

Aprovechamiento del lactosuero para la industria alimentaria

Utilization of whey in the food industry

Cristhian Gallardo^{1*}; Juan Solano-Gaviño¹

Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

* Autor correspondiente: t1042400121@unitru.edu.pe (C. Gallardo).

ORCID de los autores:

C. Gallardo: <https://orcid.org/0009-0007-3317-5711>

J. Solano-Gaviño: <https://orcid.org/0000-0003-1374-9558>

RESUMEN

El presente estudio analiza la valoración del lactosuero, subproducto lácteo con reconocido potencial nutricional y funcionalidad en el sector alimentario. Mediante revisión de literatura y análisis bibliométrico, se evidenció un crecimiento de la producción científica durante el periodo 2010 - 2026. Las áreas temáticas predominantes fueron las ciencias ambientales (42%), ciencias de la vida (25%) y ciencias de los materiales (21%). Inicialmente, la temática científica se centró en la producción de biogás y la separación de componentes para aprovechamiento industrial, pero evolucionó hacia líneas más complejas, destacando los estudios en seguridad alimentaria, propiedades nutraceuticas orientadas a la modulación de procesos metabólicos y el impacto ambiental. El análisis de coocurrencia de palabras clave identificó cuatro clústeres con temática en seguridad alimentaria, transformación química y biotecnológica, desafíos ambientales y energía renovable. El lactosuero posee un alto contenido en lactosa, proteínas solubles, vitaminas y minerales, demostrándose que sus proteínas poseen importantes propiedades bioactivas, lo que ha impulsado su uso en alimentos funcionales y suplementos. Además, su versatilidad permite la innovación en nuevas tecnologías, promoviendo la economía circular. Futuros estudios deberían centrarse en la aplicación de tecnologías emergentes para el aprovechamiento del lactosuero en la nutrición, así como en los efectos positivos de sus compuestos fenólicos sobre la salud.

Palabras clave: Metabolismo; alimento funcional; biomateriales; revalorización; bioeconomía circular.

ABSTRACT

This study analyses the value of whey, a dairy by-product with recognized nutritional potential and functionality in the food sector. Through a review of the literature and bibliometric analysis, growth in scientific production was evident during the period 2010-2026. The predominant subject areas were environmental sciences (42%), life sciences (25%), and materials sciences (21%). Initially, the scientific focus centred on biogas production and the separation of components for industrial use, but it evolved towards more complex areas, notably studies on food safety, nutraceutical properties aimed at modulating metabolic processes, and environmental impact. The analysis of keyword co-occurrence identified four clusters covering the themes of food safety, chemical and biotechnological processing, environmental challenges and renewable energy. Whey has a high content of lactose, soluble proteins, vitamins, and minerals, and its proteins have been shown to have important bioactive properties, which has driven its use in functional foods and supplements. In addition, its versatility allows for innovation in new technologies, promoting the circular economy. Future studies should focus on the application of emerging technologies for the use of whey in nutrition, as well as on the positive effects of its phenolic compounds on health.

Keywords: Metabolism, functional food, biomaterials, revaluation, circular bioeconomy.

Recibido: 17-03-2026.
Aceptado: 22-06-2026.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El lactosuero, que surge como un derivado del procesamiento lácteo, posee propiedades nutricionales y funcionales de amplia relevancia. Aun así, en muchos países en desarrollo, su uso continúa siendo limitado y frecuentemente se desecha (Santos et al., 2024).

Aunque su composición difiere de la leche entera en términos de concentración de nutrientes, el lactosuero mantiene alrededor del 55% de los componentes presentes en la leche original, entre ellos sobresalen, la lactosa, proteínas solubles, vitaminas, lípidos y minerales, que aportan un importante valor nutricional (Huertas, 2009).

La industria láctea tradicional se enfrenta actualmente a múltiples desafíos, que abarcan desde la huella de carbono del sector y los dilemas morales vinculados a la explotación animal, hasta un rendimiento que depende en gran medida de las condiciones climáticas (Piazenski et al., 2024).

En este contexto, la gestión del lactosuero representa una problemática ambiental relevante, debido a su alta carga orgánica proveniente de la lactosa, las proteínas y las grasas. El vertido inadecuado de este efluente en cuerpos de agua promueve el crecimiento bacteriano, ya que la lactosa actúa como un sustrato, reduciendo el contenido de oxígeno disuelto y, en consecuencia, deteriorando la calidad del ecosistema acuático (Huertas, 2009). Asimismo, la disposición directa del lactosuero en suelos agrícolas puede modificar sus propiedades fisicoquímicas, afectando negativamente el rendimiento de los cultivos (Araujo Guerra et al., 2013).

Anualmente, se generan entre 180 y 200 millones de toneladas de suero de leche a nivel mundial, de ellas apenas un 50% logra ser reutilizado correctamente. Esta brecha evidencia la urgencia de implementar modelos basados en bioeconomía

circular (Czarniecka-Skubina et al., 2025).

En consecuencia, la gestión de los vertidos lácteos representa un desafío ambiental significativo. Su tratamiento convencional se fundamenta en la integración de procesos fisicoquímicos y biológicos para la reducción de la carga orgánica (Quispe & Quispe, 2025). Las grandes empresas procesan aproximadamente la mitad de este recurso para obtener suero en polvo y derivados para uso alimentario y farmacéutico (Rohm et al., 2025). Ante esta situación, la investigación y el desarrollo tecnológico resultan fundamentales para mejorar la viabilidad económica del aprovechamiento del lactosuero.

Una línea prometedora consiste en su combinación con otros subproductos agroindustriales para formular ingredientes alimentarios funcionales y tecnológicamente viables (Raak & Corredig, 2023). Además se están investigando nuevos usos farmacéuticos de la proteína de suero, enfocándose en la prevención de enfermedades y la administración de fármacos (Gallo et al., 2022).

En este contexto, el suero está dejando de gestionarse como un residuo contaminante para integrarse como un insumo flexible en la elaboración de alimentos y productos de base biológica (Selmi et al., 2025), aproximadamente el 50% del volumen generado mundialmente permanece fuera de la cadena de valor alimentaria, evidenciando un desafío crítico de infrautilización (Lavelli & Beccalli, 2022).

Dado el notable aumento de artículos académicos enfocados en el lactosuero registrado en años recientes, se planteó un estudio de revisión la cual examina su potencial como ingrediente funcional en la industria alimentaria mediante un enfoque narrativo complementado con técnicas bibliométricas.

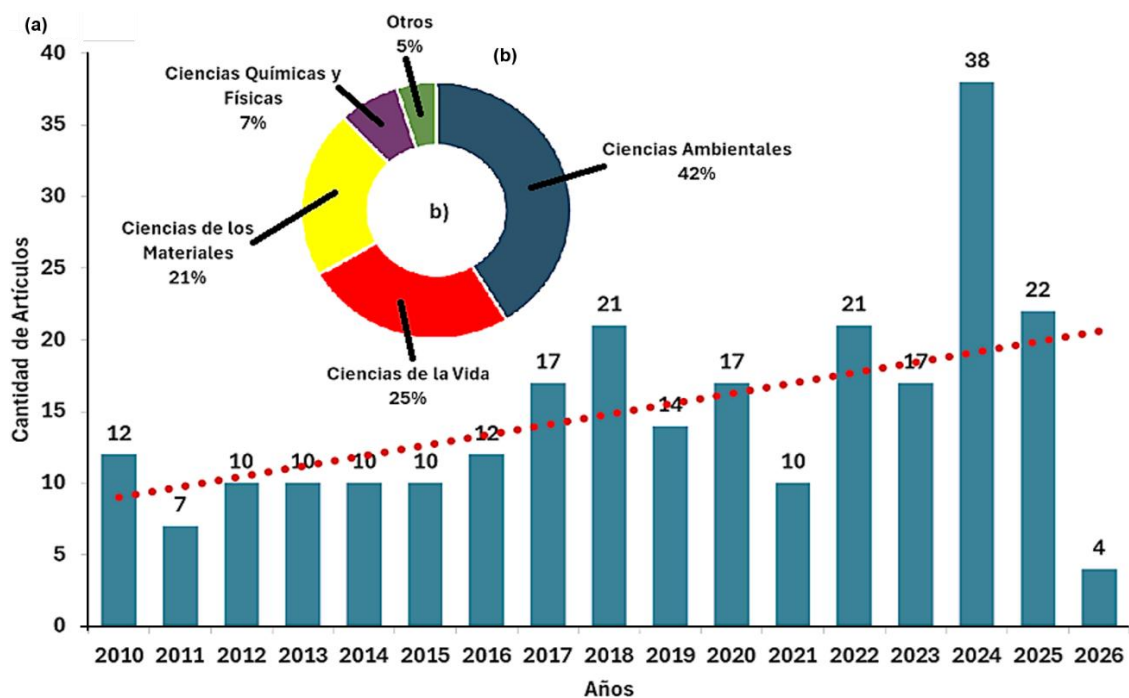


Figura 1. a) Representación gráfica de artículos científicos publicados entre los años 2010 - 2026; b) Porcentaje de artículos publicados por área temática.

PROPIEDADES FUNCIONALES DEL LACTOSUERO

En la industria agroalimentaria, existen residuos que pueden ser aprovechados, generando beneficios económicos y medioambientales para el sector (Favaro et al., 2025).

La industria láctea está dedicada a elaborar productos como queso, yogurt, mantequilla, etc. uno de los residuos recurrentes en la producción de quesos principalmente, es el lactosuero, Este residuo es un tema de interés tanto para los productores, por sus efectos en el medioambiente y para los consumidores por su efecto en la salud (Miloradovic et al., 2025).

