

## CULTIVO DE MICROALGAS: ESTRATEGIA SUSTENTABLE PARA LA VALORIZACIÓN DEL SUERO DE QUESO

Alejandra Ramírez Hernández <sup>a</sup>, Valeria Caltzontzin Rabell <sup>a</sup>, Carlos Eduardo  
Guzmán Martínez <sup>a</sup>, Claudia Gutiérrez Antonio <sup>a,\*</sup>

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Av. de las Ciencias esq. Blvd. Villas del  
Mesón S/N, Juriquilla, Querétaro, 76230, México. [claudia.gutierrez@uaq.mx](mailto:claudia.gutierrez@uaq.mx)

### Resumen

La producción de queso representa una de las actividades más relevantes de la industria. A nivel mundial, entre el 2018 y 2020 se produjeron 24 millones de toneladas anuales de queso, y se estima que se alcanzarán 27.6 millones de toneladas en el 2030. Durante la elaboración del queso se generan diferentes tipos de residuos. Sin embargo, el de mayor relevancia es el suero lácteo o suero de queso; éste se define como el residuo líquido que se genera cuando la caseína y la grasa se separan debido a la coagulación de la leche. Usualmente, las medianas y pequeñas empresas vierten el suero de queso a las redes de desagüe, lo que provoca contaminación; esto representa más de 40 millones de toneladas de suero de queso anualmente. De acuerdo con los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, estos efluentes superan el límite de descargas al agua lo que provoca daños al ecosistema mexicano. De manera tradicional se han considerado opciones en el manejo de efluentes del queso, las cuales incluyen tratamiento biológicos y fisicoquímicos. En ellos pueden recuperarse componentes de valor como proteínas y lactosa, o bien producirse ácidos lácticos, butanol, ácido acético, etc. Adicionalmente, la composición del suero de queso permite que éste pueda aprovecharse para el cultivo de microalgas y cianobacterias. Así, en el presente trabajo se realiza una revisión corta en relación al cultivo de microalgas como estrategia para el manejo de efluentes del proceso de producción de queso.

*Palabras clave:* suero de queso; microalgas; biocombustibles.

## **MICROALGAE CULTIVATION: SUSTAINABLE STRATEGY TO VALORIZE CHEESE WHEY**

### **Abstract**

Cheese production represents one of the most relevant activities in the industry. Worldwide, 24 million tons of cheese were produced annually between 2018 and 2020, and it is estimated that 27.6 million tons will be reached in 2030. Different types of waste are generated during cheese production. However, the most relevant is whey or cheese whey; this is defined as the liquid residue that is generated when casein and fat are separated due to the coagulation of milk. Usually, medium and small companies pour cheese whey into the sewage networks, which cause contamination; this represents more than 40 million tons of cheese whey annually. According to the parameters established in NOM-001-SEMARNAT-2021, these effluents exceed the limit of discharges into water, which causes damage to the Mexican ecosystem. Traditionally, the options that have been considered for the management of cheese effluents include biological and physicochemical treatments. Valuable components such as proteins and lactose can be recovered, or lactic acids, butanol, acetic acid, etc. can be produced. Additionally, the composition of cheese whey allows it to be used for the cultivation of microalgae and cyanobacteria. Thus, in this work a brief review is made regarding the cultivation of microalgae as a strategy for the management of effluents from the cheese production process.

*Keywords:* cheese whey; microalgae; biofuels.

## 1. Introducción

El suero de queso es el desecho más contaminante en la producción de queso (Rajeshwari y col., 2000). El volumen de efluentes producidos por esta industria se ha incrementado a la par de la producción del queso. La dilución de efluentes de queso es una alternativa que se considera para el manejo de estos efluentes, y consiste en la mezcla de suero de queso con otros efluentes menos contaminantes como el agua residual doméstica (Minhalma y col., 2007; Gannoun y col., 2008). Sin embargo, a pesar de la dilución de efluentes, el suero de queso puede perjudicar la estabilidad de los microorganismos en los procesos biológicos realizados en el tratamiento municipal de aguas residuales. Por otra parte, las alternativas para la gestión de este tipo de residuos no son lo suficientemente atractivas en medianas empresas; por lo que el manejo de efluentes del queso se ha convertido en un reto debido a sus requerimientos legales (Mawson, 1994; Farizoglu y col., 2007). Para el manejo de estos efluentes existen diferentes opciones de tratamiento, las cuales se mencionan a continuación.

