

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

El suero de leche o también llamado lactosuero es un subproducto importante generado en la producción de quesos y cuajadas. Según el método de coagulación utilizado, el suero puede clasificarse en suero ácido o suero dulce. En este proyecto, se trabaja con suero dulce, que se obtiene a partir de la coagulación enzimática de la leche mediante el uso de coagulantes como el cuajo. La coagulación enzimática, a diferencia de la fermentación láctica, mantiene un pH más cercano a la neutralidad 6,0 – 6,5, lo que influye favorablemente en la composición y propiedades funcionales del suero (Poveda, 2013).

El uso del suero tiene 7000 años de historia. Desde la antigüedad, este producto se utilizaba con fines medicinales para tratar infecciones, favorecer la cicatrización de heridas y aliviar enfermedades estomacales, durante el siglo XVII, también se empleaba en la preparación de sopas y mantecas de suero. Sin embargo, en tiempos más recientes, pasó de ser un recurso valioso a considerarse un residuo sin utilidad, generando un impacto negativo en el medio ambiente, En la segunda mitad del siglo XX los avances tecnológicos permitieron transformar este poco apreciado producto en valiosa materia prima reconociendo su alto valor nutricional. (Hamann, V. 2022, 6 mayo)

La producción global de queso representa un sector industrial de gran magnitud, generando un volumen significativo de suero de leche como subproducto.

A nivel mundial, Estados Unidos se consolida como el líder indiscutible en la producción de queso, impulsado por una industria láctea grande y una amplia variedad de productos que satisfacen tanto el mercado interno como las crecientes demandas de exportación. Sin embargo, el panorama quesero global es diverso, con una fuerte presencia europea, donde países como Alemania, Francia e Italia destacan por su arraigada tradición quesera, la calidad de sus productos y su capacidad para exportar variedades únicas y apreciadas internacionalmente.

En Sudamérica, Brasil y Argentina emergen como productores clave, con una industria en constante crecimiento que abastece tanto el consumo interno como los mercados regionales, aprovechando la abundancia de recursos lácteos y la creciente demanda de productos lácteos en la región. (Insights, 2024)

Tabla IND- 1: Producción global de queso

País	Producción (toneladas métricas)	Notas
Estados Unidos	6.000.000	Principal productor mundial.
Alemania	2.500.000	Importante productor y exportador en Europa.
Francia	2.000.000	Conocido por su variedad de quesos.
Italia	1.300.000	Famoso por quesos como el Parmigiano-Reggiano y el Mozzarella.

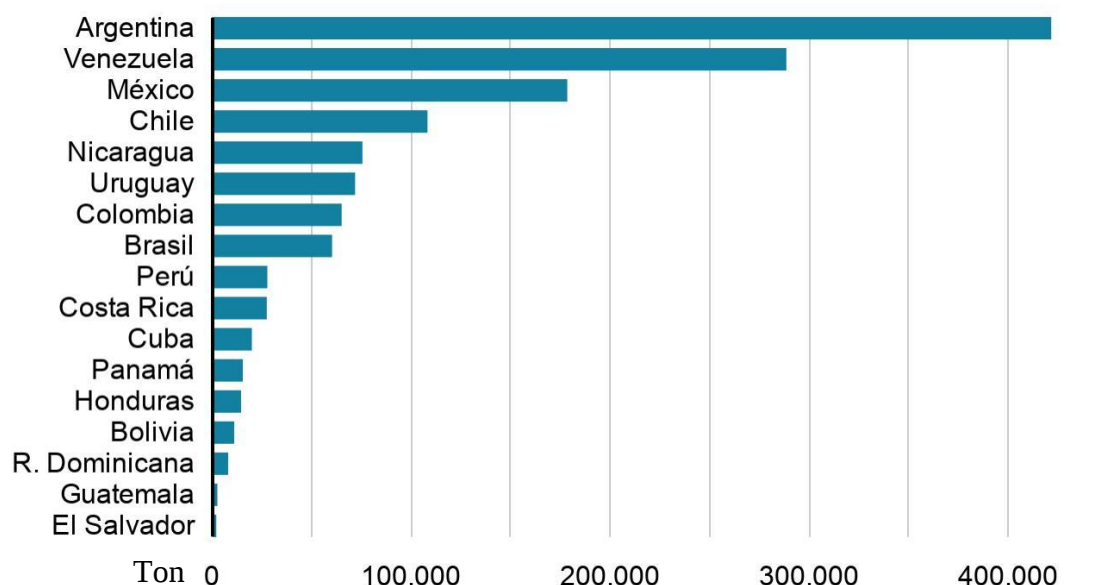
Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

La producción de quesos en América Latina es una actividad agroindustrial de gran relevancia económica y cultural, impulsada por la abundante producción de leche en países como Argentina, Brasil, México y Colombia. La región ofrece una diversidad de quesos que reflejan influencias europeas y tradiciones locales, desde quesos frescos como la cuajada y el queso blanco, hasta variedades maduradas como el queso manchego latinoamericano. Si bien muchos productores operan a pequeña escala con métodos tradicionales, en los últimos años ha habido un crecimiento de la producción

industrial y del interés por agregar valor mediante certificaciones de origen, innovación en procesos y mejoras en la cadena de frío. Esta combinación de tradición e innovación convierte al sector quesero latinoamericano en un componente clave del desarrollo rural y agroalimentario de la región. (Bermúdez, 2023)

Fig. IND - 1: Producción de quesos en América Latina

Producción de quesos en América Latina en 2020



Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

La producción de queso en Bolivia no cuenta con registros recientes en el Instituto Nacional de Estadística (INE), la última cifra oficial disponible es de 1998, cuando se reportó una producción de 135.071 kilos.

Actualmente, no existen publicaciones actualizadas sobre este sector en fuentes gubernamentales, en parte porque una gran cantidad de la producción de queso en el país proviene de pequeños productores y queseros caseros, lo que dificulta la recolección de datos precisos. Sin embargo, según estimaciones de Report Linker, una plataforma internacional de análisis de mercado, la producción de queso en Bolivia alcanzará aproximadamente 13.000 toneladas métricas para 2026, con un crecimiento anual del 1,2%.

Otras fuentes, como Dairy News, estiman una producción anual de entre 40.000 y 45.000 toneladas, aunque la variación en estas cifras podría deberse a diferencias en las metodologías utilizadas para recopilar los datos.

No obstante, el manejo del suero de leche, un subproducto resultante de la elaboración de quesos, sigue representando un desafío ambiental y económico. Gran parte de este subproducto no es aprovechado adecuadamente y, en muchos casos, es desechado sin un tratamiento adecuado, generando un impacto ambiental negativo. A pesar de ello, existe un alto potencial para su transformación en proteína en polvo, lo que permitiría diversificar la oferta en el mercado nacional y generar un producto con alto valor agregado para la industria alimentaria y de suplementos nutricionales.

En los últimos años, la demanda de proteínas en polvo y derivados de suero de leche ha experimentado un crecimiento constante en Latinoamérica, impulsada por el auge del consumo de suplementos nutricionales, el incremento de la conciencia sobre la alimentación saludable. Factores como el cambio en los hábitos alimenticios, la búsqueda de fuentes proteicas alternativas y el interés por productos funcionales han favorecido la expansión de este mercado en la región. (The Insight Partners, 2024)

En Tarija, no existen registros estadísticos oficiales recientes sobre la producción de queso por parte del Instituto Nacional de Estadística (INE). Esto se debe a que gran parte de la producción es de carácter artesanal, realizada por pequeños productores y queseros caseros, lo que dificulta su cuantificación exacta.

En el departamento de Tarija, la producción de leche equivale aproximadamente a 44.933 litros diarios, de los cuales el 91% alrededor de 40.683 litros es comercializado a las procesadoras de lácteos como PIL, PROLAC y EVA. Sin embargo, no se dispone de datos precisos sobre qué porcentaje de esta producción se destina específicamente a la elaboración de queso (CIEPLANE, 2018)

El queso es un producto característico de la región, se produce de manera artesanal y sin un registro formal, lo que impide establecer cifras oficiales sobre su volumen de producción, gran parte de la leche producida se destina a la elaboración de productos

lácteos, especialmente queso, lo que genera una cantidad significativa de suero de leche como subproducto.

Este líquido contiene proteínas de alta calidad, que incluyen lactoalbúmina, lactoferrina y β -lactoglobulina, entre otras. Estas proteínas son ricas en aminoácidos esenciales, lo que las convierte en una fuente valiosa para diversas aplicaciones en la industria alimentaria y nutricional. El aprovechamiento de estas proteínas del suero de leche no solo ofrece una solución para el manejo de residuos, sino que también presenta oportunidades para la creación de productos innovadores con alto valor nutricional (Poveda, 2013).

Las proteínas son moléculas formadas por aminoácidos, es decir son nutrientes que forman parte de la estructura de los tejidos y órganos, y que también tienen funciones metabólicas y reguladoras (MedLinePlus, 2021).

la obtención de proteínas a partir del suero no solo representa una forma eficiente de valorizar este subproducto, sino que también ofrece beneficios nutricionales debido a las propiedades funcionales de las proteínas de suero, tales como su alto valor biológico y su rápida digestibilidad. Se ha caracterizado por contener una gran cantidad de componentes saludables, como aminoácidos esenciales, péptidos bioactivos, antioxidantes e inmunopotenciadores. Las actividades biológicas asociadas a los biopéptidos incluyen propiedades inmunomoduladoras, antibacterianas, antihipertensivas, antioxidantes y opioides, entre otras. Estas funciones están relacionadas con el bienestar general o la reducción del riesgo de ciertas enfermedades crónicas. (Olvera-Rosales, 2023)

OBJETIVOS

Objetivo general

Obtener proteína en polvo por el método de liofilización a partir del suero de la leche producido en el departamento de Tarija.

Objetivos específicos

- Caracterizar el suero de la leche mediante análisis fisicoquímico, microbiológico y nutricional.
- Identificar las variables óptimas para el proceso de obtención de proteína en polvo.
- Aplicar el proceso de liofilización para obtener la proteína en polvo
- Realizar un análisis fisicoquímico, microbiológico y nutricional de la proteína en polvo obtenida.
- Determinar el rendimiento mediante el balance de materia.

JUSTIFICACIÓN

Justificación tecnológica

Se empleó el proceso de liofilización para la obtención de proteínas en polvo a partir del suero de leche, debido a que este método permite eliminar el agua a bajas temperaturas, lo que contribuye a preservar las propiedades nutricionales y funcionales de las proteínas presentes en el suero.

La liofilización favorece la obtención de un producto con mayor estabilidad, buena solubilidad y menor actividad microbiológica, lo que contribuye a prolongar la vida útil del producto sin necesidad de añadir conservantes

Justificación económica

La producción de proteína en polvo a partir del suero de leche permite dar valor agregado a un subproducto que normalmente se desperdicia, generando oportunidades de empleo y contribuyendo a la economía local.

Aunque el proceso de liofilización requiere más energía, la alta calidad del producto final permite su comercialización en sectores de alto valor, haciendo que la inversión sea rentable y sostenible.

Justificación ambiental

La obtención de proteína en polvo a partir del suero de la leche tiene un impacto ambiental positivo, ya que aprovecha un subproducto de la industria láctea que, de otro modo, podría generar contaminación al ser desechado sin utilizarse adecuadamente. Al transformar el suero en un producto valioso, se reduce el desperdicio de recursos y se disminuye la contaminación de recursos hídricos.

La liofilización, al operar a bajas temperaturas, minimiza el uso de aditivos, contribuyendo a una producción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, lo que promueve una gestión responsable de los residuos y mejora la sostenibilidad de la industria.

Justificación social

El aprovechamiento del suero de leche para la obtención de proteína en polvo mediante liofilización genera un importante impacto social, ya que ofrece una fuente accesible de proteínas de alta calidad. Ante el aumento de problemas de salud metabólicos y la creciente demanda de fuentes proteicas por parte de los deportistas, resulta importante aprovechar el potencial de la proteína de suero.

Este proceso no solo reduce el desperdicio de recursos, sino que también proporciona una opción saludable para combatir los problemas de nutrición y mejorar el estado nutricional de la población, promoviendo así una mejor salud pública.

Justificación personal

El interés por la obtención de proteína en polvo a partir del suero de leche surge a partir de la experiencia en la venta de cuajada, donde durante varios años se observó el desperdicio de grandes cantidades de suero, un subproducto de la industria láctea que, en lugar de aprovecharse, era desechado. Esta situación generó la necesidad de buscar alternativas para valorizar este recurso y utilizarlo en la mejora de la calidad nutricional de productos alimenticios.

Dicho interés se fortalece al conocer el potencial del suero como fuente de proteínas de alta calidad, especialmente en un contexto donde las enfermedades metabólicas y los problemas de nutrición representan problemáticas crecientes. Esto motiva la investigación de métodos que permitan transformar el suero en un producto útil, accesible y con valor agregado para la población.

De esta manera, el presente proyecto representa una oportunidad para aplicar conocimientos de Ingeniería Química, proponer soluciones innovadoras dentro de la industria láctea y contribuir al bienestar de la sociedad, promoviendo la sostenibilidad y la salud pública.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

1.1.1. Suero de la leche (lactosuero)

El suero de leche es un líquido de tonalidad amarillo verdoso, con una textura turbia y un sabor suave y ligeramente salado. Se obtiene principalmente como subproducto de la coagulación de la leche durante la fabricación de queso.

