante señalar que el proceso de secado por aspersion cuenta con multiples equipos, diferentes entre si de acuerdo con la escala. Por ejemplo, el secador a escala laboratorio "Büchi B290 Mini Spray-Dryer" cuenta con un volumen mínimo de solución de alimentación de 30 mL, el tiempo de residencia del polvo dentro de la cámara de secado es de aproximadamente de 1 s, el diámetro de la boquilla es de 0.7 mm, la separación de las partículas se hace con un ciclón, la tasa de producción por hora es de 1 kg y se obtiene un rendimiento típico de 65–90 % (Ousset et al., 2018). En cambio, los secadores a escala piloto generalmente usan un disco giratorio, el volumen minimo de solución de secado es de 1 L, la separación de las partículas se hace por medio de un ciclón. Además, la tasa de producción por hora es de 5 kg. Este tipo de secadores tienen un rendimiento típico de 70–90 %. Cabe mencionar que ambos equipos presentan adherencia de producto en las paredes de la cámara de secado, sin embargo, los secadores a escala piloto

cuentan con martillos automatizados que golpean la cámara evitando la adhesión excesiva de polvo en las paredes.

### **2.9.2 Parámetros del secado por aspersión**

Los tres parámetros operativos principales del secador por aspersión son: temperatura de entrada, temperatura de salida y velocidad de alimentación. Se establece una velocidad de alimentación y una temperatura de salida deseada para obtener una especificación de humedad. Los controles ajustan la temperatura de entrada para lograr la temperatura de salida adecuada. También es posible establecer una temperatura de entrada deseada y tener un control para ajustar las velocidades de alimentación para lograr una temperatura de salida deseada. Si el contenido de humedad es demasiado alto en el producto, se debe tomar la decisión de aumentar la temperatura de entrada y la temperatura de salida. Esto, con la finalidad de lograr una humedad más baja. Otra forma sería, disminuir la velocidad de alimentación para aumentar la temperatura de salida o posiblemente cambiar las condiciones de atomización para lograr partículas más pequeñas, que se secarán más rápido y con un menor contenido de humedad (Dyvelkov, & Sloth, 2014; Ribeiro et al., 2018; Magri et al., 2019).

En el caso de los secadores por aspersión cuyo material de pared de la cámara de secado es de acero inoxidable, es necesario aplicar varios métodos de vibración. Con esto evita que se formen capas de polvo en las paredes de la cámara, en las secciones curvas de las tuberías o en la parte inferior de la cámara, en la entrada al ciclón u otros lugares en el equipo. Para que esto no ocurra se recurre a sonajeros, cuernos sónicos, y martillos neumáticos. Sin embargo, esta acción es inútil en secadores a escala laboratorio, ya que generalmente, la cámara de secado en éstos es de cristal por lo que la adhesión de polvo en las paredes se hace presente.

La preparación de la solución de alimentación, suspensión o emulsión a veces se pasa por alto al considerar el éxito del secado por aspersión de un producto. La adición adecuada de aditivos para no causar espuma, el uso de



materiales tensoactivos para humedecer los sólidos con el fin de obtener dispersiones uniformes, el uso adecuado de agitadores, el rotor de alta velocidad o los homogeneizadores de alta presión con bucles circulantes pueden ser factores importantes para lograr suspensiones de alimentación homogéneas o emulsiones uniformes. La adición de estabilizantes de emulsión como las lecitinas también puede mejorar la calidad de la emulsión y, por lo tanto, el rendimiento en un producto (Jacobs, 2014). La maltodextrina también puede ser agregada como agente de secado para producir un producto en polvo, ya que reduce la higroscopicidad, así como la adhesión y deposición del producto (Kim et al., 2003; Singh et al., 2019). La naturaleza de la solución también afecta la obtención de un buen secado. Por ejemplo, una solución con mayor composición de grasa genera una adhesión relativamente alta en las paredes de la cámara del secador (Paterson et al., 2007). Por otra parte, una solución con mayor proporción en proteína genera menos adherencia en las paredes (Keshani et al., 2013). Por último, una solución con mayor proporción de carbohidratos genera una alta deposición en las paredes de la cámara (Keshani et al., 2012).

### **2.9.3 Ventajas y desventajas del secado por aspersion**

Las principales ventajas del secado por aspersion son las siguientes (Mujumdar, 2007; Keshani et al., 2015):

- Las propiedades y la calidad del producto se controlan de una manera más eficiente.
- Los alimentos sensibles al calor, los productos biológicos y los productos farmacéuticos se pueden secar a presión atmosférica y bajas temperaturas.
- Permite una producción alta de producto en operación continua con un equipo relativamente simple.
- El producto entra en contacto con las superficies del equipo en condiciones anhidras, lo que simplifica los problemas de corrosión.
- Se producen partículas esféricas relativamente uniformes.

Entre las desventajas del secado por aspersion se encuentran las siguientes:

- El secado falla si se requiere un producto de alta densidad aparente.
- En general no es flexible. Una unidad diseñada para la atomización fina puede no ser capaz de producir un producto grueso y viceversa.
- Para una capacidad dada, generalmente se requieren mayores tasas de evaporación que con otros tipos de secadores.
- Alta inversión inicial comparándolo con otros tipos de secadores continuos.
- La recuperación del producto, así como la recolección de polvo son factores que aumentan el costo del secado.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

### 3. JUSTIFICACIÓN

Las fórmulas lácteas son una alternativa para los consumidores que buscan sustituir la leche por productos similares, sin perder las características que la leche proporciona. Una de las limitaciones para la selección de los ingredientes utilizados en el diseño de una fórmula láctea es la funcionalidad de éstos. En el mercado existen al menos seis productos a base de proteínas lácteas y diversas grasas vegetales, no obstante, éstos deben ser seleccionados de acuerdo con la funcionalidad, ya que influyen de manera significativa en el producto final. Además, se debe tomar en cuenta la normatividad correspondiente para el diseño de fórmulas lácteas. Las fórmulas lácteas al igual que la leche son productos perecederos por lo que su conservación es muy importante. Uno de los métodos más empleados para lograr este objetivo es el secado por aspersion. El secado por aspersion es un proceso que transforma una materia prima líquida en partículas secas atomizando la solución en un medio de aire caliente. Uno de los problemas que se presenta durante el secado por aspersion, da como resultado que las altas temperaturas, las cuales normalmente se manejan por encima de 130 °C, causen reacciones de degradación en compuestos termosensibles tales como vitaminas, sabores o lípidos, del mismo modo, podría generar que la calidad del producto se vea afectada. Por consiguiente, el establecimiento de parámetros durante el secado es muy importante para conseguir la calidad deseada en el producto final.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo general**

Diseñar y caracterizar una fórmula láctea basada en la evaluación fisicoquímica, así como de la funcionalidad de cinco ingredientes proteicos alternativos, incorporando una grasa vegetal, vitaminas y minerales para la determinación de los parámetros para su secado por aspersion, así como para su escalamiento.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar fisicoquímicamente y determinar la funcionalidad de cinco ingredientes proteicos (caseinato de sodio, permeado de suero, leche descremada, suero de leche y concentrado de proteína de leche) para el diseño de una fórmula láctea.
- Diseñar una fórmula láctea a base a los ingredientes proteicos, de acuerdo con las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010.
- Establecer los parámetros para el secado por aspersion mediante un diseño experimental  $2^2$  para la fórmula láctea, incorporando grasa vegetal emulsificada, vitaminas y minerales.
- Escalar el proceso de secado por aspersion y evaluar la funcionalidad de las fórmulas lácteas en polvo.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 Caracterización fisicoquímica del caseinato de sodio, permeado de suero, leche descremada, suero de leche y concentrado de proteína de leche

#### 5.1.1 Determinación del contenido de proteínas

Para la determinación del contenido de proteínas se siguió el método Kjeldahl (AOAC 920.105) que constó de tres etapas:

- 1) Digestión: Se pesó 1 g de muestra perfectamente homogeneizada y se introdujo en un tubo de digestión. Se le añadieron los catalizadores (verde de bromocresol al 0.1 % y rojo de metilo al 0.1 % diluidos en alcohol al 95 %) y 10mL de ácido sulfúrico al 98 %. Se colocaron los tubos de digestión con las muestras en el Bloc-digest (Kjelflex, K-360, EEUU) con el colector de humos funcionando. Se llevó a cabo la digestión a una temperatura de 400 °C y un tiempo de 30 minutos. Se dejaron enfriar las muestras a temperatura ambiente. Se dosificó lentamente 50 mL de agua destilada en cada tubo de muestra y se dejaron enfriar las muestras a temperatura ambiente durante 5 minutos.
- 2) Neutralización y destilación: se añadieron 25 mL de ácido bórico en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y 2 o 3 gotas de indicador mixto. Se colocó el Erlenmeyer en la alargadera del refrigerante teniendo la precaución de que ésta quede sumergida dentro de la disolución de ácido bórico. Se colocó el tubo con la muestra en el lado izquierdo del destilador. Una vez colocados el tubo de muestra y el Erlenmeyer con el ácido bórico, se dosificará unos 40 mL de NaOH y se inició la destilación.
- 3) Valoración: se valoró con ácido clorhídrico 0.31 N el destilado obtenido, hasta que la solución tuvo un vire de verde a violeta. Se calculó el % de proteína aplicando las ecuaciones 1 y 2:

(1)

(2)

$$\% \text{ Nitrogeno} = 1.4x \frac{(V_1 - V_0)x N}{P}$$

$$\% \text{ Proteína} = \% \text{ Nitrogeno} x F$$

Donde:

P= peso en g de la muestra

V1= volumen de HCl consumido en la valoración (mL)

N = normalidad del HCl

V0= volumen de HCl consumido en la valoración de un blanco (mL)

F= Factor de conversión para pasar de contenido en nitrógeno a contenido en proteínas (6.25).

### 5.1.2 Determinación del contenido de grasa

El contenido de grasa se determinó utilizando el método oficial de Rose-Gottlieb para leche (AOAC 989.05). Al principio, se añadió 1 g de muestra en polvo a un matraz Mojonnier. Luego, se mezcló bien con 9 mL de agua caliente (90 °C ± 10 °C). Se agregó 1.25 mL de hidróxido de amonio (30 % v/v) y se agitó; se agregaron 10 mL de alcohol etílico (96 % v/v) y se agitó por 15 segundos, posteriormente se agregaron 3 gotas de fenolftaleína y se agitó. Para la primera extracción se agregaron 25 mL de éter etílico y 25 mL de éter de petróleo y se agitó vigorosamente por 1 minuto. Se recuperaron los solventes en los vasos (previamente colocados a peso constante) cuidando que la fase etérea se quedará en el tubo Mojonnier. Para la segunda extracción se agregaron 5 mL de alcohol etílico al tubo Mojonnier y agitó por 15 segundos. Se agregaron 15 mL de éter etílico y 15 mL de éter de petróleo y se agitó vigorosamente por 1 minuto. Se recuperaron los solventes en los vasos cuidando de nuevo que la fase etérea se quedará en el tubo Mojonnier. Para la tercera extracción se agregaron 15 mL de éter etílico al tubo Mojonnier y 15 mL de éter de petróleo y se agitó vigorosamente por 1 minuto. Se recuperaron los solventes en el vaso. Los vasos con los solventes recuperados se colocaron en una plancha de calentamiento a 100 °C y dentro de la campana de

extracción para la evaporación de los gases. Se retiraron los vasos cuando todo el solvente se había evaporado. Se pesaron los vasos con el residuo de grasa y se registraron sus pesos. Los resultados se calcularán con la ecuación 3:

$$\% \text{ de grasa} = \frac{P1}{P} \times 100 \quad (3)$$

En donde:

P= Peso de la muestra (g)

P= Peso de la muestra extraída (g)

### 5.1.3 Determinación del contenido de cenizas

El contenido de cenizas se determinó según el método AOAC (923.03). Se colocó 2 g de muestra en polvo en un crisol (previamente a peso constante) en una mufla (Arsa, AR-340, EEUU) a  $550^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$  por 4 horas, dejar enfriar y pesar los crisoles.

El porcentaje de cenizas se calculó con la ecuación 4:

$$C = \frac{(P - p) \times 100}{M} \quad (4)$$

Donde:

P= Peso del crisol con las cenizas en gramos

p= Peso del crisol vacío en gramos

M= Peso de la muestra en gramos

### 5.1.4 Determinación del contenido humedad

Se siguió el método de secado en termobalanza (Sartorius, MA160-1, EEUU). Se pesaron 5 g de muestra sobre la charola de aluminio formando una capa lo más homogénea posible y se inició el proceso de desecación y medición. Se registró el porcentaje de humedad cuando ya no hubo variación en la lectura (Kirk et al, 1996).

### **5.1.5 Determinación de la actividad de agua**

Para la determinación de la actividad de agua se siguió la metodología propuesta por Masum et al. (2019). Los valores de actividad de agua de los polvos se obtuvieron con un medidor de actividad de agua (Aqualab, CX-2, EEUU). Primeramente, se colocaron las sales (cloruro de potasio,  $A_w = 0.43$ ) en las celdas para calibrar el equipo y posteriormente se registró la actividad de agua y la temperatura. Después se colocó la muestra en las celdas del equipo tratando de rellenar solo la mitad de la celda.

### **5.1.6 Determinación del contenido de carbohidratos**

La determinación del contenido de carbohidratos se llevó a cabo por espectrofotometría (método colorimétrico fenol – sulfúrico) siguiendo la metodología propuesta por Dubois et al. (1956). A 2 mL de la alícuota de la muestra se mezcló con 1 mL de solución acuosa de fenol en un tubo de ensayo. Posteriormente se añadieron 5 mL de ácido sulfúrico concentrado rápidamente a la muestra. Los tubos se dejaron en reposo durante 10 minutos, se agitaron por 30 segundos y se colocaron durante 20 minutos en un baño de agua a temperatura ambiente para el desarrollo del color. El blanco y la solución patrón se prepararon de la misma forma utilizando. Finalmente se llevó a la celda del espectrofotómetro (HACH, modelo DR 500, Alemania). Se procedió a leer la absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda a 490 nm (Thermo Scientific, Genesys 10s, EEUU). La prueba se llevo a cabo por triplicado.



## **5.2 Determinación de las propiedades funcionales de los ingredientes proteicos de leche**

### **5.2.1 Determinación del índice de dispersabilidad**

Para medir la dispersabilidad de los ingredientes se siguió la metodología reportada por Ji et al. (2016). Se agregaron 10 g de polvo a un vaso de precipitados con 100 mL de agua destilada a una temperatura de 25 °C y se mezclaron por 15 segundos con una espátula. Las muestras reconstituidas fueron vertidas a través de un tamiz de 250  $\mu$ m para separar las partículas dispersas en la suspensión. Las muestras se recogieron en un recipiente (previamente colocado a peso constante) y se secaron en una estufa a 105 °C durante la noche.

### **5.2.2 Determinación de índice de insolubilidad**

La determinación del índice de insolubilidad se llevó a cabo siguiente la metodología reportada por la norma mexicana de referencia NMX-F-183-1986 y con lo reportado por Neves et al. (2019) con algunas modificaciones. Se pesaron 10 gramos de muestra y se agregaron 100 mL de agua destilada (a 24 °C). Posteriormente se agregaron 3 gotas del agente antiespumante, en este caso alcohol isoamilico. Se mezcló por 90 segundos a 3 800 rpm y se dejó reposar por 15 minutos. Se procedió a verter el contenido en dos tubos de centrifuga de 50 mL y se centrifugaron por 5 minutos a 160  $\times$  g. Se sifoneo cuidadosamente el líquido con la ayuda de una pipeta dejando 5 mL sobre la superficie del sedimento para posteriormente agregar de nuevo 25 mL de agua (24 °C). Se aforó el tubo a 50 mL con agua destilada a 24 °C y se mezcló y centrifugó por 5 minutos a 160  $\times$  g. Se tomó en cuenta el sedimento (mL).

### **5.2.3 Determinación de humectabilidad**

Para la determinación de la humectabilidad se siguió la metodología reportada por Ji et al. (2016). Se pesó 1 gramo de muestra de polvo y se agregó a 100 mL de agua destilada a una temperatura de 25 °C en un vaso de precipitados.

Se dejó caer el polvo y se midió el tiempo en el que el polvo se sumergió por completo en el agua.

### 5.3 Electroforesis desnaturizante SDS-PAGE

Para la electroforesis se siguió la metodología propuesta por Laemmli (Ausubel et al., 2002). Se montó el sándwich de placa de vidrio del aparato de electroforesis utilizando dos placas de vidrio limpias y dos espaciadores de 0.75 mm. Se fijó el sándwich al soporte de fundición. Se preparó la solución de gel de separación. Se desgasificó usando un matraz Erlenmeyer de 25 mL con la ayuda de una bomba de vacío con una trampa fría. Después se agregó la cantidad especificada de persulfato de amonio al 10 % (p/v) y TEMED a la solución desgasificada, se agitó suavemente para mezclar. Con una pipeta Pasteur, se aplicó la solución de gel de separación al sándwich a lo largo de un borde de uno de los espaciadores hasta que la altura de la solución entre las placas de vidrio fue de ~11 cm. Con otra pipeta Pasteur, se cubrió lentamente la parte superior del gel con una capa (~1 cm de espesor) de alcohol isobutílico saturado con H<sub>2</sub>O, colocando suavemente en capas el alcohol isobutílico contra el borde de uno y luego el otro de los espaciadores. Se dejó que el gel se polimerice de 30 a 60 min a temperatura ambiente. Se vertió la capa de alcohol isobutílico saturado con H<sub>2</sub>O y se hizo un enjuague con 1x Tris·Cl / SDS, a pH 8.8. Usando una pipeta Pasteur, se permitió que la solución de gel concentrador gotee hacia el centro del sándwich a lo largo de un borde de uno de los espaciadores hasta que la altura de la solución en el sándwich fue de ~1 cm desde la parte superior de las placas.