El suero de queso puede someterse a tecnologías de valorización, a través de las cuales se recuperan componentes de valor

agregado como proteínas y lactosa (Domingues y col., 1999). Por otra parte, los tratamientos biológicos también pueden ser aplicados al suero de queso; de hecho, este tipo de tratamientos también pueden ser empleados como tecnologías de valorización. En este caso se emplean procesos de fermentación controlados para la conversión del suero de queso en ácidos lácticos, butanol, ácido acético, glicerol, acetona, etcétera. Finalmente, otra alternativa es la aplicación de tratamientos fisicoquímicos como coagulación-floculación, precipitación isoelectrica, precipitación alcalina, u oxidación electroquímica al suero de queso.

De manera general, el manejo del suero de queso se ha enfocado en la valorización y procesos biológicos, mientras que el efluente del suero de queso se somete a procesos biológicos, tratamientos fisicoquímicos, e incluso una combinación de tecnologías fisicoquímicas (Gannoun y col., 2008). No obstante, la composición del suero de queso también posibilita su uso para el cultivo de microalgas.

En esta línea de investigación, Lavelli y Becalli (2022) reportaron un interesante trabajo sobre las alternativas de procesamiento del suero de queso considerando aspectos de economía circular;

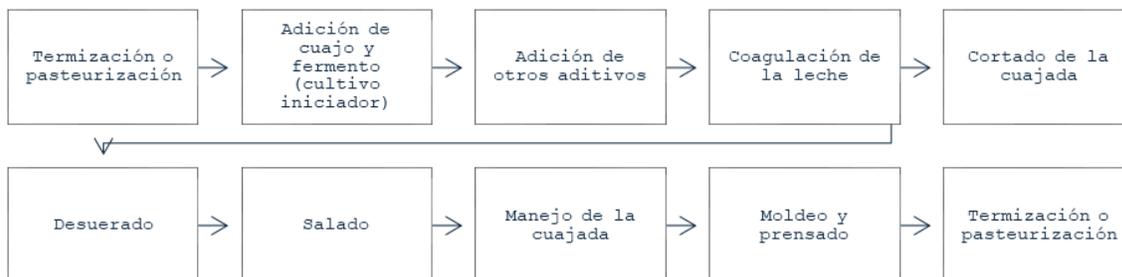
en ese trabajo, el uso de microalgas es explorado junto con otros procesos. Por otra parte, Gutiérrez-Hernández y col. (2022) se enfocaron en el manejo del suero de queso para la producción de lípidos microbianos. De igual manera, Najar-Almanzor y col. (2023) reportaron el uso de microalgas para el manejo de efluentes de las industrias quesera, tequilera y de producción de tortilla. Recientemente, Ozcelik y col. (2024) reportaron el uso de microalgas para el tratamiento de todos los efluentes de la industria láctea. Los trabajos antes mencionados representan un importante avance en el conocimiento científico en torno al manejo de efluentes de la industria láctea. Sin embargo, para el conocimiento de los autores ningún trabajo se ha enfocado en la recapitulación de los trabajos dedicados exclusivamente al suero de queso.

Por ello, en el presente trabajo se realiza una revisión corta en relación con el cultivo de microalgas para el manejo de efluentes del proceso de producción de queso, en particular el suero de queso. El uso de suero de queso como sustrato puede contribuir a minimizar el impacto ambiental de la industria quesera, y al mismo tiempo incrementar su rentabilidad, alineada a una estrategia de economía circular.