Por cada 10 litros de leche empleados en la industria quesera se obtienen 9 litros de lactosuero, este residuo contiene el 55% de los nutrientes que contiene la leche (Montalvo-Salinas & Cantú-Lozano, 2018).

Se proyecta un crecimiento anual del 1,6% en la producción láctea mundial hasta el 2033, alcanzando 1085 Mt, superando la tasa de expansión de la mayoría de los productos agrícolas básicos, con lo cual la cantidad de lactosuero producida también crecería en gran cantidad (OECD & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024).

En la producción quesera, el lactosuero se divide en dulce por coagulación enzimática, rico en lactosa y ácido por acidificación/fermentación, a pesar de su similitud composicional, el suero ácido posee mayor concentración de minerales específicos: calcio, fósforo, magnesio, sodio y potasio (Mazorra-Manzano & Moreno-Hernández, 2019).

El aprovechamiento eficiente de 1,000 litros de lactosuero permite recuperar más de 9 kg de proteínas de elevada calidad, junto con 50 kg de lactosa y 3 kg de grasa láctea, cubriendo los requerimientos proteicos diarios de 130 adultos y las necesidades energéticas de más de 100 personas (Iglesias-Guevara et al., 2024).

El lactosuero posee un conjunto de proteínas de

elevada calidad nutricional, entre las que se encuentran la β -lactoglobulina, la α -lactoalbúmina, la lactoferrina, las inmunoglobulinas y la albúmina sérica bovina (Wijegunawardhana et al., 2025). Estas proteínas no solo definen su composición química, sino que también le confieren propiedades funcionales clave para la salud humana, como actividad antioxidante, anticancerígena, antiobesidad y capacidad para reducir la presión arterial (Altınay & Şanlı, 2025).

Precisamente por estas cualidades, los concentrados proteicos derivados del suero son altamente valorados en la industria alimentaria, donde su funcionalidad tecnológica (capacidad emulsificante o de retención de agua) impulsa la demanda. Sin embargo, esta demanda exige identificar fuentes sostenibles que equilibren la producción industrial con la protección ambiental (Bustos et al., 2025). Además de su riqueza proteica, el lactosuero alberga otros componentes estratégicos, como oligosacáridos y lactosa, cuyas aplicaciones en nutrición humana y procesos industriales proyectan a este subproducto como un recurso versátil y de bajo impacto ecológico (Sousa et al., 2019).

Las proteínas del lactosuero presentan una alta solubilidad proteica lo cual es usado en la industria en la producción de formulaciones infantiles y suplementos deportivos por su ideal dispensabilidad, permitiendo una distribución adecuada en este tipo de bebidas consumidas por niños, jóvenes, adultos y ancianos, influyendo en su aprovechamiento (Rodríguez et al., 2020).

Este subproducto contiene proteínas clave como la lactoferrina y péptidos bioactivos. Estos componentes son valiosos por sus propiedades antioxidantes, que combaten el daño celular. Además, ofrecen múltiples beneficios para la salud en general (Laz-Mero et al., 2024).

Tabla 1
Componentes y función biológica del suero de la leche

Componentes del suero de la leche			
Componentes	Concentración (%)	Función biológica	Referencia
Agua	93-94	Capacidad de disolver los componentes.	(Aponte Colmenares et al., 2023)
Lactosa	4,5-6	Proporciona energía y contribuye a la absorción de calcio.	(Asas et al., 2021)
Proteínas	0,412	Crecimiento muscular, reparación de tejidos y función inmunitaria.	(Soumati et al., 2025)
Cenizas	0,21 - 1,08	Funcionamiento correcto del cuerpo.	(Sousa et al., 2019)
Perfil proteico del lactosuero			
β -lactoglobulina	40 - 50	Emulsificante y gelificante.	(Mazorra-Manzano & Moreno-Hernández, 2019)
α -lactoalbúmina	19	Favorece la regulación del apetito, incrementa la sensibilidad a la insulina y contribuye a reducir la glucemia.	(Gurrola & Chávez-Martínez, 2017)
Inmunoglobulinas	8	Solubilidad, emulsificante.	(Arias Palma & Moreano Terán, 2023)
albúmina sérica	1,2	Soluble, mantiene la presión oncótica y regula la distribución del líquido vascular.	(Ward et al., 2022)
lactoferrina	0,01	Incorpora hierro a la sangre, soluble en agua, bacteriostática,	(Aponte Colmenares et al., 2023)

BENEFICIOS DEL LACTOSUERO PARA LA SALUD

En los últimos años, el interés por alimentos funcionales que mejoren la salud ha impulsado la investigación sobre el lactosuero, un subproducto lácteo con potencial nutraceutico (Rodríguez-González et al., 2024). La composición del suero lácteo incluye una serie de constituyentes con relevancia para la salud humana, destacando lactosa, proteínas, vitaminas, minerales, grasa, además de otros compuestos minoritarios (Asas et al., 2021).

Las deficiencias de micronutrientes surgen de una ingesta insuficiente de alimentos nutritivos, exacerbada por dietas pobres, infecciones y la pérdida de sangre menstrual. Las necesidades de estos nutrientes son particularmente altas durante el desarrollo temprano, el embarazo y la lactancia, el consumo de lactosuero se presenta como una de las alternativas de solución ante los problemas de nutrición que se evidencian en la sociedad, (Olson et al., 2021).

Entre estos componentes, las proteínas destacan por su calidad biológica: estudios comparativos demuestran que el lactosuero contiene una concentración proteica superior a la del huevo y hasta catorce veces mayor que la de la soya, con una digestibilidad del 90-95%, lo que garantiza una

eficiente absorción de aminoácidos esenciales (Mazorra-Manzano & Moreno-Hernández, 2019).

En el organismo, el lactosuero ejerce efectos biológicos y fisiológicos que contribuyen al adecuado desempeño de los sistemas digestivo, óseo, inmunológico, nervioso, cardiovascular y muscular (Gurrola & Chávez-Martínez, 2017). Además, contiene agentes funcionales, como péptidos y factores de crecimiento, también pueden estar presentes, ofreciendo beneficios para la salud (Laz-Mero et al., 2024).

Las proteínas lácteas, como el suero, pueden mejorar la tolerancia a la glucosa debido a sus propiedades insulínótropicas y baja carga glucémica, además, se ha observado que niveles más altos de transpalmitoleato en la sangre se asocian con una menor resistencia a la insulina, dislipidemia y riesgo de diabetes (Duran-Agüero et al., 2019).

El suero de leche, especialmente después de ser fermentado en el colon, se presenta como una estrategia nutricional prometedora. Su consumo podría contribuir a preservar la funcionalidad de la barrera intestinal y aliviar la inflamación de bajo grado, un factor clave en desórdenes metabólicos y la obesidad (López Nicolás et al., 2023).

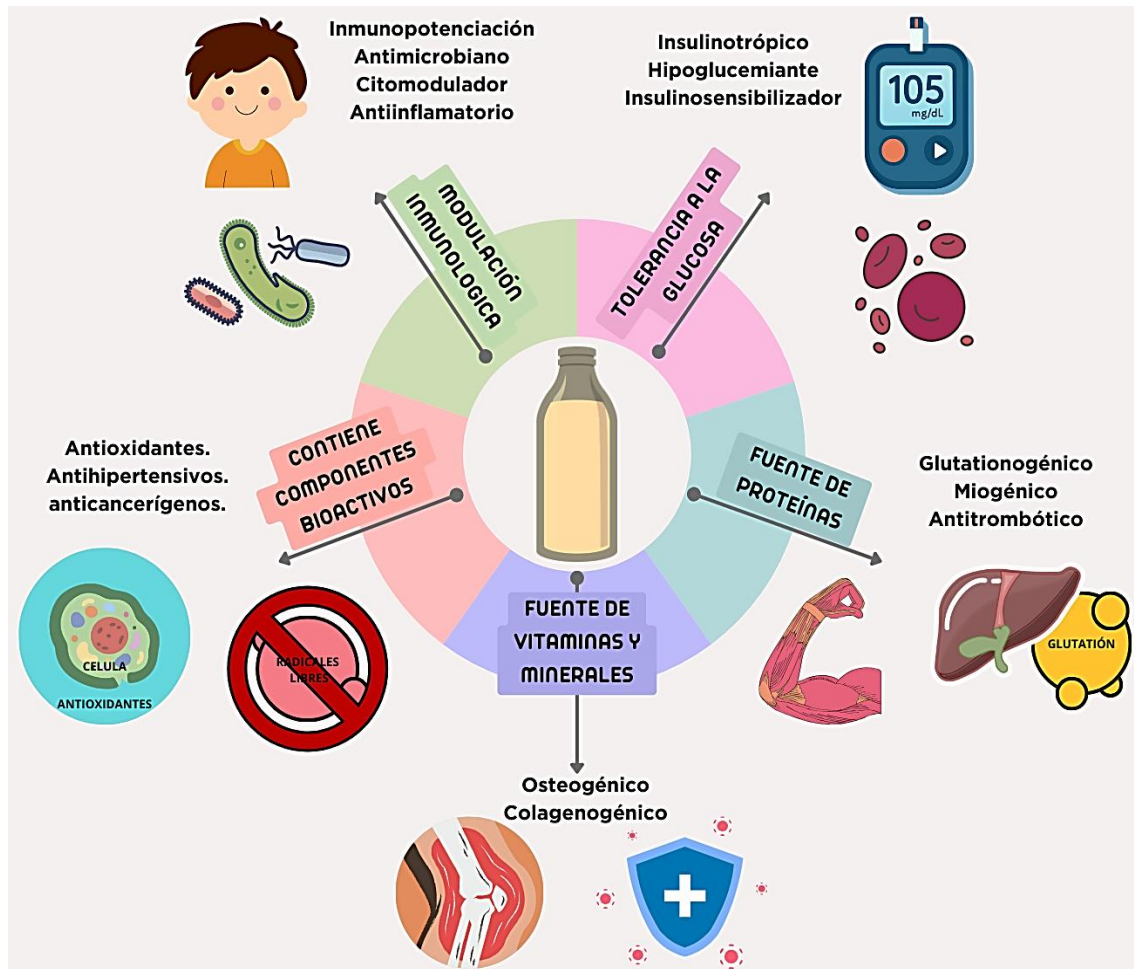


Figura 2. Beneficios del lactosuero a la salud humana.