Se insertó el peine de 0.75 mm en la capa de solución de gel concentrador. Se dejó que la solución de gel de apilamiento se polimerizara de 30 a 45 minutos a temperatura ambiente. Se diluyó una porción de la muestra de proteína a analizar 1: 1 (v / v) con 2 x amortiguador de muestra SDS y se calentó de 3 a 5 min a 100 °C en un tubo de microcentrífuga con amortiguador. Se siguió el mismo proceso para el blanco. Se retiró con cuidado el peine. Después de retirar el peine, se enjuagaron los pocillos con amortiguador de electroforesis SDS 1x. Con una pipeta

Pasteur, se llenaron los pocillos con un amortiguador de electroforesis SDS 1x. Se colocó el sándwich de gel en la cámara de amortiguación superior.

Se llenó la cámara de electroforesis (Mini-PROTEAN, 165-8000, EEUU) de amortiguador inferior con la cantidad recomendada de amortiguador de electroforesis SDS 1x. Se colocó el sándwich conectado a la cámara de amortiguación superior en la cámara de amortiguación inferior. Se llenó parcialmente la cámara de amortiguador superior con amortiguador de electroforesis SDS 1x. Con una jeringa de 25 µl se cargó la muestra de proteínas en los pocillos aplicando cuidadosamente la muestra. Se cargaron los pozos de control con estándares de peso molecular (GE Healthcare, Amersham). Se agregó un volumen igual de amortiguador de muestra de SDS 1x a los pozos vacíos para evitar la propagación de los carriles adyacentes. Se relleno el resto de la cámara de tampón superior con tampón de electroforesis SDS 1x. Se conectó la fuente de alimentación a la celda y se corrió a 10 mA de corriente constante para un gel de losa de 0,75 mm de grosor, hasta que el colorante de rastreo de azul de bromofenol entró en el gel de separación. Luego se aumentó la corriente a 15 mA. Una vez que el tinte de rastreo azul de bromofenol llegó al fondo del gel de separación, se desconectó la fuente de alimentación (PowerPac, EEUU).

Se colocó el sándwich sobre una hoja de papel absorbente o toallas de papel. La detección de proteínas se llevó a cabo mediante tinción con azul de Coomassie. Las bandas reveladas se observaron en un fotodocumentador (Alpha Innotech Corporation, Red, EEUU).

#### **5.4 Diseño de la fórmula láctea**

Para el diseño de la fórmula láctea se siguieron las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010. Su composición porcentual debe ser: humedad 3.5; proteínas 15.0; grasas 26.0. La totalidad de las proteínas debe provenir de la leche. Las grasas pueden ser de origen vegetal especificando el porcentaje de esta.

## 5.5 Materia prima

La proporción en la fórmula láctea de los ingredientes se hizo de acuerdo con las propiedades funcionales de cada uno.

Preparación de la mezcla: Se siguió la metodología propuesta por Masum et al. (2019). Los ingredientes fueron reconstituidos en agua potable (Aguaq) a 55 °C uno por uno. Al final se agregó la mezcla vitamínica y por último la grasa emulsificada. La mezcla se hizo a un porcentaje de sólidos del 50 %.

Para emulsificar la grasa, primero se calentó la oleína de palma a una temperatura de 65 °C y se mantuvo a esta temperatura hasta que se convirtiera en un líquido. Después, se agregó la cantidad requerida de mono y diglicéridos. Posteriormente se mezcló con un ultra-turrax (IKA, T 25, EEUU) a 10, 000 rpm por 3 minutos y se agregó a la mezcla anterior. Por último, la mezcla húmeda obtenida se homogeneizó con un ultra-turrax (IKA, T 25, EEUU) a 13, 500 rpm por 3 minutos tratando de mantener la temperatura a 55 °C.

## 5.6 Secado por aspersión mediante diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial 2<sup>2</sup> completamente aleatorizado con dos factores (temperatura de entrada y velocidad de alimentación) en dos niveles cada uno (160 °C y 180 °C; 6 mL/min y 9 mL/min). Las variables respuestas fueron el rendimiento del secado por aspersión, así como las propiedades de humectabilidad, solubilidad y dispersabilidad (Cuadro 15).

**Cuadro 15.** Parámetros del secado por aspersión en el diseño experimental.

	<b>T° entrada</b>	<b>Velocidad de alimentación</b>
Niveles	160°C	6 mL/min
	180 °C	9 mL/min

## **5.7 Análisis de la fórmula obtenida**

### **5.7.1 Determinación de la funcionalidad de la fórmula obtenida**

#### **5.7.1.1 Determinación del índice de dispersabilidad de la fórmula láctea**

Para medir la dispersabilidad de los ingredientes se siguió la misma metodología reportada por Ji et al. (2016) mencionada en el apartado 5.2.1.

#### **5.7.1.2 Determinación de índice de insolubilidad de la fórmula láctea**

La determinación del índice de insolubilidad se llevó a cabo siguiendo la misma metodología reportada por la norma mexicana de referencia NMX-F-183-1986 y con lo reportado por Neves et al. (2019) con algunas modificaciones, mismo protocolo reportado en el apartado 5.2.2.

#### **5.7.1.3 Determinación de humectabilidad de la fórmula láctea**

Para la determinación de la humectabilidad se siguió la misma metodología reportada por Ji et al. (2016) mencionada en el apartado 5.2.3.

### **5.7.2 Caracterización fisicoquímica de la fórmula obtenida**

#### **5.7.2.1 Determinación del contenido de proteína de la fórmula láctea**

Para la determinación del contenido de proteínas se siguió el método Kjeldahl (AOAC 920.105) que constó de tres etapas: digestión, neutralización y destilación, finalmente valoración, mismo protocolo que se siguió en el apartado 5.1.1.

#### **5.7.2.2 Determinación del contenido de grasa de la fórmula láctea**

El contenido de grasa se determinó utilizando el método oficial de Rose-Gottlieb para leche (AOAC 989.05) de acuerdo con lo reportado en el apartado 5.1.2.

### **5.7.2.3 Determinación del contenido humedad de la fórmula láctea**

Se siguió el mismo método de secado en termobalanza reportado en el apartado 5.1.4.

### **5.7.2.4 Determinación de la actividad de agua de la fórmula láctea**

Para la determinación de la actividad de agua se siguió la misma metodología propuesta por Masun et al. (2019) reportada en el apartado 5.1.5.

## **5.8 Escalamiento del secado por aspersion de la fórmula láctea a nivel piloto**

La variable respuesta que determinó la selección de los parámetros en el análisis estadístico del diseño experimental fue la solubilidad. El equipo a nivel piloto que se utilizó fue un secador por aspersion (MDR -5, SFC – 5, China). El cual tiene una capacidad de evaporación de 5 kg/h, el método de calentamiento del equipo es por calefacción eléctrica, el diámetro de la cámara de secado es de 1.1 m. El tamaño del equipo es de 2.5 m (longitud) x 1.2 m (ancho) x 2.2 m (altura). El modo de atomización que utiliza el equipo es por medio de un atomizador de disco giratorio de alta velocidad. El equipo cuenta con una bomba peristáltica de corriente que alimenta el producto a través de una manguera a través del atomizador de disco giratorio. La velocidad de mínima de alimentación de 5 mL/min y una máxima de 60 mL/min. Debido a las características del equipo, la cantidad mínima de producto a alimentar se aumentó a 1 L, así como la velocidad de alimentación, la cual se mantuvo a 40 mL/min.

La preparacion de la mezcla se llevó a cabo de la misma forma que en el apartado 5.5, sin embargo, ya que solución de alimentación era de 1 L, la homogeneización se llevo a cabo con un homogeneizador a 1, 000 psi durante 15 minutos (Armfield, FT9, Inglaterra) para posteriormente pasar al secado.

La temperatura del aire de entrada en el secador fue de 160 °C. La temperatura de salida se controló ajustando la velocidad de alimentación. La mezcla

se hizo con un contenido de sólidos al 50 %. Los sólidos obtenidos se empacaron en bolsas herméticas para resguardarlos de la humedad.

Al producto obtenido se le hicieron los análisis fisicoquímicos correspondientes (humedad,  $A_w$ , proteína y grasa) así como la determinación de las propiedades funcionales (humectabilidad, dispersabilidad y solubilidad).

### **5.9 Microscopía electrónica de barrido**

Se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar el tamaño, la morfología y la estructura de la superficie de las fórmulas lácteas en polvo. Las muestras de polvo se pulverizaron sobre una cinta de carbono de doble cara, se fijaron a trozos y se recubrieron con carbono en un dispositivo de recubrimiento de pulverización catódica (DESK II, Denton vacuum, Estados Unidos). Las observaciones se realizaron con un aumento de 250 X, 500 X y 1 000 X al vacío utilizando un microscopio electrónico de barrido (EVO-50, Zeiss, Estados Unidos).

### **5.10 Secado por aspersión de la fórmula**

Inmediatamente después de la preparación de la mezcla, ésta se alimentó aun secador por aspersión (Buchi, B-290, EEUU). Las temperaturas del aire de entrada y salida y la presión del atomizador serán de acuerdo con el análisis estadístico del Diseño experimental. La temperatura de salida del secador se controla ajustando la velocidad de alimentación. Los sólidos obtenidos se empacaron en bolsas herméticas para resguardarlos de la humedad

### **5.11 Análisis estadístico**

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado y fueron reportadas como la media de los ensayos de acuerdo con la prueba de Tukey. La comparación de medias ( $p < 0.05$  como el nivel mínimo significativo) se realizó mediante el software JMP (2017, versión 3.4.3)

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Caracterización fisicoquímica de los ingredientes proteicos de leche

En el Cuadro 16 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica de los cinco ingredientes proteicos.

**Cuadro 16.** Caracterización de los ingredientes proteicos de leche.

Determinación	Caseinato de sodio	Permeado de suero	Leche descremada NFMD	Concentrado de proteína de leche MPC70	Suero de leche
% Humedad	6.53 ±1.27 <sup>A</sup>	3.74 ±0.40 <sup>B</sup>	5.00 ±0.09 <sup>AB</sup>	5.92 ±0.69 <sup>A</sup>	5.35 ±1.27 <sup>AB</sup>
Aw	0.28 ±0.09 <sup>C</sup>	0.35 ±0.05 <sup>A</sup>	0.31 ±0.01 <sup>B</sup>	0.27 ±0.01 <sup>C</sup>	0.27 ±0.09 <sup>C</sup>
% Grasa	4.19 ±0.21 <sup>A</sup>	1.51 ±0.02 <sup>BC</sup>	1.07 ±0.14 <sup>BC</sup>	1.67 ±0.18 <sup>B</sup>	0.98 ±0.40 <sup>C</sup>
% Cenizas	7.20 ±2.20 <sup>A</sup>	7.90 ±0.01 <sup>A</sup>	7.57 ±0.02 <sup>A</sup>	7.03 ±0.02 <sup>A</sup>	7.66 ±0.01 <sup>A</sup>
% Proteína	90.5 ±0.76 <sup>A</sup>	3.22 ±0.11 <sup>E</sup>	35.8 ±1.03 <sup>C</sup>	71.9 ±0.02 <sup>B</sup>	11.0 ±0.01 <sup>D</sup>
% Lactosa	0.20 ±0.04 <sup>C</sup>	86.0 ±1.02 <sup>A</sup>	52.0 ±0.02 <sup>B</sup>	18.5 ±0.01 <sup>E</sup>	65.0 ±0.40 <sup>D</sup>

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).

El Cuadro 16 muestra los resultados obtenidos de los diferentes análisis llevados a cabo a los ingredientes proteicos de leche. En el caso del caseinato de sodio, se encontraron valores de humedad relativamente altos, esto comparándolo con lo de reportado por Southward (2003) y Augustin & Margetts (2003) quienes reportan un valor máximo de humedad de 4.5 %. Esto puede deberse a las condiciones de almacenamiento inadecuadas, donde por tratarse de un ingrediente higroscópico, pudo haberse acumulado humedad (Kailasapathy, 2015). Los ingredientes de fórmulas lácteas en polvo tienen carácter higroscópico, es decir, tienden a atraer agua fácilmente de ambientes húmedos. La medida en la que



atraen a las moléculas de agua depende tanto del área superficial de contacto de las partículas del polvo, como de la composición molecular del agente higroscópico. Es decir, a mayor presencia de grupos polares en la molécula y a menor diámetro de partícula del polvo, con mayor facilidad acumulará humedad (Petters et al., 2017). En general, las proteínas en polvo deshidratadas, como en el caso del caseinato de sodio, tienen la capacidad de absorber la humedad. La presencia de una gran cantidad de grupos polares, en los grupos radicales de la caseína, actúan facilitando la absorción de las moléculas de agua (Bajpai & Tiwari., 2014).

En el caso del contenido de cenizas, Chandan y O'Rell (2013) reportan una concentración de 4.4 %, el doble en comparación con lo encontrado en este estudio (2.2 %). Siendo una de las posibles causas la concentración de minerales anterior a la ultrafiltración. Los minerales como el sodio, el potasio y el cloruro se encuentran principalmente en solución y en formas iónicas en la leche, por lo tanto, pueden difundirse fácilmente a través de las membranas durante la ultrafiltración y durante la electrodiálisis. El calcio, el hierro, el magnesio y el fosfato están presentes en forma de solución y en parte en suspensión coloidal. Aproximadamente 20-30 % de calcio y magnesio difusibles están presentes como iones libres y el resto como sales fosfato (Kailasapathy, 2015).

Los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del permeado de suero muestran resultados similares a lo reportado por ADPI (2019) y por Think USA Dairy (2018). Obteniendo valores porcentuales elevados, en un rango de 76 - 88 % (p/p) de contenido de lactosa, debido a su bajo peso molecular; además de un porcentaje menor de grasas totales, en un rango de 0 a 1.5 % (p/p). Esto se debe, posiblemente a la composición de la leche descremada, que es utilizada como materia prima para su obtención. Además de esto se obtuvieron valores porcentuales bajos de concentración de proteína en un rango del 2 al 7 % (p/p), debido a que los compuestos proteicos presentes en el permeado de suero tras la ultrafiltración presentan pesos moleculares menores al diámetro del poro de la membrana (ADPI, 2019).

Por otra parte, en el caso de la leche descremada, Think USA Dairy (2018) y Kailasaphaty (2015) reportan valores similares de lactosa, proteína y grasa (52 % (p/p), 35 % (p/p) y 1 % (p/p) respectivamente comparándolos con los obtenidos en este estudio. En consecuencia, Olson & Aryana (2008), mencionan que la leche descremada debe tener aproximadamente el 5 % p/p de humedad y máximo 1.5 % p/p de grasa de leche. Por lo general, la NFDM contiene 34–37 % p/p de proteínas, 0.6–1.25 % p/p de grasa, 49.5–52 % p/p de lactosa, 8.2–8.6 % p/p de ceniza y 3.0–4.0 % p/p de humedad. La actividad de agua varía entre 0.020 y 0.2 y depende de la humedad, valores que corresponden a lo reportado por este estudio.

Es importante señalar, que la leche en polvo descremada (NFDM) se fabrica eliminando agua de la leche descremada pasteurizada. Típicamente contiene 5 % o menos de humedad (en peso) y 1.5 % o menos de grasa de leche (en peso). El bajo contenido de grasa en la leche descremada se debe a la eficiencia del proceso de separación por medio de centrifugación, donde las micelas más pequeñas de grasa no logran separarse por completo de la fracción hidrofílica (Lamichhane, et al., 2018). También, es necesario mencionar que, si el contenido de grasa es superior al 1.5 %, debe declararse en los ingredientes. A pesar de su similitud con la leche descremada, la diferencia es que la leche descremada en polvo tiene un contenido mínimo de proteína de leche del 34 %, mientras que la leche en polvo descremada no tiene un nivel de proteína estandarizado (Park et al., 2016).

El concentrado de proteína de leche al 70 % muestra valores similares de lactosa, proteína y grasa (18 % (p/p), 70 % (p/p) y 1.6 % (p/p) respectivamente) según lo reportado por Meena et al. (2017) y Carter et al. (2018). Los concentrados de proteína de leche (MPC) son polvos secados por aspersion con un alto contenido de proteínas (desde 45 hasta 90 %) fabricados a partir de leche descremada por ultrafiltración o diafiltración, por esta razón, el porcentaje de grasa es bajo, presentando concentraciones de 1 - 1.5 % (p/p). El contenido de cenizas de estos productos es relativamente alto, ya que los minerales unidos a proteínas se retienen (O'Regan et al., 2009).

Los MPC tienen la misma proporción de caseína - proteína de suero que la leche. El MPC producido por secado por aspersion del retenido de leche descremada contiene 70 % de proteína, 1.5 % de grasa, 2 % de calcio y 18 % de lactosa (Panthi et al., 2017), valores que corresponden a lo obtenido en este estudio.

Por último, el suero de leche presentó valores similares de lactosa (65 % p/p), proteína (11 % p/p) y de grasa (1 % p/p) según lo reportado por Think USA Dairy (2018) y Augustin & Margetts (2003). La fracción de proteína en el suero constituye aproximadamente el 10 % del total de sólidos secos en el suero. Las proteínas que conforman este porcentaje son la beta-lactoglobulina (65 %), alfa-lactoalbúmina (25 %), albúmina sérica bovina (8 %) e inmunoglobulinas.

El porcentaje de grasa obtenido para el suero coincide con el reportado por Deeth & Bansal (2019) (1 % p/p). El suero, al ser un producto de precipitación de las proteínas de la leche, su composición es elevada en carbohidratos, en este caso, de lactosa. Sin embargo, debido a que los lípidos interaccionan con las proteínas como en el caseinato de sodio, contiene un bajo porcentaje de grasa (1 - 1.5 % p/p) (Kilara & Vaghela, 2018).