## 2. Suero de queso

El queso es el producto final obtenido al solidificar la leche por adición de agentes coagulantes o cuajo, y al eliminar el suero obtenido del proceso de coagulación. El queso puede presentarse madurado o como producto fresco (Madrid, 1996). Los ingredientes básicos de la fabricación del queso incluyen leche fresca como materia prima, cultivo de bacterias lácticas, enzimas coagulantes o ácidos, cuajo, y sal; también el queso contiene aditivos permitidos según el tipo de queso, y acorde a la legislación de cada país (Madrid, 1996). Para la elaboración del queso fresco se parte de la leche cruda fresca, la cual se somete a las operaciones presentadas en la Figura 1.

Durante la elaboración del queso se generan diferentes tipos de residuos; sin embargo, existe uno de mayor relevancia conocido como lactosuero, suero lácteo o suero de queso. El suero de queso se define como el residuo líquido que se genera cuando la caseína y la grasa se separan, debido a la coagulación de la leche (Frigon y col., 2009). Durante décadas, los investigadores han estudiado la posibilidad de utilizar el suero, dado que es un subproducto no deseado.



**Figura 1.** Etapas involucradas en la elaboración del queso fresco.

Usualmente, las medianas y pequeñas industrias queseras vierten el suero lácteo a las redes de desagüe, las cuales desembocan en cuencas o depósitos como ríos y lagos, provocando contaminación. El suero tiene un alto contenido nutritivo y proteico, por lo que se podría utilizar para obtener ciertos componentes proteicos; entre éstos se incluyen  $\alpha$ -lactoalbúmina ( $\alpha$ -la), péptidos específicos, así como la producción de lactosa, ácido láctico y bioetanol (Božanić y col., 2014).

El suero de queso o lactosuero es un residuo acuoso, generalmente de coloración amarilla verdosa o, semitransparente; éste es resultado del coagulado de las proteínas de la leche en la preparación de quesos (Amaral y da Silva, 2021). Es importante mencionar que en la fabricación de lácteos sólo se aprovecha del 10% hasta el 20% del producto completo en la elaboración de sus derivados, mientras que el 85% y hasta el 90% es suero de leche (Darade y Ghodake, 2012; Zandona y col.,

2021). Además, se estima que por cada kilogramo de queso producido se generan nueve litros de suero de leche (Garay y col., 2021). Sin embargo, este subproducto, aunque se considera un desecho, contiene el 55% del contenido nutricional de la leche. La composición del lactosuero incluye 93% de agua, 4-5% de lactosa, 1% de minerales, 0.5% de proteínas, 0.7% de ácido láctico, 0.3% de grasas, y la mayor parte de las vitaminas que contiene la leche; por ello, el lactosuero contiene una importante cantidad de componentes de alto valor nutricional (Panghal y col., 2018; Garay y col., 2021; Zandona y col., 2021).

De acuerdo con el método de coagulación, este subproducto puede ser de dos tipos: suero dulce o agrio. El suero dulce cuenta con un pH de 6-7, y resulta de la coagulación de caseína en la coagulación de queso; por otra parte, el suero agrio cuenta con un pH menor a 5 que se origina durante la fermentación o elaboración de queso fresco (Zandona y col.,

2021). Finalmente, el suero ácido proviene de la acción enzimática y ácida sobre la caseína. En la Tabla 1 se presenta la

composición química de cada tipo de suero detalladamente.

**Tabla 1.** Composición química general (g/L) del suero y distribución proteica. Elaboración propia con base en Badui (2006), así como Walzem y col. (2010).

Suero	Dulce	Ácido	Observación
Sólidos totales	63.0-70.0	63.0 -70.0	-
Lactosa	46.0 -52.0	44.0 -46.0	95% de la lactosa de la leche.
Proteínas	6.0 – 10.0	6.0 – 8.0	En una proporción 0.8 – 1.0% p/v, corresponde alrededor del 25% de las proteínas en la leche. Alto contenido de aminoácidos (leucina, isoleucina, lisina, valina) vs proteínas de referencia, caseína, proteína de soya y proteína humana.
Calcio	0.4 – 0.6	6.0 – 8.0	
Fosfatos	1.0 – 3.0	2.0 – 4.5	
$\alpha$ -Lacto albúmina	30% del total del contenido proteico.		
$\beta$ -Lacto globulina	Es importante porque tiene propiedades emulsionantes, y cumple una función relevante al interactuar con compuestos como el retinol y los ácidos grasos.		
Globulina	Corresponden a 10% del total de proteínas.		
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	Potasio, fósforo, sodio y magnesio. Ellos representan 8-10% del extracto seco.		