Su composición está dominada por un 90% de agua, además de contener proteínas y grasas en menor proporción. Durante mucho tiempo, la industria quesera lo consideró un residuo difícil de gestionar debido a la gran cantidad generada en los procesos de producción. Sin embargo, con el tiempo se han reconocido sus múltiples beneficios nutricionales y aplicaciones en diversos sectores. (Parzanese, 2022)

El suero de leche es una fuente rica en vitaminas esenciales como las del grupo B, C, D y E, además de minerales clave como calcio, potasio, magnesio, sodio, fósforo y manganeso. También destaca por su elevado contenido proteico, incluso superior al del huevo, lo que lo hace valioso en la nutrición humana. (Huertas, 2009)

1.1.1.1. Tipos de suero de leche

Se clasifica principalmente en dos tipos según el método de coagulación utilizado:

Suero dulce: Se obtiene cuando la coagulación de la leche se realiza mediante enzimas, como el cuajo (renina), manteniendo un pH cercano a la neutralidad 6,0 – 6,5. Este tipo de suero contiene una mayor proporción de lactosa, minerales, proteínas solubles y posee mejores propiedades funcionales para aplicaciones nutricionales y tecnológicas. (Poveda, 2013).

Suero ácido: Proviene de la coagulación láctica, es decir, por acción de bacterias que fermentan la lactosa, reduciendo el pH a valores entre 4.2 y 4.8. Este tipo de suero contiene menor cantidad de proteínas solubles y es más común en la elaboración de quesos frescos o requesón. (Poveda, 2013).

La diferenciación entre ambos tipos es importante debido a que su composición química y propiedades funcionales influyen directamente en los procesos de

valorización, como la obtención de concentrados proteicos, la producción de bebidas nutritivas o su uso como ingrediente en productos alimenticios.

1.1.2. Composición del suero de la leche

La composición del suero lácteo puede presentar variaciones importantes dependiendo de su tipo y del proceso mediante el cual se obtiene. En el presente trabajo, se enfoca la atención del suero dulce, característico por su pH cercano a la neutralidad.

A continuación, se presenta la composición del suero dulce, que permitirá conocer los principales componentes presentes.

Tabla I - 1: Composición general del suero y distribución proteica

Componente	Observaciones
Lactosa	95% de la lactosa de la leche, en una proporción de (4,5–5,0%). 46,0–52,0 g/L en lactosuero dulce y 44,0–46,0 g/L en lactosuero ácido.
Proteína	En una proporción de 0,8–1,0%. Corresponde alrededor del 25% de las proteínas contenidas normalmente en la leche. 6,0 g/L en lactosuero dulce y 6,0–8,0 g/L en lactosuero ácido. Alto contenido de aminoácidos (leucina, isoleucina, leucina, valina)
α-Lactoalbúmina	30% del total del contenido proteico.
β-Lactoglobulina	Es importante porque tiene propiedades emulsionantes y cumple una función importante al interactuar con compuestos como el retinol y los ácidos grasos.
Globulina	Corresponde a 10% del total de proteínas.
Proteasas-peptonas	Corresponden a 10% del total de proteínas. Lactoferrinas, albúmina (idéntica a la albúmina sérica de la sangre), inmunoglobulinas, factores de crecimiento, glicoproteínas y enzimas (nucleasas, lactoperoxidasas, xantina oxidasa, lipasa esterases, amilasas, fosfatasas ácidas y alcalinas,

	lisozima, aldolasa, catalasa, inhibidor de la tripsina, lactasa sintasa, ceruloplasmina, sulfhidrolasas y otras). Son proteínas de alto valor biológico al proporcionar aminoácidos esenciales para el organismo, entre ellos triptófano, leucina, isoleucina y valina.
Lípidos	0,5% y 8% de la materia grasa de la leche.
Vitaminas	Tiamina 0,38 mg/ml; Riboflavina 1,2 mg/ml; Ácido nicotínico 0,85 mg/ml; Ácido pantoténico 3,4 mg/ml; Piridoxina 0,42 mg/ml; Cobalamina 0,03 mg/ml; Ácido ascórbico 2,2 mg/ml.
Minerales	8–10% del extracto seco. Calcio (0,4–0,6 g/L en lactosuero dulce y 1,2–1,6 g/L en lactosuero ácido), potasio, fósforo, sodio y magnesio.
Compuestos biológicamente activos y péptidos bioactivos	Para ejercer determinados efectos biológicos y fisiológicos, con potencial antihipertensivo, actividad antimicrobiana, antioxidante, incremento de la saciedad, entre otros.

Fuente: Whey, generalities and potential use as source of calcium from high bioavailability,2013

1.2 USOS DEL SUERO EN ALIMENTOS Y OTROS

El aprovechamiento del suero ha evolucionado considerablemente, permitiendo su incorporación en una amplia gama de procesos industriales. En esta sección se presentan los principales usos que se le han dado, destacando especialmente su potencial para generar productos con valor agregado y su aporte al desarrollo de alternativas más sostenibles.

Tabla I - 2: Usos del Suero en alimentos y otros.

Productos de panadería como croissants, tortas	Incrementar el valor nutricional, como emulsionante, reemplazar la adición de huevo, para dar cuerpo a la masa.
Productos lácteos como bebidas fermentadas y quesos	Valor nutricional, emulsionante, gelificante, mejorar propiedades organolépticas, mejorar consistencia, cohesividad.
Bebidas como jugos de fruta, refrescos, bebidas achocolatadas, bebidas a base de leche	Valor nutricional, solubilidad, viscosidad, estabilidad coloidal.
Postres como barras de yogurt, helados	Propiedades emulsionantes, dar cuerpo y textura a los productos.
Alimentos nutricionales	Alimentos de mayor valor nutricional y bajo costo, alimentos para deportistas, para personas adulto mayor, fórmulas nutricionales especiales para
Para concentrados de proteína	Para productos alimenticios especiales, suplementos nutricionales, productos de panadería y confitería. Contiene aproximadamente 25-89% de proteína, 4-52% de lactosa y 1-9% de grasa.
Para obtener aislados de proteína	Para suplementos de proteína, bebidas y productos altos en proteína. Contiene aproximadamente 90-95% de proteína, 0,5-1% de lactosa y 0,5-1% de grasa.
Para obtener hidrolizados de proteína	Para fórmulas infantiles, productos para deportistas, productos nutricionales especiales. Contiene aproximadamente 80-90% de proteína, 0,5-1% de lactosa y 0,5-0,8% de grasa.

Fuente: Whey, generalities and potential use as source of calcium from high bioavailability,2013

1.3 IMPACTO AMBIENTAL DEL SUERO DE LA LECHE

El vertimiento de suero crea un grave problema de contaminación ambiental porque cada 1000 litros de suero se generan aproximadamente 35 kg de demanda biológica de oxígeno y aproximadamente 68 kg de demanda química de oxígeno. El impacto ambiental producto de estos vertimientos se puede comparar con las aguas residuales producidas por 450 personas en un día (Asas, Llanos, Matavaca, & Verdezoto, 2021) (Parra Huertas, 2009).

Generalmente el suero se vierte al alcantarillado y, debido a su alto valor energético, es consumido por bacterias y microorganismos que requieren oxígeno.

La demanda biológica de oxígeno para el suero es de 40.000-50.000 O_2 mg/L, esto se traduce en que el vertimiento de un solo litro de suero puede generar la muerte de todos los peces en 10 toneladas de agua (Asas, Llanos, Matavaca, & Verdezoto, 2021).

El vertido inadecuado del suero de leche genera contaminación debido a su alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Cuando el suero es arrojado a cuerpos de agua sin un tratamiento previo, contribuye a la eutrofización, lo que provoca la proliferación excesiva de algas y la disminución del oxígeno disponible para la vida acuática (González et al., 2013). Además, su descomposición genera malos olores y puede afectar la calidad del suelo si es vertido en grandes cantidades sin una adecuada gestión.

1.4 BENEFICIOS DEL APROVECHAMIENTO DEL SUERO

La reutilización del suero de leche mediante su transformación en subproductos con contenido proteico ofrece una serie de beneficios económicos, ambientales y nutricionales.

Al aprovechar estos subproductos, se reduce considerablemente el impacto ambiental asociado con su desecho. la conversión del suero de leche en productos de valor agregado, como polvos nutritivos derivados del suero, permite a las empresas lácteas generar nuevas oportunidades de aprovechamiento, mejorar la rentabilidad y contribuir a la sostenibilidad de la industria láctea mediante prácticas de economía circular.

En el ámbito nutricional, el suero es una fuente rica en proteínas de alto valor biológico, lo que lo convierte en un ingrediente valioso en la formulación de suplementos alimenticios y alimentos funcionales, ayudando a satisfacer las necesidades de poblaciones vulnerables. (Huertas, 2009)

El uso en la industria médica como suplemento para la recuperación de pacientes desnutridos o en tratamientos postquirúrgicos demuestra su versatilidad y potencial en diversas áreas. (José Luis Bizueto-Monroy, 2023).

1.5 PROTEÍNAS DEL SUERO DE LA LECHE

Las proteínas en polvo obtenidas a partir del suero de leche son productos derivados del aprovechamiento de este subproducto generado durante la elaboración de queso o cuajada. El suero de leche contiene proteínas de alto valor nutricional, además de lactosa y minerales, lo que lo convierte en una materia prima de interés para la industria alimentaria.

Mediante procesos de concentración y deshidratación, como la filtración y el secado, es posible obtener un producto en polvo con menor contenido de humedad. Esta forma en polvo facilita su conservación, almacenamiento y utilización en diferentes aplicaciones alimentarias.

1.5.1 Importancia de las proteínas de suero de la leche

La importancia del uso de las proteínas en polvo del suero de la leche radica en su alto valor nutricional y en sus múltiples aplicaciones en distintos campos. Estas proteínas contienen aminoácidos esenciales y presentan una alta digestibilidad, lo que las convierte en una fuente proteica de gran calidad para la alimentación humana. Además, su incorporación en diferentes productos alimenticios permite mejorar el valor nutricional de los alimentos y contribuir a una dieta más equilibrada. Por otra parte, su utilización en áreas como la nutrición deportiva, la nutrición clínica, demuestra su versatilidad y su relevancia dentro de la industria alimentaria y nutricional. (Parzanese, 2022).

1.5.2 Uso de las proteínas en polvo del suero de la leche

Las proteínas en polvo derivadas del suero de leche y otros productos lácteos en polvo han ganado relevancia debido a su capacidad para mejorar el perfil nutricional de diversos alimentos. A nivel global y en Latinoamérica, la demanda de ingredientes proteicos y productos derivados del suero ha crecido en respuesta al aumento del consumo de alimentos saludables. Bolivia no es la excepción, ya que el interés por productos con mayor valor nutricional ha incrementado en los últimos años, generando oportunidades para la industrialización y aprovechamiento del suero de leche. (Intelligence, 2026)

1.5.2.1 Uso en la industria alimentaria

En la industria alimentaria, las proteínas del suero de leche son ampliamente utilizadas debido a su alto valor nutricional y a sus propiedades funcionales. Estas proteínas se incorporan en la elaboración de suplementos nutricionales, productos dietéticos, así como en alimentos de panadería y confitería, donde contribuyen a mejorar la textura, la calidad proteica y el valor nutricional de los productos. (Leprino Nutrition, s.f.)

1.5.2.2 Uso en la industria medicinal

En el ámbito medicinal y nutricional, las proteínas del suero también han adquirido gran importancia debido a sus beneficios para la salud. Estas proteínas son utilizadas en la recuperación de pacientes con desnutrición y en suplementos destinados a personas con requerimientos proteicos específicos, como pacientes en recuperación postquirúrgica o con necesidades nutricionales especiales (Tetra Pak, s.f.).

Además, algunas fracciones proteicas del suero han demostrado poseer propiedades inmunomoduladoras y antioxidantes, lo que ha despertado interés en su aplicación dentro del área de la salud y la nutrición clínica (González et al., 2013).

1.5.2.3 Uso en la industria nutricional

En el ámbito nutricional, las proteínas en polvo del suero de la leche se utilizan en la elaboración de alimentos fortificados y suplementos alimenticios. Su alto contenido de aminoácidos esenciales y su fácil digestibilidad las convierten en una fuente de proteína de alta calidad. Por esta razón, se incorporan en productos destinados a mejorar la ingesta proteica de diferentes grupos poblacionales. (Huertas, 2009).

1.5.2.4 Uso en la nutrición deportiva

Las proteínas en polvo del suero de la leche también son utilizadas en la formulación de suplementos destinados a personas que realizan actividad física. Estos productos, como bebidas proteicas y barras nutricionales, se consumen con el objetivo de contribuir a la recuperación muscular y al mantenimiento del tejido muscular después del ejercicio. (Cribb, 2005)

1.6. NORMATIVAS PARA PRODUCTOS DERIVADOS DEL SUERO

1.6.1. Codex Alimentarius

1.6.1.1. Norma Codex para los sueros en polvo (CXS 289-2022)

Esta norma se aplica al suero en polvo, destinado para el consumo directo o su posterior procesamiento, establecida por la Codex Alimentarius Commission. Esta norma define los requisitos de calidad, composición y características que deben cumplir los sueros en polvo destinados al consumo humano. Asimismo, establece parámetros relacionados con la humedad, el contenido de proteínas, la lactosa, la grasa y los criterios microbiológicos, con el fin de garantizar la inocuidad y la calidad del producto final. El cumplimiento de estos criterios permite asegurar que los productos derivados del suero de leche sean aptos para su utilización como ingredientes en alimentos y bebidas, así como en diversas formulaciones de la industria alimentaria.

