



Aprovechamiento de suero lácteo para el desarrollo de un producto funcional mediante tecnología de *spray drying*

Use of whey for the development of a functional product using spray drying technology

Adriana del Rosario Micanquer Carlosama ¹, Juan Fernando Muñoz Paredes ²

Fecha de Recepción: 6 de junio de 2025

Fecha de Aceptación: 30 de noviembre de 2025

Cómo citar: A. R. Micanquer-Carlosama and J. F. Muñoz-Paredes (2025). Aprovechamiento de suero lácteo para el desarrollo de un producto funcional mediante tecnología de spray drying. *Tecnura*, 29(86), 17–35. <https://doi.org/10.14483/22487638.23696>

Abstract

Objective: To develop a powdered product based on sweet whey, blackberry pulp (*Rubus glaucus*), maltodextrin and inulin, using spray drying technology.

Methodology: the raw material was characterized physicochemically. The formulation of a suspension was optimized using a Box-Behnken type response surface experimental design. The independent variables were: blackberry pulp (0,30 – 0,50), sweet whey (0,30 – 0,50), maltodextrin (0,10 – 0,20), all in units of mass fraction; inulin was a fixed variable at 6 %. The dependent variables were; pH, soluble solids (°Brix) and viscosity (cP). The optimum suspension was dried by spray drying, the inlet air temperature factor was evaluated (130°C, 140°C and 150°C) with a unifactorial design and the dependent variables were: humidity (%), water activity (a_w), solubility (%), wettability (g/min), antioxidant capacity (ug/g) and color ($L^*a^*b^*$). Sensory analysis (taste, odor, color and general acceptance) was performed with the best treatment.

Results: the optimal formulation of the suspension was blackberry pulp (0,419); whey (0,319); maltodextrin (0,202) and (0,060) inulin. The viscosity was 1.631 cP, pH 3,64 and 31,40 °Brix. The best treatment in the drying process was obtained at 130 °C, with $a_w = 0,247 \pm 0,037$, solubility = $60,44 \pm 0,53$ %, wettability = $0,082 \pm 0,006$ (g/min) and antioxidant capacity of $8,39 \pm 0,07$ mg gallic acid/g. In the sensory analysis, a general acceptance of $4,4 \pm 0,6$ on a scale of 1 to 5 was obtained.

Conclusions: the optimal formulation of the suspension allowed obtaining a powdered product with potential functional benefits for the consumer.

Keywords: Functional, Spray drying, Whey, Suspension

¹ Ingeniera Agroindustrial Universidad Nacional de Colombia, Doctorado en Biotecnología Universidad Nacional de Colombia Medellín. Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería de Procesos, Universidad Mariana.  Email: adromicanquer123@umariana.edu.co

² Ingeniero Químico Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería de Procesos, Universidad Mariana.  Email: jfmunoz@umariana.edu.co

Resumen

Objetivo: desarrollar un producto en polvo a base de suero lácteo dulce, pulpa de mora (*Rubus glaucus*), maltodextrina e inulina, mediante tecnología spray drying.

Métodología: se caracterizó fisicoquímicamente la materia prima. Se optimizó la formulación de una suspensión, mediante un diseño experimental de superficie respuesta tipo Box-Behnken. Las variables independientes fueron; pulpa de mora (0,30 – 0,50), suero lácteo dulce (0,30 – 0,50), maltodextrina (0,10 – 0,20), todas en unidades de fracción másica, la inulina fue una variable fija al 6 %. Las variables dependientes fueron; pH, sólidos solubles (°Brix) y viscosidad (cP). La suspensión óptima se secó mediante *spray drying* y se evaluó el factor temperatura del aire de entrada (130 °C, 140 °C y 150 °C) con un diseño unifactorial y las variables dependientes fueron: Humedad (%), actividad de agua (a_w), solubilidad (%), humectabilidad (g/min), capacidad antioxidante (ug/g) y color ($L^*a^*b^*$). Con el mejor tratamiento se realizó análisis sensorial (sabor, olor, color y aceptación general).

Resultados: la formulación óptima de la suspensión resultó con pulpa de mora (0,419); suero lácteo (0,319); maltodextrina (0,202) y (0,060) inulina. La viscosidad fue de 1.631 cP, pH 3,64 y 31,40 °Brix. El mejor tratamiento en el proceso de secado se obtuvo a 130 °C, con $a_w = 0,247 \pm 0,037$, solubilidad = $60,44 \pm 0,53$ %, humectabilidad = $0,082 \pm 0,006$ (g/min) y capacidad antioxidante de $8,39 \pm 0,07$ mg ácido gálico/g. En el análisis sensorial se obtuvo una aceptación general de $4,4 \pm 0,6$ en escala de 1 a 5.

Conclusiones: la formulación óptima de la suspensión permitió obtener un producto en polvo con potencial aporte funcional para el consumidor.

Palabras clave: Funcional, Spray drying, Suero lácteo, Suspensión.

Introducción

En la industria del procesamiento de productos lácteos, el suero de la leche es un residuo de la elaboración de queso que incluye proteína, lactosa y otros elementos solubles en agua. Se estima que la producción anual de suero a nivel mundial oscila entre 180 a 190 millones de toneladas, con un incremento del 1 % al 2 %, de tal forma que para el año 2030, se espera una generación de alrededor de 203 a 241 millones de toneladas [1]. En décadas recientes, uno de sus usos ha sido la reincorporación en la misma línea de producción; sin embargo, la gran cantidad de suero producido ha generado problemas ambientales, debido a su alto contenido orgánico y a su alta demanda bioquímica de oxígeno [2]. De acuerdo con lo anterior, su uso para la elaboración de un alimento funcional aporta valor a la cadena productiva, ya que en la actualidad el suero es considerado como una fuente de ingredientes valiosos con beneficios multifuncionales [3], además de contribuir con la mitigación de los efectos ambientales.

La Mora de Castilla es un cultivo herbáceo anual, originario de las regiones tropicales montañosas de América, incluyendo países como Colombia, Ecuador, México, Panamá, Guatemala, Honduras y El Salvador. Esta fruta, forma parte de la familia *Rosaceae*, y es apetecida por su sabor, adaptabilidad y características nutritivas [4]. Investigaciones han evidenciado que la mora es rica en antioxidantes, como

antocianinas y flavonoides, los cuales pueden tener efectos protectores sobre la salud cardiovascular y contribuir con la prevención de enfermedades crónicas [5].

Por otra parte, los alimentos funcionales son aquellos que ofrecen beneficios adicionales para la salud, incluso más allá del valor nutricional básico, ya que contienen compuestos bioactivos que mejoran la salud y reducen el riesgo de desarrollar enfermedades crónicas [6]. Hoy en día, esta nueva oferta de alimentos evoluciona muy rápido debido a las preferencias de los consumidores y a los cambios constantes en la normatividad de los países. Las tendencias actuales, muestran la relevancia en el aumento de la preferencia en el consumo de cereales integrales, frutas, verduras, además de productos con mayor contenido de proteína, igualmente, existe un creciente interés en productos con menor contenido de sal, grasa y azúcar [7].