## 6.2 Determinación de las propiedades funcionales de los cinco ingredientes proteicos de leche

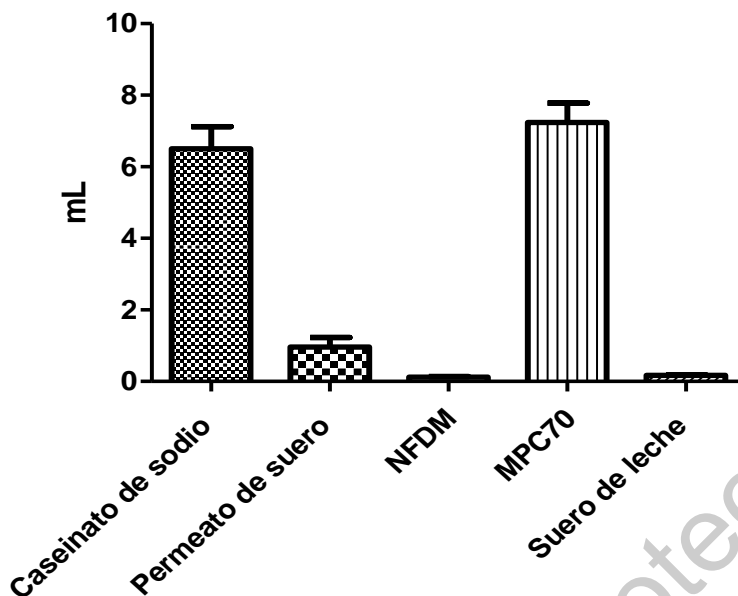
### 6.2.1 Determinación del índice de insolubilidad

En el Cuadro 17, se muestran los resultados obtenidos del índice de insolubilidad de los ingredientes proteicos de leche.

**Cuadro 17.** Índice de insolubilidad de los cinco ingredientes proteicos de leche.

Ingrediente	Índice de insolubilidad (mL)
Caseinato de sodio	6.50 ± 1.51 <sup>A</sup>
Permeado de suero	0.96 ± 0.64 <sup>B</sup>
Leche descremada	0.11 ± 0.04 <sup>B</sup>
MPC70	7.23 ± 1.32 <sup>A</sup>
Suero de leche	0.16 ± 0.05 <sup>B</sup>

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).



**Figura 4.** Índice de insolubilidad de los cinco ingredientes proteicos de leche.

Es importante mencionar que el índice de insolubilidad se relaciona de manera inversa con la solubilidad. Este, se refiere al volumen, medido en mililitros, de sedimento obtenido cuando un producto lácteo seco se reconstituye y se centrifuga. Los valores de índice de insolubilidad para los ingredientes tales como el permeado de suero, la leche descremada y el suero de leche resultaron ser considerablemente menores a los obtenidos para el caseinato de sodio y el MPC70.

En el caso del caseinato de sodio y el MPC70 los valores de índice de insolubilidad son similares a lo reportado por Baldwin & Truong (2007), quien reporta un valor de 6.2 mL para el caseinato de sodio y 6.5 mL para el MPC70.

Es necesario mencionar que, el caseinato de sodio se obtiene de leche descremada por precipitación y resuspensión alcalina. Por otro lado, en el MPC70, la mayor proporción proteica la conforman las caseínas. Estos productos se caracterizan por su capacidad de formar agregados, dependiendo del pH y por lo tanto, muestran una baja solubilidad (Nakagawa et al., 2016). Las interacciones caseína-caseína son de repulsión electrostática. Son más débiles para cationes monovalentes que para cationes divalentes, lo que permite sobrepasar la energía

de asociación hidrofóbica formando agregados hidratados, lo que dificulta su solubilidad (Carr y Golding, 2016).

Además, durante el proceso de producción del caseinato de sodio, se elimina el fosfato de calcio de la micela, generando proteínas de caseína individuales. En consecuencia, provoca dificultades en la solubilización de este ingrediente (Smialowska et al., 2017). Los MPC se obtienen al tratar térmicamente leche descremada y concentrar las fracciones de proteínas de caseína y séricas. Las caseínas forman estructuras micelares. Sin embargo, el tratamiento térmico en su fabricación promueve la desnaturalización. Ambos factores contribuyen a la disminución de la solubilidad del MPC (Carr y Golding, 2016).

Por último, los valores de índice de insolubilidad para el suero de leche, el permeado de suero y la leche descremada coinciden con lo reportado por McSweeney & Fox (2013) quienes reportan valores de 1.5 mL para el suero de leche, <0.5 mL para el permeado de suero y <0.5 mL para la leche descremada.

Cabe mencionar que, estos productos contienen un porcentaje considerable de lactosa. La lactosa tiene un papel en la prevención de las interacciones proteicas, ya que actúa como un espaciador mecánico y se une al agua por puentes de hidrógeno. Al ser hidrofílica actúa como una vía para la transferencia de humedad, haciendo más fácil la solubilización de estos productos (Baldwin, 2010).

## **6.2.2 Determinación del índice de dispersabilidad**

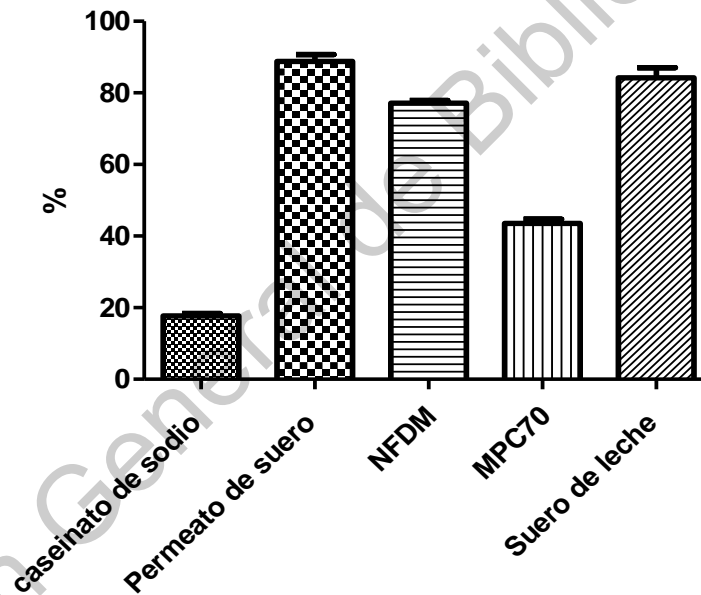
En el Cuadro 18 se muestran los resultados obtenidos del índice de dispersabilidad de los ingredientes proteicos de leche y se puede observar que el permeado de suero, la leche descremada y el suero de leche presentaron los más altos valores de dispersabilidad.

Estos valores son similares a reportado por Shuk (2013) y Ji et al. (2016) quienes reportan índices de dispersabilidad de 95 % para el suero de leche, 90- 93 % para el permeado de suero y 70- 95 % para la leche descremada.

**Cuadro 18.** Índice de dispersabilidad de los cinco ingredientes proteicos de leche.

Ingrediente	Índice de dispersabilidad (%)
Caseinato de sodio	17.7 ± 1.22 <sup>D</sup>
Permeado de suero	88.7 ± 3.31 <sup>A</sup>
Leche descremada	77.0 ± 1.41 <sup>B</sup>
MPC70	43.5 ± 2.11 <sup>C</sup>
Suero de leche	84.2 ± 4.92 <sup>AB</sup>

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).



**Figura 5.** Índice de dispersabilidad de los cinco ingredientes proteicos de leche.

El alto índice de dispersabilidad de estos ingredientes es posiblemente debido a su composición, mayormente constituidos por lactosa, un disacárido compuesto por glucosa y galactosa. La cual, es una molécula capaz de interactuar con las moléculas del agua fácilmente debido a los grupos funcionales hidroxilo en su composición. Además de esto, al ser un azúcar reductor, al entrar en contacto

con una solución acuosa presenta mutarrotación. La afinidad inicial por las moléculas de agua se debe a la forma alfa. La afinidad creciente con el tiempo se debe a la mutarrotación. A medida que parte de las moléculas en conformación alfa se convierten a conformación beta, la solución se vuelve insaturada con respecto a alfa, y más alfa logra interactuar con el agua. Este proceso continúa hasta que se alcanza el equilibrio entre alfa y beta en la solución (McSweeney & Fox, 2011; Blanco & Blanco, 2017).

En el caso del suero de leche, este contiene en su fracción proteica, en su mayoría, proteínas de conformación globular, lo cual sugiere un alto índice de dispersabilidad de este ingrediente. Estas proteínas son capaces de formar conglomerados estables al interactuar con las moléculas de agua. Esto se debe al arreglo tridimensional de sus aminoácidos, pues sus grupos radicales hidrofóbicos se encuentran estabilizados en el interior de éstas, interaccionando por fuerzas hidrofóbicas. Mientras tanto, los grupos radicales hidrofílicos permanecen en el exterior interactuando con las moléculas del agua. Esto genera una estabilidad en ambientes hidrofílicos que debería aumentar el índice de dispersabilidad (Ji et al., 2016).

Por su parte, el caseinato de sodio y el MPC70 presentaron los más bajos índices de dispersabilidad, esto coincide con los valores reportados por algunos autores como Shuk, (2013) y Ji, (2015) quienes reportan valores de 28–30 % para el caseinato de sodio y 28–40 % para el MPC70.

En cuanto al bajo índice de dispersabilidad del caseinato de sodio, puede deberse a la conformación en solución acuosa que adquiere el caseinato. Las interacciones caseína-caseína son de repulsión electrostática. Son más débiles para cationes monovalentes que para cationes divalentes, lo que permite sobrepasar la energía de asociación hidrofóbica formando agregados hidratados (Carr y Golding 2016). Esto promueve la formación de estructuras micelares conformadas de las diferentes subunidades de caseínas, presentes en el ingrediente (Ji et al., 2016).

Además, los polvos mayormente conformados por caseína son poco dispersables debido a las fuertes interacciones entre las estructuras micelares. Básicamente tardan más tiempo en interactuar, y por tanto, disolverse totalmente en agua (Baldwin y Truong, 2007; Havea, 2006; Schokker et al., 2011).

El índice de dispersabilidad de productos con alto contenido proteico como el caseinato de sodio y los MPC70 varía del 15 % al 45 % y está influenciado por las condiciones de fabricación, la temperatura de almacenamiento y el tiempo de este. Las micelas de caseína de tamaño más grande (100 nm) que contienen predominantemente alfa y beta caseína están fusionadas por interacciones proteína-proteína, lo que dificulta su dispersabilidad en agua. Su relativamente bajo índice de dispersabilidad también puede deberse a la formación de entrecruzamiento en superficies de polvo, formando componentes de microestructura (Ji et al., 2016).

### 6.2.3 Determinación de humectabilidad

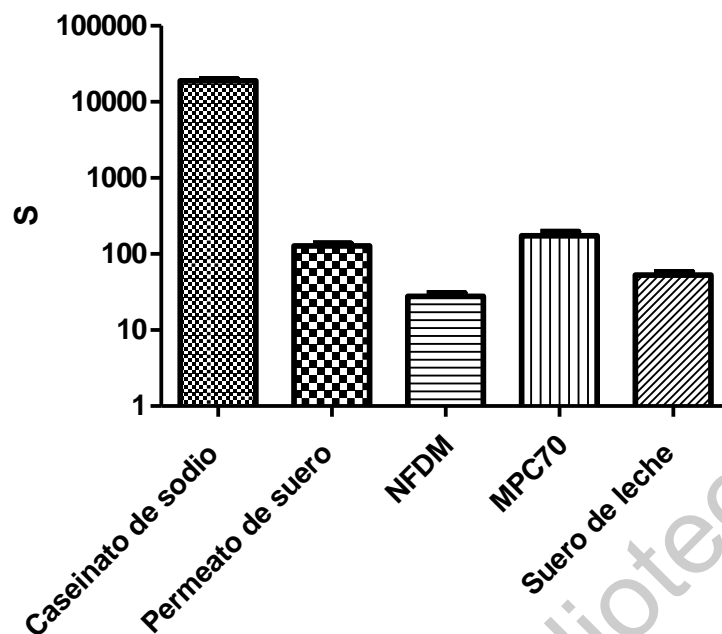
De acuerdo con los resultados obtenidos de humectabilidad de los ingredientes proteicos de leche (Cuadro 19). Se puede observar que los únicos ingredientes que se consideran humectables son la leche descremada y el suero de leche. Al contrario de los ingredientes restantes como el caseinato de sodio, el MPC70 y el permeado de suero.

**Cuadro 19.** Humectabilidad de los cinco ingredientes proteicos de leche.

<b>Ingrediente</b>	<b>Humectabilidad (s)</b>
Caseinato de sodio	18998 ± 1904 <sup>A</sup>
Permeado de suero	128.00 ± 16.37 <sup>B</sup>
Leche descremada	27.67 ± 5.51 <sup>B</sup>
MPC70	174.3 ± 37.2 <sup>B</sup>
Suero de leche	52.67 ± 9.45 <sup>B</sup>

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).





**Figura 6.** Humectabilidad de los cinco ingredientes proteicos de leche.

Esto corresponde a lo reportado por Meena et al., (2018) y Gaiani (2007) quienes reportan valores de humectabilidad para el caseinato de sodio de 1, 099–2, 100 segundos. Por otro lado, Schuck (2013) reporta valores de 807 segundos de humectabilidad para el MPC70.

Es necesario señalar que, el grado de humectabilidad de un polvo se ve favorecido si lo conforman partículas grandes de alta porosidad; es por eso que la aglomeración de partículas en unidades junto a la adición de surfactantes aumenta la humectabilidad de los polvos. Mientras la formación de conformaciones micelares la disminuyen como en el caso del caseinato de sodio y del MPC70. La literatura ya ha reportado anteriormente que los polvos de caseína y polvos de concentrado de proteína de leche como el MPC70, presentan muy poca humectabilidad (Ji et al., 2016; Sharma et al., 2012).

Por otra parte, los concentrados de proteína en polvo presentan baja humectación al mantenerse suspendidos en la superficie de la solución por la

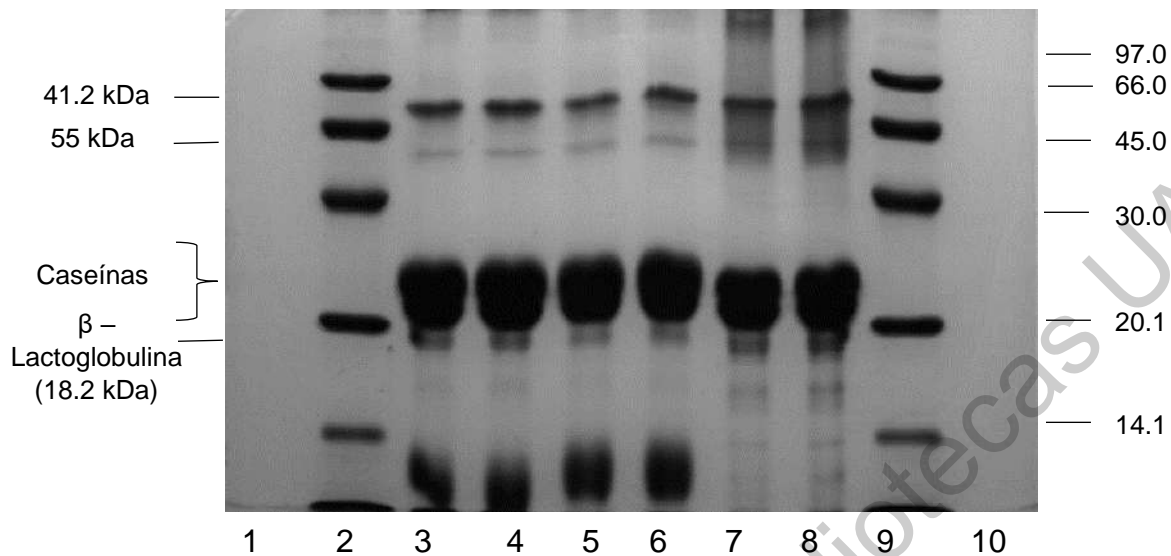
estabilidad de su estructura, ésta se considera el factor limitante de la rehidratación (Gaiani et al., 2007).

Los polvos con alto contenido de lactosa, como lo son la leche descremada y el permeado de suero presentan mayor humectabilidad. Esto debido a que, la lactosa es hidrofílica, lo que permite que el agua penetre fácilmente en las partículas, por lo tanto, se hunda y se humecte rápidamente en el agua. (Gaiani et al., 2007). Esto corresponde a lo reportado por Gaiani (2007) y Ji et al. (2016) quienes reportan valores de humectabilidad de 9, 190 segundos para el suero de leche y 130 segundos para la leche descremada.

De igual forma, se ha sugerido que los azúcares pueden unirse por puentes de hidrógeno a la proteína seca en lugar de las moléculas de agua que se pierden a medida que se elimina la capa de hidratación polar. A partir de estas ideas, se puede deducir que, en productos lácteos como el suero de leche y la leche descremada, la lactosa tiene un papel en la prevención de las interacciones proteicas, tanto actuando como un espaciador mecánico como uniéndose por puentes de hidrógeno con la cadena proteica. Además, al ser hidrofílica, la lactosa puede actuar como una vía para la transferencia de humedad dentro de las partículas de polvo en el proceso de rehidratación (Baldwin, 2010).

### **6.3 Electroforesis SDS PAGE de los cinco ingredientes proteicos de leche**

Se llevó a cabo una electroforesis en condiciones desnaturalizantes para observar el perfil de proteínas de cada uno de los ingredientes. La Figura 7 muestra los resultados obtenidos para la leche descremada, el MPC70 y el caseinato de sodio.



**Figura 7.** Gel electroforesis SDS-PAGE (15 % T). **Carril 1 y 10:** blanco; **carril 2 y 9:** marcador de peso molecular (GE Healthcare, Amersham); **carril 3 y 4:** leche descremada (7 ug/uL); **carril 5 y 6:** concentrado de proteína de leche 70% (MPC70) (7.2 ug/uL); **carril 7 y 8:** caseinato de sodio (9 ug/uL).