1.6.1.2. Requisitos Generales de Composición para Suero de leche en polvo

Tabla I - 3: Requisitos Generales de Composición para Suero de leche en polvo

Componente	Norma (CXS 289-2022)
Proteína mínima	11%
Grasas	n.s (la norma no fija limite)
Carbohidratos	60-70 %
Humedad	El contenido máximo de humedad permitido es 5%
Ceniza maxima	8,50%
PH	n.s (varia dependiendo el tipo de suero)
Etiquetado Nutricional	Debe incluir una tabla nutricional detallada que indique:
	1. Valor energético
	2. Contenido de proteínas, grasas, carbohidratos
	3. Vitaminas y minerales, si es relevante
	4. Instrucciones de uso y advertencias sobre alergias, como la presencia de lactosa.
Microbiología	El producto debe cumplir con las normas microbiológicas para garantizar que esté libre de patógenos (salmonella, E. coli, etc.).

Fuente: Norma CXS 289-2022

1.7 MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE PROTEÍNAS EN POLVO

Existen diversos métodos para obtener proteínas en polvo derivados del suero de leche, cada uno con características específicas en cuanto a la calidad del producto final, el proceso y la inversión requerida. Los principales métodos son:

1.7.1. Secado por Convección Forzada con Aire Caliente

Este método usa aire caliente que circula sobre el producto para evaporar el agua.

1.7.1.1. Pretratamiento:

El suero se concentra mediante evaporación para reducir el contenido de agua y aumentar la proporción de proteína.

1.7.1.2. Distribución del suero:

El suero concentrado se distribuye sobre bandejas o mallas, permitiendo la exposición al flujo de aire.

1.7.1.3. Secado:

Se aplica aire caliente a presión controlada, el cual evapora el agua del suero lentamente.

1.7.1.4. Recolección:

El producto seco se raspa o se recoge manualmente, y se pulveriza si es necesario para obtener una textura más fina.

1.7.1.5. Envasado:

Una vez obtenido el polvo, se envasa al vacío, para mantener sus propiedades.

Fig. I - 1: Diagrama de Secado por Convección Forzada (Aire Caliente)



Fuente: Elaboración propia,2026

1.7.2. Secado por Tambor (Drum Drying)

El suero es secado sobre la superficie caliente de un tambor rotativo.

1.7.2.1. Pretratamiento:

Se concentra el suero para lograr mayor contenido proteico y reducir el tiempo de secado.

1.7.2.2. Aplicación sobre el tambor:

El suero se extiende en forma de capa delgada sobre la superficie externa de un tambor rotativo calentado por vapor.

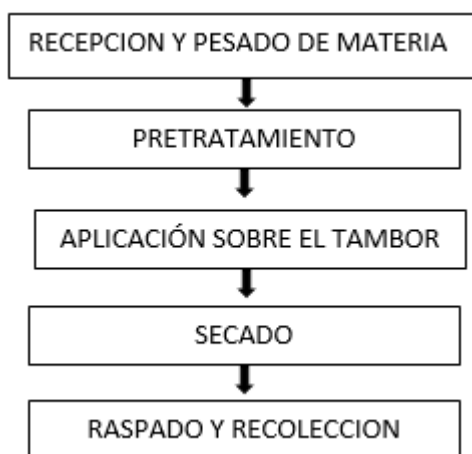
1.7.2.3. Secado:

El calor del tambor evapora el agua de manera rápida, secando la película delgada del suero.

1.7.2.4. Raspado y recolección:

Una cuchilla metálica raspa el producto seco del tambor, que luego se muele y envasa.

Fig. I - 2: Diagrama de Secado por Tambor (Drum Drying)



Fuente: Elaboración propia,2026

1.7.3. Secado al Vacío (Vacuum Drying)

El secado se realiza a baja presión, permitiendo evaporar el agua a menor temperatura.

1.7.3.1. Pretratamiento:

El suero se congela o concentra previamente para facilitar la remoción del agua.

1.7.3.2. Carga en la cámara de vacío:

El suero se coloca en bandejas o contenedores dentro de una cámara hermética.

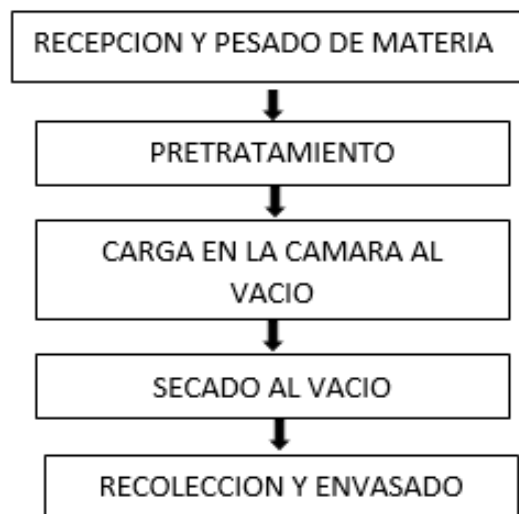
1.7.3.3. Secado al vacío:

Se aplica vacío y calor indirecto, permitiendo la evaporación del agua sin dañar las proteínas.

1.7.3.4. Recolección y envasado:

El producto seco se extrae cuidadosamente, conservando sus características nutricionales y se envasa.

Fig. I - 3: Diagrama de obtención de proteína a través de Secado al Vacío (Vacuum Drying)



Fuente: Elaboración propia, 2025

1.7.4. Secado por Atomización (Spray Drying):

Es el método más usado industrialmente para obtener proteínas en polvo.

1.7.4.1. Pretratamiento:

Se filtra y concentra el suero, eliminando impurezas y reduciendo agua.

1.7.4.2. Atomización:

El suero concentrado se pulveriza en gotas finas mediante boquillas o discos giratorios.

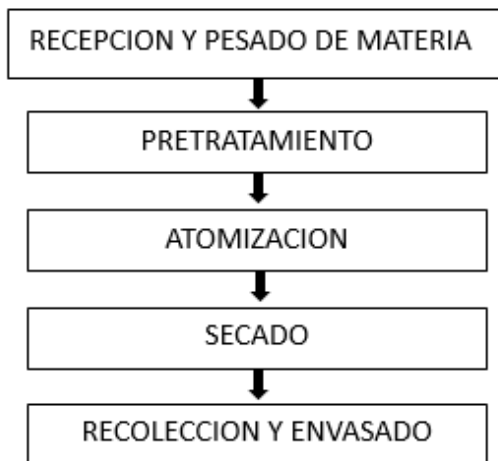
1.7.4.3. Secado:

Las gotas entran en contacto con aire caliente dentro de una torre de secado, y se secan instantáneamente.

1.7.4.4. Recolección y envasado:

El polvo seco cae al fondo de la torre, donde se recoge, filtra y envasa.

Fig. I - 4: Diagrama Secado por Atomización (Spray Drying)



Fuente: Elaboración propia, 2025

1.7.5. Liofilización (Freeze Drying)

La liofilización es un método de deshidratación avanzado basado en el principio de sublimación del agua previamente congelada, es decir, el paso directo del agua desde estado sólido (hielo) a estado gaseoso (vapor), sin atravesar la fase líquida. Este proceso se realiza bajo condiciones controladas de baja temperatura y vacío, lo que permite conservar de manera significativa las propiedades fisicoquímicas, nutricionales y funcionales, en el caso del suero de leche, este método es especialmente adecuado debido a la presencia de proteínas termolábiles, las cuales pueden desnaturalizarse fácilmente con tratamientos térmicos convencionales. A diferencia de otros métodos de secado como el secado por atomización (spray drying) o el secado por aire caliente, la liofilización minimiza el daño estructural, preservando la actividad biológica y la solubilidad de las proteínas. (Magali, 2018)

1.7.5.1. Pretratamiento:

El proceso inicia con la recepción del suero de leche, la cual es sometida a una etapa de filtración con el objetivo de eliminar sólidos suspendidos, grasas residuales o impurezas que puedan interferir en la formación homogénea del hielo. (Magali, 2018)

Posteriormente, el suero se distribuye en bandejas o contenedores adecuados y se prepara para la congelación. Esta etapa es crítica porque una correcta preparación influye en la uniformidad del proceso de secado y en la calidad final del polvo obtenido.

1.7.5.2. Congelación inicial:

El suero se somete a un enfriamiento de temperaturas aproximadas de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ o inferiores. El objetivo de esta etapa es transformar completamente el agua libre en hielo sólido, formando una matriz congelada estable. (Magali, 2018)

La velocidad de congelación es un factor determinante: una congelación rápida produce cristales de hielo pequeños, lo que favorece la preservación de la estructura del material y mejora la eficiencia del secado posterior. En cambio, una congelación lenta genera cristales grandes que pueden romper la matriz proteica y afectar la textura final del producto.

1.7.5.3. Sublimación (secado primario):

Una vez congelado el producto, se aplica un sistema de vacío profundo, reduciendo la presión a condiciones por debajo del punto triple del agua.

Bajo estas condiciones, el hielo no pasa por fase líquida, sino que sublima directamente a vapor de agua. Este fenómeno constituye la base del proceso de liofilización.

Durante el secado primario se elimina la mayor parte del agua (aproximadamente 80–90%), manteniendo la estructura porosa del material intacta. El control simultáneo de presión y temperatura es crítico para evitar el colapso estructural del producto. (Magali, 2018)

1.7.5.4. Secado secundario:

En esta etapa se incrementa ligeramente la temperatura, manteniendo el vacío, con el objetivo de eliminar el agua residual o agua ligada que permanece adsorbida en la matriz proteica.

Este paso permite reducir la humedad final a valores muy bajos, generalmente inferiores al 5%, lo cual es esencial para garantizar la estabilidad microbiológica y evitar reacciones de deterioro durante el almacenamiento. (Magali, 2018)

1.7.5.5. Trituración

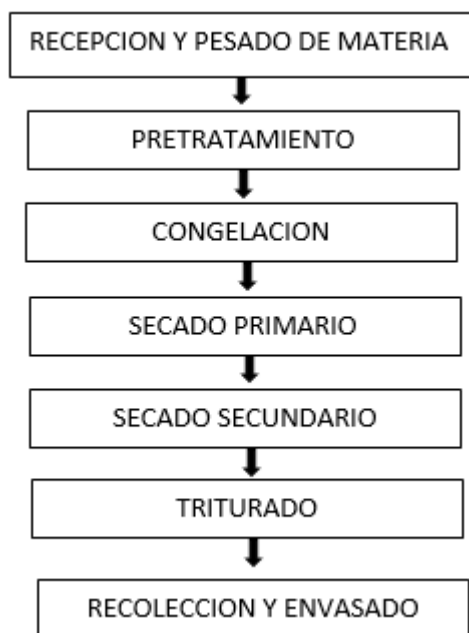
Una vez finalizado el secado, el material obtenido presenta una estructura porosa, ligera y frágil. Por ello, se realiza una etapa de trituración, con el fin de obtener un polvo fino y homogéneo.

Este paso también mejora la solubilidad del producto final y facilita su dosificación y aplicación en formulaciones alimentarias.

1.7.5.6. Recolección y envasado:

El producto final se recolecta en condiciones controladas para evitar la reabsorción de humedad ambiental. Posteriormente, se envasa en sistemas herméticos, preferentemente al vacío.

Fig. I - 5: Diagrama de obtención de proteína por liofilización.



Fuente: Elaboración propia, 2025

CAPÍTULO II

**MARCO METODOLÓGICO Y PARTE
EXPERIMENTAL**

2.1. DESCRIPCIÓN DEL METODO DE ESTUDIO

El método de estudio es experimental y analítico, centrado en la obtención de proteína en polvo a partir del suero de leche mediante liofilización. Se evalúan parámetros como el contenido proteico, la humedad y la Inocuidad utilizando técnicas de laboratorio validadas, además de análisis microbiológicos para garantizar la seguridad del producto.

2.1.1. Metodología documental

Se emplea una metodología documental que consiste en la recopilación, selección, análisis y presentación de información relevante de diversas fuentes, tales como artículos científicos, páginas web, tesis y otros materiales pertinentes. El objetivo principal es reunir datos coherentes y actualizados que permitan una comprensión profunda de la proteína en polvo a partir del suero de la leche.

2.1.2. Metodología cuantitativa

Para la investigación sobre la obtención de proteína en polvo a partir del suero de leche, se utiliza una metodología cuantitativa con enfoque experimental, ya que el objetivo principal es analizar de manera precisa la cantidad y calidad de la proteína obtenida mediante el proceso de liofilización. Se realizan mediciones detalladas de la concentración proteica, el análisis microbiológico y la evaluación nutricional del producto final.