El lactosuero, rico en cisteína, potencia la producción hepática de glutatión, un potente antioxidante esencial para la desintoxicación y la salud. Estudios sugieren su potencial para mejorar la esteatosis y el perfil lipídico en el hígado graso (Uscanga-Domínguez et al., 2019). Los péptidos del suero poseen múltiples beneficios para la salud, como efectos citomoduladores, antitrombóticos, reductores de colesterol, y propiedades antimicrobianas, antioxidantes e inmunomoduladoras. Cabe señalar que gran parte de las investigaciones se basan en concentrados y aislados de proteína de suero bovino, no en suero fresco (Dalaka et al., 2025). Las proteínas de suero contienen abundantes BCAA (leucina, valina e isoleucina), fundamentales para el crecimiento muscular, y se caracterizan por su rápida digestión frente a la caseína, no obstante, esta velocidad puede ser contraproducente, ya que una digestión incompleta podría reducir los beneficios de las comidas ricas en proteínas, como el aumento de masa muscular (Sah et al., 2016).

APLICACIONES DEL LACTOSUERO EN PRODUCTOS ALIMENTARIOS

Históricamente, el lactosuero fue considerado un desecho en la industria láctea. Sin embargo, hoy se reconoce como un ingrediente clave en la alimentación, tanto por sus beneficios nutricionales como por su potencial sostenible (Aponte Colmenares et al., 2023). Este cambio de paradigma impulsa su integración en múltiples aplicaciones innovadoras. Además, el lactosuero sirve como materia prima para obtener ácido láctico, polihidroxialcanoatos, bacteriocinas, exopolisacáridos, compuestos bioactivos, aromatizantes y edulcorantes. Estos compuestos se utilizan en los sectores del envasado, farmacéutico, cosmético y médico (Laz-Mero et al., 2024).

La fortificación de alimentos es una estrategia efectiva y económica que aporta beneficios significativos a la salud, la economía y la sociedad. A pesar de los debates, su implementación en diversos alimentos ha demostrado reducir las deficiencias nutricionales y generar ventajas económicas (Olson et al., 2021).

Estudios recientes destacan que las proteínas del lactosuero son ideales para estabilizar emulsiones alimentarias, mejorando propiedades como la

Para asegurar la seguridad en fórmulas infantiles, el concentrado de proteína de suero convencional y el derivado de leche descremada son sometidos a calor, sin embargo, este tratamiento térmico y el almacenamiento alteran la estructura de las proteínas, lo que a su vez puede influir en su digestibilidad y bioactividad (Ye et al., 2025).

Los productos para ser inocuos necesitan un tratamiento térmico, este influye en las proteínas de manera deseada liberando péptidos y demás componentes (Ye et al., 2025).

Las enzimas intestinales pueden descomponer los polipéptidos, pero los péptidos de bajo peso molecular podrían actuar directamente a nivel tisular. La digestión puede generar péptidos bioactivos resistentes o degradarlos, impactando su eficacia. La fermentación del suero de leche (SW) es un proceso que puede favorecer la liberación de péptidos bioactivos con actividad antiinflamatoria (Dalaka et al., 2025).

cremosidad, la hidrofobicidad y reduciendo el tamaño de partículas. Esto las hace útiles en productos como salsas, postres o bebidas (Lin et al., 2025).

La adición de concentrado de proteína de suero al 80% (WPC80), en rangos específicos, mejoró significativamente las propiedades texturales de los postres lácteos sin grasa y ricos en proteínas evaluados. Con un contenido de WPC80 entre el 5% y el 11%, se observó un incremento en la dureza y la elasticidad. Por otro lado, un rango ligeramente más amplio, del 5% al 13% de WPC80, resultó en un aumento notable de la adhesividad, la cohesión y la viscosidad de estos productos (Kusio et al., 2020).

Las propiedades de los geles proteicos, como su módulo elástico o de cizallamiento, están directamente influenciadas por el tipo de relleno, su concentración, el tamaño de las partículas, la rigidez y las propiedades interfaciales de los componentes, es por ello que la concentración de proteínas de lactosuero puede tener influencia en estas propiedades, específicamente en la emulsificante (Hu et al., 2026).

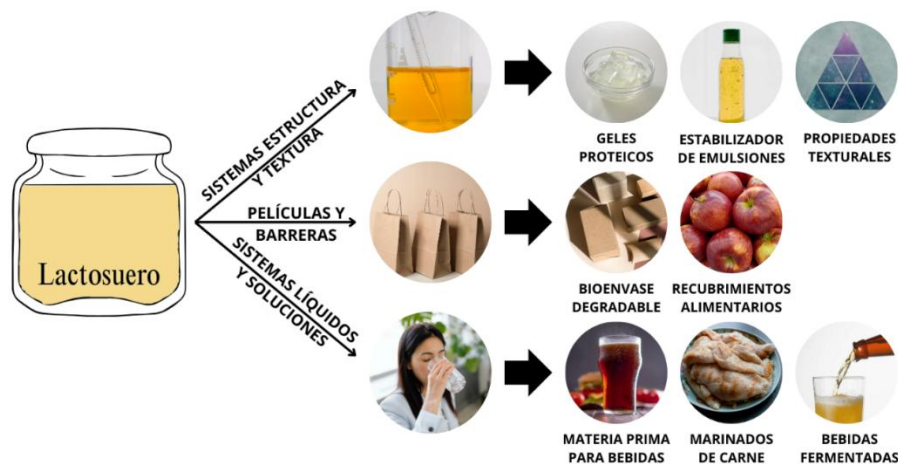


Figura 3. Aplicaciones del lactosuero en la industria alimentaria.

Asimismo, el lactosuero ofrece posibilidades para la creación de diversos productos, especialmente en la industria alimentaria, se puede usar como materia prima en bebidas lácteas, e incluso en cerveza artesanal al utilizarlo como sustrato, además de estos productos de consumo directo, el lactosuero es valioso para la elaboración de biopolímeros y jarabes (Quille Quille et al., 2021). El aislado de proteína de suero (WPI), en combinación con nanoquitosano (NCH), nanocelulosa bacteriana (BN) y aceite esencial de canela (CEO) extiende la vida útil del pollo refrigerado, esta mezcla es superior a los recubrimientos individuales para inhibir la oxidación lipídica y el crecimiento bacteriano, manteniendo las propiedades sensoriales (Sheerzad et al., 2024). Marinar carne de cerdo con suero ácido de yogur (YAW) por 10-15 horas mejora su terneza sin afectar otras cualidades, este

proceso también aumenta la estabilidad oxidativa del pollo, ofreciendo una solución sostenible para la industria cárnica al reducir desechos y enriquecer la calidad de la carne (Karageorgou et al., 2023).

Mediante procesos biotecnológicos, el lactosuero se transforma en ácidos de azúcar (galactónico y 2-cetogalactónico) y bioetanol. Estos compuestos tienen aplicaciones como aditivos alimentarios, edulcorantes o en la producción de biocombustibles, integrando economía circular (Hua et al., 2025).

Las proteínas del lactosuero, combinadas con lignina, permiten desarrollar envases biodegradables con propiedades antioxidantes y de barrera UV. Estos materiales prolongan la vida útil de alimentos sensibles a la oxidación (aceites, carnes) y reducen el uso de plásticos, alineándose con demandas ambientales (Deng et al., 2025).

INNOVACIONES Y TECNOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL LACTOSUERO

Con una producción global de 180 millones de toneladas anuales, el lactosuero emerge como un pilar clave para la economía circular. Su volumen masivo lo convierte en una materia prima ideal para procesos de alto impacto, como la producción de ácido láctico o hidrógeno, este último dirigido a la generación de biocombustibles. Estas aplicaciones no solo son rentables, sino que contribuyen directamente a los objetivos climáticos globales (Ozturk et al., 2025).

El aprovechamiento del lactosuero se afianza como una medida sostenible orientada a disminuir la huella ecológica generada por el sector lácteo, superando incluso a alternativas como las proteínas vegetales en términos de huella ecológica. Su aprovechamiento integral minimiza residuos y genera beneficios económicos y sociales, aunque su implementación óptima depende del contexto productivo (Mehner et al., 2024).

La composición del lactosuero presenta una variabilidad intrínseca supeditada a factores como la tipología del queso, el origen de la materia prima láctea y los parámetros tecnológicos implementados durante el procesamiento para la producción de biogás (Stres et al., 2024).