Compuestos biológicamente activos y péptidos bioactivos	Ejercen efectos biológicos y fisiológicos, y tienen potencial antihipertensivo, actividad antimicrobial, antioxidante, incremento de la saciedad, entre otros.
---	--

La producción del suero de queso a nivel mundial se estima en alrededor de 180 a 190 millones de toneladas al año (Mollea y col., 2013). La mayor parte del suero de queso proviene de la Unión Europea y Estados Unidos (70% aproximadamente del suero a nivel mundial); la generación de este subproducto crece a la par de la producción de leche, y representa el 2% de generación de suero por año (Smithers, 2008). A nivel mundial, más de 40 millones de toneladas de suero de queso son generadas anualmente (Carvalho y col., 2013). De acuerdo con los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, estos efluentes superan el límite de descargas al agua dañando al ecosistema mexicano (Bendicho y Lavilla, 2019). La contaminación del suero de queso es atribuible a la presencia de sales minerales, principalmente NaCl y KCl, además de sales de calcio. La contaminación inorgánica es consecuencia de la adición de NaCl durante la producción del queso (Carvalho y col., 2013). La producción de queso es responsable de tres tipos de efluentes; 1) suero de queso (resultado de la producción del queso), 2) el segundo suero de queso (resultado de la

producción de queso cottage), y 3) el agua residual del suero de queso (agua de lavado que contiene diferentes fracciones de suero de queso). Estos efluentes representan un impacto medioambiental en la industria láctea por las características fisicoquímicas, tales como minerales (0.46-10%), sólidos totales suspendidos ( $0.1-22 \text{ kg m}^{-3}$ ), pH (3.3-9.0), fósforo ( $0.006-0.5 \text{ kg m}^{-3}$ ), Nitrógeno Total de Kjeldahl (TKN por sus siglas en inglés, indicador de muestras cuantitativas presentes en muestras de agua) ( $0.01-1.7 \text{ kg m}^{-3}$ ), carga orgánica ( $0.6-102 \text{ kg m}^{-3}$ ), etcétera. El alto contenido de materia orgánica es causado por la lactosa ( $0.18-60 \text{ kg m}^{-3}$ ), proteína ( $1.4-33.5 \text{ kg m}^{-3}$ ) y grasas ( $0.08-10.58 \text{ kg m}^{-3}$ ). Esta materia orgánica es 99% biodegradable (Ergüder y col., 2001). Sin embargo, si no están controlados, la lactosa y la caseína generan fuertes olores, y atraen insectos, entre otros efectos no deseados (Rivas y col., 2010). Por ello, algunas alternativas para reducir el impacto ambiental de la industria quesera incluyen la reducción de uso de energía, la reducción de pérdida de producto, y el mejoramiento de la cartera de productos (Djekic y col., 2014).

Debido a las características antes mencionadas es que los efluentes de la industria de queso superan los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021; esto ocasiona serios daños al ecosistema mexicano (Bendicho y Lavilla, 2019). México produce alrededor de 332,251 toneladas de suero de queso anualmente, lo cual representa cerca de 2.875 millones de metros cúbicos (Osorio-González y col.,

2018). Las características fisicoquímicas del suero de queso son comparadas con la Norma Mexicana para descarga de aguas residuales en la Tabla 2. De allí que se presentan a continuación estrategias de manejo y valorización de este residuo, así como el uso potencial de las microalgas.

**Tabla 2.** Suero de queso en comparación con la norma mexicana de vertido de aguas residuales.

	<b>Suero de queso</b>	<b>NOM-001-SEMARNAT-2021</b>
pH	3.8-6.5	6-9
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	50,000-80,000	120-210
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	30,000-60,000	NA
Fosfatos (mg L <sup>-1</sup> )	336-434	15-21 <sup>a</sup>
Nitrógeno (mg L <sup>-1</sup> )	897-1200	30-35
Partículas suspendidas (mg L <sup>-1</sup> )	20-22	28-84
Referencias	Farizoglu y col. (2004), Carvalho y col. (2013), Slavov (2017)	DOF (2022)

<sup>a</sup>\_(Se refiere al fósforo total)

### 3. Uso de microalgas para la valorización del suero de queso

La biomasa microalgal puede tener diversas aplicaciones incluyendo su uso alimentario y como materia prima para biocombustibles.