2.2. SELECCIÓN DEL PROCESO UTILIZADO

Para seleccionar el método de secado más adecuado para la obtención de proteína en polvo a partir del suero de leche, es necesario comparar diferentes alternativas tecnológicas considerando tanto la calidad del producto final como los requerimientos operativos de cada proceso. En esta sección se presenta una evaluación donde se califican y ponderan los factores más relevantes que influyen en el desempeño de cada método, permitiendo determinar cuál ofrece los mejores resultados para los objetivos de este trabajo.

La Tabla II-1 muestra la selección del método de secado más adecuado para la obtención de proteína en polvo a partir del suero de leche, realizada mediante una matriz de decisión multicriterio, la cual permite comparar diferentes alternativas tecnológicas considerando variables técnicas, operativas y de calidad del producto final. Este tipo de herramienta es ampliamente utilizado en ingeniería para evaluar procesos cuando intervienen múltiples factores que afectan el rendimiento y la viabilidad del sistema productivo.

Para ello, se establece una escala de calificación de 1 a 10, donde el valor 1 representa el desempeño menos favorable y el valor 10 representa el desempeño más favorable de cada método de secado frente a cada criterio evaluado. Esta escala permite asignar una valoración comparativa entre los métodos de convección forzada, secado por tambor, secado al vacío, atomización y liofilización.

Posteriormente, cada criterio recibe una ponderación porcentual de acuerdo con su nivel de importancia dentro de la investigación, de manera que la suma total de los porcentajes sea igual al 100%. La asignación de estos porcentajes se realiza en función del objetivo principal de la tesis, que consiste en maximizar la conservación de la proteína del suero de leche y garantizar la estabilidad del producto final, considerando además aspectos como el costo operativo, el tiempo de secado, la disponibilidad de equipos y la humedad final del producto.

Finalmente, la calificación obtenida en cada criterio se multiplica por su respectiva ponderación porcentual, permitiendo obtener un valor ponderado total para cada alternativa y así identificar el método más adecuado para el desarrollo experimental de la investigación.

2.2.1. Tabla de evaluación de métodos

Tabla II- 1: Tabla de evaluación de métodos

Factores de evaluación	Valoración porcentual (%)	CONVECCIÓN FORZADA		TAMBOR		VACÍO		ATOMIZACIÓN		LIOFILIZACIÓN	
		Puntuación	Ponderación	Puntuación	Ponderación	Puntuación	Ponderación	Puntuación	Ponderación	Puntuación	Ponderación
Conservación de la proteína	30	6	1,8	5	1,5	8	2,4	7	2,1	10	3
Estabilidad microbiológica	20	6	1,2	5	1	8	1,6	7	1,4	10	2
Costo operativo del proceso	15	8	1,2	7	1,05	5	0,75	6	0,9	4	0,6
Tiempo de secado	10	9	0,9	8	0,8	6	0,6	9	0,9	3	0,3
Requerimiento de equipos especiales	15	7	1,05	5	0,75	6	0,9	9	1,35	10	1,5
Humedad final del producto	10	6	0,6	5	0,5	7	0,7	8	0,8	10	1
Total	100		6,75		5,6		6,95		7,45		8,4

Fuente: Elaboración propia,2025

2.2.1.1 Justificación de la ponderación de los factores de evaluación

La conservación de la proteína (30%): Recibe la mayor ponderación debido a que el objetivo principal de la tesis consiste en obtener proteína en polvo a partir del suero de leche preservando su valor nutricional y funcional. Las proteínas del suero son altamente sensibles a tratamientos térmicos intensos, pudiendo sufrir desnaturalización, pérdida de solubilidad y disminución de su funcionalidad tecnológica. Por ello, el método de secado debe priorizar la mínima alteración estructural de estas biomoléculas, siendo este el factor más determinante dentro del estudio (Walstra et al., 2006; Smithers, 2008).

La estabilidad microbiológica (20%): Se considera como el segundo criterio de mayor importancia, ya que la reducción de la actividad de agua mediante el secado influye directamente en la conservación del producto y en la prevención del crecimiento microbiano. Un producto con baja humedad residual presenta mayor vida útil, menor riesgo de contaminación y mejores condiciones de almacenamiento. La literatura sobre conservación de alimentos establece que la estabilidad microbiológica es esencial en productos lácteos deshidratados destinados al consumo humano (Jay, 2000; Fennema, 2010).

El costo operativo del proceso (15%): Se incluye debido a su relevancia en la viabilidad técnica y económica de la implementación del proceso, especialmente considerando una posible aplicación a escala industrial. Aunque la calidad del producto es prioritaria, los costos energéticos, el consumo de equipos y el mantenimiento también representan factores importantes para la sostenibilidad del proceso. Métodos como la liofilización presentan mayores costos de operación en comparación con otros sistemas de secado convencionales.

El requerimiento de equipos especiales (15%): Se pondera considerando la disponibilidad real de equipos dentro de la universidad para el desarrollo experimental de la investigación. Debido a que la institución cuenta con liofilizador y Spray Drying, estos métodos presentan mayor viabilidad práctica para la ejecución de ensayos

experimentales, mientras que otros sistemas como el secado por tambor o al vacío presentan menor accesibilidad. Este criterio permite evaluar no solo la complejidad tecnológica, sino también la factibilidad real de aplicación dentro del alcance de la tesis.

El tiempo de secado (10%): Influye directamente en la eficiencia operativa del proceso y en la capacidad de producción. Métodos con menor tiempo de procesamiento pueden resultar más convenientes desde el punto de vista industrial; sin embargo, en esta investigación se le asigna una menor ponderación debido a que la prioridad principal no es la velocidad de producción, sino la conservación proteica.

La humedad final del producto (10%): Se considera porque representa un parámetro clave en la estabilidad física, microbiológica y el almacenamiento del polvo proteico. Una menor humedad residual mejora la conservación del producto y reduce fenómenos como aglomeración, oxidación y deterioro microbiológico.

La liofilización obtiene la mayor puntuación total de 8,4 dentro de la matriz de evaluación multicriterio, por lo que se selecciona como el método más adecuado para la obtención de proteína en polvo a partir del suero de leche.

Este resultado se debe principalmente a su alta capacidad para conservar la estructura y funcionalidad de las proteínas, garantizar una mayor estabilidad microbiológica y alcanzar bajos niveles de humedad final en el producto, aspectos que representan los criterios de mayor importancia dentro de la investigación.

Aunque presenta mayor costo operativo y mayor tiempo de secado en comparación con otros métodos, la disponibilidad del liofilizador en la universidad y la calidad superior del producto final justifican su selección como la mejor alternativa para el desarrollo experimental de la tesis.

2.3. DESCRIPCION DEL PROCESO EXPERIMENTAL SELECCIONADO

El proceso para la obtención de proteína en polvo a partir del suero de leche se desarrolló mediante una serie de etapas que permitieron transformar el subproducto líquido en un ingrediente de alto valor nutricional.

A continuación, se describen las operaciones unitarias aplicadas:

2.3.1 Recolección de materia prima

El suero de leche utilizado como materia prima es obtenido del proceso de elaboración de cuajada. Durante este proceso, al producirse la coagulación de la leche y la separación de la cuajada, se genera el suero como subproducto líquido. Posteriormente, el suero es recolectado en recipientes limpios y trasladado al laboratorio para su procesamiento.

Fig. II- 1: Recolección de suero de leche

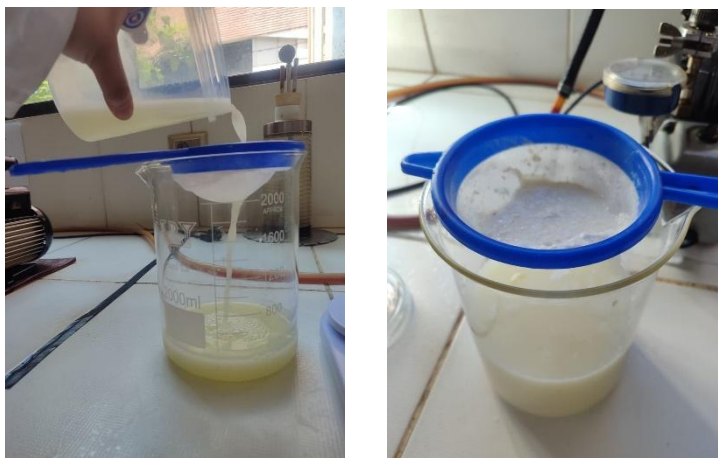


Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3.2 Filtración del suero de leche

La filtración tiene como finalidad eliminar partículas gruesas y cualquier residuo sólido proveniente del proceso de cuajado. Inicialmente, el suero es pesado y posteriormente pasa a través de un colador previamente desinfectado. Después de la filtración, el suero es pesado nuevamente con el fin de determinar las pérdidas generadas durante esta etapa, obteniendo un fluido más limpio y adecuado para el proceso de concentración.

Fig. II- 2: Filtrado del suero



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3.3 Concentrado del suero de leche

La concentración del suero se realiza en un rotavapor a 50 °C, equipo que permite eliminar parte del agua del suero a través de evaporación, sin someterlo a temperaturas elevadas que puedan desnaturalizar las proteínas. Esta operación es fundamental para aumentar los sólidos totales antes del proceso de liofilización.

Inicialmente, el suero presenta un contenido de 8 °Brix, valor que se determina mediante un refractómetro Abbe antes de ser colocado en el matraz balón. Posteriormente, el suero previamente filtrado se coloca en el matraz y se introduce en el baño térmico del rotavapor.

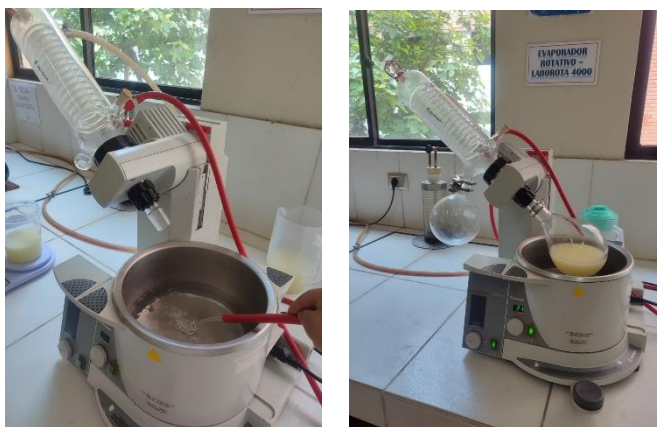
Durante la operación, el balón gira de manera continua, lo que incrementa la superficie de evaporación y favorece la transferencia de calor. Simultáneamente, se aplica vacío mediante una bomba, reduciendo la presión a permitiendo que el agua se evapore a temperaturas inferiores a las de ebullición a presión atmosférica. La presión de vacío utilizada durante este proceso es de

Una vez alcanzado el nivel de concentración esperado, se miden nuevamente los °Brix utilizando el refractómetro Abbe como parámetro de control. Para este trabajo, los valores finales oscilan entre 30 °Brix y 40 °Brix, dependiendo de la corrida

experimental. Esta concentración adecuada permite reducir de manera significativa el tiempo de liofilización posterior y mejorar el rendimiento del producto final.

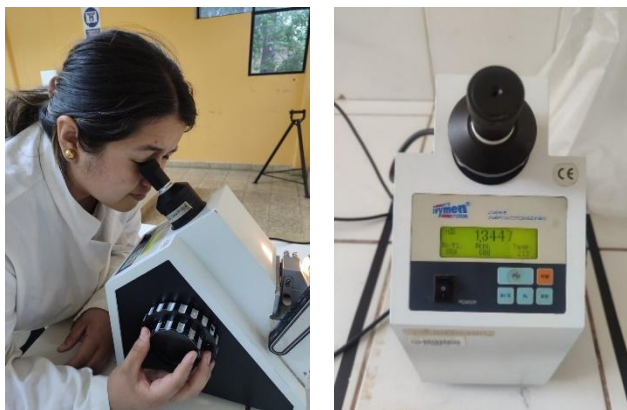
Finalmente, el concentrado se transfiere a recipientes limpios, se deja enfriar a temperatura ambiente y se procede a la etapa de congelación, previa a su secado por liofilización.

Fig. II- 3: Concentración del suero



Fuente: Elaboración propia, 2025

Fig. II- 4: Medición de °Brix en Refractómetro



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3.4 Congelación del suero concentrado

El suero concentrado se coloca previamente en bandejas planas de tecnopor, distribuyéndolo en volúmenes de 30 mL y 40 mL, los cuales corresponden a las variables del diseño experimental establecido en la investigación. Estos volúmenes

permiten formar una capa delgada y uniforme, condición necesaria para asegurar una congelación eficiente y favorecer la posterior sublimación durante la liofilización.

Una vez distribuido en las bandejas, el producto se introduce en un Ultra congelador a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde permanece durante 13 horas hasta lograr una congelación completa.