El proceso integrado para la valorización del lactosuero comprende etapas iniciales de clarificación y estabilización con procesos como la filtración, centrifugación y pasteurización, seguidas de un sistema secuencial de membranas. Este último integra ultrafiltración y nanofiltración operadas en modo de diafiltración para optimizar la purificación y concentración de los componentes en sus respectivos retenidos durante el proceso (Macedo et al., 2021).

El lactosuero agroindustrial es fuente prometedora para producir biocombustibles y energía renovable. Sus componentes favorecen la proliferación microbiana que, mediante fermentación y digestión anaeróbica, genera biogás utilizable para calor o electricidad (Alvarado et al., 2021).

La digestión anaerobia representa una tecnología clave para abordar el desafío que supone el lactosuero, facilitando su valorización energética

mediante la recuperación de biogás para la generación de electricidad. Este enfoque integra configuraciones tecnológicas de alta madurez e implementación en el sector industrial (Arellano-García et al., 2024).

La codigestión anaerobia una variable de la digestión anaerobia que usa 2 o más sustratos incluido el lactosuero para generar biogás también se presenta como una estrategia técnica y ambientalmente viable para las pequeñas y medianas empresas (pymes). Mediante el proceso permite la sustitución de combustibles fósiles por biogás y mitiga el impacto ecológico derivado de la gestión inadecuada del suero lácteo (Chagua Rodríguez et al., 2024).

La codigestión de estiércol bovino y lactosuero en proporción 30:70 alcanzó un potencial energético de 4671,24 MJ/tonelada para el biogás y de 4674,71 MJ/tonelada para el metano (Velasco Morales et al., 2024).

Desde la década de 1970, la industria alimentaria ha diversificado la producción de bebidas derivadas del lactosuero. Esta categoría comprende formulaciones obtenidas a partir de suero dulce, ácido o diluido, integradas con diversos aditivos y componentes de origen vegetal para optimizar sus propiedades funcionales y sensoriales (Novgorodska & Bernyk, 2024).

Las bebidas derivadas del lactosuero se categorizan predominantemente en cuatro grupos, mezclas con zumos frutales o vegetales; productos de tipo lácteo de alta viscosidad; bebidas carbonatadas refrescantes; y derivados alcohólicos obtenidos por fermentación o destilación (Shraddha Rc & Nalawade T, 2015).

La formulación de bebidas funcionales a partir de lactosuero potencia la nutrición y la salud, facilitando su reincorporación a la cadena de valor. Esta estrategia circular permite mitigar el impacto ambiental, promoviendo la sostenibilidad mediante la valorización de subproductos y la optimización en la gestión de recursos (Kotsaki et al., 2025).

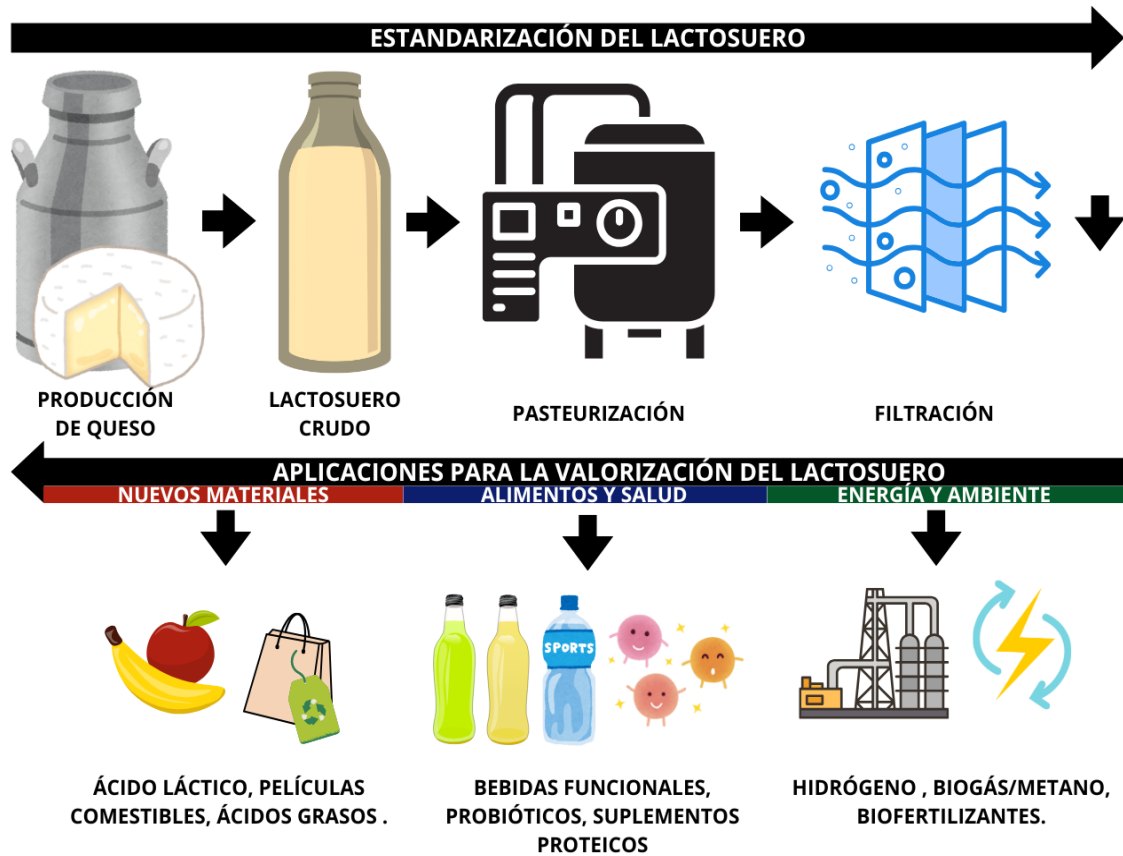


Figura 4. Innovación y tecnologías aplicadas al lactosuero.

Para maximizar la valorización, se han creado bebidas funcionales incorporando aditivos naturales como jugo de espinillo amarillo, jengibre y canela al lactosuero. Esta estrategia no solo mejora su perfil nutricional, sino que resuelve el problema del descarte de un subproducto rico en nutrientes (Tița et al., 2024).

El ácido láctico se obtiene mediante la fermentación del suero de leche, empleando la bacteria *Lactobacillus bulgaricus* como agente fermentador. Este compuesto tiene múltiples usos en los sectores farmacéutico, cosmético, químico y alimentario (García-Mujica & Benavides-Cedeño, 2020).

En el ámbito de la reducción de residuos, se han desarrollado películas comestibles a partir de proteínas del suero. Estas innovaciones no solo sustituyen a los plásticos no biodegradables, sino que ofrecen ventajas adicionales, como su aplicabilidad en envasado activo de alimentos (Koukoumaki et al., 2024).

El suero de queso puede transformarse en ácidos grasos volátiles, una alternativa sostenible y valiosa desde el punto de vista medioambiental, mediante la fermentación anaeróbica, se recuperaron los AGV a partir del suero de queso, utilizando un innovador sistema de membranas tubulares (Molinuevo-Salces et al., 2024).

Un caso específico es el lactosuero derivado de la

producción de queso Pico, que puede transformarse en un producto similar al requesón con propiedades probióticas. Este enfoque circular optimiza recursos lácteos y reduce la contaminación de aguas residuales en la industria quesera (Cámara et al., 2025).

Es fundamental seguir investigando y desarrollando nuevas formas de aprovechar el lactosuero para explotar su potencial en las distintas líneas de innovación (Soumati et al., 2023).

En la Figura 4 se detallan las tres principales vías de aprovechamiento del lactosuero. Estas rutas comparten procesos comunes como la pasteurización, orientada a la eliminación de patógenos y a la reducción de la actividad enzimática, y la filtración para la separación de componentes. Se clasifican en tres categorías, Energía y Medio Ambiente, centrada en la producción de hidrógeno, biogás, metano y biofertilizantes; Alimentos y Salud, enfocada en bebidas funcionales, probióticos y suplementos proteicos; y Nuevos Materiales, dirigida a la obtención de ácido láctico, películas comestibles y ácidos grasos.

Existe un amplio potencial de investigación en el desarrollo y optimización de técnicas para el procesamiento del lactosuero, con el fin de maximizar su valorización en industrias alimentarias y no alimentaria.