Se puede observar en la imagen anterior que el gel de electroforesis muestra patrones de bandas, en los tres ingredientes que corresponden a pesos moleculares similares a las caseínas (19.0–25.2 kDa). También se observan bandas con valores de 41.2 kDa y 55 kDa en todos los ingredientes. Del mismo modo se observan bandas que corresponden a la  $\beta$  – Lactoglobulina (18.2 kDa). Esto ocurre en todas las muestras de los ingredientes proteicos de leche.

### 6.3.1 Análisis densitométrico del gel de electroforesis SDS-PAGE (15 % T)

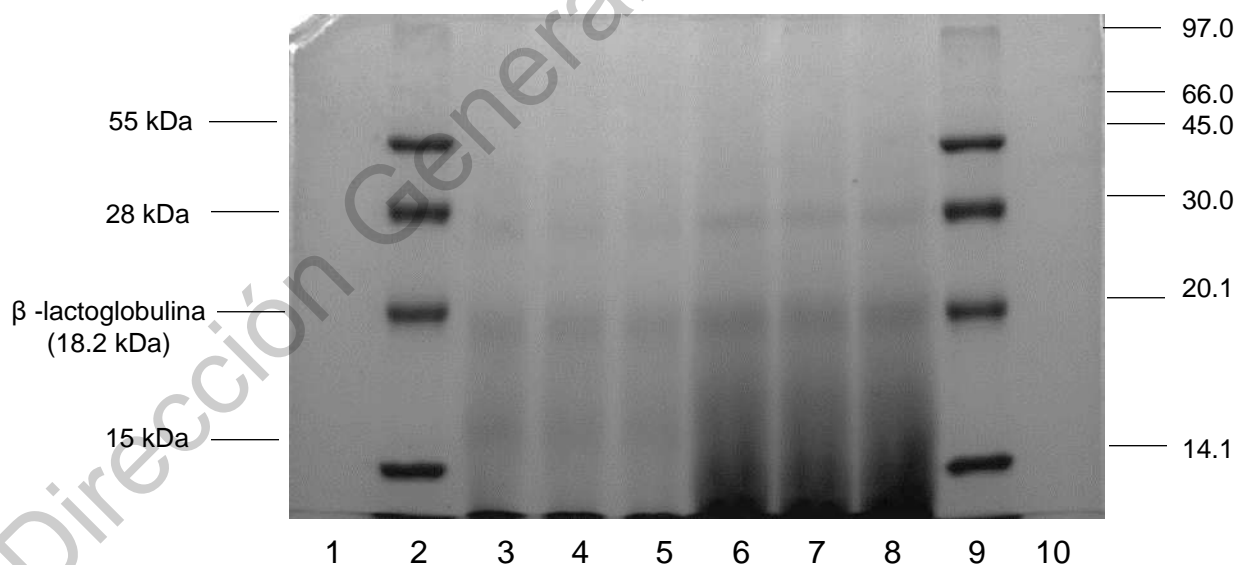
El Cuadro 20 muestra el análisis densitométrico de las bandas que corresponden al gel de electroforesis de los ingredientes leche descremada, MPC70 y caseinato de sodio.

**Cuadro 20.** Análisis densitométrico del gel de electroforesis SDS–PAGE (15 % T).

Carril	Banda	Área (número de píxeles)	%	Rf	Peso Molecular calculado (kDa)
2	1	90,995	3.08	0.0132	97.0
2	2	494,164	16.51	0.1700	66.0
2	3	621,459	20.75	0.2607	45.0
2	4	779,574	26.01	0.4026	30.0
2	5	664,548	22.18	0.6469	20.1
2	6	351,785	11.47	0.8597	14.4
3	1	424,075	14.79	0.2162	54.9
3	2	64,393	2.29	0.3036	45.0
3	3	1,152,344	40.11	0.5479	25.9
3	4	284,639	9.94	0.6205	22.0
3	5	221,248	7.74	0.6320	21.4
3	6	19,257	0.72	0.6716	19.6
3	7	710,756	24.41	0.9538	10.3
4	1	493,643	17.84	0.2129	55.3
4	2	63,989	2.36	0.3003	45.4
4	3	1,188,168	42.86	0.5479	25.9
4	4	146,385	5.32	0.6040	22.8
4	5	129,49	4.73	0.6304	21.5
4	6	18,833	0.73	0.6733	19.5
4	7	734,470	26.16	0.9769	9.8
5	1	369,212	9.74	0.1980	57.2
5	2	59,924	1.62	0.2855	46.9
5	3	1,449,853	38.12	0.5545	25.5
5	4	1,250,824	32.89	0.6040	22.8
5	5	0	0.05	0.6848	19.0
5	6	678,717	17.57	0.9373	10.7
6	1	446,880	14.24	0.1881	58.5
6	2	73,417	2.38	0.2789	47.6
6	3	1,279,872	40.70	0.5528	25.6
6	4	583,002	18.57	0.6188	22.1
6	5	0	0.05	0.6733	19.5
6	6	765,065	24.05	0.9422	10.6
7	1	83,321	3.68	0.0462	80.7
7	2	296,872	12.97	0.2063	56.1
7	3	141,103	6.19	0.2822	47.3
7	4	1,038,479	45.24	0.5578	25.3
7	5	620,463	27.05	0.6287	21.6
7	6	39,135	1.75	0.6782	19.3
7	7	35,909	1.61	0.6931	18.6
7	8	42,966	1.52	0.7723	15.6
8	1	347,355	15.64	0.2013	56.8
8	2	190,496	8.60	0.2838	47.1
8	3	1,007,205	45.25	0.5446	26.1
8	4	470,493	21.17	0.6254	21.7
8	5	23,686	1.11	0.6766	19.3
8	6	26,195	1.23	0.6898	18.8
8	7	51,926	1.98	0.7706	15.6

El análisis densitométrico muestra que efectivamente existen bandas con pesos moleculares aproximados que corresponden a las caseínas (19.0–25.2 kDa) en las tres muestras inyectadas (leche descremada, MPC70 y caseinato de sodio). En el caso de la leche descremada, las bandas que corresponden a las caseínas representan entre un 51–56 % del total de proteína de la muestra. Así mismo, la banda que corresponde a la  $\beta$ -lactoglobulina, representa el 0.70 % aproximadamente del total de proteína de la muestra. Por otro lado, en el caso del MPC70, las bandas que corresponden a las caseínas representan entre un 58–70 % del total de proteína de la muestra. Por último, en el caso del caseinato de sodio, las bandas que corresponden a las caseínas representan entre un 66 - 72 % del total de proteína de la muestra. En el caso de la banda que corresponde a la  $\beta$ -lactoglobulina, ésta representa entre un 1.1–1.6 % del total de proteína.

De la misma manera, se llevó a cabo una electroforesis en condiciones desnaturalizantes para observar el perfil de proteínas de los ingredientes restantes. La Figura 8 muestra los resultados obtenidos para el suero de leche y el permeado de suero.



**Figura 8.** Gel electroforesis SDS-PAGE (12 % T). **Carril 1 y 10:** blanco, **carril 2 y 9:** marcador de peso molecular (GE Healthcare, Amersham); **carril 3, 4 y 5:** suero de leche (7 ug/uL), **carril 6, 7 y 8:** permeado de suero (7.2 ug/uL).

### 6.3.2 Análisis densitométrico del gel de electroforesis SDS-PAGE (12 % T)

El Cuadro 21 muestra el análisis densitométrico del gel de electroforesis de los ingredientes suero de leche y permeado de suero.

**Cuadro 21.** Análisis densitométrico del gel de electroforesis SDS–PAGE (12 % T).

Carril	Banda	Área (número de píxeles)	%	Rf	Peso molecular calculado (kDa)
2	1	64,795	2.56	0.0538	97.0
2	2	28,957	1.17	0.0886	66.0
2	3	520,766	20.19	0.2959	45.0
2	4	651,962	25.27	0.4256	30.0
2	5	686,982	26.62	0.6250	20.1
2	6	631,962	24.19	0.9351	14.4
3	1	66,330	46.11	0.6519	21.9
3	2	77,688	53.89	0.8623	14.1
4	1	19,121	38.27	0.6614	21.5
4	2	30,914	61.73	0.8497	14.5
5	1	85,273	68.05	0.6392	22.5
5	2	40,135	31.95	0.8449	14.7
6	1	60,753	31.34	0.4415	34.1
6	2	96,698	49.85	0.6060	24.2
6	3	16,380	8.49	0.8513	14.5
6	4	20,353	10.33	0.9082	12.8
7	1	60,735	32.95	0.4304	34.9
7	2	82,649	44.83	0.6203	23.4
7	3	18,749	10.21	0.8528	14.4
7	4	22,446	12.01	0.9193	12.5
8	1	3,382	42.14	0.4351	34.5
8	2	4,441	18.73	0.6250	23.2
8	3	2,467	12.26	0.8560	14.3
8	4	3,692	26.87	0.9193	12.5

El análisis densitométrico muestra que efectivamente existen bandas con pesos moleculares aproximados que corresponden a la  $\beta$ -lactoglobulina (18.2 kDa) en las dos muestras inyectadas (permeado de suero y suero de leche). En el caso del suero de leche, las bandas que corresponden a la  $\beta$ -lactoglobulina y ésta representa entre un 50–60 % del total de proteína de la muestra. Por otro lado, en el caso del permeado de suero, las bandas que corresponden a la  $\beta$ -lactoglobulina representan entre un 8–12 % del total de proteína de la muestra.

#### 6.4 Diseño de la fórmula láctea

Para el diseño de la fórmula láctea se siguieron las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010. Su composición porcentual debe ser humedad y proteínas 3.5 y 15,0, respectivamente. El porcentaje de grasa no se menciona, sin embargo, se debe de especificar el rango. Durante el transcurso de la tesis se llevó a cabo dentro del grupo de investigación, la asesoría a dos empresas de alimentos (Geo Nutrition y Nucitec) con enfoque a fórmulas lácteas por lo que esta experiencia permitió el diseño de la fórmula láctea. Es importante mencionar que las propiedades funcionales dieron la pauta para la determinar la proporción de los ingredientes proteicos en la fórmula.

La fórmula láctea diseñada se presenta en el Cuadro 22:

**Cuadro 22.** Fórmula láctea seleccionada.

Ingrediente	% composición (p/p)
Leche descremada	32
Caseinato de sodio	5
Concentrado de proteína de leche al 70 %	14
Suero de leche	6
Permeado de suero	6
Maltodextrina	11
Oleína de palma	24
Mezcla vitamínica	1
Emulsificantes	1
Sabor grasa butírica	0.1
Sabor leche	0.1
Total	99.9 %

De acuerdo con la noma NOM-183-SCFI-2012, el producto obtenido puede denominarse "Producto lácteo en polvo". Dicha norma menciona que el porcentaje mínimo de proteína debe ser de 22 %, el caso de la parte lipídica puede ser sustituida por alguna grasa vegetal, en este caso fue sustituida por oleína de palma. Es importante mencionar que el rango del porcentaje de grasa no se especifica, sin embargo, éste debe declararse.

De igual forma, es necesario mencionar que la leche descremada, ocupa el mayor porcentaje de la fórmula. La leche descremada sin grasa posee proteínas, (caseínas) carbohidratos, vitaminas y minerales, ya que la materia prima para su obtención es la leche pasteurizada (Alan et al., 2018). Además de mejorar las propiedades funcionales como la emulsificación, la cual se espera que se le atribuyan a la fórmula láctea. Por otro lado, según el análisis densitométrico del gel de electroforesis; del total de las proteínas presentes en la leche descremada, entre el 51–56 % corresponden a las caseínas.

Del mismo modo, en el caso del MPC70, este es el ingrediente que mayor porcentaje ocupa después de la leche descremada. Los MPC son más altos en cuanto al contenido de proteínas y más bajos en lactosa. Por lo tanto, proporcionan una fuente de proteína concentrada, agregando propiedades sensoriales, así como algunas propiedades funcionales tales como emulsificación (Agarwal et al., 2015). De acuerdo con el análisis densitométrico del gel de electroforesis, las bandas que corresponden a las caseínas, en el MPC70, representan entre un 58–70 % del total de proteína.

En el caso del caseinato de sodio, este representa un 5 % del porcentaje de la fórmula láctea. De acuerdo con el análisis densitométrico del gel de electroforesis del caseinato, las caseínas representan el 66- 72 % del total de proteína del ingrediente. Sin embargo, presenta pobres propiedades funcionales (solubilidad, dispersabilidad y humectabilidad) las cuales posiblemente podrían repercutir en las propiedades funcionales finales de la fórmula láctea.

Por último, el suero de leche y el permeado de suero, representan el 6 % del porcentaje total de la fórmula. Estos ingredientes obtuvieron muy buenas propiedades funcionales. Sin embargo, de acuerdo con el análisis densitométrico, la mayor prevalencia de proteínas son proteínas propias del suero ( $\beta$  – Lactoglobulina) que representan un 8–60 % del total de proteínas. De acuerdo con los análisis fisicoquímicos de dichos ingredientes, la mayor proporción de ambos es la lactosa, la cual es hidrofílica y por lo tanto aporta a las buenas propiedades de



rehidratación (Sharma et al., 2012), lo cual, se espera, repercuta en la fórmula láctea.

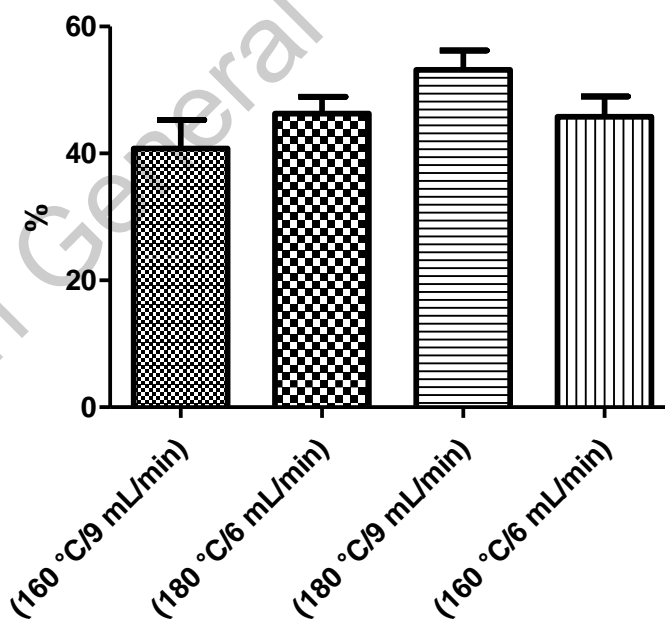
### 6.5. Secado por aspersión de la fórmula láctea

El secado por aspersión se llevo a cabo utilizando los parámetros de acuerdo con el Diseño experimental. De acuerdo con el rendimiento se puede observar, que no hay diferencia significativa entre los tratamientos; sin embargo, el mayor rendimiento se obtuvo en el tratamiento de 180 °C de temperatura de entrada y 9 mL/min de velocidad de alimentación (Cuadro 23).

**Cuadro 23.** Rendimientos obtenidos en el secado por aspersión.

Parámetro	Rendimiento (%)
180 °C/ 9 mL/min	53.1 ± 6.1 <sup>A</sup>
180 °C/ 6 mL/min	46.2 ± 5.2 <sup>A</sup>
160 °C/ 6 mL/min	45.7 ± 7.7 <sup>A</sup>
160 °C/ 9 mL/min	40.7 ± 9.0 <sup>A</sup>

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).



**Figura 9.** Rendimientos obtenidos en el secado por aspersión.

### 6.5.1 Análisis estadístico del diseño experimental 2<sup>2</sup>

A continuación, se muestran el análisis del diseño experimental utilizado para analizar las variables respuestas de este estudio. El análisis estadístico de cada variable respuesta se muestra por separado.

Mediante el análisis del diseño experimental (Cuadro 24). se puede observar que la temperatura de entrada es el factor que más afecta el rendimiento, sin embargo, tomando en cuenta un valor p de 0.05 de significancia, ningún factor es determinante en el rendimiento

**Cuadro 24.** Análisis de varianza para rendimiento de fórmulas lácteas.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	Prob > F
T. de entrada	1	164.99402	3.5303	0.0848
Vel. de alimentación	1	3.64810	0.0781	0.7847
T. de entrada * Vel. de alimentación	1	141.72903	3.0325	0.1072

Los bajos rendimientos en los tratamientos se deben a la deposición de producto a las paredes del secador por aspersion. Prevenir o controlar esta situación es muy importante debido a que esto afecta de manera directa al rendimiento y cuestiones de seguridad y calidad (Francia et al., 2017).

La deposición de producto en las paredes del secador según algunos autores se debe a diversos factores. Uno de ellos se refiere a la naturaleza de la muestra, es decir, una solución a secar con una mayor proporción de proteína presentará menor adherencia en las paredes del secador (Keshani et al., 2013; Kota & Langrish., 2006). Por otra parte, una solución con mayor porcentaje de grasa y mayor porcentaje de carbohidratos en su composición presentará mayor deposición en las paredes (Keshani et al., 2012; Paterson et al., 2007).

Otro aspecto muy importante al tomar en cuenta para prevenir la deposición de producto es el material de pared del secado por aspersión. Por ejemplo, si las paredes del secador son de acero inoxidable, éstas presentaran una mayor deposición en comparación con las paredes de Nylon (Bhandari & Howes, 2005; Kota y Langrish, 2006).

Del mismo modo, otro factor muy importante que afecta la deposición del producto en las paredes del secador son los parámetros de operación utilizados. Por ejemplo, a menor temperatura de entrada, habrá mayor deposición de producto en comparación con una temperatura de entrada más alta. En contraste, una mayor velocidad de alimentación generará una mayor deposición en las paredes del secador en comparación con una menor velocidad de alimentación (Keshani et al., 2013; Chegini y Ghobadian, 2007). Por ejemplo, algunos autores como Chauhan y Kumar (2004) han establecido parámetros óptimos para obtener una muy buena calidad de leche en polvo, en términos de contenido de humedad e índice de insolubilidad. Ellos establecieron una temperatura de entrada de 190 °C con un 46 % de sólidos, por su parte Birchall et al. (2005) encontraron que los parámetros óptimos deberían ser 1.4 kg de sólidos totales por hora y una temperatura de entrada de 160 °C.