Fig. II- 5: Platos de Tecnopor



Fuente: Elaboración propia, 2025

Fig. II- 6: Ultra congelador



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3.5 Liofilización de la muestra

Una vez que el suero está completamente congelado, la muestra se retira de los platos y se coloca en las bandejas del liofilizador, donde pasa por dos procesos importantes:

a) Secado primario

El secado primario se lleva a cabo durante 7 horas, etapa en la cual el hielo se transforma directamente en vapor por sublimación, A una presión de 193,99 mmHg y $-90,2^{\circ}\text{C}$ de temperatura, controladas automáticamente por el liofilizador, evitando así la desnaturalización de las proteínas.

b) Secado secundario

Una vez finalizado el secado primario, se realiza el secado secundario durante 3 horas, con el objetivo de eliminar la humedad residual que permanece adsorbida en el producto, garantizando que el polvo final alcance la humedad mínima necesaria para su estabilidad y conservación.

Fig. II- 7: Liofilizador



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3.6 Triturado del producto

Una vez finalizado el proceso de liofilización, el producto obtenido presenta una estructura frágil y porosa, por lo que es necesario tritarlo para obtener un polvo homogéneo y facilitar su posterior análisis. El material seco se tritura cuidadosamente utilizando un mortero hasta lograr un tamaño de partícula uniforme.

Fig. II- 8: Triturado en mortero



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3.7 Medición de la humedad

Luego de obtener el polvo, se procede a la medición de la humedad mediante una termobalanza digital, con el fin de verificar la eficacia del proceso de secado y confirmar que la muestra alcance la humedad mínima necesaria para su estabilidad. Para este análisis, se toma una porción representativa del polvo y se determina su contenido de humedad mediante el método correspondiente, lo que permite evaluar el grado de deshidratación final del producto y asegurar que cumpla con los requisitos adecuados para su conservación y posterior caracterización.

Fig. II- 9: Termobalanza

Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3.8 Recolección y envasado de las proteínas en polvo

Después de determinar la humedad final del producto, se procede a la etapa de recolección y envasado de la proteína en polvo.

El material triturado y completamente seco se reúne cuidadosamente para evitar pérdidas y asegurar una muestra representativa y homogénea.

Una vez recolectado, el polvo se envasa inicialmente en bolsas herméticamente cerradas, con el propósito de almacenar temporalmente el producto y reunir la cantidad suficiente para su etapa final de envasado. Estas bolsas permiten proteger la muestra del contacto con la humedad ambiental y posibles contaminaciones.

Posteriormente, cuando se obtiene el volumen necesario de proteína, se realiza el envasado al vacío, lo cual garantiza una mejor conservación del producto al reducir la presencia de oxígeno y evitar la absorción de humedad. Este procedimiento permite mantener la estabilidad del polvo hasta su posterior análisis y utilización dentro del desarrollo de la investigación.

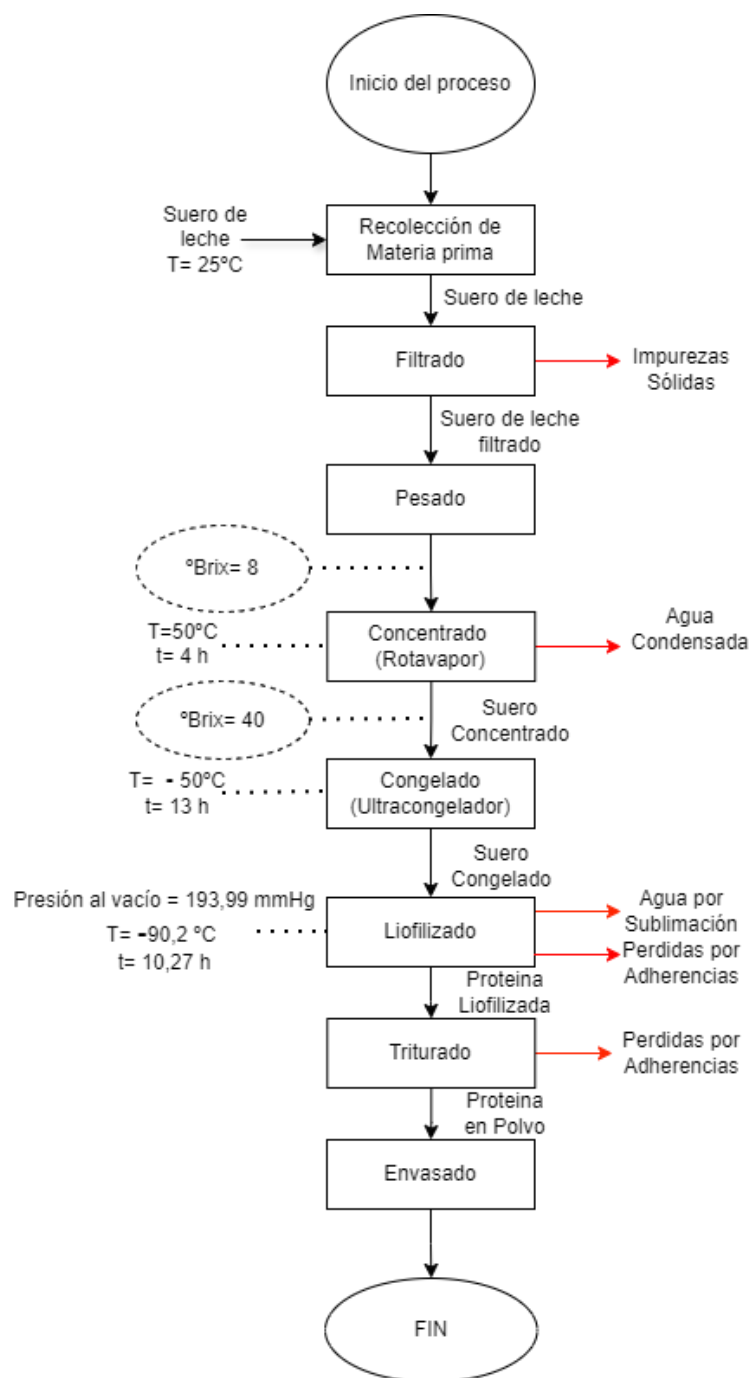
Fig. II- 10: Proteínas en polvo obtenida



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3.9 Diagrama para la obtención de proteína en polvo

Fig. II-11: Diagrama para la obtención de proteína en polvo



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4. DISEÑO FACTORIAL

El diseño factorial es un tipo de experimento diseñado que permite estudiar los efectos que varios factores pueden tener sobre una variable de respuesta. En los diseños factoriales de 2 niveles, cada factor experimental tiene únicamente dos niveles, generalmente representados como nivel bajo (−1) y nivel alto (+1), incluyendo todas las combinaciones posibles entre ellos, lo que permite evaluar tanto los efectos individuales como las interacciones entre factores. (Minitab, 2026)

El diseño experimental aplicado en este estudio permite identificar las variables más significativas del proceso, optimizando los resultados y contribuyendo a la reducción de los costos de producción. Este diseño se lleva a cabo directamente en el liofilizador, donde se evalúan los parámetros operativos disponibles mediante diferentes pruebas, lo que permite determinar cuáles de ellos ejercen una mayor influencia en el comportamiento del proceso.

2.4.1. Variables dependientes

- Humedad

2.4.2. Variables independientes

- Concentración del suero

- Volumen de la muestra

El diseño factorial planteado para el presente proyecto de investigación es 2^k . Es decir, se aplica un diseño factorial 2^2 , en el cual se tienen 2 factores o variables independientes, 2 niveles y 3 repeticiones, sobre los cuales se evalúa la variable de respuesta.

El número de experimentos que se realiza se expresa en la siguiente ecuación:

$$\text{Nº experimentos} = (2^2) \times 3 = 12$$

Esto significa que se realizan 4 experimentos, correspondientes a las combinaciones posibles de los dos factores en sus dos niveles. Cada uno de estos cuenta con 3 repeticiones, lo que da un total de 12 experimentos.

Los factores o variables que influyen más en el proceso son determinados según pruebas realizadas: estos son el volumen y la concentración en °Brix.

En la Tabla II-2 se ven las variables y niveles que se toman en cuenta.

Tabla II- 2 : variables y niveles

		Niveles	
Variables	Unidad de medida	Bajo (-)	Alto (+)
Concentración de suero (Solidos Solubles)	°Brix	20	30
Volumen de la muestra	mL	30	40

Fuente: Elaboración propia, 2026

Los niveles son representados por -1 y +1 donde: **-1** representa el nivel bajo y **+1** el nivel alto de cada variable.

La Tabla II-3 muestra la matriz y plan de experimentos realizados.

Tabla II- 3: Matriz de experimentos y plan de experimentos

Prueba	Matriz de experimentos		Plan de experimentos	
	Variable 1	Variable 2	Concentración en °Brix	Volumen de muestra en mL
1	-1	-1	20	30
2	+1	-1	30	30
3	-1	+1	20	40
4	+1	+1	30	40
5	-1	-1	20	30
6	+1	-1	30	30
7	-1	+1	20	40
8	+1	+1	30	40
9	-1	-1	20	30
10	+1	-1	30	30
11	-1	+1	20	40
12	+1	+1	30	40

Fuente: Elaboración propia, 2026

A partir de este punto, las muestras se codifican para llevar a cabo la obtención de proteínas en polvo conforme a la siguiente tabla

Tabla II- 4: Matriz de experimentos y plan de experimentos

	Plan de experimentos			
Muestra	Concentración en °Brix	Volumen de muestra en mL	Humedad Observada	
M ₁₋₁	20	30	3,2518	Replica 1
M ₁₋₂	30	30	3,0824	
M ₁₋₃	20	40	3,8324	
M ₁₋₄	30	40	3,5002	
M ₂₋₅	20	30	3,3028	Replica 2
M ₂₋₆	30	30	3,0646	
M ₂₋₇	20	40	3,8017	
M ₂₋₈	30	40	3,5234	
M ₃₋₉	20	30	3,2785	Replica 3
M ₃₋₁₀	30	30	3,0798	
M ₃₋₁₁	20	40	3,7935	
M ₃₋₁₂	30	40	3,4738	

Fuente: Elaboración propia, 2026

Donde M₃₋₁₂:

$$M_{3-12}$$

M = Muestra

3 = Número de replica

12= Número de experimento

2.4.3. Especificaciones de las variables del diseño factorial

Las variables seleccionadas para el diseño factorial son el volumen de suero colocado en las bandejas y la concentración del suero antes de la liofilización.

La elección de estas variables se basa en criterios experimentales, ya que representan los factores que más influyen en el comportamiento del secado por sublimación y en el contenido final de humedad del producto liofilizado.

El volumen de muestra es una variable determinante en los procesos de liofilización, ya que define el espesor de la capa congelada, por tanto, la resistencia a la transferencia de masa durante la sublimación. En este proyecto se trabaja con dos niveles: 30 mL y 40 mL por bandeja, los cuales son determinados mediante pruebas experimentales.

Un volumen de 30 mL forma una capa más delgada, lo que facilita tanto la congelación como la sublimación, permitiendo un secado más rápido y una menor retención de humedad. En cambio, 40 mL generan una capa más gruesa, por lo que se evalúa cómo este mayor espesor afecta la pérdida de agua y la humedad final. De este modo, el rango entre 30 y 40 mL permite observar claramente cómo la cantidad de suero colocado influye en el comportamiento del proceso.

La concentración del suero también constituye una variable clave, ya que determina la cantidad de agua libre presente en la muestra antes del congelamiento. Un suero menos concentrado presenta mayor contenido de agua, lo que hace que el secado sea más lento y puede dejar mayor humedad residual. En cambio, un suero más concentrado contiene menos agua disponible para sublimar, por lo que se evalúa si esto mejora la eficiencia del proceso y si el polvo final presenta mejor textura, porosidad y estabilidad. Al comparar estos dos niveles, es posible analizar cómo la concentración afecta tanto el comportamiento del secado como la calidad del producto obtenido.

En conjunto, estas dos variables permiten estudiar de manera clara y directa cómo pequeños cambios en el volumen y la concentración modifican significativamente la humedad final del suero liofilizado, considerado el parámetro más importante para lograr un producto estable y de buena calidad.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta el análisis de los datos obtenidos durante el proceso de obtención de proteína en polvo a partir del suero de la leche. Se describe la caracterización inicial del suero, así como la evaluación de los resultados experimentales generados bajo el diseño factorial 2² aplicado en la etapa de liofilización.

El objetivo es interpretar el comportamiento del producto frente a las variaciones del volumen y la concentración del suero, y analizar su impacto sobre la humedad final del polvo obtenido, garantizando la calidad y estabilidad del producto liofilizado.

3.1.1. Presentación de los resultados de la caracterización de la materia prima

El análisis de la materia prima para el desarrollo experimental en el presente trabajo de Investigación Aplicada se realizó en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo CEANID de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija - Bolivia.