En cuanto a la clasificación de estos alimentos funcionales, se pueden mencionar dos grandes grupos: los alimentos funcionales que se producen de forma natural, incluidos los alimentos mínimamente procesados que cuentan en sí mismos con propiedades beneficiosas para la salud; y, por otra parte, los alimentos funcionales modificados, es decir, aquellos en los cuales se ha introducido una alteración en su composición, con el fin de aumentar el contenido de componentes bioactivos o nutrientes específicos [8].

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de un prebiótico se encuentra dentro de la clasificación de alimentos funcionales modificados, con aportes fundamentales para mejorar la salud gastrointestinal de las personas [9]. Igualmente, la reutilización de lactosuero contribuye con la economía circular, con la conservación del ambiente, y contribuye a enfrentar los retos de seguridad alimentaria en las regiones de mayor producción de leche [10]. Tanto el suero lácteo como la pulpa de mora proporcionan elementos de gran valor nutricional. Por ejemplo, el suero de leche se compone del 5 % de lactosa, el 93 % de agua, el 0,85 % de proteína, el 0,53 % de minerales y el 0,36 % de grasa [11]. Por otro lado, la pulpa de mora proporciona nutrientes, antioxidantes, y posee características antiinflamatorias y quimiopreventivas, gracias a su composición rica en polifenoles [12].

Finalmente, el aprovechamiento de suero lácteo y pulpa de mora representa una alternativa viable para la elaboración de un producto funcional con propiedades prebióticas que contribuye a la valorización de subproductos agroindustriales, a la conservación de los recursos naturales, a la innovación tecnológica y a la investigación. Por todo lo anterior, esta investigación planteó, en primer lugar, la caracterización del suero lácteo y de la pulpa de mora con el fin de conocer las propiedades fisicoquímicas y el aporte en actividad antioxidante de estas materias primas; luego, la obtención de un producto en polvo mediante *spray drying*, una de las tecnologías viables económicamente para este tipo de productos y finalmente la caracterización química y sensorial del producto final.

Metodología

Materiales

Para la medición de las propiedades fisicoquímicas se utilizó *Buffer* estándar con pH 4 y 7 para la calibración del pH-metro, hidróxido de sodio (NaOH) al 0,1N para la titulación de acidez, fenolftaleína como indicador de pH, ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado para la digestión en la determinación de proteínas, ácido bórico al 4 % para la valoración del nitrógeno total, etanol al 96 %, DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) para antioxidantes y agua destilada.

Caracterización fisicoquímica del suero lácteo dulce y la pulpa de mora

La mora se obtuvo del mercado “potrerillo” en la ciudad de Pasto – Nariño (Colombia) y el suero lácteo dulce de una planta de procesamiento de lácteos ubicada en la misma ciudad. Las propiedades fisicoquímicas que se midieron en el suero fueron pH, acidez (%), sólidos totales (%), sólidos solubles (°Brix), proteínas (); y en la pulpa de mora (*Rubus glaucus*) se midieron pH, acidez (%), humedad (%), sólidos solubles (°Brix), capacidad antioxidante (ug/ml) y contenido de polifenoles (ug ácido gálico/g). El pH se midió según Norma Técnica Colombiana (NTC 3651:2012) [13], acidez se midió según NTC 4978. Sólidos solubles totales según NTC 4624. Sólidos totales según NTC-5283. Contenido de proteína y N₂ se llevó a cabo mediante digestión por el método Kjeldahl NTC 5025. Humedad se determinó según la AOAC (925.09) [13], Antioxidantes por método DPPH y polifenoles se determinaron según la metodología establecida en AOAC (925.09) [13]. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

Diseño experimental en la formulación de la suspensión y en el proceso de secado

Mediante un diseño de optimización de superficie de respuesta – Box-Behnken (ajuste de modelo de segundo orden) se optimizó la elaboración de la suspensión prebiótica. El diseño experimental se trabajó con valores de fracción másica con el condicional que el total de los componentes sumarán 1. Uno de los componentes (inulina) de la suspensión se trabajó como variable fija, con una participación fija del 0,060 (valor tomado con base a estudios previos). Los factores evaluados fueron: Factor 1, fracción de pulpa de mora (0,30 – 0,50). Factor 2, fracción de suero lácteo (0,30 – 0,50). Factor 3, fracción de maltodextrina (0,10 – 0,20), obteniendo un total de 15 tratamientos. Las variables dependientes evaluadas fueron pH, sólidos solubles (°Brix) y viscosidad (cP). Todas las mediciones se midieron por triplicado.

En el proceso de secado ([figura 1](#)) se evaluó el efecto de la temperatura del aire de entrada en el equipo de secado *spray drying* con tres niveles 130 °C, 140 °C y 150 °C, sobre las propiedades fisicoquímicas del producto en polvo mediante un diseño unifactorial con un total de seis tratamientos. El proceso de secado se llevó a cabo en condiciones controladas, garantizando la reproducibilidad de los

tratamientos. Se determinaron las variables, capacidad antioxidante (ug/g), actividad de agua (a_w), solubilidad (%), humectabilidad (g/min) y color en unidades Ciel^{*}a^{*}b^{*}. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

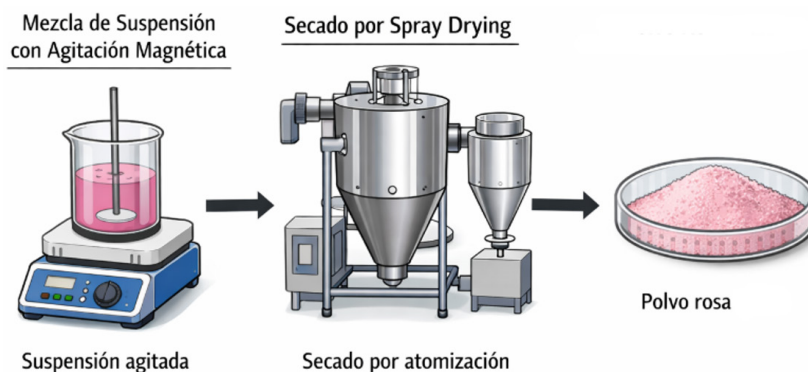


Figura 1: Representación del proceso de secado por spray drying en la obtención de un producto en polvo.

Nota: elaboración propia.

Caracterización fisicoquímica de la suspensión

El pH se midió mediante metodología establecida en [13]. Los sólidos solubles totales según NTC 4624. La viscosidad se midió con un viscosímetro de husillo N°3 a 30 rpm, como se describe en la metodología descrita por [14]. Los resultados se reportaron en cP.

Caracterización fisicoquímica del polvo obtenido del proceso de secado

Se determinó la actividad antioxidante mediante método DPPH [15], actividad de agua se midió en un higrómetro de punto de rocío a 20°C (AquaLab 3TE, USA), Solubilidad y humectabilidad se determinaron según la metodología de [16], con modificaciones. Para la solubilidad se trabajó con una dilución de 10 mL de agua destilada/0,1 g de polvo. Se centrifugó a 3100 rpm por 10 min. Se tomó una alícuota de 2,5 mL del sobrenadante y se secó en estufa convectiva a 105 °C por 1 h.