Tabla 2
Innovaciones en la utilización de lactosuero

Recurso	Tecnología	Aplicación	Producto	Referencia
Suero de queso	Ultrafiltración con membranas con propiedades de selectividad y antifouling	Separación selectiva de proteínas y desalinización; mejora de propiedades antiincrustantes.	Proteínas de suero recuperadas (WP, BSA y Caseína) (>99,0% retención proteica, <1,0% retención NaCl)	(Li et al., 2025)
Suero de queso	Ultrafiltración integrada con hidrólisis enzimática (Membrana cerámica funcionalizada con β -galactosidasa inmovilizada)	Concentración simultánea de proteínas y eliminación de lactosa en un solo paso	Concentrado de proteína de suero (WPC) con lactosa hidrolizada (72% hidrólisis de lactosa, 83% recuperación de proteínas)	(Al-Mutwalli et al., 2024)
Suero de queso cheddar	Fermentación láctica (<i>L. plantarum</i> KGL3A) y Ultrafiltración (3 y 10 kDa)	Formulación de alimentos funcionales (antidiabéticos, antioxidantes y antiinflamatorios)	Péptidos bioactivos de bajo peso molecular	(Das et al., 2025)
El suero ácido	Nanofiltración (NF) acoplada a Electrodialisis (ED) bajo Campo Eléctrico Pulsado (PEF).	Mejora del rendimiento de secado y reducción de higroscopicidad	Polvo de suero desmineralizado (rendimiento de secado del 90,35%)	(Poitras et al., 2025)
Suero ácido	Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF) y Separación Magnética (partículas de óxido de hierro)	Aislamiento selectivo de proteínas de alto valor comercial	Lactoferrina purificada (78% de pureza, 60% de rendimiento)	(Krolitzki et al., 2024)
Permeado de suero de queso (CWP)	Fermentación biotecnológica con levaduras no convencionales (<i>Kluyveromyces marxianus</i>)	Producción de biocombustibles y reducción de carga orgánica contaminante	Bioetanol avanzado (Rendimiento hasta 0,50 g/g)	(De Micco et al., 2025)
Permeado de suero de queso (CWP)	Expresión génica heteróloga en <i>E. coli</i> BL21 (DE3) (Inducción alternativa a IPTG)	Producción biotecnológica de proteínas recombinantes a bajo costo	Proteínas modelo (GFP y variante Q55 de la ataxina-3)	(De Divitiis et al., 2023)
Suero descremado industrial	Electrodialisis redox (ED-redox) basada en membranas de Nanofiltración (NF) con polímeros redox	Desmineralización eficiente para valorización de proteínas y circularidad de recursos	Suero desalinizado de grado alimenticio (89% desmineralización, >95% retención proteica)	(Aguda et al., 2025)

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

La presente revisión bibliométrica se fundamentó en un análisis sistemático de la producción científica relacionada con el aprovechamiento del lactosuero en la industria alimentaria.

La Figura 5 muestra la ruta para el análisis bibliométrico, por ello, se empleó la base de datos Scopus, reconocida por sus publicaciones de alta reputación y de calidad (Alviz-Meza et al., 2023), por tanto, su avanzado sistema de búsqueda permitió establecer parámetros precisos para la recuperación de información, ayudando a cometer menos errores y tener un mayor rendimiento en la obtención de la información (Kaur et al., 2021).

La estrategia de búsqueda se centró en los términos "dairy", "waste" y "food industry", aplicando la búsqueda sobre títulos, resúmenes y palabras clave de las publicaciones. La ecuación de búsqueda empleada fue la siguiente: (TITLE-ABS-KEY("dairy" AND "waste" AND "food industry") AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar"))).

Se establecieron como criterios de inclusión:

artículos científicos publicados entre 2010 y 2026, en idioma inglés. Esta ventana temporal permite abarcar la evolución reciente del campo y las tendencias emergentes. Tras la búsqueda, los registros recuperados se descargaron en archivos CSV para el respectivo análisis.

El procesamiento y análisis de la información recopilada se llevó a cabo mediante dos herramientas especializadas, Bibliometrix versión 4.0.0 (Aria & Cuccurullo, 2017) y VOSviewer versión 1.6.20 (Van Eck & Waltman, 2010), Ambas herramientas permiten explorar y visualizar la estructura intelectual, social y conceptual de un campo científico, identificando patrones de colaboración, redes de coautoría, concitación y coocurrencia de términos (Arruda et al., 2022).

Primero se utilizó la herramienta Vosviewer (Van Eck & Waltman, 2010), el archivo en formato CSV fue cargado en el programa mediante la secuencia de opciones: "Create map", "Create a map based on bibliographic data", "Read data from bibliographic database files", "Scopus". Una vez importados los datos, el software procedió a organizar y procesar

la información para su posterior análisis estadístico y evaluación de relaciones entre documentos, autores y palabras clave.

Complementariamente, se empleó el software Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017) implementado en el entorno de programación R (R Core Team, 2025) a través de su interfaz de desarrollo integrado RStudio (Posit team, 2026). Tras la instalación del paquete mediante `install.packages("bibliometrix")` y su posterior carga con `library(bibliometrix)`, se ejecutó la función `biblioshiny()` que despliega una interfaz web interactiva. A continuación, se importó el archivo CSV previamente exportado desde Scopus, lo que permitió generar de manera sistematizada indicadores bibliométricos. La combinación de ambas herramientas garantizó un análisis exhaustivo y complementario de la información.

La Figura 6 muestra el análisis de coocurrencia de términos clave, que revela una clara segmentación temática y una evolución temporal en la investigación sobre el lactosuero. Asimismo, la Figura 6a muestra cuatro clústeres principales que reflejan las diferentes aproximaciones científicas al estudio del lactosuero y su aprovechamiento en la industria alimentaria.

El **clúster rojo**, el más extenso con 80 elementos, se articula en torno a los términos "food industry", "human", "livestock", "food loss" y "food supply". Este agrupamiento conecta el impacto de la industria alimentaria con la seguridad alimentaria y el aprovechamiento de residuos, ya sea para la alimentación animal o la producción de fertilizantes, evidenciando la necesidad de implementar modelos de economía circular. La utilización de residuos alimentarios en la

alimentación animal se consolida como una práctica de gestión integral que ofrece beneficios simultáneos para la seguridad alimentaria y la preservación ambiental (Nath et al., 2023).

El **clúster verde**, compuesto por 73 elementos, presenta una marcada orientación hacia la transformación química y biotecnológica del lactosuero. Los términos centrales, "fermentation", "chemistry", "yogurt", "amino acid" y "enzyme activity", destacan el papel preponderante de la fermentación como herramienta tecnológica, así como el interés en la obtención de alimentos funcionales y la recuperación de nutrientes específicos como los aminoácidos. La fermentación se posiciona como una tecnología disruptiva para el desarrollo de alimentos proteicos de alto valor, al mejorar simultáneamente sus características nutricionales, funcionales y sensoriales, y promover la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad del sistema alimentario (Yousefi et al., 2025).

El **clúster azul**, con 43 elementos, se centra en los desafíos ambientales derivados de la alta carga orgánica del lactosuero. Conceptos como "wastewater", "chemical oxygen demand", "filtration", "bacteria" y "microbial community" reflejan la investigación orientada a mitigar su impacto contaminante mediante procesos de filtración y control microbiológico. Las aguas residuales procedentes de plantas de alimentos y bebidas por su elevada carga de contaminantes orgánicos, constituyen un vector relevante para la introducción de mezclas complejas de agentes químicos y patógenos en los ecosistemas acuáticos (Abdel-Fatah, 2023).

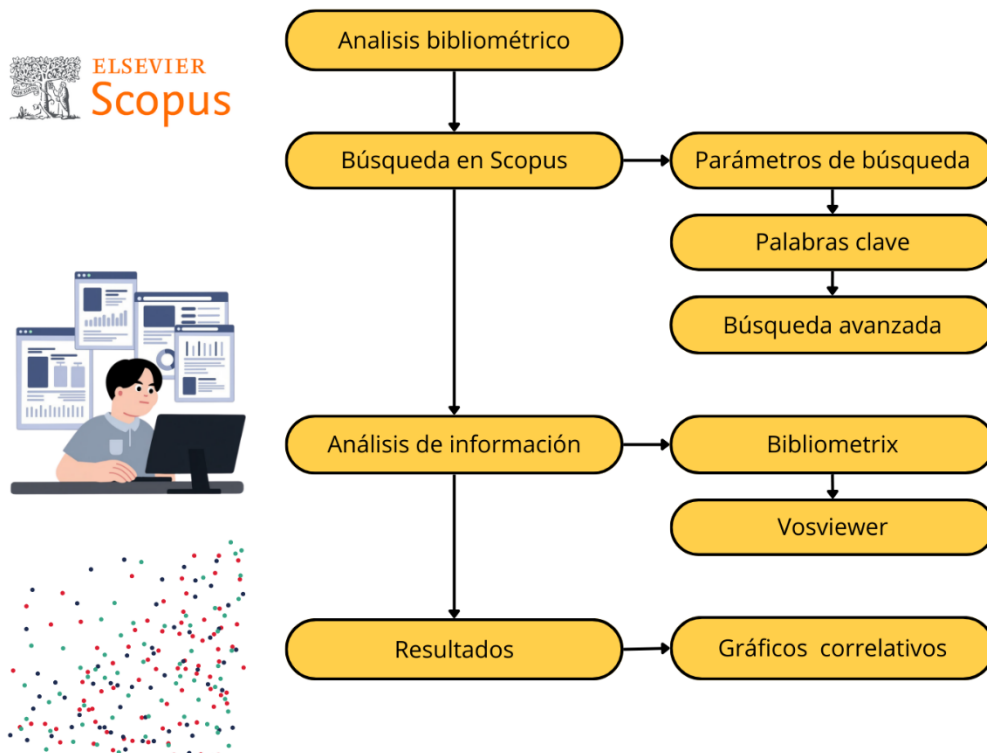


Figura 5. Representación para el análisis bibliométrico.

CONCLUSIONES

El lactosuero ha evolucionado de un subproducto residual a una materia prima estratégica para la industria agroalimentaria. Su relevancia reside en una composición química excepcional que preserva componentes clave de la leche, destacando un perfil proteico con propiedades como alta solubilidad, capacidad emulsificante y gelificante. Esto sumado a su potencial como agente bioactivo, lo posicionan como una solución integral para el desarrollo de alimentos de alta densidad nutricional.

Como matriz nutricional, el lactosuero destaca por su elevada digestibilidad y riqueza en aminoácidos de cadena ramificada (BCAA) y cisteína, fundamentales para la recuperación muscular y la síntesis de glutatión. La evidencia científica respalda su capacidad para modular la homeostasis metabólica, mejorando la sensibilidad a la insulina y preservando la integridad de la barrera intestinal. No obstante, la eficacia de estas funciones depende críticamente de los procesos tecnológicos aplicados, mientras que la fermentación potencia su bioactividad, el tratamiento térmico debe ser optimizado para evitar la desnaturalización de sus proteínas clave.