En la Tabla III-1 se muestra los resultados obtenidos, (ver Anexo 1)

Tabla III- 1: Caracterización fisicoquímica y microbiológica del suero

Parámetro	Método / Norma	Unidad	Resultado
Acidez titulable (como ácido láctico)	NB 33042:23	g/100 g	0,11
Ceniza	NB 33041:23	g/100 g	1,28
Densidad relativa (20°C/20°C)	NB 33040:22	g/mL	1,0342
Grasa	NB/ISO 19662:23	g/100 g	0,46
Hidratos de carbono	NB 312031:10	g/100 g	5,87
Proteína total (N×6,38)	NB ISO 8968-1:22	g/100 g	1,14
pH (20°C)	NB 3318005:02 (mod)	—	6,57
Sólidos totales	NB 231:1-98 (mod.)	g/100 g	8,75
Valor energético	NB 312032:06	Kcal/100 g	32
Bacterias aerobias mesófilas	NB 32003:05	UFC/mL	$3,8 \times 10^7$
Coliformes totales	NB 32005:02	UFC/mL	$1,5 \times 10^5$
Mohos y levaduras	NB 32006:03	UFC/mL	$3,9 \times 10^2$

Fuente: CEANID,2025

La humedad del suero se determina por diferencia a partir del contenido de sólidos totales, aplicando la siguiente relación: $\text{Humedad (\%)} = 100 - \text{Sólidos Totales (\%)}$. (OMS, 2003)

Considerando que los sólidos totales obtenidos fueron de 8,75 %, se calcula una humedad de 91,25 %, lo que indica un alto contenido de agua. Este resultado justifica la necesidad de realizar una etapa de concentración previa al proceso de liofilización para favorecer la obtención de proteína en polvo.

3.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE PRODUCTO OBTENIDO

3.2.1. Diseño factorial de la proteína en polvo obtenida

3.2.1.1 Variable respuesta: Humedad

En la Tabla III-2 se presentan los datos ingresados al software Minitab, de acuerdo con el diseño factorial planteado para la humedad como variable respuesta. Cada factor o variable independiente presenta un nivel superior (+1) y un nivel inferior (−1).

Tabla III- 2 : Datos para determinar la humedad

N° Muestra	Variables independientes		Variable dependiente
	Concentración en °Brix	Volumen en ml	Humedad (%)
M ₁₋₁	20	30	3,2518
M ₁₋₂	30	30	3,0824
M ₁₋₃	20	40	3,8324
M ₁₋₄	30	40	3,5002
M ₂₋₅	20	30	3,3028
M ₂₋₆	30	30	3,0646
M ₂₋₇	20	40	3,8017
M ₂₋₈	30	40	3,5234
M ₃₋₉	20	30	3,2785
M ₃₋₁₀	30	30	3,0798
M ₃₋₁₁	20	40	3,7935
M ₃₋₁₂	30	40	3,4738

Fuente: Elaboración propia, 2026

La Tabla III-2 presenta los resultados obtenidos del diseño factorial aplicado, donde las variables independientes corresponden a la concentración del suero medida en °Brix 20 y 30 °Brix y al volumen de muestra utilizado 30 y 40 mL, mientras que la variable dependiente evaluada es el porcentaje de humedad final del producto liofilizado.

Se observa que las muestras trabajadas con una concentración de 30 °Brix y un volumen de 30 mL presentan, en general, menores valores de humedad, lo que indica una mayor eficiencia en el proceso de liofilización y una mejor eliminación del agua residual. En cambio, las muestras con 20 °Brix y 40 mL registran los mayores porcentajes de humedad, lo que evidencia una menor eficiencia en el secado debido al mayor contenido de agua presente en la muestra.

Asimismo, al incrementar la concentración de 20 a 30 °Brix, la humedad final tiende a disminuir, mientras que, al aumentar el volumen de 30 a 40 mL, la humedad se incrementa.

Mediante el análisis estadístico realizado en el software Minitab, se determina que la muestra M3-9, identificada en la tabla con color amarillo, es la muestra ganadora, presentando un valor de humedad de 3,2785 %.

Esta selección se establece considerando la optimización de las condiciones experimentales y la estabilidad del producto final, siendo la muestra más adecuada para la continuación de los análisis posteriores de la investigación.

En la Tabla III-3, se muestra el resumen del diseño factorial.

Tabla III- 3: Resumen del diseño factorial

Resumen del diseño			
Factores:	2	Diseño de la base:	2; 4
Corridas:	12	Réplicas:	3
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

Fuente: Minitab,2026

3.2.1.2 Análisis de varianza (ANOVA)

Tabla III- 4 : Coeficientes codificados variable respuesta Humedad

Coeficientes codificados						
Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		3,41543	0,00608	561,45	0	
Volumen (ml)	0,47747	0,23873	0,00608	39,24	0	1
Concentración (Brix)	-0,256	-0,128	0,00608	-21,04	0	1
Volumen(ml)* Concentración (Brix)	-0,054	-0,027	0,00608	-4,44	0,002	1

Fuente: Minitab,2026

En este análisis, el valor del coeficiente indica cómo cambia la humedad cuando varía cada factor, mientras que el valor p muestra si ese efecto es realmente significativo, considerando significativo todo valor menor a 0.05. El valor T refleja la fuerza del efecto, y el error estándar indica la precisión de la estimación del coeficiente. Finalmente, el FIV permite verificar que los factores no interfieren entre sí; valores cercanos a 1 confirman que el modelo es estable y confiable.

Los resultados del análisis de coeficientes codificados muestran que tanto el volumen como la concentración (°Brix) influyen de manera significativa en la humedad final del producto liofilizado. El modelo presenta un valor constante de 3,41543, que corresponde a la humedad promedio cuando los factores están en sus niveles centrales. El volumen tiene un coeficiente positivo (0,23873), lo que significa que, al aumentar

el volumen, la humedad también aumenta, obteniéndose un producto menos deshidratado.

Por el contrario, la concentración °Brix posee un coeficiente negativo $-0,128$, indicando que mayores valores de °Brix reducen la humedad, favoreciendo un polvo más seco, la interacción entre ambos factores presenta un coeficiente de $-0,027$, lo que demuestra que la combinación de volumen y °Brix también afecta la humedad, aunque en menor magnitud.

Finalmente, los valores FIV (Factor de Inflación de la Varianza) iguales a 1 confirman que los factores están bien definidos y no interfieren entre sí, por lo que el modelo es confiable para interpretar cómo cada variable contribuye a obtener una menor humedad final. (Minitab, 2026)

3.2.1.3 Resumen del modelo

Tabla III- 5: Resumen del modelo

Resumen del modelo			
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,021073	99,60%	99,45%	99,10%

Fuente: Minitab,2026

Como se observa en la Tabla III-5, el modelo de regresión presenta un coeficiente de determinación R^2 de 99,60 %, lo que indica que explica el 99,60 % de la variabilidad total de la humedad.

El R^2 ajustado de 99,45 % confirma la adecuación del modelo considerando el número de parámetros estimados, mientras que el R^2 de predicción de 99,10 % evidencia una capacidad predictiva adecuada para nuevas observaciones. (Minitab, 2026)

La desviación estándar del error ($S = 0,021073$) refleja una alta precisión en las estimaciones del modelo. (Minitab, 2026).

3.2.1.4 Análisis de varianza (ANOVA)

Tabla III- 6: Análisis de varianza (ANOVA)

Análisis de Varianza (ANOVA)					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	0,889341	0,296447	667,57	0
Lineal	2	0,880582	0,440291	991,49	0
Volumen (mL)	1	0,683923	0,683923	1540,1	0
Concentración (Brix)	1	0,196659	0,196659	442,86	0
Interacciones de 2 términos	1	0,008759	0,008759	19,72	0,002
Volumen (mL)*Concentración (Brix)	1	0,008759	0,008759	19,72	0,002
Error	8	0,003553	0,000444		
Total	11	0,892894			

Fuente: Minitab,2026

El análisis de varianza presentado en la Tabla III-6 demuestra que el modelo completo es estadísticamente significativo (valor $p = 0.000$), lo que permite rechazar la hipótesis nula que plantea que los coeficientes del modelo son iguales a cero. Los efectos lineales de los factores resultan altamente significativos (valor $p = 0.000$), evidenciando que tanto el volumen como la concentración °Brix contribuyen de manera importante a la variación de la humedad final del producto liofilizado.

Entre ambos factores, el volumen explica la mayor proporción de la suma de cuadrados del modelo, identificándose como el factor con mayor influencia directa sobre la humedad.

Asimismo, la interacción entre volumen y °Brix también presenta significancia estadística (valor $p = 0.002$), indicando que el efecto de un factor depende del nivel del otro y confirmando que el comportamiento de la humedad no responde únicamente a los factores por separado, sino también a su combinación. Estos resultados validan la relevancia del modelo para describir el proceso y establecen las condiciones más adecuadas para minimizar la humedad del producto final.

3.2.1.5 Ecuación lineal

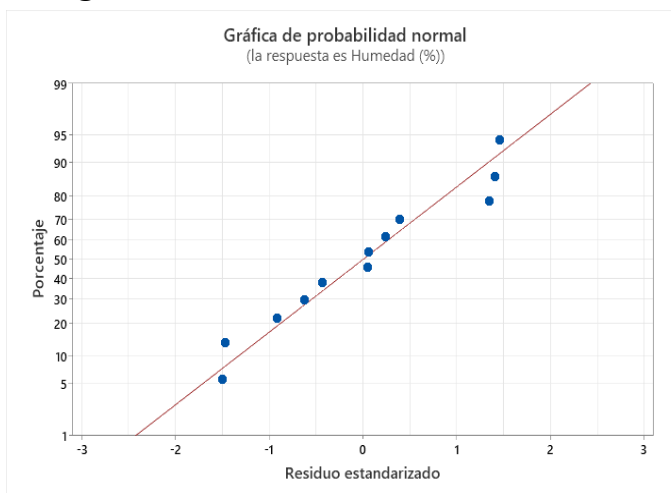
La ecuación de regresión lineal para la variable respuesta humedad es:

$$\text{Humedad (\%)} = 1,439 + 0,07476 \text{ Volumen (mL)} + 0,01222 \text{ Concentración (Brix)} - 0,001081 \text{ Volumen (mL)} * \text{Concentración (Brix)}$$

Este modelo permite predecir la humedad final de las proteínas en función de los niveles de concentración y volumen empleados, constituyendo una herramienta valiosa para el control y optimización del proceso productivo. (Minitab, 2026)

3.2.1.6 Gráfica de Probabilidad Normal

Fig. III- 1: Grafica de Probabilidad Normal



Fuente: Minitab,2026

La Gráfica de Probabilidad Normal de los residuos (Figura III-1) permite verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad, requisito fundamental para la validez del análisis de varianza (ANOVA) y del modelo de regresión aplicado en esta investigación. En esta gráfica, los residuos obtenidos experimentalmente se comparan con los valores teóricos de una distribución normal, lo que permite evaluar si presentan un comportamiento estadísticamente adecuado.

Se observa que la mayoría de los puntos se encuentran próximos a la línea de referencia, lo que indica que los residuos presentan una distribución aproximadamente normal y que no existen desviaciones importantes respecto al comportamiento esperado. Asimismo, no se identifican patrones sistemáticos ni valores atípicos significativos que puedan afectar la confiabilidad del modelo estadístico.

Este comportamiento confirma que los datos experimentales cumplen con el supuesto de normalidad, lo cual valida la aplicación del ANOVA y respalda las conclusiones obtenidas sobre el efecto del volumen y la concentración del suero en la humedad final del producto liofilizado.

3.2.1.7 Comparación entre la Humedad Observada y la Humedad modelo

Tabla III- 7: Comparación entre la Humedad observada y la Humedad del modelo

Muestra	Humedad Observada	Humedad Modelo	Error
M ₁₋₁	3,2518	3,2777	-0,0259
M ₁₋₂	3,0824	3,0757	0,0067
M ₁₋₃	3,8324	3,8092	0,0232
M ₁₋₄	3,5002	3,4991	0,0011
M ₂₋₅	3,3028	3,2777	0,0251
M ₂₋₆	3,0646	3,0757	-0,0111
M ₂₋₇	3,8017	3,8092	-0,0075
M ₂₋₈	3,5234	3,4991	0,0243
M ₃₋₉	3,2785	3,2777	0,0008
M ₃₋₁₀	3,0798	3,0757	0,0041
M ₃₋₁₁	3,7935	3,8092	-0,0157
M ₃₋₁₂	3,4738	3,4991	-0,0253

Fuente: Elaboración propia, 2026

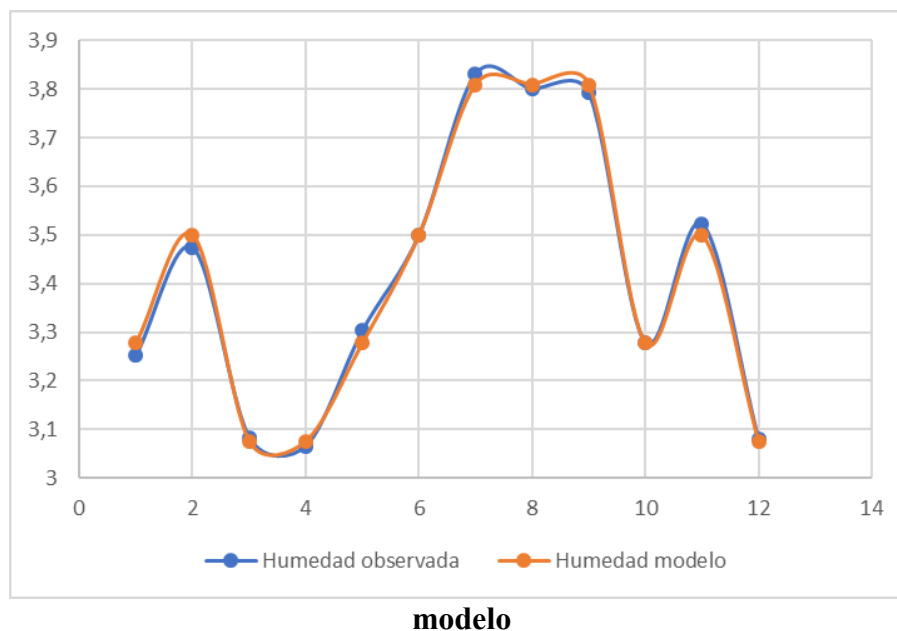
La selección de la muestra óptima se realiza a partir de la comparación entre los valores de humedad observada y los valores de humedad estimada por el modelo matemático. Para ello, se calcula el error individual de cada ensayo, entendido como la diferencia entre ambos valores.