También, otro factor que afecta la deposición de producto es el tipo del secador usado, por ejemplo, algunos autores afirman que se observa mayor deposición en los secadores cónicos en comparación con los secadores parabólicos (Keshani et al., 2013; Keshani et al., 2014).

Un último factor importante que afecta de manera directa la deposición de producto en las paredes del secador es la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de la lactosa, el cual es el carbohidrato de mayor proporción en la fórmula láctea. Por ejemplo, por encima de la  $T_g$ , el estado de las partículas de polvo en el secador son gomosas, por lo que son precursoras de adhesión. Por otro lado, cuando la temperatura de las paredes del secador está por debajo de la  $T_g$  se observará menor deposición en las paredes del secador (Ozmen y Langrish, 2003). Algunos autores como Adhikari et al. (2004) han añadido aditivos a su formulación para

aumentar el peso molecular y por lo tanto disminuir la Tg de la lactosa y así evitar la adhesión de producto en las paredes del secador. Por su parte, Adhikari et al. (2009) aplicaron concentrados de proteínas como WPI y caseinato de sodio para minimizar la adhesión de lactosa en las paredes.

## 6.6 Determinación de las propiedades funcionales de las fórmulas lácteas

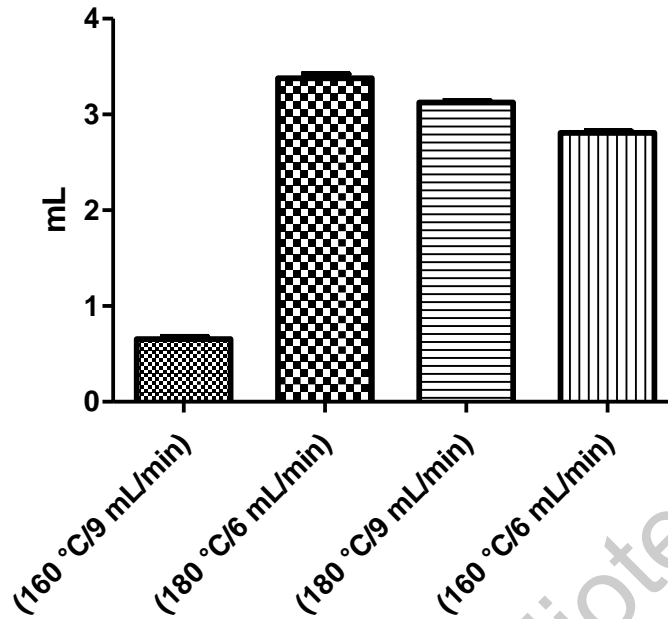
### 6.6.1 Determinación del índice de insolubilidad

Es importante mencionar que, a mayor índice de insolubilidad, el polvo mostrará menor solubilidad. Con base en esto, la mejor solubilidad se obtiene utilizando los parámetros de 160 °C como temperatura de entrada y una velocidad de alimentación de 9 mL/min (Cuadro 25).

**Cuadro 25.** Índice de insolubilidad de fórmulas lácteas.

Parámetro	Índice de insolubilidad (mL)
180 °C/ 9 mL/min	3.12 ± 0.08 <sup>B</sup>
180 °C/ 6 mL/min	3.38 ± 0.21 <sup>A</sup>
160 °C/ 6 mL/min	2.81 ± 0.08 <sup>C</sup>
160 °C/ 9 mL/min	0.65 ± 0.11 <sup>D</sup>

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).



**Figura 10.** Índice de insolubilidad de fórmulas lácteas.

**Cuadro 26.** Análisis de varianza para índice de solubilidad.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	Prob > F
T. de entrada	1	9.2720250	2421.421	< 0.001*
Vel. de alimentación	1	5.8081000	1516.805	< 0.001*
T. de entrada * Vel. de alimentación	1	3.6290250	947.7323	< 0.001*

En el cuadro 26 Se puede observar que todos los factores afectan la solubilidad de la fórmula láctea, tanto la temperatura de entrada como la velocidad de alimentación, así como la interacción de ambos factores. Esto, tomando en cuenta un valor p de 0.05 de significancia.

El proceso de rehidratación en agua es complejo y puede describirse en tres etapas o propiedades inherentes del polvo. El primero es la humectabilidad, definida como la capacidad del polvo de absorber agua en su superficie y penetrar en la superficie del agua. La dispersibilidad viene luego, la cual representa la separación de los agregados en partículas individuales. Al final viene la solubilidad, una característica relacionada con la velocidad de disolución y la solubilidad total que también está relacionada con la cantidad de material disuelto en una solución saturada (Francisquini et al., 2020).

Algunos autores como Sadat et al. (2016) reportan un índice de insolubilidad de 2.83 mL de una leche en polvo adicionada de sales a una temperatura de entrada de 130 °C y a una velocidad de alimentación de 7.5 mL/min. Por otro lado, Pugliese et al. (2017) reportan un índice de insolubilidad de 0.8 mL para leche entera en polvo. Por último, Augustin et al. (2014) reportan un índice de insolubilidad para leche entera en polvo de 0.5 mL usando una temperatura de entrada de 190 °C y una concentración de sólidos del 44 %.

La capacidad de un polvo para disolverse en agua, denominada solubilidad, indica la rehidratación completa de los polvos. Además, es bien sabido que uno de los factores que más afecta la solubilidad son las condiciones del secado. Se puede observar que mientras más se eleva la temperatura, la solubilidad disminuye. Se considera que la caseína es el principal componente de atracción de agua en la leche en polvo. La interacción entre el agua y la caseína está influenciada en gran medida por la organización estructural de la caseína. Esto quiere decir que la baja solubilidad de los polvos lácteos se podría deber a una modificación conformacional en la estructura de la caseína provocando aglomerados de ésta. La modificación de la organización estructural de las micelas de caseína induce cambios en las interacciones entre el agua y las moléculas de caseína. Se sabe que el estado de agregación de proteínas tiene un papel importante en la cantidad de agua unida a la estructura molecular (Sadat et al., 2016).

La solubilidad depende principalmente de la composición química del polvo y su estado físico. Algunos factores que influyen directamente en la insolubilidad de

los polvos lácteos son, el calor, el tipo de secado y la concentración de iones. El factor principal que controla el índice de insolubilidad es la temperatura de entrada durante la etapa del secado (Sharma et al., 2012).

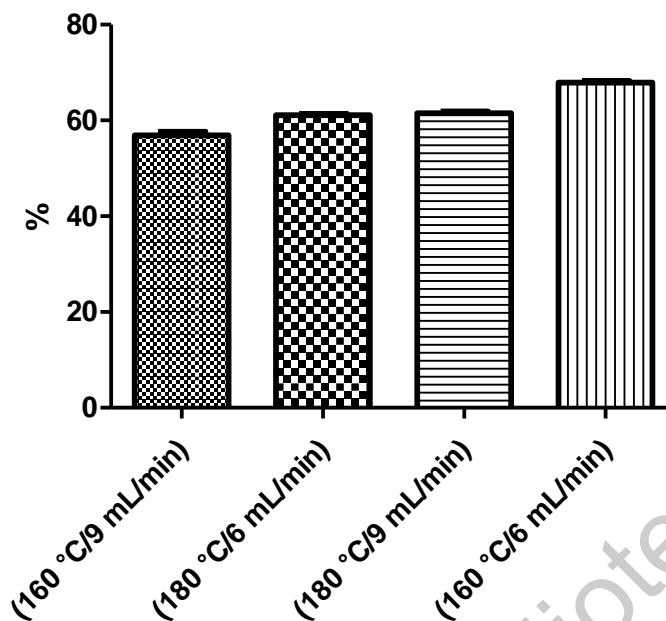
### 6.6.2 Determinación del índice de dispersabilidad

Se muestra el índice de dispersabilidad para los diferentes parámetros usados en el secado por aspersion de la fórmula láctea. Es importante mencionar que a mayor índice de dispersabilidad, el polvo mostrará mayor dispersabilidad. Con base en esto, la mejor dispersabilidad se obtiene utilizando los parámetros de 160 °C como temperatura de entrada y una velocidad de alimentación de 6 mL/min (Cuadro 27).

**Cuadro 27.** Índice de dispersabilidad de fórmulas lácteas.

Parámetro	Índice de dispersabilidad (%)
180 °C/ 9 mL/min	61.47 ± 1.32 <sup>B</sup>
180 °C/ 6 mL/min	61.07 ± 1.03 <sup>B</sup>
160 °C/ 6 mL/min	67.93 ± 1.09 <sup>A</sup>
160 °C/ 9 mL/min	56.88 ± 2.56 <sup>D</sup>

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).



**Figura 11.** Índice de dispersabilidad de fórmulas lácteas.

**Cuadro 28.** Análisis de varianza para índice de dispersabilidad.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	Prob > F
T. de entrada	1	5.130	5.428	< 0.038*
Vel. de alimentación	1	113.210	119.774	< 0.001*
T. de entrada * Vel. de alimentación	1	131.217	138.825	< 0.001*

En el Cuadro 28 se puede observar que la temperatura de entrada y su interacción con la velocidad de alimentación afectan de manera significativa la dispersabilidad, así mismo, la velocidad de alimentación tiene un efecto importante en la dispersabilidad, todo esto tomando en cuenta un valor p de 0.05 de significancia.

Algunos autores como Fonseca et al. (2011) reportan índices de dispersabilidad para leche de cabra en polvo de 82 % con una temperatura de entrada de 145 °C y una concentración de sólidos de la mezcla de 40 %. Por otro lado, Fournaise et al. (2020) reportan una dispersabilidad de 19.79 % para leche



entera en polvo de vaca usando una concentración de la mezcla a 30 % de sólidos con una temperatura de entrada de 200 °C con una velocidad de alimentación de 68 mL/min. Por último, Mahadev & Meena (2020) reportan un índice de dispersabilidad de 7.43 % para leche de búfalo adicionada con MPC80 usando una temperatura de entrada de 200 °C.

Los polvos muy dispersables exhiben típicamente buena humectabilidad (Sharma et al., 2012). La capacidad de dispersión de los alimentos en polvo depende principalmente de la capacidad de la caseína para dispersarse en la solución. La tasa de dispersión determina si los polvos lácteos en cuestión pueden clasificarse como instantáneos, donde deben tener buena dispersabilidad, humectabilidad y aglomeración óptima. En general, la velocidad de disolución se ve favorecida por la presencia de pequeñas moléculas hidrofílicas en la superficie. La solubilidad de la proteína se basa en la capacidad de los residuos polares solubles de interactuar con el agua a través de un enlace de hidrógeno, mientras que la parte hidrofóbica de la proteína se pliega para evitar el contacto (Fang et al., 2010).

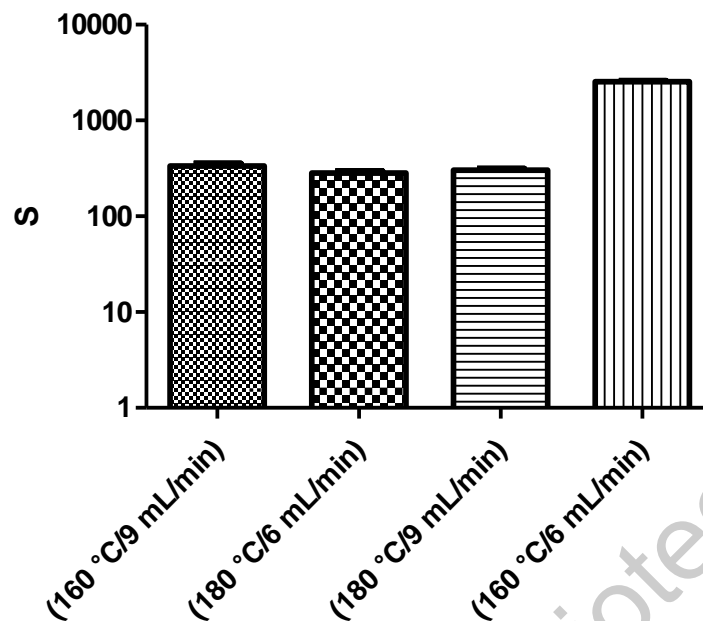
### 6.6.3 Determinación de humectabilidad

Se muestran los valores de humectabilidad para los diferentes parámetros usados en el secado por aspersión de la fórmula láctea. Es importante mencionar que, a mayor valor de humectabilidad, el polvo mostrará menor humectabilidad. Con base en esto, la mejor humectabilidad se obtiene utilizando los parámetros de 180 °C como temperatura de entrada y una velocidad de alimentación de 6 mL/min (Cuadro 29).

**Cuadro 29.** Humectabilidad de fórmulas lácteas.

Parámetro	Humectabilidad (s)
180 °C/ 9 mL/min	302.0800 ± 43.2 <sup>B</sup>
180 °C/ 6 mL/min	282.9125 ± 45.9 <sup>B</sup>
160 °C/ 6 mL/min	2546.7450 ± 207.3 <sup>A</sup>
160 °C/ 9 mL/min	336.2475 ± 68.5 <sup>B</sup>

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).



**Figura 12.** Humectabilidad de fórmulas lácteas.

**Cuadro 30.** Análisis de varianza para humectabilidad.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	Prob > F
T. de entrada	1	5280804.00	2057.59	< 0.001*
Vel. de alimentación	1	4801927.20	1871.01	< 0.001*
T. de entrada * Vel. de alimentación	1	4971406.00	1937.04	< 0.001*

Se puede observar en el Cuadro 30 que todos los factores afectan la humectabilidad de la fórmula, tanto la temperatura de entrada, la velocidad de alimentación, así como la interacción entre ambos factores. Esto, tomando en cuenta un valor p de 0.05 de significancia.

Fournaise et al., (2020) reporta valores de humectabilidad para leche en polvo de < 90 minutos para leche entera en polvo de vaca usando una concentración de la mezcla a 30 % de sólidos con una temperatura de entrada de 200 °C con una velocidad de alimentación de 68 mL/min. Por su parte, Kim et al. (2002) reporta un valor de humectabilidad para leche de vaca entera de > 15 minutos (parámetros de

secado no especificados) y, por último, Hammes et al. (2015) reporta valores de humectabilidad de > 5 minutos de leche de búfalo en polvo con una concentración de sólidos del 40 % a una velocidad de alimentación de 0.60 L/h con una velocidad de entrada de 140 °C.

La humectabilidad depende de diversas propiedades de los polvos, como el tamaño de partícula, la densidad, el área superficial de las partículas, la presencia de sustancias anfipáticas, así como si la superficie de las partículas se encuentra cubierta por moléculas higroscópicas (como lactosa) las cuales producen buenas propiedades humectantes debido al pequeño ángulo de contacto. A menor ángulo de contacto, mayor humectabilidad. La humectabilidad se ve favorecida por partículas grandes de alta porosidad, es por esto que, la adición de tensoactivos a los polvos se usa comúnmente para mejorar la humectabilidad de la leche en polvo (Sharma et al., 2012).

Es bien sabido que la humectabilidad puede ser un paso crítico en el proceso de rehidratación de los productos lácteos en polvo (Ji et al., 2016). La humectabilidad de los productos lácteos en polvo es un proceso de penetración dinámica y se cree que el comportamiento de humectación de los productos lácteos en polvo puede verse específicamente afectado por la composición de la superficie y el tamaño de las partículas (Crowley et al., 2016; Felix da Silva et al., 2018). Las partículas con superficies hidrofóbicas no se humedecerán fácilmente y los polvos que contienen una gran cantidad de tales partículas exhiben una tendencia a aglomerarse (Fitzpatrick et al., 2016). Los polvos aglomerados (con un tamaño de partícula más grande) tienden a presentar una humectabilidad más rápida ya que el agua puede penetrar más fácilmente en los espacios vacíos grandes que existen entre las partículas (Ji et al., 2016).

Fitzpatrick et al. (2016) investigó el comportamiento de rehidratación (humectabilidad y solubilización) de doce polvos alimenticios diferentes y concluyó que la composición, en particular, tuvo una gran influencia en la humectabilidad. Específicamente, los polvos con alto contenido de grasa tenían la humectabilidad más pobre debido a la naturaleza hidrofóbica de la grasa.

Se espera que la composición de la superficie del polvo juegue un papel importante en el proceso de humectación. En general, la cobertura de la superficie de los componentes hidrofóbicos (por ejemplo, grasa) proporciona propiedades de humectación "pobres" con un ángulo de contacto grande. Por otro lado, la cobertura de la superficie de los componentes higroscópicos (por ejemplo, lactosa) proporciona propiedades de humectación "buenas" con un ángulo de contacto pequeño (Kim et al., 2002).

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos de las fórmulas lácteas en polvo, estos se compararon con las especificaciones de la NOM-183-SCFI-2012, la cual menciona que el mínimo de proteína debe ser de 22 %, los polvos obtenidos presentan un porcentaje promedio de 26 % de proteína. En el caso del porcentaje de grasa, dicha norma menciona que solo se debe de declarar dicho porcentaje. Por último, en el caso del porcentaje de humedad, esta debe de estar en aproximadamente 4 %, en este caso, el promedio de humedad de las fórmulas lácteas obtenidas fue de 4.6 %.

Se puede observar que el mejor rendimiento se obtiene a 180 °C con una velocidad de alimentación de 9 mL/min (Cuadro 31). Sin embargo, esta condición afecta en gran medida las propiedades funcionales de la fórmula, tales como la solubilidad, la cual es la de mayor impacto. Del mismo modo se puede observar que a menor temperatura de entrada se obtienen mejores propiedades funcionales de solubilidad y dispersabilidad, sin embargo, se obtiene una pobre humectabilidad. De igual forma, el rendimiento disminuye. Por su parte, en la actividad de agua, así como la humedad y el porcentaje de grasa y el porcentaje de proteína no presentan diferencias significativas entre sí de acuerdo con la comparación de medias por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).

**Cuadro 31.** Resumen de parámetros usados en el secado por aspersión, variables respuesta y resultados de la caracterización del polvo obtenido.