De acuerdo con Mata y col. (2010), así como Chen y col. (2011) existen cuatro métodos principales de cultivo de microalgas: fotoautótrofo, heterotrófico, mixotrófico, y fotoheterotrófico. Con excepción del método

fotoautótrofo, estos métodos de cultivo requieren componentes orgánicos para el crecimiento de microalgas. Por ello, se consideran dos aspectos importantes para la selección de una fuente de carbono para la producción de biomasa microalgal: el costo económico y el impacto ambiental; en este contexto es que se toma como ventaja el uso de algunos residuos industriales en el cultivo de las microalgas. Como potencial medio de cultivo se encuentra el suero de queso, que es un residuo importante en la elaboración de queso; existen tres tipos de suero de queso en función de su valor de pH: suero dulce (pH 5.6), suero ácido (pH 5.1 o menos) y el suero proveniente de la cuajada (pH cerca de 6.5) (Conde-Báez y col., 2017). La composición del suero de queso puede variar de acuerdo con el origen del queso. Los valores reportados incluyen lactosa, 39-60 kg m<sup>-3</sup>, grasa, 0.99 -10.58 kg m<sup>-3</sup>, proteína, 1.4-8.0 kg m<sup>-3</sup>, y sales minerales, 0.46-10%; el contenido de nitrógeno y fósforo ha sido cuantificado como 0.2-1.76 kg m<sup>-3</sup> y 0.124-0.54 kg m<sup>-3</sup> (Carvalho y col., 2013).

Los componentes presentes en el suero de queso lo hacen un material potencial en el crecimiento de microalgas, ya que éstas requieren carbón, nitrógeno y fósforo en el proceso de cultivo (Abdel-Raouf y col., 2012). Así, existe una oportunidad de

incrementar la cadena de valor en la industria del queso mediante su uso como una fuente de nutrientes para la producción de biomasa (Kothari y col., 2012). En este contexto, se ha probado el potencial de dos especies de microalgas (*Chlorella pyrenoidosa* y *Chlamydomonas polypyrenoides*) para un doble uso: tratamiento de aguas residuales y la generación de biomasa para la producción de biocombustible (Abreu y col., 2012). Por otra parte, el trabajo reportado por Nazos y col. (2023) utilizó los efluentes del suero de queso proveniente de una industria quesera local en Grecia. El uso del suero de queso como sustrato muestra un alto potencial para la producción de biomasa de la microalga *Chlorella*, siempre que se diseñe adecuadamente el medio, siendo un ejemplo de revalorización.

Tsolcha y col. (2016) reportaron el desarrollo del cultivo mixotrófico de *Chlorella vulgaris* utilizando suero de queso como fuente de nutrientes; los autores probaron suero de queso hidrolizado y no hidrolizado, obteniendo mejores resultados con el suero de queso hidrolizado (Tsolcha y col., 2016). Además, Zúñiga-Estrada y col. (2016) realizaron el análisis experimental del potencial de suero de queso como fuente de nutrientes en un cultivo mixotrófico de