Para la humectabilidad se pesó 1 g de polvo y se adicionó en 500 ml de agua, el tiempo que tarda en sumergirse totalmente el polvo se registró en unidades de g/min. Y color se midió utilizando un colorímetro (LUTRON RGB-1002). Los resultados se reportaron en coordenadas CIELAB (L^* , a^* , b^*). Donde el valor " L^* " se utiliza para denotar luminosidad (+) y oscuridad (-); valores de " a^* " rojo (+) y verde (-); valores de " b^* " amarillo (+) y azulado (-) [17].

Análisis sensorial

Se realizó un análisis sensorial para la determinación del grado de aceptación del producto en polvo obtenido (mejor tratamiento en el proceso de secado), en la cual se evaluaron los atributos: color, sabor,

olor, textura y aceptación general con un panel de 30 catadores no entrenados [15]. Estos se seleccionaron de una población de personas mayores de 18 años (género masculino y femenino) de un municipio del departamento de Nariño (Colombia). La muestra de la población se seleccionó con base en un segmento de población de uno de los municipios de alta producción de derivados lácteos en los cuales la necesidad del aprovechamiento del suero lácteo es evidente. Las muestras para cada panelista fueron de 1 g, entregado en recipiente plástico color blanco desechables y como borrador se utilizó agua. El lugar fue un ambiente con iluminación luz día.

Se aplicó escala hedónica de 5 puntos como se muestra en la [Tabla 1](#), mediante análisis de varianza se identificó las diferencias entre las características sensoriales evaluadas por los panelistas y el grado de aceptación del producto [18].

Análisis estadístico

El análisis ANOVA del diseño experimental de optimización en la formulación de la suspensión se realizó utilizando el software *Statgraphics* versión XVII.II con un nivel de confianza del 95 %.

Los resultados del diseño unifactorial del proceso de secado y del análisis sensorial se compararon mediante un análisis de varianza unidireccional (Minitab. 0.19) con agrupaciones de datos mediante prueba de Tukey, considerando significativa las diferencias para $p < 0,05$. Todos los resultados se reportaron como medias \pm desviación estándar de mediciones por triplicado de cada tratamiento.

Tabla 1. Escala hedónica de puntuación en el análisis sensorial del producto final en polvo

Valoración numérica	Representación hedónica
1	Me disgusta mucho
2	Me disgusta moderadamente
3	Ni me gusta, ni me disgusta
4	Me gusta moderadamente
5	Me gusta mucho

Fuente: Autores.

Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica del suero lácteo y pulpa de mora

Los resultados obtenidos de las mediciones de las propiedades fisicoquímicas en la pulpa de mora y en el suero lácteo dulce se muestran en la [Tabla 2](#). Los valores reportados fueron el resultado de las mediciones realizadas por triplicado.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de pulpa de mora y del suero lácteo dulce

Propiedad	Unidad	Resultados pulpa de mora (media \pm SD)	Resultados suero lácteo dulce (media \pm SD)
pH	-	2,74 \pm 0,04	6,40 \pm 0,03
Acidez	%	2,72 \pm 0,04	0,35 \pm 0,04
Humedad	%	90,92 \pm 0,86	-
Antioxidantes	ug/ml	5,49 \pm 0,65	-
Polifenoles	ug ácido gálico/g	4,66 \pm 0,23	-
Sólidos Solubles	°Brix	8,18 \pm 0,23	7,22 \pm 0,04
Sólidos Totales	%	-	7,90 \pm 0,20
Proteína	%	-	1,52 \pm 0,35

Fuente: elaboración propia

La mora presentó valores de pH mayormente ácidos, siendo una característica propia de las bayas y frutos rojos. Valores similares han sido reportados por [19] en una suspensión coloidal de pulpa de mora ($3,07 \pm 0,01$); acorde al valor de pH, se obtuvo alta acidez, tal como lo reportó [20] en su estudio de caracterización de zarzamora secada en lecho fluidizado ($2,1 \pm 0,04$). Mientras que, el suero lácteo presentó un valor de pH cercano al neutro, propiedad ajustada al tipo de suero dulce, lo cual facilita su uso en formulaciones en combinación con frutos ácidos [21]. Resultados iguales han sido reportados en suero dulce (6,40) según los autores [22]. Se obtuvo valor de acidez moderada, esto debido a que se trabajó con suero fresco esterilizado, evitando de esta manera una fermentación acelerada [23]. Con estos resultados se puede inferir que tanto la acidez como el pH dependen del estado fresco en el que se encuentre el suero, dado que durante el transporte puede iniciar procesos fermentativos [24].

Los resultados en sólidos totales y sólidos solubles fueron similares en el suero lácteo dulce, siendo coherente dado que, en el suero se encuentra gran cantidad de sólidos correspondientes a proteínas solubles, lactosa, minerales y calcio [11]. Esto desde luego, es positivo para el aprovechamiento del suero en productos en polvo principalmente en el factor de rendimiento en el proceso de secado. Por otra parte, se obtuvo un alto valor en proteína respecto al reportado en el estudio de [25], quienes informaron valores menores (0,46 %), en suero utilizado para bebidas funcionales. El contenido de proteína es importante ya que es un componente que aporta al perfil nutricional del producto final en el que se busca incorporar el suero.

En la mora también es característico un alto contenido de humedad, así como lo reporta [20] con un valor de 85,5 %, el cual es cercano al obtenido en esta investigación. Otra propiedad relevante fue el contenido de compuestos bioactivos. En este contexto, el método DPPH se ha utilizado ampliamente, dado

a que es un radical libre estable para evaluar la capacidad antioxidante [26]. En un estudio realizado por [27] encontraron valores mayores en capacidad antioxidante en extracto de mora con diferentes solventes (0,25 a 4 mg/mL). Por otra parte, el contenido de polifenoles ha sido determinado en mora de castilla provenientes de la sierra ecuatoriana con un valor de 2,66 mg ácido gálico/g [26]. Estos resultados en compuestos bioactivos proporcionan indicios del potencial nutricional que aporta la mora. Las variaciones en los resultados obtenidos con respecto a los reportados por otros autores se pueden atribuir a factores como la variedad, factores ambientales, la calidad y el estado de madurez la fruta [12].

Formulación de la suspensión a base de suero lácteo, pulpa de mora, maltodextrina e inulina

En la [Tabla 3](#) se presentan los valores medios \pm desviación estándar de las variables dependientes: viscosidad, pH y °Brix en función de las variables independientes: fracciones másicas de pulpa de mora, suero lácteo, maltodextrina e inulina. Y la [Tabla 4](#) muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) de las variables dependientes e independientes bajo análisis de efectos principales.