En el ámbito tecnológico, el empleo de concentrados y aislados proteicos permite optimizar las propiedades reológicas y sensoriales de una amplia línea de productos, como postres, bebidas fermentadas y derivados cárnicos. Su versatilidad como agente espesante y estabilizante mejora la calidad del producto final y facilita la fortificación alimentaria de manera costo-efectiva, respondiendo a las demandas de salud pública.

La integración del lactosuero en la bioeconomía circular ha impulsado el desarrollo de innovaciones disruptivas, como recubrimientos activos y envases biodegradables que ofrecen alternativas sostenibles al plástico convencional. Este aprovechamiento biotecnológico, que abarca desde la

producción de biocombustibles hasta el diseño de nuevos materiales, demuestra que el subproducto es un recurso esencial para incrementar la eficiencia industrial y reducir la huella ecológica de la cadena láctea.

La transición hacia el modelo de biorrefinería se fundamenta en la integración de tecnologías de separación por membranas y procesos biotecnológicos de vanguardia. Esta estructura permite una valorización multidimensional en tres ejes principales: bioenergía, biomateriales y nutrición funcional. La implementación de sistemas de purificación secuencial, junto con la codigestión anaerobia, maximiza la recuperación de componentes de alto valor comercial, transformando un pasivo ambiental en un activo económico sostenible.

El análisis bibliométrico permitió comprender las cuatro aproximaciones científicas diferenciadas que han coexistido y evolucionado: la gestión ambiental, la valorización energética, la transformación biotecnológica y la incorporación del lactosuero en la cadena alimentaria. Esta segmentación temática ha experimentado una evolución temporal, transitando desde el tratamiento de efluentes y la producción de biogás, pasando por la optimización de procesos químicos y fermentativos, hasta alcanzar el enfoque contemporáneo centrado en la seguridad alimentaria, la funcionalidad nutricional y la sostenibilidad ambiental.

Como estudios futuros, se plantea estudiar en profundidad las tecnologías integradas de separación por membranas y bioprocesamiento, que permitirán maximizar la recuperación de los componentes del lactosuero, consolidando su papel como materia prima renovable capaz de generar simultáneamente beneficios ambientales, nutricionales y económicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Fatah, M. A. (2023). Integrated Management of Industrial Wastewater in the Food Sector. *Sustainability*, 15(23), 16193. <https://doi.org/10.3390/su152316193>
- Aguda, A., Kim, N., Harbut, E., Elbert, J., Li, J., Merrill, R., Kim, C., & Su, X. (2025). Architecture Design of Nanofiltration-Based Redox Electrodialysis for Whey Protein Valorization. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13(28), 10978-10992. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c03425>
- Al-Mutwalli, S. A., Dilaver, M., Korkut Uru, S., Koseoglu-Imer, D. Y., & Lipnizki, F. (2024). β -galactosidase immobilization on ceramic ultrafiltration membrane for simultaneous lactose hydrolysis and protein separation. *Journal of Water Process Engineering*, 64, 105619. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105619>
- Altınay, C., & Şanlı, T. (2025). Characteristics of innovative whey cheese (Lor) produced with milk fermented with commercial starter cultures. *International Dairy Journal*, 167, 106281. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106281>
- Alvarado, R. R., Torres-Payoma, F., Cárdenas, C. V., Ojeda, K., Díaz, M. E., Quintero, D. N., & Velásquez, N. V. (2021). Obter biogás a partir do soro de leite: uma alternativa resiliente. *Ingenio Magno*, 12(2), 85-104.
- Alviz-Meza, A., Orozco-Agamez, J., Quinayá, D. C. P., & Alvarez-Amador, A. (2023). Bibliometric Analysis of Fourth Industrial Revolution Applied to Material Sciences Based on Web of Science and Scopus Databases from 2017 to 2021. *ChemEngineering*, 7(1), 2. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7010002>
- Aponte Colmenares, A. P., Prieto Suárez, G. A., Castellanos Báez, Y. T., Muvidi Nova, C. D. J., & Yurievich Sakharov, I. (2023). Review. Aplicaciones del lactosuero y sus derivados proteínicos. *Ciencia en Desarrollo*, 14(2), 139-155. <https://doi.org/10.19053/01217488.v14.n2.2023.15002>
- Araujo Guerra, Á. V., Monsalve Castro, L. M., & Quintero Tovar, A. L. (2013). Aprovechamiento del lactosuero como fuente de energía nutricional para minimizar el problema de contaminación ambiental. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 55. <https://doi.org/10.22490/21456453.992>
- Arellano-García, L., Flores-Payán, V., & McCulligh, C. (2024). Cheese whey generation, management and potential for biogas production in Mexico and the State of Jalisco. *International Journal of Sustainable Engineering*, 17(1), 995-1007. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2417018>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Arias Palma, G., & Moreano Terán, N. (2023). Aprovechamiento del lactosuero en la industria. *@limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 19(1). <https://doi.org/10.24054/limentech.v19i1.1409>
- Arruda, H., Silva, E. R., Lessa, M., Proença Jr., D., & Bartholo, R. (2022). VOSviewer and Bibliometrix. *Journal of the Medical Library Association*, 110(3), 392-395. <https://doi.org/10.5195/jmla.2022.1434>