microalgas con el inóculo obtenido de aguas residuales de la región del Valle Mezquital, Hidalgo, México. Se identificaron dos especies de microalgas (*Desmodesmus maximus* y *Chlorella vulgaris*) y una cianobacteria (*Planktothrix pseudoagardii*) (Zuñiga-Estrada y col., 2016). El experimento se preparó bajo las condiciones reportadas por Conde-Mejía y col. (2019). En este caso, el objetivo fue proponer una alternativa que tome ventaja de los efluentes del suero de queso, lo que representa un beneficio ambiental comparado con otras opciones de valorización; esto se debe a la biofijación de CO<sub>2</sub> de la microalga, que ayuda de esta manera a reducir la huella de carbono generada en la industria láctea (Zúñiga-Estrada y col., 2016). Así, en el trabajo de Zúñiga-Estrada y col. (2016) se utilizó suero fresco de la producción de cuajada con un pH cerca del 6.65 en los experimentos, como fuente de carbono, y se definió un porcentaje de concentración de suero en el medio de cultivo. El inóculo de microalgas fue obtenido de aguas residuales y adaptadas a la solución de suero de queso. El crecimiento microalgal fue medido por un análisis de una densidad óptica de 685 nanómetros (OD<sub>685</sub>); además, se compararon dos fuentes de

nutrientes con el suero de queso, las aguas residuales y el fertilizante foliar. Los experimentos se realizaron en 3 fases de crecimiento con diferentes medios de cultivo: suero de queso, aguas residuales y fertilizante. Los resultados del medio de cultivo, así como el tiempo y productividad de cada uno se muestra en la Tabla 3.

La tasa superior de producción de biomasa al emplear suero de queso como medio de cultivo se confirma cuando la concentración y productividad de los diferentes medios son comparadas; de acuerdo con la Tabla 3, los mejores valores para la concentración de biomasa y productividad fueron para el suero de queso, con un tiempo de cultivo de 10 días con 1.0 g L<sup>-1</sup> y 0.1 g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. La producción en aguas residuales representa sólo el 41% de la producción de suero de queso, mientras que la producción con fertilizante representa el 8.6%; además, la concentración de biomasa descende a partir del día 17. Por otra parte, en la Tabla 4 se puede observar la tasa de crecimiento y productividad de biomasa microalgal reportada en la literatura, asociada al suero de queso como fuente de carbono.

**Tabla 3.** Rendimiento de biomasa y productividades resultantes para tres sustratos diferentes.

Fuente: Zúñiga-Estrada y col. (2016).

Medio	Tiempo de cultivo [días]	Producción de Biomasa [g L <sup>-1</sup> ]	Productividad [g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]
Suero de queso	10	1.000	0.1000
Suero de queso	17	0.910	0.0535
Aguas residuales	13	0.410	0.0315
Fertilizante	20	0.086	0.0043

**Tabla 4.** Tasa de rendimiento de biomasa microalgal y productividad reportada en la literatura, asociado al suero de queso como fuente de carbono.

Medio	Microalga	Producción de Biomasa [g L <sup>-1</sup> ]	Productividad [g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	Aceite y proteínas	Ref.
Solución fresca de suero de queso	<i>Chlorella vulgaris</i> <i>/Planktothrix pseudoagardii</i>	1.000	0.1000	14.56 mg L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> aceite 12.75 mg L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> proteína	Conde-Mejía y col. (2019)
Solución de polvo de suero de queso	<i>Chlorella vulgaris</i>	1.980	0.3200	474 mg L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 65%	Abreu. y col. (2012)
Solución en aguas residuales	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	6.800	0.4533	23% lípidos en peso seco	Kothari y col. (2012)
Solución de suero de queso fresco pre-tratado en filtro biológico anaerobio	<i>Choricystis</i>		0.2289	60.8-119.5 mg L <sup>-1</sup>	Tsolcha y col. (2016)

De acuerdo con los resultados reportados por Conde-Mejía y col. (2019), la concentración

inicial de azúcares fue de 2.05 g L<sup>-1</sup> y al final del cultivo del 0.21 g L<sup>-1</sup>; la biomasa

microalgal demostró un buen rendimiento de consumo de azúcares, con un porcentaje de 89%. En comparación al trabajo realizado por Tsolcha y col. (2016) presentó un rápido decremento de azúcares totales al día 2 del cultivo. También se reportó que utilizando el suero de queso pretratado en un filtro biológico anaerobio se puede acelerar la degradación de azúcares; lo anterior a diferencia del suero de queso directamente en el cultivo, resultando en una lenta degradación de azúcares.