Parámetro	180 °C	180 °C	160 °C	160 °C
Temperatura de entrada	180 °C	180 °C	160 °C	160 °C
Velocidad de alimentación	9 mL/min	6 mL/min	9 mL/min	6 mL/min
Rendimiento	53.10 ± 6.10 <sup>A</sup>	46.20 ± 5.20 <sup>A</sup>	40.78 ± 9.00 <sup>A</sup>	45.70 ± 7.70 <sup>A</sup>
Índice de insolubilidad (mL)	3.12 ± .08 <sup>B</sup>	3.38 ± 0.21 <sup>A</sup>	0.65 ± 0.11 <sup>D</sup>	2.81 ± 0.08 <sup>C</sup>
Índice de dispersabilidad (%)	61.47 ± 1.3 <sup>B</sup>	61.07 ± 1.03 <sup>B</sup>	56.88 ± 2.56 <sup>D</sup>	67.93 ± 1.09 <sup>A</sup>
Humectabilidad (s)	302.08 ± 43.20 <sup>B</sup>	282.91 ± 45.90 <sup>B</sup>	336.25 ± 68.50 <sup>B</sup>	2546.74 ± 207.30 <sup>A</sup>
Aw	0.40 ± 0.00 <sup>A</sup>	0.42 ± 0.00 <sup>A</sup>	0.45 ± 0.00 <sup>A</sup>	0.39 ± 0.00 <sup>A</sup>
Humedad (%)	5.90 ± 0.05 <sup>A</sup>	4.40 ± 0.26 <sup>A</sup>	4.50 ± 0.04 <sup>A</sup>	3.60 ± 0.25 <sup>A</sup>
Grasa (%)	26.40 ± 0.80 <sup>A</sup>	26.10 ± 1.60 <sup>A</sup>	26.90 ± 1.60 <sup>A</sup>	27.10 ± 0.90 <sup>A</sup>
Proteína (%)	26.40 ± 0.29 <sup>A</sup>	27.30 ± 0.07 <sup>A</sup>	26.80 ± 0.06 <sup>A</sup>	26.40 ± 0.20 <sup>A</sup>

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).

Por lo anterior, los parámetros seleccionados para el escalamiento del secado por aspersión de la fórmula láctea fueron una temperatura de entrada de 160 °C con una velocidad de alimentación alta. En este caso se usó una velocidad de 40 mL/min. Del mismo modo, se seleccionó la propiedad funcional de solubilidad como determinante para el escalamiento de la fórmula láctea a nivel piloto.

## 6.7 Escalamiento del secado por aspersion de la fórmula láctea a nivel piloto

Se llevó a cabo el escalamiento del secado por aspersion de la fórmula láctea a nivel piloto, se caracterizó y se evaluaron sus propiedades funcionales. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 32.

Es importante mencionar que el escalamiento presentó varios desafíos, primeramente, el material de pared del secador por aspersion a escala laboratorio es de vidrio, a diferencia del secador a escala piloto, el cual es de acero inoxidable. Otro reto que se presentó fue la cantidad de fórmula a secar, debido a que la mínima cantidad para secar en el secador a escala piloto es 1 kg, así mismo, este equipo requiere del encendido de un compresor de aire, así como del armado del equipo, el cual requiere de dos operarios.

En el Cuadro 32 se puede observar que, al hacer el escalamiento del secador a escala laboratorio, al secador por aspersion a escala piloto, el rendimiento aumento de un 40.78 % a un 60.5 %. En este caso, el aumento del rendimiento supone que existe una menor energía superficial del material de pared del secador a escala piloto, en comparación con el vidrio, material de pared del secador por aspersion a escala laboratorio. Ya que, se considera que el material de pared influye en gran medida en la adhesión de producto en dichas paredes provocando pérdidas de producto y como consecuencia pobre rendimiento. (Gunjal & Shirolkar, 2020).

Por otro lado, es necesario mencionar que, una temperatura de pared más alta produce mayor deposición de producto (Keshani et al., 2015). Por lo que posiblemente la temperatura de pared del secador por aspersion a escala piloto, el cual es de acero inoxidable, es menor en comparación con la temperatura de pared del secador a escala laboratorio el cual es de cristal lo que posiblemente provoco que el rendimiento aumentara.

**Cuadro 32.** Resultados obtenidos en dos secadores por aspersión, caracterización del polvo obtenido y resultados de la evaluación de las propiedades funcionales.

<b>TIPO DE SECADOR</b>	<b>ESCALA LABORATORIO</b>	<b>ESCALA PILOTO</b>
Temperatura de entrada	160 °C	160 °C
Velocidad de alimentación	9 mL/min	40 mL/min
<b>Rendimiento (%)</b>	40.78 ± 9.0	60.5 %
<b>Índice de insolubilidad (mL)</b>	0.65 ± 0.11	0.4 ± 0.11
<b>Índice de dispersabilidad (%)</b>	56.88 ± 2.56	72.9 ± 3.46
<b>Humectabilidad (s)</b>	336.25 ± 68.5	2018 ± 234
Aw	0.45 ± 0.0	0.13 ± 0.001
Humedad (%)	4.50 ± 0.04	1.55 ± 0.01
Grasa (%)	26.90 ± 1.6	25.79 ± 0.68
Proteína (%)	26.80 ± 0.06	26.20 ± 0.15

Los resultados se reportan como la media ± la desviación estándar (n=3). Letras iguales indican que no existe diferencia significativa por la prueba de Tukey ( $\alpha < 0.05$ ).

En el caso de la solubilidad, ésta mejoro ligeramente. Hay que recordar que la solubilidad depende de algunas propiedades del polvo tales como el contenido de humedad y el tamaño de las partículas, además es uno de los principales parámetros determinantes de la capacidad de hidratación de un polvo (Zouari et al., 2020). Por lo tanto, es importante señalar que el polvo obtenido en el escalamiento presentó un porcentaje menor de humedad, comparándolo con el polvo obtenido en el secador de vidrio. Así mismo se obtuvo un polvo con menor actividad de agua, comparándola con la obtenida en el secador por aspersión a escala laboratorio. Esto posiblemente provoco que la solubilidad mejorara, así mismo es posible que se haya obtenido un tamaño de partícula menor en el secador

a escala piloto, ya que ésta, está directamente relacionada con la mejora de la solubilidad. En el caso de la humectabilidad, esta incrementó, haciendo que el polvo obtenido sea menos humectable. Algunos autores afirman que un mayor porcentaje de grasa en las superficies de las partículas de polvo disminuye considerablemente la humectabilidad de este por lo que posiblemente esta podría ser una razón por la cual la humectabilidad se vio afectada (Wu et al., 2014).

Otro factor que posiblemente afectó el rendimiento del polvo obtenido pudo ser la geometría de la cámara, ya que ésta cambia directamente el patrón de flujo de aire y afecta el comportamiento y patrón de flujo de las partículas dentro del secador. Varios investigadores han estudiado posibles geometrías de cámara como cónica, geometría de reloj de arena, geometría parabólica, entre otras. Encontrando mejores rendimientos en la geometría parabólica. De la misma manera, no solo la geometría del cilindro afecta la adhesión del polvo, también la duración de la residencia de las partículas en la cámara de secado, así como el volumen total de la cámara puede afectar el rendimiento del secado.

Cuando aumenta la velocidad de alimentación, se forman gotas más grandes y, por lo tanto, la velocidad de evaporación es menor. El aumento de la velocidad de alimentación da como resultado una mayor humedad en el polvo obtenido afectando las propiedades funcionales del mismo, tales como la humectabilidad. De igual forma, cuando se alimenta más producto en la cámara, el tiempo de residencia de las partículas es más corto y el tiempo de secado se reduce, dando como resultado partículas más húmedas. En esta condición, las partículas son más cohesivas, lo que provoca que la tasa de deposición aumente y el rendimiento disminuya. Por otra parte, se observa un aumento en los depósitos de la pared de la cámara de secado. La deposición en este caso es alta debido al mayor caudal de alimentación (Gunjal & Shirolkar, 2020).

En el caso de la dispersabilidad, esta mejoró en un 16.8 % haciendo que el polvo sea más dispersable. Es necesario mencionar que la dispersabilidad depende de la presencia de pequeñas moléculas hidrofílicas en la superficie de las partículas por lo que es probable que esto haya influido en la mejora de esta propiedad (Fang



et al., 2010). Por último, en el caso del contenido de grasa, así como del contenido de proteína se observa que no hubo diferencias en el porcentaje de ambos componentes al hacer el escalamiento.

### 6.8 Comparación de los polvos obtenidos

Se muestran las diferencias de color entre los dos polvos obtenidos, tanto del polvo obtenido a nivel laboratorio, como el obtenido a nivel piloto. Se puede observar que el polvo obtenido a nivel piloto presenta una coloración ligeramente más amarilla que el polvo obtenido a nivel laboratorio. También es importante mencionar que el aspecto del polvo obtenido a nivel piloto es más fino, en comparación con el obtenido a nivel laboratorio (Figura 13,14).



**Figura 13.** Polvos obtenidos a diferentes escalas.



**Figura 14.** Comparación de los polvos obtenidos a diferentes escalas. A) Polvo obtenido a escala laboratorio. B) Polvo obtenido a escala piloto.

### 6.8.1 Microscopía electrónica de barrido de la fórmula láctea

Se muestran las diferencias entre los dos tipos de polvos obtenidos a diferentes escalas. Es importante mencionar que, en el polvo obtenido a escala laboratorio, las partículas presentan mayor aglomeración en comparación con el polvo obtenido a escala piloto, el cual muestra menor aglomeración (Figura 15)

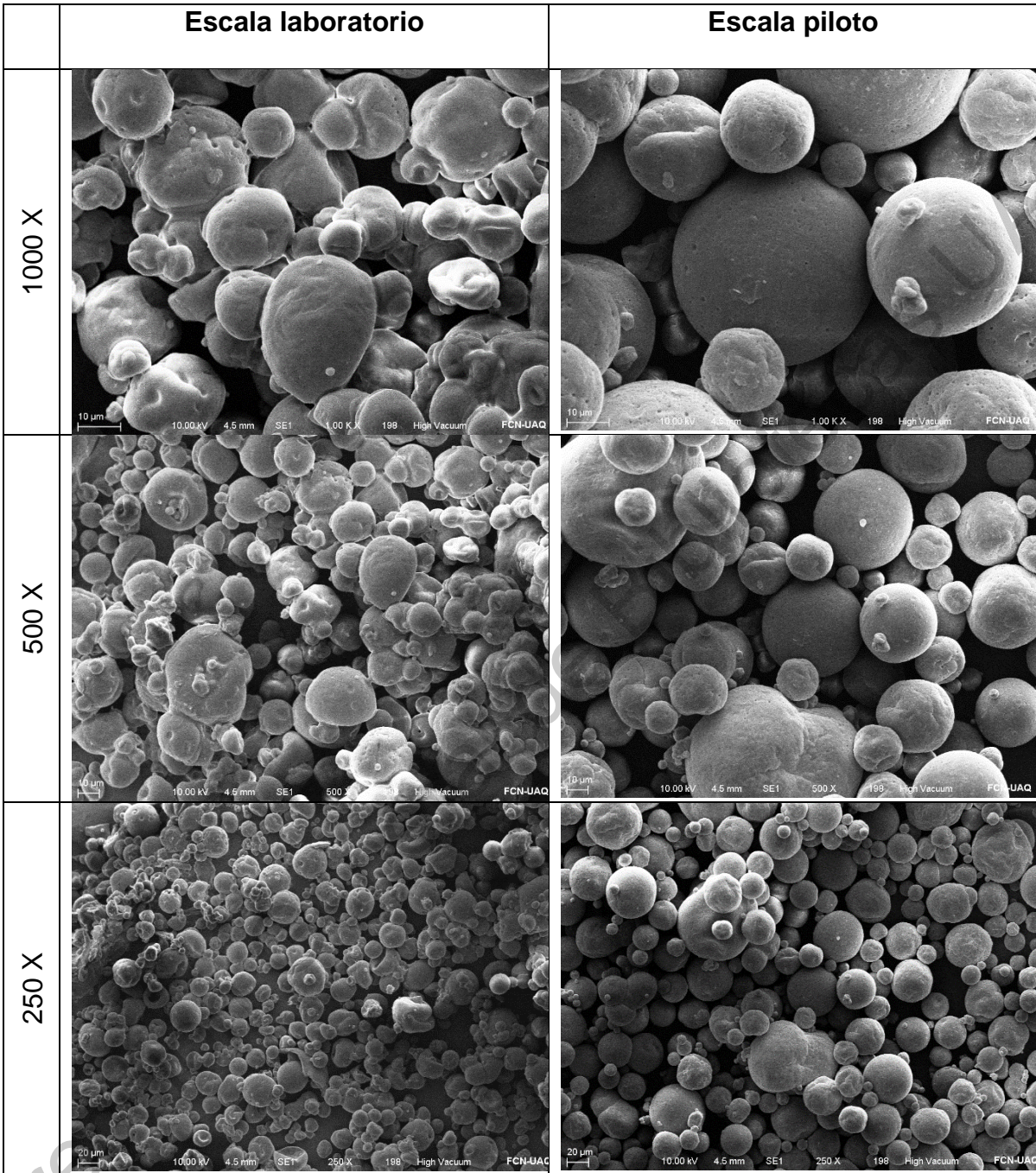
Del mismo modo, las partículas de polvo a escala laboratorio se muestran rugosas y poco esféricas. Por otro lado, en el caso del polvo obtenido a escala piloto, las partículas fueron, en su mayoría, lisas y esféricas con poca o ninguna aglomeración.

De igual forma, autores como Masum et al. (2020) y Li et al. (2016) también observaron partículas lisas y esféricas en polvos de algunas fórmulas lácteas.

Autores como Ousset et al. (2018) afirman que una concentración relativamente baja del contenido de sólidos de la solución a secar en el proceso de secado por aspersion genera partículas esféricas, pero con superficies rugosas.

Por otro lado, autores como Fournaise et al. (2020) y Deshwal et al. (2020) reportan que las superficies lisas de las partículas se deben en gran medida a la presencia de una capa de lípidos en la superficie de la partícula, la cual se forma por la migración de lípidos en la partícula de polvo durante el secado por aspersion.

De la misma forma, autores como Voronin et al. (2020) explican que las diferentes morfologías de las partículas de polvo se deben a la velocidad de alimentación durante el proceso de secado. Por ejemplo, a una tasa de alimentación baja, las partículas presentan formas más esféricas, uniformes y lisas. Por el contrario, si la tasa de alimentación es relativamente alta, la cantidad de agua a eliminar será mucho mayor y por lo tanto se formarán aglomerados produciendo partículas menos uniformes.



**Figura 15.** Imágenes de microscopía electrónica de barrido de las fórmulas lácteas obtenidas a diferentes escalas.

Por último, otros autores como Badem & Ucar (2017) encontraron que la leche entera en polvo muestra una superficie lisa, cubierta de una ligera capa grasa, por otro lado, la leche desnatada en polvo presentó partículas más rugosas o la denominada forma de estructura cerebral. La razón de esto sería que, durante el secado por aspersión de las gotas de leche, la superficie exterior de las partículas se cubrirá de grasa. Por consiguiente, habrá una tendencia a llenar los poros y fisuras en la superficie de las partículas y obstruir el movimiento del agua a la superficie, generando partículas lisas y uniformes. Las partículas presentarán una forma esférica ya que la humedad y el vapor dentro de la partícula tienden a expandirse.



## 7. CONCLUSIONES

Se caracterizaron fisicoquímicamente los cinco ingredientes proteicos de leche y se determinaron sus propiedades funcionales para determinar la proporción de estos en el diseño de la fórmula láctea. Se siguieron las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010 y el producto obtenido puede ser denominado "Producto lácteo en polvo".

De acuerdo con el análisis estadístico la temperatura de entrada y la velocidad de alimentación afectan de manera significativa la solubilidad. La temperatura de entrada es el factor que más afecta la dispersabilidad. La temperatura de entrada y la velocidad de alimentación afectan de manera significativa la humectabilidad. El factor que más afectó el rendimiento fue la temperatura de entrada. Por lo tanto, el factor temperatura de entrada es determinante en el proceso de secado por aspersion de esta fórmula láctea.

El escalamiento de nivel laboratorio a nivel piloto no afectó el contenido de grasa ni proteína de la fórmula láctea manteniendo el porcentaje en 26 % y 26 % respectivamente. Sin embargo, algunas propiedades funcionales como solubilidad y dispersabilidad se vieron afectadas, pasando de un índice de 0.65 % a 0.4 % en el caso de la solubilidad y de un 56.88 % a un 72.9 % en el caso de la dispersabilidad. Además, el rendimiento aumento de un 40.78 a un 60.5 %. Por lo que, al requerirse escalar a nivel industrial, deberá ser necesario evaluar las propiedades funcionales de dispersabilidad y solubilidad.

Los resultados obtenidos en este estudio brindan un precedente al escalamiento industrial de la fórmula láctea obtenida. Por lo que podrían diseñarse pruebas de escalamiento manteniendo las proporciones de los ingredientes de la fórmula diseñada, considerando el factor temperatura de entrada como determinante en el proceso de secado por aspersion.

## 8. REFERENCIAS

Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B., Bheshe & Langrish, T.A.G. (2009). Effect of addition of proteins on the production of amorphous sucrose powder through spray drying. *Journal of Food Engineering*, 94 (1), 144-153.

Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B., & Troung, V. (2004). Effect of addition of maltodextrin on drying kinetics and stickiness of sugar and acid-rich foods during convective drying: experiments and modelling. *Journal of Food Engineering*, 62 (1), 53–68.

Adhikari, B., Howes, T., Wood, B. J., & Bhandari, B. R. (2009). The effect of low molecular weight surfactants and proteins on surface stickiness of sucrose during powder formation through spray drying. *Journal of Food Engineering*, 94 (2), 135–143.