- Asas, C., Llanos, C., Matavaca, J., & Verdezoto, D. (2021). Whey: Environmental impact, uses and applications via biotechnology mechanisms. *Agroindustrial Science*, 11(1), 105-116. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.01.13>
- Brião, V. B., Mossman, J., Seguenka, B., Graciola, S., & Piccin, J. S. (2024). Integrating Whey Processing: Ultrafiltration, Nanofiltration, and Water Reuse from Diafiltration. *Membranes*, 14(9), 191. <https://doi.org/10.3390/membranes14090191>
- Bustos, L. F., Vasile, F. E., Ruiz-Henestrosa, V. M. P., Carrera-Sánchez, C., & Pérez, O. E. (2025). Buffalo whey proteins—Vitamin E macromolecular bioinspired complexes. Formation and performance at air/water interface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 718, 136871. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136871>
- Cámara, S. P. A., Maduro Dias, C., Nunes, H. P. B., Martin, R., Pimentel, F., Gomes, J. V., Silveira, M. D. G. A., Rosa, H. J. D., Dapkevicius, A., Borba, A. E. S., & Dapkevicius, M. D. L. N. E. (2025). Addressing Quality, Safety, and Sustainability Challenges in Artisanal Pico Cheese Production: Proteolysis Indexes, Staphylococci, and Whey Valorization. *Foods*, 14(9), 1487. <https://doi.org/10.3390/foods14091487>
- Chagua Rodriguez, P., Cochachi Poma, W. A., & Soto Castilla, W. P. (2024). Use of whey through anaerobic codigestion for biomethane production: Utilización del lactosuero mediante codigestión anaerobia para la producción de biometano. *KANYÚ*, 2(2), 55-69. <https://doi.org/10.61210/kany.v2i2.97>
- Córdoba, V., & Ottolina, G. (2025). Anaerobic Co-Digestion of Swine Wastewater, Cheese Whey and Organic Waste: Performance Optimization Through Mixture Design. *Biomass*, 5(4), 72. <https://doi.org/10.3390/biomass5040072>
- Czarniecka-Skubina, E., Pielak, M., Neffe-Skocińska, K., Kajak-Siemaszko, K., Karp-Paździerska, S., Gluchowski, A., Moczowska-Wyrwiz, M., Rosiak, E., Rutkowska, J., Antoniewska-Krzaska, A., & Zielińska, D. (2025). Whey—A Valuable Technological Resource for the Production of New Functional Products with Added Health-Promoting Properties. *Foods*, 14(24), 4258. <https://doi.org/10.3390/foods14244258>
- Dalaka, E., Stefanos, G. C., Politis, I., & Theodorou, G. (2025). Immunomodulatory Properties of Sweet Whey-Derived Peptides in THP-1 Macrophages. *Molecules*, 30(6), 1261. <https://doi.org/10.3390/molecules30061261>
- Das, B., Basaiawmoit, B., Sakure, A. A., Maurya, R., Bishnoi, M., Kondepudi, K. K., Mankad, P. M., Patel, A., & Hati, S. (2025). Production and identification of antidiabetic and antioxidative peptides from fermented cheddar cheese whey with anti-inflammatory activity: A valorisation of dairy waste. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-025-06349-1>
- De Divitiis, M., Ami, D., Pessina, A., Palmioli, A., Scandrone, B., Airoldi, C., Regonesi, M. E., Brambilla, L., Lotti, M., Natalello, A., Brocca, S., & Mangiagalli, M. (2023). Cheese-whey permeate improves the fitness of *Escherichia coli* cells during recombinant protein production. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02281-8>
- De Micco, C., Radice, M., Di Fidio, N., Agrimi, G., & Pisano, I. (2025). Physiological characterization of *Kluyveromyces marxianus* strains for the development of a microbial platform to obtain bioethanol from cheese whey permeate. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1663736. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1663736>
- Deng, Y., Kolodjski, S., Lewis, G., Onan, G., & Kim, Y. (2025). Physical and functional characterization of whey protein-lignin biocomposite films for food packaging applications. *Future Foods*, 11, 100554. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100554>
- Duran-Agüero, S., Landaeta-Díaz, L., & Cortes, L. Y. (2019). Consumo de lácteos y asociación con diabetes e hipertensión. *Revista Chilena de Nutrición*, 46(6), 776-782. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182019000600776>
- Favaro, L., Casella, S., Parro, E., Franzosi, G., Rodighiero, V., & Basaglia, M. (2025). Utilization of lactose and whey permeate for the sustainable production of polyhydroxyalkanoates by *Hydrogenophaga pseudoflava* DSM1034. *New Biotechnology*, 87, 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2025.02.009>
- Gallo, V., Giansanti, F., Arienzo, A., & Antonini, G. (2022). Antiviral properties of whey proteins and their activity against SARS-CoV-2 infection. *Journal of Functional Foods*, 89, 104932. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.104932>
- García-Mujica, R., & Benavides-Cedeño, G. (2020). Diseño de una planta a escala industrial para la elaboración de ácido láctico mediante fermentación líquida. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 3(5), 25-34. <https://doi.org/10.46296/ig.v3i5.0013>
- Gölcük, E., Balta, Y., Yerlikaya, O., & Uysal, H. R. (2025). Peyniraltı Suyunun Değerlendirilmesindeki Yenilikçi Yaklaşımlar. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 13(6), 1694-1706. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v13i6.1694-1706.7485>
- Gurrola, L. R. C., & Chávez-Martínez, A. (2017). Proteínas del lactosuero: usos, relación con la salud y bioactividades. *Interciencia*, 42(11), 712-718.
- Hu, X., Li, Y., Ryu, J., & McClements, D. J. (2026). Modulating the gel strength of filled whey protein hydrogels by altering oil droplets characteristics: Theory and experiments. *Food Hydrocolloids*, 170, 111721. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111721>
- Hua, X., Zhang, R., Hu, Y., Liu, D., & Xu, Y. (2025). In-situ cascaded and selective bio-preparation of galactose-derived acids from cheese whey powder by the bifunctional regulation of resting-cell catalysis. *Bioresource Technology*, 429, 132527. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132527>
- Huertas Parra, R. A. (2009). Lactosuero: importancia en la industria de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 62(1), 4967-4982.
- Iglesias-Guevara, D., Casariego-Ano, A., Arencibia-Sánchez, J. A., & Mosquera-Milián, E. (2024). Formulación de un postre lácteo con adición de proteínas de lactosuero. 2024, 44(2), 318-333.
- Karageorgou, A., Paveli, A., Goliomytis, M., Theodorou, G., Politis, I., & Simitzis, P. (2023). The Effects of Yoghurt Acid Whey Marination on Quality Parameters of Pork and Chicken Meat. *Foods*, 12(12), 2360. <https://doi.org/10.3390/foods12122360>
- Kaur, R., Ramachandran, R. K., Doss, R., & Pan, L. (2021). The importance of selecting clustering parameters in VANETS: A survey. *Computer Science Review*, 40, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100392>
- Kotsaki, P., Aspri, M., & Papademas, P. (2025). Novel Whey Fermented Beverage Enriched with a Mixture of Juice Concentrates: Evaluation of Antimicrobial, Antioxidant, and Angiotensin I Converting Enzyme Inhibitory (ACE) Activities Before and After Simulated Gastrointestinal Digestion. *Microorganisms*, 13(7), 1490. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13071490>
- Koukoumaki, D. I., Papanikolaou, S., Ioannou, Z., Gkatzionis, K., & Sarris, D. (2024). The Development of Novel Edible Films from Single-Cell Protein Produced by the Biotechnological Valorization of Cheese Whey. *Applied Microbiology*, 4(3), 1030-1041. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4030070>
- Krolitzki, E., Ostertag, F., Schwaminger, S. P., Hinrichs, J., & Berensmeier, S. (2024). Purification of lactoferrin through a sequential filtration and magnetic separation process: A processing example for acid whey valorization. *Future Foods*, 9, 100342. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100342>
- Kusio, K., Szafrńska, J. O., Radzki, W., & Sołowiej, B. G. (2020). Effect of Whey Protein Concentrate on Physicochemical, Sensory and Antioxidative Properties of High-Protein Fat-Free Dairy Desserts. *Applied Sciences*, 10(20), 7064. <https://doi.org/10.3390/app10207064>
- Lavelli, V., & Beccalli, M. P. (2022). Cheese whey recycling in the perspective of the circular economy: Modeling processes and the supply chain to design the involvement of the small and medium enterprises. *Trends in Food Science & Technology*, 126, 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.013>
- Laz-Mero, M., Tuárez-Párraga, M. A., Córdova-Mosquera, A., Panchana-Cedeño, R., Solórzano Zambrano, L., Gavilanes-López, P., & Cedeño-Carpio, X. (2024). Aprovechamiento sostenible del lactosuero: oportunidades y desafíos para la economía circular. *Agroalimentaria*, 30(59), 129-147.
- Li, J., Wang, K., Liu, F., Ji, M., Ge, Z., & Xie, M. (2025). Charge-enhanced sulfonated block copolymer composite membrane for whey recovery. *Separation and Purification Technology*, 363, 132081. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132081>
- Lin, Y., Roos, Y. H., O'Sullivan, M., & Miao, S. (2025). Stabilization of nanoemulsions using cold-water fish gelatin and whey protein isolates/fibrils. *Food Hydrocolloids*, 168, 111496. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111496>
- López Nicolás, R., Sánchez-Moya, T., Ydjedd, S., Frontela-Saseta, C., & Ros-Berruero, G. (2023). Anti-inflammatory effect of milk whey from different species after in vitro digestion. *Nutrición Hospitalaria*. <https://doi.org/10.20960/nh.04451>
- Macedo, A., Azedo, D., Duarte, E., & Pereira, C. (2021). Valorization of Goat Cheese Whey through an Integrated Process of Ultrafiltration and Nanofiltration. *Membranes*, 11(7), 477. <https://doi.org/10.3390/membranes11070477>