Tabla 3. Diseño experimental para la elaboración de una suspensión y valores de las variables independientes (fracciones másicas de pulpa de mora, suero lácteo, maltodextrina e inulina) y dependientes (viscosidad, pH y °Brix)

Corridas	Variables Independientes (fracción másica)				Variables Dependientes		
	Pulpa mora	Suero lácteo	Maltodextrina	Inulina	Viscosidad (cP)	pH	°Brix
1	0,297	0,495	0,148	0,060	816 \pm 62,43	3,91 \pm 0,09	25,42 \pm 0,12
2	0,410	0,410	0,120	0,060	1080 \pm 34,64	3,69 \pm 0,02	22,71 \pm 0,82
3	0,353	0,468	0,119	0,060	1013 \pm 47,34	3,72 \pm 0,05	22,53 \pm 0,60
4	0,314	0,417	0,209	0,060	996 \pm 6,36	3,73 \pm 0,08	29,81 \pm 0,51
5	0,418	0,314	0,208	0,060	1737 \pm 81,45	3,70 \pm 0,06	31,41 \pm 0,25
6	0,375	0,375	0,190	0,060	1313 \pm 14,14	3,63 \pm 0,01	30,22 \pm 0,25
7	0,468	0,354	0,118	0,060	1473 \pm 14,15	3,67 \pm 0,10	23,52 \pm 0,31
8	0,396	0,396	0,148	0,060	1064 \pm 91,25	3,68 \pm 0,02	25,53 \pm 0,15
9	0,431	0,336	0,173	0,060	1657 \pm 49,50	3,62 \pm 0,01	27,42 \pm 0,12
10	0,396	0,396	0,148	0,060	1193 \pm 84,85	3,71 \pm 0,04	26,14 \pm 0,05
11	0,396	0,396	0,148	0,060	1110 \pm 81,85	3,65 \pm 0,01	26,42 \pm 0,15
12	0,472	0,376	0,092	0,060	1290 \pm 14,14	3,65 \pm 0,03	21,53 \pm 0,15
13	0,336	0,431	0,173	0,060	1037 \pm 84,85	3,73 \pm 0,06	26,52 \pm 0,10

14	0,376	0,472	0,092	0,060	699 ± 13,44	3,66±0,02	20,12± 0,79
15	0,495	0,297	0,148	0,060	1703 ± 85,05	3,55± 0,01	25,74± 0,51

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resultados de análisis ANOVA y la significancia de las variables independientes en función de las variables dependientes

VARIABLES Dependientes	VARIABLES Independientes, efectos principales	P-value (0,05)
Viscosidad	Pulpa de mora	0,0017*
	Suero	0,0002*
	Maltodextrina	0,0146*
°Brix	Pulpa de mora	0,0029*
	Suero	0,0004*
	Maltodextrina	0,0001*
pH	Pulpa de mora	0,0631
	Suero	0,0808
	Maltodextrina	0,7079

Fuente: elaboración propia.

*Significativo para $p < 0,05$

La viscosidad varió entre $699 \pm 13,44$ cP y $1737 \pm 81,45$ cP (Tabla 3). Esta propiedad aumentó cuando mayor fue la proporción de pulpa de mora y maltodextrina. Este comportamiento es consistente con estudios realizados por [28], donde la adición de pectina y carboximetilcelulosa (CMC) incrementó la viscosidad en bebidas a base de permeado de suero hidrolizado enriquecido con pulpa de agraz y uchuva. La propiedad fundamental en la optimización de la formulación de la suspensión fue la viscosidad, ya que es un parámetro crítico que determina la textura, aceptabilidad sensorial y estabilidad de la suspensión.

En productos de alta viscosidad se debe evitar la sedimentación de sólidos para generar una sensación agradable al paladar [28]. Valores altos de viscosidad puede atribuirse a la capacidad de la inulina y la maltodextrina para formar estructuras tridimensionales que retienen agua y aumentan la consistencia de la suspensión. Además, el comportamiento de mayor viscosidad se presentó cuando la formulación incluyó mayor proporción de pulpa de mora, componente que aportó pectinas y fibra soluble que actúan como agentes espesantes naturales [29].

El pH, se mantuvo en un rango ácido (3,58 – 3,69), valores que están directamente relacionados por la presencia de pulpa de mora, debido a su contenido natural de ácidos orgánicos. Valores bajos de pH permiten inducir a la estabilidad microbiológica de la suspensión y contribuir a su perfil organoléptico, reforzando el sabor característico ácido del fruto, siendo compatible con la acidez del suero. Estudios

como el de [30] han demostrado que el pH influye significativamente en la recuperación y purificación de glicomacro-péptidos en soluciones de proteínas de suero, lo que indica que es una propiedad importante para tener en cuenta según el aprovechamiento que se le dé a este subproducto.

Por otra parte, los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) fluctuaron entre 11,60 y 15,60, aumentando con la incorporación de maltodextrina y pulpa de mora. Este parámetro es relevante dado que incide en la percepción de dulzor, textura y vida útil del producto final, niveles regulados de $^{\circ}$ Brix ayudan a asegurar una suspensión con características funcionales y sensoriales balanceadas; además, la maltodextrina facilita la fluidez de la suspensión en las paredes del atomizador durante el secado, esto debido a su alto temperatura de transición vítrea [31].

Los resultados del análisis ANOVA con un nivel de confianza del 95 % (Tabla 4) obtenidos en la optimización de la formulación de una suspensión en la que se evaluaron las variables independientes pulpa de mora, suero lácteo dulce y maltodextrina mostraron diferencias significativas en los efectos principales sobre las variables dependientes viscosidad y $^{\circ}$ Brix. Mientras que no presentó diferencias significativas sobre la variable dependiente pH. Esto evidencia que la variación de los rangos evaluados de cada uno de los componentes presentó efecto sobre la fluidez y sólidos totales de la suspensión.

En la Figura 2 se presenta la interacción de las variables concentración de suero y concentración de pulpa de mora respecto al ajuste del valor de deseabilidad (82 %) del diseño experimental de la formulación de la suspensión. En la Tabla 5 se presentan los criterios establecidos en la optimización experimental para la formulación de la suspensión; así como, los valores teóricos predichos por el modelo de 2^o orden, los valores experimentales obtenidos a partir de tres réplicas a la condición óptima y el error medio experimental (EMR).