ADPI. American Dairy Products Institute. (2019). Dairy Permeate Standards. Wisconsin Center for Dairy research. Elmhurst, IL: American Dairy Products Institute. Disponible en file:///C:/Users/PC/Downloads/US%20Whey-Milk-Permeate-Overview.pdf consultado el 26 de mayo de 2020.

ADPI. American Dairy Products Institute. (2016). Whey Protein Concentrate (WPC) standard. Elmhurst, IL: American Dairy Products Institute. Disponible en <https://www.adpi.org/Portals/0/Standards/WPCStandardbook.pdf>, consultado el 31 de marzo de 2019.

ADPI. American Dairy Products Institute. (2019). Whey Protein Isolate (WPI). Standard. Elmhurst, IL: American Dairy Products Institute. Disponible en [https://www.adpi.org/Portals/0/Standards/WPIStandard\\_book.pdf](https://www.adpi.org/Portals/0/Standards/WPIStandard_book.pdf), consultado el 31 de marzo de 2019.

ADPI. American Dairy Products Institute. (2019). Skim Milk Powder (SMP). Standard. Elmhurst, IL: American Dairy Products Institute. Disponible en <https://www.adpi.org/DairyProducts/DryMilks/SkimMilkPowder/tabid/359/Default.aspx> consultado el 24 de abril de 2020.

- Agarwal, S., Beausire, R. L. W., Patel, S., & Patel, H. (2015). Innovative uses of milk protein concentrate in product development. *Journal of Food Science*, 80 (1), 23–29.
- Alan, K. S., Subbiah, J., & Schmidt, K. A. (2019). Application of a dry heat treatment to enhance the functionality of low-heat nonfat dry milk. *Journal of Dairy Science*, 102(2), 1096-1107.
- Augustin, M. A., & Margetts, C. L. (2003). POWDERED MILK | Milk Powders in the Marketplace. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 4694–4702.
- Augustin, M. A., Puvanenthiran, A., Clarke, P. T., & Sanguansri, P. (2014). Energy use for alternative full-cream milk powder manufacturing processes. *Journal of Food Engineering*, 124 (1), 191–196.
- Ausubel, F.M., Brent, R., Kingston, R., Moore, D., Seidman, J., Smith, J., Struh, K. (2002). *Short Protocols in Molecular Biology*, 5<sup>a</sup> ed. Wiley.
- Awuchi, Chinaza & Victory, Igwe & Echeta, Chinelo. (2019). The Functional Properties of Foods and Flours, 5 (1), 139-160.
- Bacenetti, J., Bava, L., Schievano, A., & Zucali, M. (2018). Whey protein concentrate (WPC) production: Environmental impact assessment. *Journal of Food Engineering*, 224, 139–147.
- Badem, A., & Ucar, G. (2017). Production of caseins and their usages. *Int. J. Food Sci. Nutr*, 2 (1), 4-9.
- Bajpai, S., & Tiwari, P. (2014). Investigation of moisture sorption behavior of soluble sodium caseinate. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 26 (5), 399-406.
- Baldwin, A., 2010. Insolubility of milk powder products – A minireview. *Dairy Science & Technology*, 90 (2), 169-179.
- Baldwin, A. and Truong, G., 2007. Development of insolubility in dehydration of Dairy Milk Powders. *Food and Bioproducts Processing*, 85 (3), 202-208.

- Baraka A. & Abd E. (2015). Effect of milk fat replacement with vegetable oil and/or whey protein concentrate on microstructure, texture, and sensory characteristics of fresh soft cheese. *International Journal of Dairy Science*, 10 (1), 117-125.
- Barberis, S. E., Sturniolo, H. L., Folguera, L., & Magallanes, J. F. (2018). Strategy for the prediction, control, and optimization of the functional properties of food proteins: Using Statistical and Chemometric Tools. In *Food Processing for Increased Quality and Consumption* (Pp. 313-345). Academic Press.
- Belton P. (2000). The functional properties of fats and oils - A richness of diversity. *Institute of Food Research*, 32 (51), 1- 5.
- BeMiller, J. N. (2019). Summary of carbohydrate functionalities. *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*, (Pp. 401-405). Academic Press.
- Bentahar, J., Doyen, A., Beaulieu, L., & Deschênes, J.-S. (2019). Acid whey permeate: An alternative growth medium for microalgae *Tetrademus obliquus* and production of  $\beta$ -galactosidase. *Algal Research*, 41, 101559.
- Bhandari, B., & Howes, T. (2005). Relating the stickiness property of foods undergoing drying and dried products to their surface energetics. *Drying Technology*, 23(4), 781–797.
- Blanco, G., & Blanco, A. (2017). *Medical biochemistry*. (Pp.73 -97). Academic Press. Academic Press.
- Boland, M., & Hill, J. (2020). World supply of food and the role of dairy protein. *Milk Proteins*, (pp. 1–19). Academic Press.
- Birchal, V. S., Passos, M. L., Wildhagen, G. R., & Mujumdar, A. S. (2005). Effect of spray-dryer operating variables on the whole milk powder quality. *Drying Technology*, 23 (3), 611-636.
- Carr, A., & Golding, M. (2016). Functional milk proteins production and utilization: Casein-based ingredients. In *advanced dairy chemistry* (pp. 35-66). Springer, New York, NY.



- Carter, B., Patel, H., Barbano, D. M., & Drake, M. (2018). The effect of spray drying on the difference in flavor and functional properties of liquid and dried whey proteins, milk proteins, and micellar casein concentrates. *Journal of Dairy Science*, 101 (5), 3900–3909.
- Castro, N., Durrieu, V., Raynaud, C., & Rouilly, A. (2016). Influence of DE-value on the physicochemical properties of maltodextrin for melt extrusion processes. *Carbohydrate Polymers*, 144 (1), 464–473.
- Chandan, R. C., & O'Rell, K. (2013). Ingredients for yogurt manufacture. *Manufacturing yogurt and fermented milks* (pp. 217-237). Springer, New York, NY.
- Chauhan B.S. & Kumar D. (2004). Effect of spray dryer operating parameters on the quality of milk powder. *New Agriculturist* 15 (1), 107–111.
- Chegini, G. R., & Ghobadian, B. (2007). Spray dryer parameters for fruit juice drying. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3 (2), 230-236.
- Chen, L. (2015). Emulsifiers as food texture modifiers. In *Modifying Food Texture* (pp. 27-49). Woodhead Publishing.
- Chen, W., Ma, X., Wang, W., Lv, R., Guo, M., Ding, T. & Liu, D. (2019). Preparation of modified whey protein isolate with gum acacia by ultrasound maillard reaction. *Food Hydrocolloids*, 95 (1), 298-307.
- Crowley, S. V., Desautel, B., Gazi, I., Kelly, A. L., Huppertz, T., & O'Mahony, J. A. (2015). Rehydration characteristics of milk protein concentrate powders. *Journal of Food Engineering*, 149 (1), 105–113.
- Crowley, S. V., Kelly, A. L., Schuck, P., Jeantet, R., & O'mahony, J. A. (2016). Rehydration and solubility characteristics of high-protein dairy powders. In *Advanced dairy chemistry* (pp. 99-131). Springer, New York, NY.
- Dairy Management Incorporated. DMI (2020). National Milk Producers Federation. Reporte de mercado de productos lácteos. Enero 2020. Disponible en:

<https://www.nmpf.org/wp-content/uploads/2020/01/Dairy-Market-Report-January-2020.pdf> consultado el 26 de mayo de 2020.

- Deeth, H., & Bansal, N. (2019). Whey proteins: An overview. In *Whey Proteins* (pp. 1-50). Academic Press.
- Deshwal, G. K., Singh, A. K., Kumar, D., & Sharma, H. (2020). Effect of spray and freeze drying on physico-chemical, functional, moisture sorption and morphological characteristics of camel milk powder. *LWT*, 134 (1), 110-117.
- Devi, A., & Khatkar, B. S. (2016). Physicochemical, rheological and functional properties of fats and oils in relation to cookie quality: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 53 (10), 3633–3641.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A y Smith, F. (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances, *Analytical Chemistry*, 28 (3), 350-356.
- Dyvelkov, K. N., & Sloth, J. (2014). New advances in spray-drying processes. In *microencapsulation in the food industry* (pp. 57-63). Academic Press.
- Ejeahalaka, K. K., & On, S. L. W. (2019). Chemometric studies of the effects of milk fat replacement with different proportions of vegetable oils in the formulation of fat-filled milk powders: Implications for quality assurance. *Food Chemistry*, 295 (1), 198–205.
- Fang, Y., Rogers, S., Selomulya, C., & Chen, X. D. (2012). Functionality of milk protein concentrate: Effect of spray drying temperature. *Biochemical Engineering Journal*, 62 (1), 101–105.
- Fang, Y., Selomulya, C., & Chen, X. D. (2010). Characterization of milk protein concentrate solubility using focused beam reflectance measurement. *Dairy Science & Technology*, 90 (2), 253-270.
- Farkye, N. Y., & Shah, N. (2015). Milk proteins. *Applied Food Protein Chemistry*, 1, 427-458.

- Fenelon, M. A., Hickey, R. M., Buggy, A., McCarthy, N., & Murphy, E. G. (2019). Whey proteins in infant formula. In *Whey Proteins* (pp. 439-494). Academic Press.
- Fennema O. (1985). *Food Chemistry*. Second edition. United States of America Marcel Dekker (pp. 235-239). Academic Press.
- Felix da Silva, D., Ahrné, L., Larsen, F. H., Hougaard, A. B., & Ipsen, R. (2018). Physical and functional properties of cheese powders affected by sweet whey powder addition before or after spray drying. *Powder Technology*, 323 (1), 139– 148.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. FIRA (2019). Panorama Agroalimentario. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. *Leche y Lácteos 2019*. Disponible en <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2019/06/Panorama-Agroalimentario-Leche-y-la769cteos-2019.pdf> Consultado el 26 de mayo de 2020.
- Fitzpatrick, J. J., van Lauwe, A., Coursol, M., O'Brien, A., Fitzpatrick, K. L., Ji, J., & Miao, S. (2016). Investigation of the rehydration behaviour of food powders by comparing the behaviour of twelve powders with different properties. *Powder Technology*, 297 (1), 340–348.
- Fletcher, D. F., Guo, B., Harvie, D. J. E., Langrish, T. A. G., Nijdam, J. J., & Williams, J. (2006). What is important in the simulation of spray dryer performance and how do current CFD models perform *Applied Mathematical Modelling*, 30 (11), 1281–1292.
- Foegeding, E. A. (2015). Food Protein Functionality-A New Model. *Journal of Food Science*, 80(12), C2670–C2677.
- Fonseca, C. R., Bento, M. S. G., Quintero, E. S. M., Gabas, A. L., & Oliveira, C. A. F. (2011). Physical properties of goat milk powder with soy lecithin added before spray drying. *International Journal of Food Science & Technology*, 46 (3), 608–611.

- Foroutan, A., Guo, A. C., Vazquez-Fresno, R., Lipfert, M., Zhang, L., Zheng, J., Badran H., Budinski Z., Mandal R., Ametaj B.N. y Wishart, D. S. (2019). Chemical Composition of Commercial Cow's Milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67 (17), 4897-4914.
- Fournaise, T., Burgain, J., Perroud, C., Scher, J., Gaiani, C., & Petit, J. (2020). Impact of formulation on reconstitution and flowability of spray-dried milk powders. *Powder Technology* 45 (2) 107-116.
- Francia, V., Martín, L., Bayly, A. E., & Simmons, M. J. H. (2017). Agglomeration during spray drying: Airborne clusters or breakage at the walls?. *Chemical Engineering Science*, 162 (1), 284–299.
- Francisquini, J. D. A., Martins, E., Renhe, I. R. T., Oliveira, L. F. C. D., Stephani, R., Perrone, Í. T., & Carvalho, A. F. D. (2020). Particle size distribution applied to milk powder rehydration. *Química Nova*, 43 (2), 226-230.
- Frank, S. G. (2002). Emulsions: theory and practice. *Journal of the American Chemical Society*, 124 (26), 7876–7877.
- Ganzle, M. G., Haase, G., & Jelen, P. (2008). Lactose: crystallization, hydrolysis and value-added derivatives. *International Dairy Journal*, 18 (7), 685–694.
- Gaiani, C., Scher, J., Ehrhardt, J. J., Linder, M., Schuck, P., Desobry, S., & Banon, S. (2007). Relationships between Dairy powder surface composition and wetting properties during storage: importance of residual lipids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (16), 6561–6567.
- Gaiani, C., Schuck, P., Scher, J., Desobry, S., & Banon, S. (2007). Dairy powder rehydration: influence of protein state, incorporation mode, and agglomeration. *Journal of Dairy Science*, 90 (2), 570–581.
- Grand View Research (2019). Dairy Products Market Size, Share & Trends Analysis Report by application, regional outlook, and segment forecasts, 2019 to 2025. Disponible en <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/dairy-product-market> consultado el 26 de mayo de 2020.

- Goulding, D. A., Fox, P. F., & O'Mahony, J. A. (2020). Milk proteins: An overview. In *Milk Proteins* (pp. 21-98). Academic Press.
- Gunjal, S. D., & Shirolkar, S. V. (2020). An overview of process parameters and spray drying agents involved in spray drying of herbal extracts. *Paideuma Journal*, 102 – 118.
- Gunstone, F. D., & Hamilton, R. J. (2004). *The chemistry of oils and fats: Sources, Composition, Properties and Uses*, CRC, Boca Raton, 141-143.
- Gunstone, F. D. (2011). Production and trade of vegetable oils. *Vegetable oils in food technology: composition, properties and uses*, 1.
- Hanus, O., Samkova, E., Krizova, L., Hasonova, L., & Kala, R. (2018). Role of fatty acids in milk fat and the influence of selected factors on their variability— a review. *Molecules*, 23 (7), 1636.
- Hammes, M. V., Englert, A. H., Noreña, C. P. Z., & Cardozo, N. S. M. (2015). Study of the influence of soy lecithin addition on the wettability of buffalo milk powder obtained by spray drying. *Powder Technology*, 277 (1), 237–243.
- Harper, W. J., Hewitt, S. A., & Huffman, L. M. (2020). Model food systems and protein functionality. In *Milk Proteins* (pp. 573-598). Academic Press.
- Hasenhuettl, G. L. (2008). Overview of food emulsifiers. In *Food emulsifiers and their applications* (pp. 1-9). Springer, New York, NY.
- Haug, A., Høstmark, A. T., & Harstad, O. M. (2007). Bovine milk in human nutrition – a review. *Lipids in Health and Disease*, 6(1), 25–28
- Havea, P. (2006). Protein interactions in milk protein concentrate powders. *International Dairy Journal*, 16(5), 415-422.
- Hazlett, R., Schmidmeier, C., & O'Mahony, J. A. (2018). *Encyclopedia of Food Chemistry: Milk Proteins*. Reference Module in Food Science. 138–47.

- Hofman, D. L., van Buul, V. J., & Brouns, F. J. P. H. (2015). Nutrition, health, and regulatory aspects of digestible maltodextrins. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56 (12), 2091–2100.
- Ho, Q. T., Murphy, K. M., Drapala, K. P., O’Callaghan, T. F., Fenelon, M. A., O’Mahony, J. A., & McCarthy, N. A. (2018). Effect of pH and heat treatment on viscosity and heat coagulation properties of milk protein concentrate. *International Dairy Journal*, 85 (1), 219–224.
- Huppertz, T., Fox, P. F., & Kelly, A. L. (2018). The caseins: Structure, stability, and functionality. In *Proteins in Food Processing* (pp. 49-92). Woodhead Publishing.
- Jacobs, I. C. (2014). Atomization and spray-drying processes. In *Microencapsulation in the Food Industry* (pp. 47-56). Academic Press.
- Jensen, H. B., Holland, J. W., Poulsen, N. A., & Larsen, L. B. (2012). Milk protein genetic variants and isoforms identified in bovine milk representing extremes in coagulation properties. *Journal of Dairy Science*, 95 (6), 2891–2903.
- Ji, J., Fitzpatrick, J., Cronin, K., Crean, A., & Miao, S. (2015). Assessment of measurement characteristics for rehydration of milk protein based powders. *Food Hydrocolloids*, 54 (1), 151-161.
- Ji, J., Fitzpatrick, J., Cronin, K., Maguire, P., Zhang, H., & Miao, S. (2016). Rehydration behaviours of high protein dairy powders: The influence of agglomeration on wettability, dispersibility and solubility. *Food Hydrocolloids*, 58 (1), 194–203.
- Ji, J., Cronin, K., Fitzpatrick, J., Maguire, P., Zhang, H., & Miao, S. (2016). The structural modification and rehydration behaviours of milk protein isolate powders: The effect of granule growth in the high shear granulation process. *Journal of Food Engineering*, 189 (1), 1–8.

- Kailasapathy, K. (2015). Chemical composition, physical, and functional properties of milk and milk ingredients. *Dairy Processing and Quality Assurance*, 5 (1), 77–105.
- Kelly, A. L., & Fox, P. F. (2016). Manufacture and properties of dairy powders. In *Advanced dairy chemistry* (pp. 1-33). Springer, New York, NY.
- Kelly, P. (2019). Manufacture of whey protein products: concentrates, isolate, whey protein fractions and microparticulated. In *Whey Proteins* (pp. 97-122). Academic Press.
- Kern, L., Fabre, O., Scher, J., & Petit, J. (2020). Chemical fractionation of caseins by differential precipitation: influence of pH, calcium addition, protein concentration and temperature on the depletion in  $\alpha$ - and  $\beta$ -caseins. *International Journal of Food Science & Technology*, 55 (2), 542-552.
- Keshani, S., Daud, W. R. W., Woo, M. W., Nourouzi, M. M., Talib, M. Z. M., Chuah, A. L., & Russly, A. R. (2013). Reducing the deposition of fat and protein covered particles with low energy surfaces. *Journal of Food Engineering*, 116 (3), 737–748.
- Keshani, S., Daud, W. R. W., Woo, M. W., Talib, M. Z. M., Chuah, A. L., & Russly, A. R. (2012). Artificial neural network modeling of the deposition rate of lactose powder in spray dryers. *Drying Technology*, 30 (4), 386–397.
- Keshani, S., Montazeri, M. H., Daud, W. R. W., & Nourouzi, M. M. (2015). CFD Modeling of air flow on wall deposition in different spray dryer geometries. *Drying Technology*, 33 (7), 784–795.
- Khalesi, H., Emadzadeh, B., Kadkhodaei, R., & Fang, Y. (2016). Effects of biopolymer ratio and heat treatment on the complex formation between whey protein isolate and soluble fraction of persian gum. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38 (9), 1234–1241.