Este análisis permite evaluar el grado de ajuste del modelo a los resultados experimentales y, por lo tanto, identificar cuál de las muestras representa de manera más precisa el comportamiento real del proceso.

Al analizar los errores obtenidos, se observa que la mayoría de las muestras presentan diferencias pequeñas, lo que confirma un buen ajuste general del modelo. Sin embargo, la muestra M3-9 destacó por presentar el menor error absoluto (0,0008), lo que indica que la humedad predicha por el modelo coincide prácticamente con la humedad medida experimentalmente.

Debido a esta mínima discrepancia, M3-9 se considera la muestra que mejor se ajusta al modelo, es decir, la muestra óptima. Esta selección respalda la consistencia del modelo y valida los parámetros utilizados en el diseño experimental.

Fig. III- 2: Gráfica de comparación entre la humedad observada y la humedad



Fuente: Elaboración propia, 2026

La gráfica de comparación entre la humedad observada y la humedad estimada por el modelo muestra una alta coincidencia entre ambos valores a lo largo de los 12 ensayos experimentales. Se puede observar que ambas curvas presentan un comportamiento muy similar, con diferencias mínimas entre los valores experimentales y los valores predichos, lo que indica un buen ajuste del modelo matemático desarrollado.

3.2.2. Resultados de Análisis fisicoquímicos, microbiológico y nutricional de la proteína en polvo obtenida.

El análisis del producto terminado del desarrollo experimental del presente trabajo se realizó en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija - Bolivia.

En la Tabla III-8 se muestra los resultados obtenidos. (ver Anexo 2)

Tabla III- 8: Resultados de Análisis Fisicoquímicos, microbiológicos y nutricional de la proteína en polvo obtenida.

Parámetro	Método / Norma	Unidad	Resultado
Índice de Solubilidad	NB 368:98	ml	0,3
Ceniza	NB 33041:23	g/100 g	14,59
Densidad relativa (20°C/20°C)	NB 34043:23	g/mL	1,0342
Grasa	NB 313019:06 (mod)	g/100 g	5,95
Hidratos de carbono	NB 312031:10	g/100 g	59,82
Proteína total (N×6,38)	NB ISO 8968-1-22	g/100 g	13,76
pH (20°C)	NB 3318005:02 (mod)	—	5,18
Sólidos totales	NB 231:1-98	g/100 g	94,12
Valor energético	NB 312032:06	Kcal/100 g	350
Bacterias aerobias mesófilas	NB 32003:05	UFC/mL	$10^1 < 1,0 \times (*)$
Coliformes totales	NB 32005:02	UFC/mL	$10^1 < 1,0 \times (*)$
Mohos y levaduras	NB 32006:03	UFC/mL	$10^1 < 1,0 \times (*)$
(*) : no se observa desarrollo NB: Norma Boliviana g/100g: gramos por cien gramos <menor que			

Fuente: CEANID ,2026

CAPÍTULO IV

BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA

4.1. INTRODUCCIÓN

El balance de materia se realiza con el propósito de determinar el rendimiento real del proceso y cuantificar cuánto suero se transforma efectivamente en proteína en polvo. Este análisis permite identificar las pérdidas en cada etapa, verificar la eficiencia del proceso de liofilización y asegurar que los resultados obtenidos sean coherentes con la cantidad de producto final obtenido.

4.1.1. Balance de materia por etapa

Etapa de Pesado

A= 322,22 gramos de suero

B= 322,22 gramos de suero



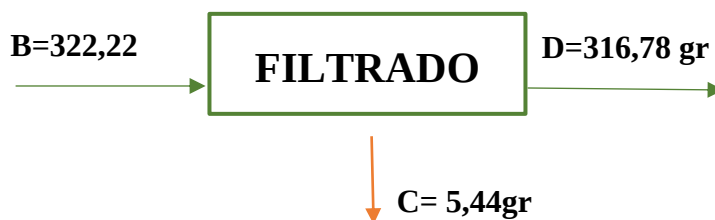
B=A= 322,22 granos de suero pesado

Etapa de filtrado

B= 322,22 gramos suero pesado

C= Pérdida de restos de cuajada en el suero

D= 316,78 gramos de suero filtrado



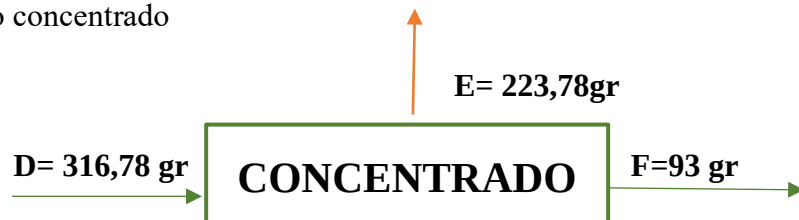
$C=B-D= 322,22\text{gr} - 316,78\text{gr} = 5,44\text{gr}$ de pérdida por restos de cuajada en el suero

Etapa de Concentrado

D= 316,78 gramos de suero filtrado

E= Pérdidas de agua por evaporación

F= 93 Suero concentrado



$E = D - F = 316,78\text{gr} - 93\text{ gr} = 223,78\text{gr}$ de pérdidas de agua por evaporación

Etapa de congelación

F=93 gr de suero concentrado

G= 93 gr de suero concentrado congelado



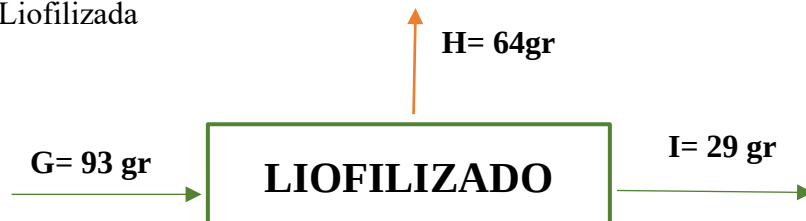
$F = G = 93\text{ gr}$ de suero concentrado congelado

Etapa de liofilización

G= 93 gr de suero concentrado congelado

H= Agua eliminada por sublimación

I= Proteína Liofilizada



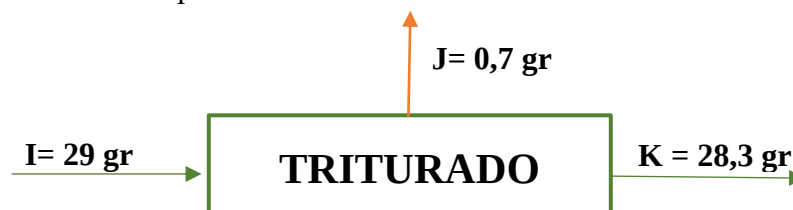
$H = G - I = 93\text{ gr} - 29\text{ gr} = 64\text{gr}$ de Agua eliminada por sublimación

Etapa de triturado

I = 29 gr de Proteína liofilizada

J= Pérdidas en el mortero

K = 28,3 gr de Proteína en polvo.



$J = I - K = 29\text{gr} - 28,3\text{gr} = 0,7\text{ gr}$ de pérdidas en el mortero.

Etapa de envasado

K= 28,3 gr de Proteína en polvo

L= 28,3 gr de Proteína en polvo



K= L = 28,3 gr de Proteína en polvo

4.1.2 Rendimiento

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Proteína en polvo}}{\text{Suero de leche}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{28,3}{322,22} \times 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = 8,78\%$$

El rendimiento obtenido es de 8,78 %, lo que indica que el proceso de obtención de proteína en polvo es eficiente. Las pérdidas observadas se deben principalmente a la filtración, concentración del suero y a la eliminación de agua durante la liofilización. A pesar de estas pérdidas inevitables, el rendimiento obtenido demuestra que la metodología aplicada permitió obtener un producto proteico de buena calidad.

4.2. BALANCE DE ENERGÍA

El balance de energía es una herramienta fundamental en la ingeniería de procesos, ya que permite evaluar la cantidad de energía que entra, se transforma y sale en cada etapa del sistema. Su aplicación facilita la comprensión del comportamiento térmico de los equipos y del proceso en general.

En el presente trabajo, se realiza el balance de energía en tres etapas clave: el rotavapor, el ultracongelado y la liofilización. Cada una de estas operaciones implicó diferentes mecanismos de transferencia de calor, como la evaporación del agua, la reducción de temperatura y la sublimación del hielo.

El análisis energético en estas etapas permitió determinar los requerimientos de energía necesarios para el desarrollo del proceso, así como comprender de mejor manera el funcionamiento de cada equipo.

4.2.1 Balance de energía en el Rotavapor

$D = 316,78\text{g} = 0,317\text{kg}$ de suero filtrado

$Q_a = \text{Calor absorbido}$

$F = 93\text{g} = 0,093\text{kg}$ Suero concentrado

$E = \text{Pérdidas de agua por evaporación}$

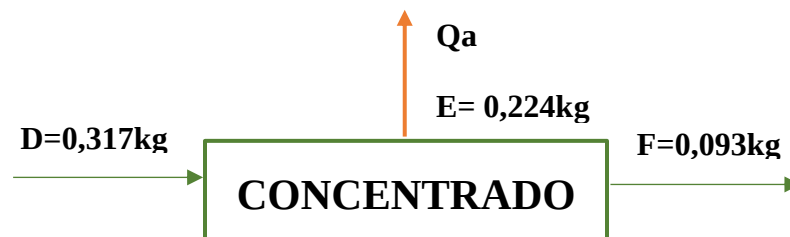


Tabla IV - 1: Parámetros empleados en la etapa de concentrado

Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Suero de Leche	D	Kg	0,317
Calor específico	Cp	kJ/kg°C	4,061
Temperatura inicial	Ti	°C	25
Temperatura final	Tf	°C	50
Entalpia de evaporizacion	ΔH_{vap}	KJ/Kg	2382,7
Calor absorbido	Qa	kJ	565,55
<i>Cp del suero obtenido de (Tabla de propiedades termicas de los alimentos)</i>			

Fuente: Elaboración propia,2026

$Q_a = \text{Calor sensible} + \text{Calor latente}$

$$Q_a = D * C_p * (T_f - T_i) + E * \Delta H_{vap}$$

$$Q_a = 0,317 * 4,016 * (50 - 25) + 0,224 * 2382,7$$

$$Q_a = 565,55 \text{KJ}$$

4.2.2 Balance de energía del Ultra congelador

F=93g=0,093kg de suero concentrado

G=93g=0,093kg de suero concentrado congelado

Qc= Calor cedido en el Ultra congelador

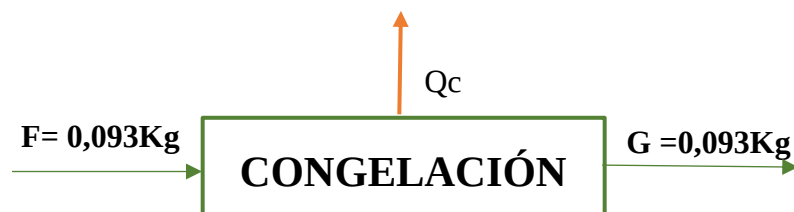


Tabla IV - 2: Parámetros empleados en la etapa de Congelación

Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Suero de Leche	F	Kg	0.093
Calor específico	Cp	kJ/kg°C	4,061
Temperatura inicial	Ti	°C	30
Temperatura final	Tf	°C	-50
Calor absorbido	Qa	kJ	-29,879
<i>Cp del suero obtenido de (Tabla de propiedades termicas de los alimentos)</i>			

Fuente: Elaboración propia,2026

Q_c = calor sensible

$$Q_c = D * C_p * (T_f - T_i)$$

$$Q_c = 0,093 * 4,016 * (-50 - 30)$$

$$Q_c = -29,879\text{KJ}$$

4.2.3 Balance de energía del Liofilizador

$G=93\text{g}=0,093\text{kg}$ de suero concentrado congelado

H = Agua eliminada por sublimación

I = Proteína liofilizada

Q_{ced} =Calor cedido en el liofilizador

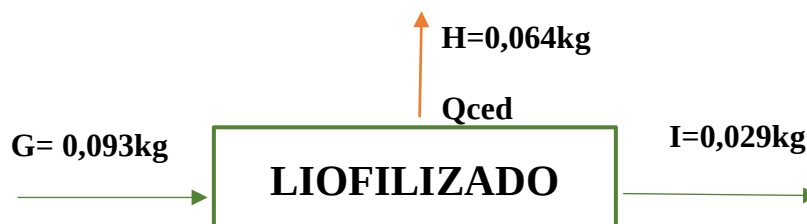


Tabla IV - 3: Parámetros empleados en la etapa de Liofilización

Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Suero de Leche	F	Kg	0,093
Calor específico	Cp	kJ/kg°C	4,061
Temperatura inicial	Ti	°C	-50
Temperatura final	Tf	°C	-86,5
Calor cedido	Qced	kJ	-15,014
<i>Cp del suero obtenido de (Tabla de propiedades termicas de los alimentos)</i>			