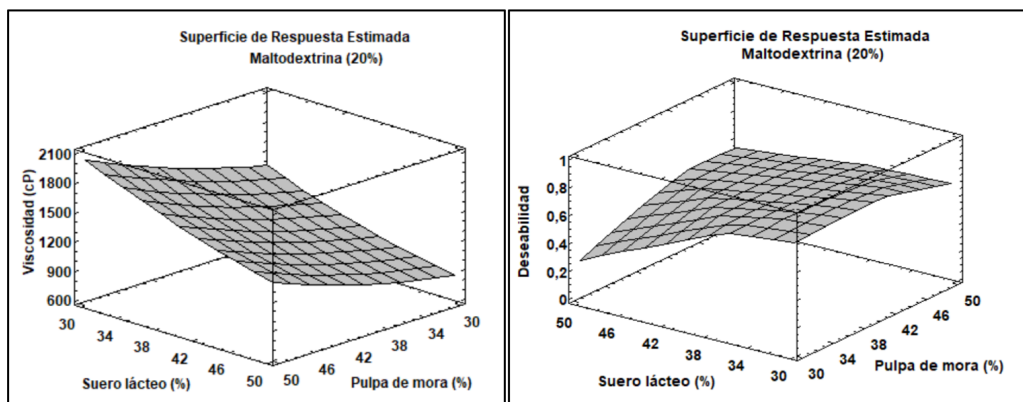


Figura 2. Superficie de respuesta para optimización por múltiples respuestas. A la izquierda variable dependiente viscosidad en función de las variables independientes; pulpa de mora y suero lácteo. A la derecha ajuste del modelo en función de las variables independientes del diseño experimental.

Fuente: elaboración propia.

El resultado de la optimización por múltiples respuestas y una deseabilidad del 82 % indicó que la formulación óptima de la suspensión debe contener en fracción másica 0,419 de pulpa de mora, 0,319 % de suero lácteo y 0,202 de maltodextrina y 0,060 de inulina. Se identificó que en la formulación óptima de la suspensión, la variable independiente suero lácteo tomó el menor nivel en el rango evaluada y la maltodextrina el nivel superior; mientras que la pulpa de fruta tomó un valor medio. Se observó que la propiedad de mayor relevancia fue la viscosidad, identificando que mayor participación de pulpa de mora y menor participación de suero es posible tener valores mayores de viscosidad (Fig. 1). Sin embargo, el factor reológico de la suspensión se determina según la tecnología y las características del equipo de secado [32].

Tabla 5. Comparación de los resultados óptimos de las variables dependientes

Variables Dependientes	Criterio	Óptimo teórico	Óptimo experimental	EMR (%)
Viscosidad (cP)	Maximizar	1630,95	1699 ± 35,55	4,17
pH	Media	3,64	3,54 ± 0,03	2,70
°Brix	Maximizar	31,40	30,65 ± 0,42	2,39

Fuente: Autores

En los resultados obtenidos en la validación de los valores teóricos se identificaron bajos valores de error medio relativo (EMR) (< 5 %), lo que confirma un buen ajuste del modelo de segundo grado y su correlación entre las variables independientes en función de las variables dependientes y a su vez los criterios establecidos para la optimización por múltiples respuestas.

La viscosidad medida experimentalmente en la suspensión óptima presentó una diferencia de 69 cP, con un bajo margen de error (Tabla 5) respecto al valor teórico. En el estudio de [16], quienes estudiaron la microencapsulación de probióticos a través de secado por aspersion, y utilizaron inulina y fructo-oligosacáridos como materiales de pared reportaron que el uso de materiales encapsulantes influye en la viscosidad de las suspensiones y favorecen la eficiencia del proceso de secado. Esto sugiere que la viscosidad establecida en la suspensión óptima es adecuada para asegurar una correcta atomización y formación de partículas durante el proceso de secado.

Caracterización fisicoquímica del producto obtenido del proceso de secado por *spray drying*

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del polvo obtenido del diseño unifactorial en el proceso de secado se presentan en la Tabla 6. Aquí la variable independiente fue la temperatura de entrada con 3 niveles 130 °C, 140 °C y 150 °C, en función de las variables dependientes; actividad antioxidante (ug/l), actividad de agua (a_w), solubilidad (%), humectabilidad (g/min) y color ($L^* a^*$, b^*).

Tabla 6. Determinación de antioxidantes, actividad de agua, solubilidad, humectabilidad, y color (L*a*b) del polvo prebiótico

Variable Ind. (°C)	Variables dependientes						
	Antioxidantes (ug/g)	Actividad de agua (a _w)	Solubilidad (%)	Humectabilidad (g/min)	Color (L*a*b)		
					L	a	b
130 (1)	8,92 ± 0,22 ^A	0,36 ± 0,01 ^A	61,91 ± 2,86 ^A	0,08 ± 0,01 ^A	94,06 ± 1,62 ^A	3,03 ± 1,82 ^A	-6,91 ± 1,87 ^A
130 (2)	8,82 ± 0,28 ^A	0,38 ± 0,02 ^A	62,65 ± 4,27 ^A	0,07 ± 0,01 ^A	90,36 ± 2,01 ^A	14,59 ± 2,31 ^A	-8,76 ± 2,82 ^A
140 (1)	7,86 ± 0,28 ^B	0,32 ± 0,01 ^A	49,73 ± 4,71 ^B	0,05 ± 0,01 ^A	89,39 ± 0,84 ^A	17,19 ± 1,59 ^A	-12,40 ± 0,99 ^B
140 (2)	8,04 ± 0,22 ^B	0,33 ± 0,01 ^B	49,65 ± 2,32 ^B	0,05 ± 0,01 ^A	88,61 ± 1,11 ^A	18,25 ± 1,81 ^A	-13,23 ± 1,26 ^B
150 (1)	6,69 ± 0,25 ^C	0,29 ± 0,01 ^B	35,80 ± 3,35 ^C	0,04 ± 0,01 ^A	93,91 ± 2,37 ^A	14,86 ± 2,03 ^A	-9,43 ± 1,54 ^A
150 (2)	6,94 ± 0,20 ^C	0,24 ± 0,04 ^B	41,73 ± 2,85 ^C	0,03 ± 0,01 ^A	93,42 ± 1,04 ^A	10,38 ± 1,72 ^A	-7,63 ± 1,24 ^B

Fuente: Autores

*(1): primera muestra, (2): réplica. Las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes

En cuanto a la capacidad antioxidante del polvo prebiótico, se observó una reducción progresiva cuando aumentó la temperatura de secado, pasando de 8,92 a 6,69 (ug/g) para las temperaturas de 130 °C y 150 °C respectivamente. Este comportamiento está directamente relacionado con la termodegradación de compuestos fenólicos y flavonoides, los cuales son los principales compuestos que aportan a la capacidad antioxidante. La exposición a temperaturas elevadas conduce al deterioro de los grupos funcionales activos, tales como los radicales hidroxilos fenólicos. En consecuencia, si se desea conservar las propiedades funcionales del producto, se sugiere no exceder temperaturas de 170 °C durante el proceso de secado [20]. En un estudio de los autores [33], quienes determinaron la capacidad antioxidante de mora encapsulada mediante spray-dry usando maltodextrina obtuvieron valores de 91,67 ± 1,53 ug/g.

La actividad de agua (a_w) presentó una disminución significativa respecto al incremento de la temperatura de secado, pasando de 0,38 a 0,24. Este comportamiento se atribuye a la mayor eficiencia en la transferencia de masa durante el proceso de secado por aspersión, ya que temperaturas más elevadas promueven una evaporación acelerada del agua libre contenida en la suspensión. Valores bajos de a_w es altamente favorable, ya que valores menores a 0,3 limitan el crecimiento de microorganismos y reducen reacciones de deterioro, como la oxidación de lípidos y el pardeamiento no enzimático, contribuyendo así a la estabilidad microbiológica y química del producto final [17].