- Kieferle, I., Hiller, K., Kulozik, U., & Germann, N. (2018). Rheological properties of fresh and reconstituted milk protein concentrates under standard and processing conditions. *Journal of Colloid and Interface Science*.
- Kilara, A., & Vaghela, M. N. (2018). Whey proteins. In *Proteins in food processing* (pp. 93-126). Woodhead Publishing.
- Kim, E. H.-J., Dong Chen, X., & Pearce, D. (2003). On the mechanisms of surface formation and the surface compositions of industrial milk powders. *Drying Technology*, 21 (2), 265–278.
- Kim, E. H.-J., Chen, X. D., & Pearce, D. (2002). Surface characterization of four industrial spray-dried dairy powders in relation to chemical composition, structure and wetting property. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 26 (3), 197–212.
- Kinsella, J. E., & Melachouris, N. (1976). Functional properties of proteins in foods: A survey. *C R C Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 7 (3), 219–223.
- Kinsella, J. E., & Morr, C. V. (1984). Milk proteins: physicochemical and functional properties. *C R C Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 21(3), 197– 262.
- Kirk R. S., Sawyer R. & Egan, H. (1996). *Pearson's Food Composition and Analysis*, Second Edition; Compañía Editorial Continental SA de CV, Mexico.
- Kota, K., & Langrish, T. A. G. (2006). Fluxes and patterns of wall deposits for skim milk in a pilot-scale spray dryer. *Drying Technology*, 24 (8), 993–1001.
- Lacerda, E. C. Q., Calado, V. M. de A., Monteiro, M., Finotelli, P. V., Torres, A. G., & Perrone, D. (2016). Starch, inulin and maltodextrin as encapsulating agents affect the quality and stability of jussara pulp microparticles. *Carbohydrate Polymers*, 151 (1), 500–510.
- Lamichhane, P., Kelly, A. L., & Sheehan, J. J. (2018). Effect of milk centrifugation and incorporation of high-heat-treated centrifugate on the composition,



texture, and ripening characteristics of Maasdam cheese. *Journal of Dairy Science*, 101 (7), 5724–5737.

Lamothe, S., Desroches, V., & Britten, M. (2019). Effect of milk proteins and food-grade surfactants on oxidation of linseed oil-in-water emulsions during in vitro digestion. *Food Chemistry*, 294 (1), 130-137.

Li-Chan, E. C. Y., & Lacroix, I. M. E. (2018). Properties of proteins in food systems: an introduction. In *Proteins in food processing* (pp. 1-25). Woodhead Publishing.

Li, K., Woo, M. W., & Selomulya, C. (2016). Effects of composition and relative humidity on the functional and storage properties of spray dried model milk emulsions. *Journal of Food Engineering*, 169 (1), 196-204.

Lindsay, M. J., Walker, T. W., Dumesic, J. A., Rankin, S. A., & Huber, G. W. (2018). Production of monosaccharides and whey protein from acid whey waste streams in the dairy industry. *Green Chemistry*, 20 (8), 1824–1834.

Li, X., Anton, N., Arpagaus, C., Belleteix, F., & Vandamme, T. F. (2010). Nanoparticles by spray drying using innovative new technology: The Büchi Nano Spray Dryer B-90. *Journal of Controlled Release*, 147 (2), 304–310.

Liu, Y., Li, Y., Shi, T., Zhao, J., Wang, H., Liu, T., Yue S., Zhou J., Yu L., & Zhu, Z. (2016). The optimization of spray drying process of *Lactobacillus reuteri*. *LWT - Food Science and Technology*, 68 (1), 615–618.

Loi, C. C., Eyres, G. T., & Birch, E. J. (2019). Effect of mono- and diglycerides on physical properties and stability of a protein-stabilised oil-in-water emulsion. *Journal of Food Engineering*, 240 (1), 56–64.

Magri, G., Franze, S., Musazzi, U. M., Selmin, F., & Cilurzo, F. (2019). Data on spray-drying processing to optimize the yield of materials sensitive to heat and moisture content. *Data in Brief*, 23, 103792.

Mahadev, G. M., & Meena, G. S. (2020). Milk protein concentrates 80: Does composition of buffalo milk matter for its poor functionality?. *LWT*, 109652.

- Marques, G. R., Borges, S. V., de Mendonca, K. S., de Barros Fernandes, R. V., & Menezes, E. G. T. (2014). Application of maltodextrin in green corn extract powder production. *Powder Technology*, 263 (1), 89–95.
- Masum, A. K. M., Chandrapala, J., Adhikari, B., Huppertz, T., & Zisu, B. (2019). Effect of lactose-to-maltodextrin ratio on emulsion stability and physicochemical properties of spray-dried infant milk formula powders. *Journal of Food Engineering*, 254 (1), 34-41.
- McSweeney, P. and Fox, P. (2013). *Advanced Dairy Chemistry*. (pp. 43-85). Springer, Boston, MA.
- McSweeney, P., & Fox, P. (2011). *Advanced dairy chemistry* (pp. 59-64). New York: Springer US.
- Meena, G. S., Singh, A. K., Gupta, V. K., Borad, S., & Parmar, P. T. (2018). Effect of change in pH of skim milk and ultrafiltered/diafiltered retentates on milk protein concentrate (MPC70) powder properties. *Journal of Food Science and Technology*, 55 (9), 3526–3537.
- Meena, G. S., Singh, A. K., Panjagari, N. R., & Arora, S. (2017). Milk protein concentrates: opportunities and challenges. *Journal of Food Science and Technology*, 54 (10), 3010–3024.
- Mujumdar, A. S. (2007). *Book Review: Handbook of Industrial Drying: A Review of*. Publisher (pp. 1133-1134). CRC Press. Boca Raton, FL.
- Nakagawa, K., Jarungrumlert, T., & Adachi, S. (2016). Structural changes in casein aggregates under frozen conditions affect the entrapment of hydrophobic materials and the digestibility of aggregates. *Chemical Engineering Science*, 143 (1), 287–296.
- Neves, M. I. L., Desobry-Banon, S., Perrone, I. T., Desobry, S., & Petit, J. (2019). Encapsulation of curcumin in milk powders by spray-drying: Physicochemistry, rehydration properties, and stability during storage. *Powder technology*, 345 (1), 601-607.

NMX-F-183-1986. Norma Mexicana. Alimentos lácteos. Determinación del índice de insolubilidad de la leche en polvo. Foods. Lacteous. Insolubility index in powder milk determination. Normas mexicanas. Dirección general de normas. Fecha de consulta: 20 de marzo de 2019.

NMX-F-026-1997. Norma Mexicana. Leche. Denominación. Especificaciones comerciales y métodos de prueba. Milk. Denomination. Commercial specifications, and test methods. Fecha de consulta: 19 de marzo de 2019.

Norn V. (2015). Emulsifiers in food technology, Segunda edición. John Wiley & Sons.

NOM-155-SCFI-2003. Norma Oficial Mexicana. Leche, Fórmula Láctea y Producto Lácteo Combinado-Denominaciones, Especificaciones Fisicoquímicas, Información Comercial y Métodos de Prueba. Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2019.

NOM-243-SSA1-2010. Norma Oficial Mexicana. Productos y servicios. Leche, fórmula láctea, producto lácteo combinado y derivados lácteos. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 23 de marzo de 2019.

Okamoto, K., Nakagawa, S., Kanawaku, R., & Kawamura, S. (2019). Ethanol production from cheese whey and expired milk by the brown rot fungus *neolentinus lepideus*. *Fermentation*, 5 (2), 49 – 56.

Olson D. & Aryana K. (2008). Ingredients in dairy products. *Dairy Processing and Quality Assurance*, 189 – 202.

O'Regan, J., Ennis, M. P., & Mulvihill, D. M. (2009). Milk proteins. In *Handbook of hydrocolloids* (pp. 298-358). Woodhead Publishing.

O'Sullivan, J. J., Norwood, E. A., O'Mahony, J. A., & Kelly, A. L. (2019). Atomisation technologies used in spray drying in the dairy industry: A review. *Journal of Food Engineering*, 243 (1), 57-69.

- Ousset, A., Meeus, J., Robin, F., Schubert, M. A., Somville, P., & Dodou, K. (2018). Comparison of a novel miniaturized screening device with büchi b290 mini spray-dryer for the development of spray-dried solid dispersions (SDSDs). *Processes*, 6 (8), 129-148.
- Ozmen, L., & Langrish, T. A. G. (2003). An experimental investigation of the wall deposition of milk powder in a pilot-scale spray dryer. *Drying Technology*, 21(7), 1253-1272.
- Pande, G., Akoh, C. C., & Lai, O. M. (2012). Food uses of palm oil and its components. In *Palm Oil* (pp. 561-586). AOCS Press.
- Panthi, R. R., Jordan, K. N., Kelly, A. L., & Sheehan, J. D. (2017). Selection and treatment of milk for cheesemaking. In *Cheese* (pp. 23-50). Academic Press.
- Park, C. W., Stout, M. A., & Drake, M. (2016). The effect of spray-drying parameters on the flavor of nonfat dry milk and milk protein concentrate 70 % 1. *Journal of Dairy Science*, 99 (12), 9598–9610.
- Pasotti, L., De Marchi, D., Casanova, M., Massaiu, I., Bellato, M., De Angelis, M. G. C. & Magni, P. (2020). Engineering endogenous fermentative routes in ethanologenic *Escherichia coli* W for bioethanol production from concentrated whey permeate. *New Biotechnology*.
- Paterson, A. H., Zuo, J. Y., Bronlund, J. E., & Chatterjee, R. (2007). Stickiness curves of high fat dairy powders using the particle gun. *International Dairy Journal*, 17 (8), 998–1005.
- Petters, S. S., Pagonis, D., Claflin, M. S., Levin, E. J. T., Petters, M. D., Ziemann, P. J., & Kreidenweis, S. M. (2017). Hygroscopicity of organic compounds as a Function of Carbon Chain Length and Carboxyl, Hydroperoxy, and Carbonyl Functional Groups. *The Journal of Physical Chemistry A*, 121 (27), 5164–5174.
- Prazeres, A. R., Carvalho, F., & Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68.

- Pugliese, A., Cabassi, G., Chiavaro, E., Paciulli, M., Carini, E., & Mucchetti, G. (2017). Physical characterization of whole and skim dried milk powders. *Journal of Food Science and Technology*, 54 (11), 3433–3442.
- Ribeiro, C. M. C. M., Magliano, L. C. dos S. A., Costa, M. M. A. de, Bezerra, T. K. A., Silva, F. L. H. da, & Maciel, M. I. S. (2018). Optimization of the spray drying process conditions for acerola and seriguela juice mix. *Food Science and Technology*, 39 (1), 48-55.
- Sadat, A., Ezzatpanah, H., & Bakhoda, H. (2016). Solubility and structure of milk powders manufactured with the addition of disodium phosphate and tetrasodium pyrophosphate mixtures. *International Journal of Food Properties*, 20 (11), 2645–2657.
- Samantha, S. C., Bruna, A. S. M., Adriana, R. M., Fabio, B., Sandro, A. R., & Aline, R. C. A. (2015). Drying by spray drying in the food industry: Micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. *African Journal of Food Science*, 9 (9), 462–470.
- Santos, M. S., Tavares, F. W., & Biscaia Jr, E. C. (2016). Molecular thermodynamics of micellization: Micelle size distributions and geometry transitions. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33 (3), 515–523.
- Schokker, E. P., Church, J. S., Mata, J. P., Gilbert, E. P., Puvanenthiran, A., & Udabage, P. (2011). Reconstitution properties of micellar casein powder: Effects of composition and storage. *International Dairy Journal*, 11 (1), 877–886.
- Schuck, P. (2013). Dairy Protein Powders. *Advances in Dairy Ingredients*, 1–29.
- Sharma, A., Jana, A., & Chavan, R. (2012). Functionality of milk powders and milk-based powders for end use applications-A review. *Comprehensive reviews In Food Science and Food Safety*, 11 (5), 518-528.
- Siew, W. L. (2002). Palm oil. *Vegetable ols in food technology: composition, properties and uses*. Backwell publishing, 59-60.

- Sikand, V., Tong, P. S., Roy, S., Rodriguez-Saona, L. E., & Murray, B. A. (2011). Solubility of commercial milk protein concentrates and milk protein isolates. *Journal of Dairy Science*, 94 (12), 6194–6202.
- Sikorski Z. (2007). Chemical and functional properties of food components. Third edition. CRC press. New York, 546.
- Singh, H. (2011). Milk protein products. Functional properties of milk proteins. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 887–893.
- Singh, Harjinder & Ye, Aiqian. (2020). Interactions and functionality of milk proteins in food emulsions, in milk proteins (pp. 467-497). Academic Press.
- Singh, J., Prakash, S., Bhandari, B., & Bansal, N. (2019). Comparison of ultra high temperature (UHT) stability of high protein milk dispersions prepared from milk protein concentrate (MPC) and conventional low heat skimmed milk powder (SMP). *Journal of Food Engineering*, 246 (1), 86–94.
- Smialowska A, Matia-Merino L, Ingham B, Carr AJ. 2017. Effect of calcium on the aggregation behaviour of caseinates. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 522 (1), 113–23.
- Smith, S. T., Metzger, L., & Drake, M. A. (2016). Evaluation of whey, milk, and delactosed permeates as salt substitutes. *Journal of Dairy Science*, 99 (11), 8687-8698.
- Southward, C. R. (2003). Casein and caseinates. *Methods of Manufacture. Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 943–948.
- Schuck, P. (2013). Dairy Protein Powders. *Advances in Dairy Ingredients*, 1–29.
- Schuck, P. (2014). Effects of Drying on Milk Proteins. *Milk Proteins*, 319–342.
- Takeiti, C. Y., Kieckbusch, T. G., & Collares-Queiroz, F. P. (2010). Morphological and physicochemical characterization of commercial maltodextrins with different degrees of dextrose-equivalent. *International Journal of Food Properties*, 13 (2), 411–425.

Think USA Dairy (2018). Dry Buttermilk & Buttermilk Powder. Disponible en <https://www.thinkusadairy.org/x11472.xml> Consultado el 5 de Julio de 2020.

Think USA Dairy (2018). Milk Permeate. Dairy Export Council. Disponible en [https://www.thinkusadairy.org/products/permeate-\(dairy-product-solids\)/permeate-categories/milk-permeate](https://www.thinkusadairy.org/products/permeate-(dairy-product-solids)/permeate-categories/milk-permeate) Consultado el 26 de mayo de 2020.

Think USA Dairy (2018). Non-fat Dry Milk & Skim Milk Powder. Dairy Export Council. Disponible en <https://www.thinkusadairy.org/products/milk-powders/milk-powder-categories/non-fat-dry-milk-and-skim-milk-powder> Consultado el 26 de mayo de 2020.

Traves, D. (2019). Understanding infant formula. *Paediatrics and Child Health*, 25 (9), 413–417.

Tighe-Neira, R., Alberdi, M., Arce-Johnson, P., Romero-Romero, J., Reyes-Díaz, M., & Inostroza-Blancheteau, C. (2017). Foods with functional properties and their potential uses in human health. *Superfood and functional food - An overview of their processing and utilization*, 21 (1), 312–324.

Tomasik T. (2007). *Saccharides. Chemical and functional properties of food components*. Gdansk University of Technology Gdansk, Poland, (pp. 93-128). CRC Press.

United States Department of Agriculture. USDA. (2018). Informe económico del aceite de palma en España 2018. España. 1- 107.

Valenzuela, C., & Aguilera, J. M. (2015). Effects of maltodextrin on hygroscopicity and crispness of apple leathers. *Journal of Food Engineering*, 144 (1), 1–9.

Voronin, G. L., Hettiarachchi, C. A., & Harte, F. M. High pressure jet spray drying of condensed skim milk results in powders with enhanced interfacial properties. *Journal of Food Engineering*, 292 (1), 110-249.

Wang, S., Shi, Y., Tu, Z., Zhang, L., Wang, H., Tian, M., & Zhang, N. (2017). Influence of soy lecithin concentration on the physical properties of whey

protein isolate-stabilized emulsion and microcapsule formation. *Journal of Food Engineering*, 207 (1), 73–80.

Wherry, B., Barbano, D. M., & Drake, M. A. (2019). Use of acid whey protein concentrate as an ingredient in nonfat cup set-style yogurt. *Journal of Dairy Science*, 102 (10), 8768-8784

Whitehurst, R. J. (2008). *Emulsifiers in food technology*. John Wiley & Sons.

Wusigale, Liang, L., & Luo, Y. (2020). Casein and pectin: Structures, interactions, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 97 (1), 391-403.

Wu, W. D., Liu, W., Gengenbach, T., Woo, M. W., Selomulya, C., Chen, X. D., & Weeks, M. (2014). Towards spray drying of high solids dairy liquid: Effects of feed solid content on particle structure and functionality. *Journal of Food Engineering*, 123 (2), 130–135.

Zhang, L., Zeng, X., Fu, N., Tang, X., Sun, Y., & Lin, L. (2018). Maltodextrin: A consummate carrier for spray-drying of xylooligosaccharides. *Food Research International*, 106 (1), 383–393.

Zouari, A., Mtibaa, I., Triki, M., Jridi, M., Zidi, D., Attia, H., & Ayadi, M. A. (2020). Effect of spray-drying parameters on the solubility and the bulk density of camel milk powder: A response surface methodology approach. *International Journal of Dairy Technology*, 73 (3), 616-624.