- Mazorra-Manzano, M. A., & Moreno-Hernández, J. M. (2019). Propiedades y opciones para valorizar el lactosuero de la quesería artesanal. *CienciaUAT*, 133-144. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1134>
- Mehner, E., Fantin, V., Pizzichini, D., & Vaccari, M. (2024). Decentralised by-product valorisation in the dairy value chain: An opportunity for sustainable intensification. *Journal of Cleaner Production*, 478, 143958. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143958>
- Mendoza-Flores, L. A., Pérez-Flores, J. G., García-Curiel, L., Cruz-Guerrero, A. E., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., & González-Olivares, L. G. (2025). Whey as a functional ingredient in the food industry: A bibliometric study on its potential and innovation. *Food Science Today*, 4(1), 53-70. <https://doi.org/10.58951/fstoday.2025.007>
- Miloradovic, Z., Mirkovic, M., Bajcetic, N., Smigic, N., Djekic, I., & Miacinovic, J. (2025). Exploring consumer attitudes towards whey's health benefits. *International Dairy Journal*, 162, 106154. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.106154>
- Molinuevo-Salces, B., Da Silva-Lacerda, V., García-González, M. C., & Riaño, B. (2024). Production of Volatile Fatty Acids from Cheese Whey and Their Recovery Using Gas-Permeable Membranes. *Recycling*, 9(4), 65. <https://doi.org/10.3390/recycling9040065>
- Montalvo-Salinas, D., & Cantú-Lozano, D. (2018). Rheological performance of lactic acid production from whey using *Kluyveromyces marxianus* yeast. Effect of initial concentrations of substrate, inoculum and oxygen. *Ciencia e Ingeniería*, 39(3). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507557607001>
- Mota, J., Moura-Alves, M., Teixeira, A. F., Nóbrega, R., Lameirão, D., & Gonçalves, C. (2026). From Cheese Whey to Functional Ingredients: Upcycling Whey Proteins for Cardiovascular and Immunomodulatory Health—Evidence Mapping and Perspectives from Portugal. *Foods*, 15(5), 908. <https://doi.org/10.3390/foods15050908>
- Nath, P. C., Ojha, A., Debnath, S., Sharma, M., Nayak, P. K., Sridhar, K., & Inbaraj, B. S. (2023). Valorization of Food Waste as Animal Feed: A Step towards Sustainable Food Waste Management and Circular Bioeconomy. *Animals*, 13(8), 1366. <https://doi.org/10.3390/ani13081366>
- Novgorodska, N., & Bernyk, I. (2024). DRINK BASED ON MILK WHEY WITH VEGETABLE FILLERS. *Human and nation s health*, 2(4), 18-27. <https://doi.org/10.31548/humanhealth.4.2024.18>
- OECD & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2024-2033*. OECD. <https://doi.org/10.1787/2b0c9d81-es>
- Olson, R., Gavin-Smith, B., Ferraboschi, C., & Kraemer, K. (2021). Food Fortification: The Advantages, Disadvantages and Lessons from Sight and Life Programs. *Nutrients*, 13(4), 1118. <https://doi.org/10.3390/nu13041118>
- Ozturk, A. B., Acar, Z. D., Yilmaz, F., & Sagdic, O. (2025). Whey conversion scenarios for sustainable lactic acid, ethanol and hydrogen production: Techno-economic aspects of biofuels and biochemical production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, bbb.2761. <https://doi.org/10.1002/bbb.2761>
- Piazenski, I. N., Candelario, J. P. M., Soccol, V. T., Vandenberghe, L. P. D. S., Pereira, G. V. D. M., & Soccol, C. R. (2024). From lab to table: The path of recombinant milk proteins in transforming dairy production. *Trends in Food Science & Technology*, 149, 104562. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104562>
- Poitras, D., Perreault, V., Gaaloul, S., Schuck, P., & Bazinet, L. (2025). Lactic acid removal and demineralization of acid whey by coupling electrodialysis under pulsed electric fields with pre-concentration by nanofiltration: Impact on spray drying and powder quality. *Desalination*, 613, 119032. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119032>
- Posit team. (2026). *RStudio: Integrated Development Environment for R* (Versión 2026.1.1.403) [Software]. Posit Software, PBC. <http://www.posit.co/>
- Quille Quille, L., Luque Vilca, O. M., & Arhuanca Ordoñez, F. P. (2021). Potencialidades del lactosuero generado por la industria quesera y su valorización. *Revista Científica I+D Aswan Science*, 1(2), 16-23. <https://doi.org/10.51392/rcidas.v1i2.10>
- Quispe, W., & Quispe, P. (2025). Depuración sostenible de efluentes de la industria láctea mediante electrocoagulación. *2025*, 6(2). <https://doi.org/10.21142/SS-0602-2025-e132>
- R Core Team. (2025). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Raak, N., & Corredig, M. (2023). Towards creating sustainable foods from side streams: Heat-induced structure formation in blends of sunflower seed press cakes and cheese whey under moderate shear. *Food Hydrocolloids*, 144, 108932. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108932>
- Ramos-Suárez, J. L., Álvarez-Méndez, S. J., Ritter, A., González, J. M., & Pérez, A. C. (2024). A comprehensive evaluation of cheese whey to produce biogas in the Canary Islands. *Biomass and Bioenergy*, 180, 107008. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.107008>
- Rana, M. N., Saifullah, Md., Saeid, A., Kamal, Md. M., Gao, X., & Gao, X. (2025). Protein-based micro- and nano-transporters for gut microbiota modulators: Advances in delivery strategies and gut health benefits. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1706245. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1706245>
- Rodríguez, M., Añón, M. C., & Abraham, A. G. (2020). Pérdida de solubilidad de sistemas modelo de aislado de proteínas de lactosuero, caseinato de calcio, lactosa e inulina por acción de la composición y el tratamiento térmico. *2020*, (19), 23-36. <https://doi.org/10.12461/19.06>
- Rodríguez-González, D., Colominas-Aspuro, A. M., & Zumbado-Fernández, H. M. (2024). Utilización de suero lácteo en la elaboración de una bebida refrescante con fructooligosacáridos y pulpa de acerola (Malpighia emarginata D.C.). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 25(3). https://doi.org/10.21930/rcta.vol25_num3_art.3692
- Rohm, H., Morejón Caraballo, S., Salvador, A., Mendo, S., Llorca, E., Cattaneo, S., De Noni, I., Struck, S., Foschino, R., & Hernando, I. (2025). Sensory Properties of Fermented Blends of Sunflower Press Cake and Whey. *Foods*, 14(9), 1489. <https://doi.org/10.3390/foods14091489>
- Sah, B. N. P., McAinch, A. J., & Vasiljevic, T. (2016). Modulation of bovine whey protein digestion in gastrointestinal tract: A comprehensive review. *International Dairy Journal*, 62, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.07.003>
- Santos, H. C., Leonel, G. V. F., Ramos, L. C. D. S., Hudson, E. A., Pinto, M. S., Rezende, J. D. P., Vidigal, M. C. T. R., & Pires, A. C. D. S. (2024). Enhancing dairy sustainability: Rheological, sensory, and physical-chemical properties of low-fat fermented beverages incorporating buttermilk. *Journal of Cleaner Production*, 443, 141159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141159>
- Sar, T., Bogovic Matijasic, B., Danilovic, B., Gamero, A., Gandía, M., Krausova, G., Martínez-Villaluenga, C., Peñas, E., Bagherzadehsurbagh, E., Cemali, Ö., Santa, D., Künil, I. E., Kesenkas, H., Chassard, C., Pracer, S., Vergères, G., & Ergün, B. G. (2025). A systematic review of health promoting effects of consumption of whey-based fermented products on adults. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1651365. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1651365>
- Selmi, H., Presutto, E., Spano, G., Capozzi, V., & Fragasso, M. (2025). Valorising Whey: From Environmental Burden to Bio-Based Production of Value-Added Compounds and Food Ingredients. *Foods*, 14(21), 3646. <https://doi.org/10.3390/foods14213646>
- Sheerzad, S., Khorrami, R., Khanjari, A., Gandomi, H., Basti, A. A., & Khansavar, F. (2024). Improving chicken meat shelf-life: Coating with whey protein isolate, nanochitosan, bacterial nanocellulose, and cinnamon essential oil. *LWT*, 197, 115912. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115912>
- Shraddha R, C. R., & Nalawade T, K. A. (2015). Whey Based Beverage: Its Functionality, Formulations, Health Benefits and Applications. *Journal of Food Processing & Technology*, 6(10). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000495>
- Soumati, B., Atmani, M., Benabderrahmane, A., & Benjelloun, M. (2023). Whey Valorization – Innovative Strategies for Sustainable Development and Value-Added Product Creation. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 86-104. <https://doi.org/10.12911/22998993/169505>
- Soumati, B., Lazraq, A., Benabderrahmane, A., & Atmani, M. (2025). From gutter to value: Valorization of acid whey from fresh cheese using membrane filtration. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(5), 276-286. <https://doi.org/10.12912/27197050/203125>
- Sousa, Y. R. F., Araújo, D. F. S., Pulido, J. O., Pintado, M. M. E., Martínez-Férez, A., & Queiroga, R. C. R. E. (2019). Composition and isolation of goat cheese whey oligosaccharides by membrane technology. *International Journal of Biological Macromolecules*, 139, 57-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.181>
- Stres, B., Hatzikioseyan, A., Kousi, P., Remoundaki, E., Deutsch, L., Vogel Mikuš, K., Rak, G., & Kolbl Repinc, S. (2024). Case specific: Addressing co-digestion of wastewater sludge, cheese whey and cow manure: Kinetic modeling. *Heliyon*, 10(19), e38773. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38773>

- Tița, M. A., Moga, V.-M., Constantinescu, M. A., Bătușaru, C. M., & Tița, O. (2024). Harnessing the Potential of Whey in the Creation of Innovative Food Products: Contributions to the Circular Economy. *Recycling*, 9(5), 79. <https://doi.org/10.3390/recycling9050079>
- Uscanga-Domínguez, L. F., Orozco-García, I. J., Vázquez-Frias, R., Aceves-Tavares, G. R., Albrecht-Junghans, R. E., Amieva-Balmori, M., Bazaldúa-Merino, L. A., Bernal-Reyes, R., Camacho-de León, M. E., Campos-Gutiérrez, J. A., Carmona-Sánchez, R. I., Castro-Marín, L. V., Coss-Adame, E., Cuevas-Estrada, A. J., Escobedo-Martínez, J. A., González-Franco, L. R., Huerta-Iga, F. M., Lozano-Lozano, R., Martínez-Vázquez, S. E., ... Velázquez-Alva, M. C. (2019). Posición técnica sobre la leche y derivados lácteos en la salud y en la enfermedad del adulto de la Asociación Mexicana de Gastroenterología y la Asociación Mexicana de Gerontología y Geriatria. *Revista de Gastroenterología de México*, 84(3), 357-371. <https://doi.org/10.1016/j.rgmx.2019.03.002>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Velasco Morales, M. A., Venegas Venegas, J. A., Reyes Sosa, M. B., Hernández- Altemirano, R., Pinto Ruiz, R., López De Paz, P., Meza Avendaño, C. A., & Aguilar Aguilar, F. A. (2024). Sustainable biogas production via anaerobic co-digestion of cheese whey and cattle manure. *Biotecnia*, 26, e2063. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v26.2063>
- Ward, E. S., Gelinis, D., Dreesen, E., Van Santbergen, J., Andersen, J. T., Silvestri, N. J., Kiss, J. E., Sleep, D., Rader, D. J., Kastelein, J. J. P., Louagie, E., Vidarsson, G., & Spriet, I. (2022). Clinical Significance of Serum Albumin and Implications of FcRn Inhibitor Treatment in IgG-Mediated Autoimmune Disorders. *Frontiers in Immunology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.892534>
- Wijegunawardhana, D., Wijesekara, I., Liyanage, R., Truong, T., Silva, M., & Chandrapala, J. (2025). The effect of varying casein to whey protein ratio on physicochemical and structural properties of lactose and maltodextrin modified liquid and concentrated milk-tea blends. *Food Research International*, 213, 116466. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116466>
- Ye, Y., Fang, Y., Engholm-Keller, K., Bechshøft, M. R., Chatterton, D. E. W., Sangild, P. T., Nguyen, D. N., Bering, S. B., & Lund, M. N. (2025). Protein Digestibility and Anti-inflammatory Activity of Processed Whey Protein Ingredients for Infant Formula. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(9), 5465-5476. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c08785>
- Yousefi, N., Shokrollahi Yancheshmeh, B., & Gernaey, K. V. (2025). The Potential of Fermentation-Based Processing on Protein Modification: A Review. *Foods*, 14(20), 3461. <https://doi.org/10.3390/foods14203461>
- Zandona, E., Blažič, M., & Režek Jambrak, A. (2021). Whey Utilisation: Sustainable Uses and Environmental Approach. *Food Technology and Biotechnology*, 59(2), 147-161. <https://doi.org/10.17113/ftb.59.02.21.6968>