En una investigación donde secaron suspensiones a base de camu-camu y uso de diferentes compuestos encapsulantes; así, con maltodextrina reportaron valores mucho menores de actividad de agua (0,06), y similares en polvos con inulina (0,15) y fructooligosacáridos (0,16) [34]. Esto confirma la efectividad de la maltodextrina como agente encapsulante para mejorar la estabilidad del polvo. Lo que permite mirar que la combinación de maltodextrina e inulina demostró ser funcional para obtener un polvo de baja cantidad de agua microestructural disponible, siendo una propiedad importante para un adecuado almacenamiento y uso posterior en alimentos en polvo.

Respecto a la solubilidad, se evidenció una disminución a temperaturas más altas. A 150 °C se obtuvo menor solubilidad (Tabla 6); mientras que, a 130 °C la solubilidad mejoró, con un valor de $62,28 \pm 3,57$. Este comportamiento se asocia con la desnaturalización térmica de proteínas y la degradación de azúcares, factores que pueden inducir una fusión superficial de las partículas, dificultando su dispersión en medios acuosos. La solubilidad es una propiedad crítica en polvos funcionales, especialmente para productos instantáneos [17]. Por otra parte, [31] se evaluó la mezcla de inulina y maltodextrina en la obtención de polvos probióticos secados por *spray dry* a una temperatura de 140 °C, el autor obtuvo valores de solubilidad de 87,40 y 80,58 % usando maltodextrina e inulina respectivamente. Con estos resultados se infiere que la maltodextrina permite una mayor solubilidad en los polvos obtenidos mediante *spray dry* en comparación a la inulina.

La propiedad de humectabilidad no presentó diferencia significativa entre los tratamientos evaluados: el polvo presentó baja humectabilidad en agua con valores en un rango entre 0,0828 y 0,0411 g/min. Esta diferencia sugiere que el factor temperatura no tiene efecto sobre esta propiedad funcional. Valores bajos indican fácil aglomeración del polvo reduciendo la interacción con el agua, lo cual dificulta vencer la tensión superficial y por ende afectar una mejor reconstitución [32].

Tabla 7. Resultados de análisis ANOVA y la significancia de las variables independientes en función de las variables dependientes

Variables dependientes	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Antioxidantes	2	4,238	2,119	121,210	0,001*
Humectabilidad	2	0,009	0,005	4,040	0,141
Solubilidad	2	553,880	276,940	46,520	0,006*
Actividad de agua	2	0,011	0,005	11,100	0,041*
Color L*	2	22,789	11,394	4,700	0,119
Color a*	2	79,940	39,970	1,550	0,345
Color b*	2	29,096	14,548	11,870	0,038*

Fuente: elaboración propia.

*Significativo para $p < 0,05$

Finalmente, los parámetros de color también se vieron afectados por la variación térmica durante el proceso de secado. Se identificaron cambios significativos en las coordenadas cromáticas, principalmente en los valores de b^* , lo que indica variaciones en la tonalidad azul (-b). Este fenómeno se atribuye a la degradación térmica de las antocianinas, compuestos pigmentarios altamente sensibles al calor, lo que influyó en la aparición de todos azulados. En el estudio realizado por [35], en pulpa de *Rubus glaucus benth.*, obtuvieron valores de $L^*=71,16$, $a^*=29,30$ y $b^*=-0,51$; la cual fue encapsulada mediante *spray drying* a temperaturas similares a las de esta investigación (120 °C).

La pérdida de compuestos bioactivos no solo reduce la parte visual del producto en polvo, sino que también compromete la funcionalidad antioxidante. [8] mencionaron que el aumento de la temperatura provoca una reducción progresiva del contenido de antocianinas en matrices vegetales, afectando tanto el color como la actividad biológica del producto. En este contexto, la elección de 130 °C como temperatura óptima en el presente estudio se alineó con una mejor preservación de compuestos bioactivos y funcionales del polvo. Este parámetro es fundamental, especialmente si el polvo está destinado a su uso en alimentos instantáneos o bebidas funcionales, donde la capacidad de disolución rápida influye directamente en la aceptación sensorial y funcionalidad del producto.

Análisis sensorial

En la [Tabla 8](#) se muestran los resultados de los valores promedios agrupados en dos grupos de los panelistas no entrenados en la categoría de jóvenes y adultos sobre los atributos sensoriales evaluados en el polvo obtenido. En la [Figura 3](#), se indica la distribución de los resultados en valores promedios de los atributos (olor, color, sabor, textura y aceptación general) utilizando una escala hedónica en escala de 1 a 5.

Tabla 8. Resultados de valores medios agrupados por población jóvenes y adultos en atributos sensoriales evaluados en el producto en polvo

Atributo	Jóvenes ≤30 años (n=18)	Adultos >30 años (n=12)
Olor	3,91 ± 0,53	4,42 ± 0,77
Color	4,31 ± 0,62	4,50 ± 0,52
Sabor	3,93 ± 0,73	3,67 ± 0,63
Textura	4,75 ± 0,65	4,58 ± 0,58
Aceptación general	4,18 ± 0,74	4,17 ± 0,66

Fuente: elaboración propia.

El producto final en polvo presentó una aceptación favorable en ambos grupos de edad. Aunque los adultos destacaron más el olor (4,42 ± 0,77) y color (4,50 ± 0,52), el grupo en la categoría de jóvenes valoraron mejor la textura (4,75 ± 0,65). Esto sugiere que el producto tiene una buena versatilidad sensorial en los dos grupos poblacionales.

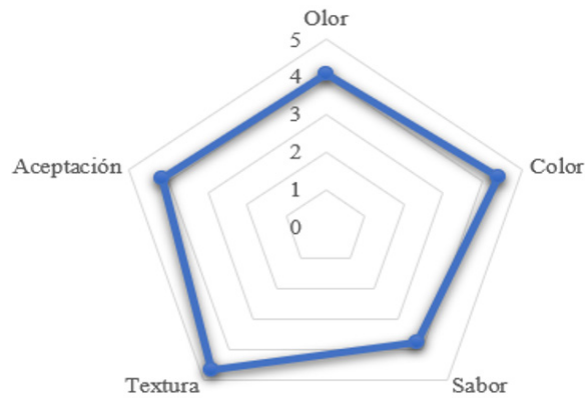


Figura 3. Resultados del panel sensorial en valores promedio, de los atributos (color, olor, sabor, textura y aceptación general del producto).

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos mostraron una tendencia positiva en la aceptación del producto. El análisis de las puntuaciones promedio de los 30 panelistas no entrenados revelaron que la textura fue el atributo mejor valorado, con un promedio de 4,67, seguida del color con 4,40. La valoración global alcanzó un promedio de 4,17, lo que indica una aceptación satisfactoria en una población identificada como potencial consumidora, dado que son personas de las regiones donde se tiene la producción del suero lácteo, lo cual representa un factor importante para la economía del departamento de Nariño, dado que se valorizaría un residuo de bajo aprovechamiento.