Fuente: Elaboración propia,2026

Qced = calor sensible

$$Q_{ced} = G * Cp * (Tf - Ti)$$

$$Q_{ced} = 0,093 * 4,016 * (-90,2 + 50)$$

$$Q_{ced} = -15,014\text{KJ}$$

Energía Eléctrica Total del proceso

Tabla IV - 4: Potencia y Tiempo utilizado en el proyecto

EQUIPO	POTENCIA (Kw)	TIEMPO (h)
Liofilizador	16,1	10,27
Bomba al vacío del liofilizador	0,3	10,27
Rotavapor	0,23	4
Bomba al vacío del Rotavapor	1,32	4
Ultracongelador	0,435	13
<i>La potencia de cada equipo fue obtenida de su placa de identificación, mientras que el tiempo corresponde al tiempo total de uso durante cada corrida experimental.</i>		

Fuente: Elaboración propia,2026

P= Potencia

E=energía

t= Tiempo

$$E_{total} = E_{consumida \text{ por el liofilizador}} + E_{consumida \text{ por la bomba de vacío}} \\ + E_{consumida \text{ por la bomba de vacío del rotavapor}} \\ + E_{consumida \text{ el rotavapor}} + E_{consumida \text{ por el ultracongelador}}$$

Para el liofilizador se tiene;

$$E_{consumida \text{ por el liofilizador}} = P_{\text{liofilizador}} * t$$

$$E_{consumida \text{ por el liofilizador}} = 16,1Kw * 10,27 \text{ h}$$

$$E_{consumida \text{ por el liofilizador}} = 165,347Kwh$$

Para la bomba de vacío se tiene;

$$E_{consumida \text{ por la bomba al vacío}} = P_{\text{bomba}} * t$$

$$E_{consumida \text{ por la bomba al vacío}} = 0,3Kw * 10,27 \text{ h}$$

$$E_{consumida \text{ por la bomba al vacío}} = 3,081kwh$$

Para la bomba al vacío del rotavapor se tiene;

$$E_{consumida \text{ por la bomba al vacío del Rotavapor}} = P_{\text{bomba}} * t$$

$$E_{consumida \text{ por la bomba al vacío del Rotavapor}} = 0,23 Kw * 4 \text{ h}$$

$$E_{consumida \text{ por la bomba al vacío del Rotavapor}} = 0,92 \text{ kwh}$$

Para el Rotavapor se tiene;

$$E_{consumida \text{ por el Rotavapor}} = P_{\text{Rotavapor}} * t$$

$$E_{consumida \text{ por el Rotavapor}} = 1,320Kw * 4 \text{ h}$$

$$E_{consumida \text{ por el Rotavapor}} = 5,28 \text{ kw}$$

Para el Ultracongelador se tiene;

$$E_{consumida \text{ por el Ultracongelador}} = P_{\text{Ultracongelador}} * t$$

$$E_{consumida \text{ por el Ultracongelador}} = 0,435 * 13$$

$$E_{consumida \text{ por el Ultracongelador}} = 5,655 \text{ kwh}$$

$$E_{total} = 180,283 \text{ kwh}$$

4.3. EVALUACIÓN DE COSTOS

4.3.1 Evaluación de Costos de la materia prima

En la Tabla IV-5 se presentan los costos de la materia prima, el suero de la leche.

Tabla IV - 5: Costos de materia prima

Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (Bs)
1	Suero de leche	gramos	322,22	0,644

Fuente: Elaboración propia,2026

4.3.2 Evaluación de Costos de Materiales

En la Tabla IV-6 se presentan los costos correspondientes de materiales utilizados durante el proceso y el envasado del producto final.

Tabla IV - 6: Costos de Materiales

Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (Bs)
1	Frasco de plástico	Pza.	1	7
2	Colador	Pza.	1	5
3	platos de tecnopor	Pza.	12	30
4	bolsas herméticas	Pza.	50	7
5	bolsas de vacío	Pza.	10	35
Total				84

Fuente: Elaboración propia,2026

4.3.3 Costos de Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la materia prima

En la Tabla IV-7 se presentan los costos correspondientes a los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados a la materia prima.

Tabla IV - 7: Costos de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del suero de leche

Nº	Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Costo (Bs)
1	Acidez	50	1	50
2	Ceniza	80	1	80
3	Densidad relativa	50	1	50
4	Grasa	120	1	120
5	Hidratos de Carbono	20	1	20
6	Proteína total	120	1	120
7	pH	25	1	25
8	Solidos totales	50	1	50
9	Valor energético	20	1	20
10	Bacterias aerobias mesófilas	110	1	110
11	Mohos y levaduras	110	1	110
12	Coliformes totales	110	1	110
total				865

Fuente: Elaboración propia,2026

4.3.4 Costos de Análisis fisicoquímicos, microbiológicos y nutricional del producto

En la Tabla IV-8 se presentan los costos correspondientes de análisis fisicoquímicos, microbiológicos y nutricionales del producto en polvo obtenido.

Tabla IV - 8: Costos de análisis fisicoquímicos, microbiológicos y nutricionales del producto en polvo obtenido

Nº	Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Costo (Bs)
1	Humedad	50	1	50
2	Ceniza	80	1	80
3	Índice de Solubilidad	30	1	30
4	Materia Grasa	120	1	120
5	Hidratos de Carbono	20	1	20
6	Proteína total	120	1	120
7	pH	45	1	45
8	Solidos totales	50	1	50
9	Valor energético	20	1	20
10	Bacterias aerobias mesófilas	110	1	110
11	Mohos y levaduras	110	1	110
12	Coliformes totales	110	1	110
total				865

Fuente: Elaboración propia,2026

4.3.4 Costos Energéticos

En la Tabla IV-9 se muestra los costos estimados de energía eléctrica. La energía eléctrica se calculó en función del consumo total obtenido del balance de energía

Tabla IV - 9: Costos Energéticos

Descripción	Precio Unitario (Bs)/kw	kw Utilizado	Costo total (Bs)
Energía eléctrica	0,84	180,283	151,437

Fuente: Elaboración propia,2026

El costo unitario de energía eléctrica que se utiliza en el presente trabajo se obtuvo a partir de una factura de consumo de SETAR, dividiendo el costo total de la energía utilizada entre la cantidad total de energía consumida (kWh). Mediante este cálculo se determinó un valor de 0,84 Bs/kWh, el cual fue empleado para estimar los costos energéticos de los equipos utilizados durante el proceso experimental.

4.3.5 Costos de servicios y materiales directos e indirectos

En la Tabla IV-10 se muestran los costos asociados a los servicios y materiales de apoyo requeridos durante el desarrollo del proyecto. Incluyen gastos de investigación, impresión, encuadernado, transporte y mano de obra

Tabla IV - 10: Costos de servicios y materiales directos e indirectos

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
Impresiones	hojas	400	160
Anillado	pieza	6	36
Mano de obra	hora	200	2000
Empastados	pieza	4	240
Transporte diario	Pasaje	30	180
TOTAL			2616

Fuente: Elaboración propia,2026

4.3.6 Costo total del proyecto

En la Tabla IV-11 se muestra el costo total del proyecto, tomando en cuenta todos los gastos realizados durante el desarrollo de la investigación.

Tabla IV - 11: Costo total del proyecto

N°	Descripción	Costos (Bs)
1	Costos de materia prima	0,644
2	Costos de materiales	84
3	Costo de Análisis fisicoquímicos y microbiológicos	1730
4	Costos Energéticos	151,437
5	Costos de servicios y materiales directos e indirectos	2616
Total (Bs)		4582,081

Fuente: Elaboración propia 2026

4.3.7 Determinación del costo unitario de las proteínas en polvo

La Tabla IV-12 presenta los gastos considerados para la determinación del costo unitario de la proteína en polvo obtenida a partir del suero de leche.

Tabla IV - 12: Resumen de gastos de producción en la obtención de proteína en polvo

N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costos Total (Bs)
1	Costos de materia prima	gramos	322,22	0,002 bs/g	0,644
2	Costos Energéticos	kwh	180,283	0,84	151,437
3	Mano de Obra	horas	14,5	10	145
Total					297,081

Fuente: Elaboración propia, 2026

Para determinar el costo unitario de la proteína en polvo obtenida, se considera el costo del proceso experimental y la cantidad de producto final obtenida.

El costo total del proceso es 297,081 Bs, y la cantidad de producto obtenido es 28,3 g.

A partir de estos datos, se calcula el costo unitario mediante la siguiente relación:

$$\text{Costo Unitario} = \frac{\text{Costo total}}{\text{Cantidad de producto}}$$

Reemplazando:

$$\text{Costo Unitario} = \frac{297,081\text{Bs}}{28,3\text{g}}$$

$$\text{Costo Unitario} = 10,5 \text{ Bs/g}$$

El costo unitario de la proteína en polvo obtenida a partir del suero de leche es de 10,5 Bs por gramo, valor que resulta elevado debido a que el proceso se desarrolla a escala experimental. El principal factor que influye en este costo es el alto consumo energético, especialmente durante la etapa de liofilización, además de la baja cantidad de producto final obtenida y los gastos asociados a la materia prima y mano de obra. En estas condiciones, la viabilidad económica para su comercialización directa es limitada; sin embargo, a nivel industrial, este costo puede reducirse significativamente mediante la optimización del proceso, el incremento en la capacidad de producción y la disminución de costos operativos, permitiendo una mayor competitividad del producto en el mercado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El suero de leche producido en el departamento de Tarija constituye una materia prima adecuada para la obtención de proteínas en polvo, ya que presenta características fisicoquímicas y microbiológicas que permiten su aprovechamiento y procesamiento experimental.
- La aplicación del proceso de liofilización permite reducir significativamente el contenido de humedad del suero concentrado, obteniendo un producto en forma de polvo que facilita su manipulación, almacenamiento y conservación.
- El producto obtenido presenta un contenido de proteína de 13,76 %, valor que se encuentra dentro del rango reportado para suero de leche en polvo de acuerdo con la *Standard for Whey Powders* establecida por la Codex Alimentarius Commission, lo que demuestra que el proceso aplicado permite conservar las proteínas presentes en el suero.
- A través del análisis experimental, se identificaron las variables óptimas de operación del proceso, determinándose que la muestra M3-9 presenta el mejor comportamiento, con una humedad final de 3,2785 % y el menor error respecto al modelo (0,0008), dentro de las condiciones evaluadas.
- Los análisis microbiológicos realizados indican que el producto obtenido cumple con condiciones básicas de Inocuidad, lo que demuestra que el proceso aplicado permite obtener un producto seguro para su posible uso en aplicaciones alimentarias.
- El balance de materia permitió determinar el rendimiento del proceso, evidenciando la eficiencia de la transformación del suero de leche en proteína en polvo, considerando las pérdidas generadas durante las etapas de concentración, congelación y liofilización.
- El análisis del producto final realizado por CENID reporta una humedad de 5,88%, valor superior al obtenido experimentalmente durante el proceso de liofilización 3,2785%. Esta diferencia refleja cambios ocurridos durante el almacenamiento.
- Se concluye que la obtención de proteína en polvo a partir del suero de leche, bajo las condiciones desarrolladas a escala experimental, no presenta viabilidad económica

para su comercialización directa, debido a que el costo unitario es de 10,5 Bs por gramo, valor influenciado principalmente por el alto consumo energético del proceso de liofilización y la baja cantidad de producto final obtenida. Sin embargo, el proceso representa una alternativa de aprovechamiento del suero de leche, ya que a nivel industrial la optimización de las operaciones y el incremento de la producción pueden contribuir a la reducción de costos y mejorar su viabilidad económica.

5.2. RECOMENDACIONES

- Mantener los valores de volumen y concentración del suero utilizados en la muestra ganadora M3-9, ya que permiten obtener un polvo con humedad baja y uniforme.
- Preparar las bandejas con capas finas y uniformes para asegurar una congelación y sublimación homogénea durante el proceso de liofilización.
- Se recomienda tener especial cuidado durante el almacenamiento del producto, evitando su exposición a la humedad del ambiente, ya que esto puede incrementar el contenido de humedad final y afectar la estabilidad del polvo.
- Se recomienda investigar otros métodos de envasado que permitan mejorar la conservación del producto, prolongar su vida útil y reducir la absorción de humedad, evaluando alternativas que garanticen mayor protección frente a las condiciones ambientales.
- Evaluar la viabilidad del secado por aspersión (*spray drying*) como alternativa a la liofilización, con el fin de comparar rendimientos, eficiencia y características del producto final.
- Se recomienda utilizar la proteína en polvo obtenida a partir del suero de leche como aditivo en bebidas energéticas y nutricionales, ya que contribuye al aporte de proteínas y energía, además de mejorar el valor nutricional del producto final. Asimismo, puede emplearse como ingrediente complementario en la elaboración de productos alimenticios como batidos, yogures, productos de panificación, helados y postres, debido a que favorece el aumento de sólidos lácteos, aporta sabor característico y mejora la textura.