Dentro del análisis de biomasa microalgal obtenido, los resultados del porcentaje de humedad, aceite, proteínas y cenizas fueron evaluados en los tres diferentes medios de cultivo. La humedad tuvo valores similares para los tres tipos de nutrientes. El porcentaje de cenizas fue significativamente alto en el cultivo en aguas residuales con un  $31.65\% \pm 3.01$ , moderado en el suero de queso con  $13.61\% \pm 0.35$  (10 días), y  $16.24\% \pm 0.47$  (17 días) en el fertilizante; este último se descartó, ya que no fue suficiente la cantidad de muestra. El contenido de aceite fue similar en el suero de queso (10 días) y agua residual; igualmente, entre el cultivo de suero de queso (17 días) y el fertilizante con resultados cercanos. Respecto de las proteínas, éstas presentan composiciones similares entre el

suero de queso (10 días) y el fertilizante. En cuanto a productividad, el valor mejor evaluado para aceite y proteína se obtuvo para el suero de queso de 10 días de cultivo (fase exponencial) con  $19.64 \text{ mg L}^{-1}\text{d}^{-1}$ , para la proteína fue de  $50.47 \text{ mg L}^{-1}\text{d}^{-1}$ .

La productividad de aceite obtenida fue más alta que los resultados reportados por Tsolcha y col. (2016) de  $8.84\text{-}16.41 \text{ mg L}^{-1}\text{d}^{-1}$ . La producción de biomasa microalgal utilizando el suero de queso en un cultivo mixotrófico obtuvo una mayor densidad celular, en comparación con los demás cultivos en las mismas condiciones obteniendo un consumo de azúcares de 89.0% en 17 días. Por ello se considera que es promisoría su utilización en la aplicación de producción de biocombustibles, además de disminuir el impacto ambiental de la industria del queso.

Cabe añadir que se han reportado estudios donde se han cultivado otras especies de microalgas en suero de queso. Por ejemplo, Girard y col. (2014) reportan el crecimiento de *Scenedesmus obliquus*, de la cual obtiene aceite para la producción de biodiésel. Por otra parte, Nham y col. (2024) reportan el uso de un policultivo de microalgas (*Scenedesmus*, *Monoraphidium*, diatomeas y algas verdes filamentosas) usando suero de queso permeado en una planta piloto en

condiciones externas. Otra especie cuyo cultivo ha sido estudiado en suero de queso es *Arthrospira* (Spirulina) *platensis*, la cual alcanzó una biomasa producida de 0.76 g/L en 14 días bajo iluminación continua (Athanasiadou y col., 2023). Finalmente, Abril Bonett y col. (2020) reportaron el crecimiento de *Desmodesmus sp.* en suero de queso bajo condiciones ambientales.

#### 4. Perspectivas

De manera paralela al cambio de paradigma hacia un modelo de economía circular, el suero de queso también ha evolucionado de ser considerado como un desecho a un recurso valioso. En México, el suero de queso supera en gran medida los límites permitidos de los compuestos que pueden ser vertidos en aguas residuales. En este contexto se han propuesto tecnologías que posibilitan la recuperación o generación de productos de alto valor agregado. Sin embargo, el uso del suero de queso como un medio para el cultivo de microalgas permite remover los compuestos que al mismo tiempo son utilizados para el crecimiento de la biomasa microalgal; dicha biomasa puede ser usada para la extracción y/o producción de compuestos de valor agregado, así como para la producción de biocombustibles.

Con base en la revisión de la literatura se observa que la microalga *Chlorella* es la más utilizada en el cultivo de las microalgas en suero de queso. Cabe destacar que este suero se puede utilizar diluido o sin diluir para el cultivo de las microalgas, lo anterior sin necesidad de un pretratamiento adicional. No obstante, la productividad de biomasa microalgal es más baja cuando se usa suero de queso, con respecto a la reportada al emplear aguas residuales. Un aspecto importante a resaltar es que los tiempos de cultivo no exceden de 17 días, los cuales inclusive son más cortos que algunos reportados para la crianza de insectos, como la mosca soldado negro (*Hermetia Illucens*). Es importante mencionar que el contenido de proteínas y aceites es más elevado en las microalgas cultivadas en suero de queso, respecto de otros medios como las aguas residuales. Estos resultados permiten considerar el uso de las microalgas cultivadas para la producción de alimentos para animales, plásticos o bien biocombustibles. Adicionalmente, el agua resultante puede ser utilizada en riego de áreas verdes, o sometida a un tratamiento posterior para el consumo humano.