Esos resultados sugieren que los procesos de formulación de la suspensión y secado permitieron lograr una textura fina y agradable en el polvo obtenido, así como una apariencia visual atractiva. Aunque el sabor fue el atributo con menor puntuación, sigue estando dentro de un rango aceptable, lo que cual se puede atribuir a las características organolépticas del ácido láctico presente en el suero lácteo [14].

Al comparar estos resultados con el estudio de [36], quienes evaluaron una bebida probiótica a base de suero lácteo y pulpa de mango, se observó una tendencia similar en cuanto a la aceptación sensorial de esta investigación. Los autores reportaron valor promedio de 8,75 en una escala de 1 a 10, reflejando también una alta aceptación del producto. Incluso, el atributo de textura fue el de mejor puntuación, indicando que este atributo presentó un impacto significativo en la aceptación sensorial. El atributo por mejorar fue el sabor, para lo cual se debería evaluar el grado de acidificación del suero, y su posterior fermentación durante el proceso de homogenización y posterior secado.

Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad del producto para continuar en fases posteriores de mejora y validación comercial, tal como lo trabajaron los autores [36]. Ya que, el producto en polvo a base de suero lácteo dulce y pulpa de mora presentó alta aceptación sensorial y fue bien recibido por potenciales consumidores

Conclusiones

Los resultados de las propiedades fisicoquímicas del suero lácteo dulce y la pulpa de mora (*Rubus glaucus*) permitieron identificar que ambos aportan compuestos importantes y benéficos al organismo humano. Se destaca el aprovechamiento del aporte proteico (1,52 %) del suero lácteo y de compuestos antioxidantes como los polifenoles (4,66 ug ácido gálico/g) en la pulpa de mora; todos estos son nutrientes relevantes en la gama de productos funcionales.

La formulación óptima de la suspensión prebiótica permitió identificar las proporciones de la mezcla de la suspensión (0,419 en pulpa de mora, 0,319 en suero lácteo, 0,202 en maltodextrina y 0,060 en la inulina), valores que evidencian la posibilidad de incorporar un subproducto poco valorizado en la industria de la cadena láctea en un nuevo producto con valor agregado. Además, se encontró que el uso de inulina y maltodextrina como estabilizadores fueron relevantes para preservar los componentes activos, mantener la suspensión estable y potenciar tanto la facilidad de uso como la uniformidad del producto.

El producto prebiótico en polvo con mejores propiedades funcionales y sensoriales se obtuvo a 130°C de temperatura de aire de entrada en el secado por *spray drying*. A esta temperatura, se consiguió una mejor conservación de los compuestos antioxidantes (8,92 ug ácido gálico/g) y un desempeño positivo en relación con la solubilidad del polvo (62,28 %). Además, el análisis sensorial reveló que el 93 % de los panelistas no entrenados manifestaron su deseo de consumir el producto con una evaluación global de 4,17 (escala de 1 a 5), lo cual indica una aceptación favorable a nivel sensorial y evidenciando que la incorporación de suero lácteo en una nueva matriz alimentaria es una alternativa que le aporta positivamente en marco de la economía circular; puesto que, el nuevo producto contiene nutrientes con potencial funcional de interés para la industria de alimentos.

Financiamiento

La investigación fue financiada por la Universidad Mariana de la ciudad de Pasto – Nariño (Colombia) y con recursos de los autores.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento, a Juliana Oviedo Pantoja y Miguel Ibarra Vallejo, por la colaboración brindada en el desarrollo de las pruebas experimentales, al igual que en la organización y análisis de los resultados.

Referencias

- [1] T. Zotta, L. Solieri, L. Iacumin, C. Picozzi & M. Gullo. Valorization of cheese whey using microbial fermentations. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(7), 2749–2764, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10408-2>
- [2] G. Ozturk, N. Liang, M. Bhattacharya, R. C. Robinson, S. Shankar, Y. Huang, B. Paviani, A. Taha & D. Barile. Glycoproteomic and Lipidomic Characterization of Industrially Produced Whey Protein Phospholipid Concentrate with Emphasis on Antimicrobial Xanthine Oxidase, Oxylipins and Small Milk Fat Globules. *Dairy*, 3(2), 277–302, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/dairy3020022>
- [3] N. Kaur, P. Sharma, S. Jaimni, B. A. Kehinde & S. Kaur. Recent developments in purification techniques and industrial applications for whey valorization: A review. *Chemical Engineering Communications*, 207(1), 123–138, 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1573169>
- [4] M. Mora, F. Pardo & H. Bastidas. Diagnóstico Patológico en Mora de Castilla *Rubus glaucus* Bentham (Rosales: Rosaceae). *Orinoquia*, 24 (2) 27-32. 2020, doi: <https://doi.org/10.22579/20112629.618>
- [5] M. B. Braga, P. C. Veggi, M. C. Codolo, M. A. Giaconia, C. L. Rodrigues y A. R. C. Braga. Evaluation of freeze-dried milk-blackberry pulp mixture: Influence of adjuvants over the physical properties of the powder, anthocyanin content and antioxidant activity. *Food Research International*, 125, 108557, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108557>
- [6] O. Frumuzachi, A. Flanagan, S. Rohn y A. Mocan. The dichotomy between functional and functionalized foods – A critical characterization of concepts. *Food Research International*, 208, 116173, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116173>
- [7] M. Alsubhi, M. Blake, T. Nguyen, I. Majmudar, M. Moodie y J. Ananthapavan. Consumer willingness to pay for healthier food products: A systematic review. *Obesity Reviews*, 24(1), e13525, 2023, doi: <https://doi.org/10.1111/obr.13525>
- [8] D. Martini, M. Marino, S. Venturi, M. Tucci, D. Klimis-Zacas, P. Riso, M. Porrini y C. Del Bo. Blueberries and their bioactives in the modulation of oxidative stress, inflammation and cardio/vascular function markers: a systematic review of human intervention studies. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 111, 109154, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2022.109154>
- [9] Z. Abdi-Moghadam, M. Darroudi, M. Mahmoudzadeh, M. Mohtashami, A. M. Jamal, E. Shamloo y Z. Rezaei. Functional yogurt, enriched and probiotic: A focus on human health. *Clinical Nutrition ESPEN*, 57, 575–586, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2023.08.005>
- [10] M. Ayala, D. Sánchez, R. Ruiz, S. Muñoz, R. Gama, O. Mendo y N. Torres Salado. Efecto prebiótico de dos fuentes de inulina en el crecimiento in vitro de *Lactobacillus salivarius* y *Enterococcus faecium*. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(2), 346–361, 2018, doi: <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i2.4488>
- [11] A. F. Pires, N. G. Marnotes, O. D. Rubio, A. C. Garcia y C. D. Pereira. Dairy by-products: A review on the valorization of whey and second cheese whey. *Foods*, 10(5), 1067, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/foods10051067>
- [12] F. Van de Velde, M. H. Grace, D. Esposito, M. É. Pirovani y M. A. Lila. Quantitative comparison of phytochemical profile, antioxidant, and anti-inflammatory properties of blackberry fruits adapted to Argentina. *Journal of Food Composition and Analysis*, 47, 82–91, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2016.01.008>

- [13] AOAC Official Method 2012.04. Antioxidant Activity in Foods and Beverages: Reaction with 2,2'-Diphenyl-1-Picrylhydrazyl (DPPH), in Dr. George W Latimer, Jr. (ed.), *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*, 22nd Edition (New York).
- [14] R. Hoxha, Y. Evstatieva y D. Nikolova. Physicochemical, Rheological, and Sensory Characteristics of Yogurt Fermented by Lactic Acid Bacteria with Probiotic Potential and Bioprotective Properties. *Foods*, 12(13), 2552, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/foods12132552>
- [15] R. A. Benavides Zambrano, A. M. Hernández Cardona y C. D. Narváez Pérez. Obtención de licor artesanal de café a partir de destilado de caña panelera y hierbas aromáticas, Universidad Mariana. 2023. Tesis.
- [16] H. Castaño-Peláez, M. C. Rodríguez, J. H. Gil G., G. L. López y R. Ortega-Toro. Optimization of spray-drying process parameters on strawberry (*Fragaria ananassa* D.) extracts microcapsules quality. *Journal of Berry Research*, 12(4), 531-550, 2022, doi: <https://doi.org/10.3233/JBR-220047>
- [17] M. I. Arango-Torres, M. Cortés-Rodríguez, E. Largo-Ávila, M. Gallón-Bedoya y R. Ortega-Toro. Yacon powder mix: Effects of the composition and the process of microencapsulation by spray drying. *Heliyon*, 10(13), 20224, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33968>
- [18] B. T. Nguyen, E. Bujna, N. Fekete, A. T. M. Tran, J. M. Rezessy-Szabo, R. Prasad y Q. D. Nguyen. Probiotic Beverage From Pineapple Juice Fermented With *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* Strains. *Frontiers In Nutrition*, 6. 2029, doi: <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00054>
- [19] C. De los Rios Carvajal, M. Cortes Rodriguez y J. C. Arango Tobon. Physicochemical quality and antioxidant activity of blackberry suspensions: Compositional and process effects. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6), e15498. 2021, doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.15498>
- [20] A. Sozzi, M. Zambon, G. Mazza y D. Salvatori. Fluidized bed drying of blackberry wastes: Drying kinetics, particle characterization and nutritional value of the obtained granular solids. *Powder Technology*, 385, 37-49, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.058>
- [21] N. Deshmukh, P. S. Rao, H. Sharma y M. Kumar. Waste to nutrition: The evolution of whey, a byproduct to galactooligosaccharides production. *Food Chemistry Advances*, 4, 100642, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100642>
- [22] P. Papademas y P. Kotsaki. Technological utilization of whey towards sustainable exploitation. *Journal of Advances In Dairy Research*, 7(4), 231, 2019, doi: <https://doi.org/10.35248/2329-888X.19.7.231>
- [23] M. N. S. Cerda, J. A. G. Martínez, S. P. T. Dávila, R. T. Flores, R. C. L. G. Reyes y D. A. J. Gámez. Lactosuero, estabilizantes comerciales y fécula de maíz en la producción de helados artesanales Whey, commercial stabilizers, and cornstarch in the production of artisanal ice cream. *Revista Científica*, 24(43), 150-157, 2024. Tesis.
- [24] A. Merkel, D. Voropaeva y M. Ondrušek. The impact of integrated nanofiltration and electro-dialytic processes on the chemical composition of sweet and acid whey streams. *Journal Of Food Engineering*, 298, 110500, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110500>
- [25] M. Saleem, Z. Ahmad, M. Waseem, T. Alsulami, M. R. Javed, M. Farhan, G. A. Nayik, M. F. Manzoor y G. Abdi. Nutritional, physicochemical, and antioxidant characterization of pomegranate, beetroot, and carrot concentrates supplemented functional whey beverages. *Food Chemistry: X*, 102206, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2025.102206>

- [26] Z. Gong, M. Yu, W. Wang y X. Shi. Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 2229–2238, 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1506477>
- [27] Z. Dou, C. Chen, Q. Huang y X. Fu. Comparative study on the effect of extraction solvent on the physicochemical properties and bioactivity of blackberry fruit polysaccharides. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 183, 1548–1559, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.131>
- [28] M. Karim, M. Alimi, S. Shokoohi y F. Fazeli. Effect of long-chain inulin and modified starch on the physicochemical and rheological properties of doogh (Iranian yogurt drink). *Acta Alimentaria*, 46(1), 51-60, 2017, doi: <https://doi.org/10.1556/066.2017.46.1.7>
- [29] R. Soni, N. K. Jain, V. Shah, J. Soni, D. Suthar y P. Gohel. Development of probiotic yogurt: effect of strain combination on nutritional, rheological, organoleptic and probiotic properties. *Journal Of Food Science And Technology*, 57(6), 2038-2050, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04238-3>
- [30] E. Hadjimbei, G. Botsaris y S. Chrysostomou. Beneficial effects of yoghurts and probiotic fermented milks and their functional food potential. *Foods*, 11(17), 2691, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/foods11172691>
- [31] G. Kwon. Characteristics of inulin-based synbiotic powders and granules encapsulating *Lactobacillus rhamnosus* GG (Tesis Doctoral. Seoul National University), 서울대학교 대학원). 2020.
- [32] S. C. Lourenço, N. A. Lopes, F. M. Nunes y C. A. Pinto. Microencapsulation of pineapple peel extract by spray drying using maltodextrin, inulin, and Arabic gum as wall matrices. *Foods*, 9(6), 718, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/foods9060718>
- [33] S. Santos, L. Rodrigues, S. Costa y G. Madrona. Antioxidant compounds from blackberry (*Rubus fruticosus*) pomace: Microencapsulation by spray-dryer and pH stability evaluation. *Food Packaging And Shelf Life*, 20, 100177, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.12.001>
- [34] J. A. Figueiredo, A. M. Lago, J. M. Mar, L. S. Silva, E. A. Sanches, T. P. Souza, J. A. Bezerra, P. H. Campelo, D. A. Botrel y S. V. Borges. Stability of camu-camu encapsulated with different prebiotic biopolymers. *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, 100(8), 3471–3480, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10384>
- [35] B. F. Feitosa, B. L. A. Decker, E. S. De Brito, S. Rodrigues y L. R. B. Mariutti. Microencapsulation of anthocyanins as natural dye extracted from fruits – A systematic review. *Food Chemistry*, 424, 136361, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136361>
- [36] P. Glibowski y P. Rybak. Rheological and sensory properties of stirred yoghurt with inulin-type fructans. *International Journal Of Dairy Technology*, 69(1), 122–128, 2015, doi: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12231>