## 5. Conclusiones

El suero de queso es un recurso valioso que se genera en la producción de queso, y cuya producción se incrementa a la par de la fabricación de queso. La composición del suero de queso incluye una gran cantidad de nutrientes, por lo cual no puede ser vertida directamente en el drenaje. Sin embargo, justamente esos nutrientes pueden ser utilizados como alimento para el cultivo de microalgas. La revisión del estado del arte muestra que es factible cultivar microalgas en soluciones de suero de queso con tiempos relativamente pequeños, alrededor de 17 días. De igual manera, las microalgas cultivadas en soluciones de suero de queso contienen altas cantidades de aceite y proteínas, lo cual permitiría la producción de alimentos para animales, plásticos o bien biocombustibles. Adicionalmente, el agua resultante puede ser utilizada en riego de áreas verdes, o sometida a un tratamiento posterior para el consumo humano.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por el Grupo Procesos Sustentables de Producción de Bioproductos a través de la beca de manutención de A. Ramírez Hernández. De igual manera, los

autores agradecen el apoyo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro a través de la beca de colegiaturas de A. Ramírez Hernández para el desarrollo de sus estudios de Posgrado.

## Referencias bibliográficas

Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A.A., e Ibraheem, I.B.M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>.

Abreu, A.P., Fernandes, B., Vicente, A.A., Teixeira, J., y Dragone, G. (2012). Mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* using industrial dairy waste as organic carbon source. *Bioresource Technology*, 118, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.005>.

Abril Bonett, J.E., de Sousa Geraldino, P., Gomes Cardoso, P., de Freitas Coelho, F., y Ferreira Duarte, W. (2020). Isolation of freshwater microalgae and outdoor cultivation using cheese whey as substrate. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29, 101799. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101799>.

Amaral, D.A., y da Silva, J.A.F. (2021). Whey in the industry: environmental and valorization 19 impacts. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 1(9), 41-57. <https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/environmental-engineering-en/whey>.

Athanasiadou, V., Klontza, E.E., Dimitriou-Christidis, P., Fountoulakis, M., y Lekkas, D.F. (2023). Evaluation of *Arthrospira* (*Spirulina*) platensis growth on cheese whey in the context of circular economy. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 34, 101173. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101173>.

Badui-Dergal, S. (2006). *Química de los Alimentos*. Pearson.

Bendicho, C., y Lavilla, I. (2019). Water analysis sewage. En P. Worsfold, A. Townshend, C. Poole, M. Miró (Eds.). *Encyclopedia of Analytical Science*, 3ª edición (pp. 371–381). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11519-7>.

Božanić, R., Barukčić, I., Lisak, K., y Tratnik, L. (2014). Possibilities of whey utilisation. *Austin Journal of Nutrition and Food Science*, 2(7), 1036.

Carvalho, F., Prazeres, A.R., y Rivas, J. (2013). Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the Total Environment*, 445–446, 385–396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.038>.

Chen, C.Y., Yeh, K.L., Aisyah, R., Lee, D.J., y Chang, J.S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. *Bioresource Technology*, 102(1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.159>.

Conde-Báez, L., Castro-Rosas, J., Villagómez-Ibarra, J.R., Páez-Lerma, J.B., y Gómez-Aldapa, C. (2017). Evaluation of waste of the cheese industry for the production of aroma of roses (phenylethyl alcohol). *Waste and Biomass Valorization*, 8, 1343–1350. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9654-6>.

Conde-Mejía, C., Aguilar-Arteaga, K., Rosas-Escamilla, D.A., López-Molina, A., Díaz-Batalla, L., y Guerrero-Zárate, D. (2019). Microalgae biomass production by mixotrophic cultivation using cheese whey as an alternative carbon source. *DYNA Energía*

y *Sostenibilidad*, 8(1), 1-11.  
<http://dx.doi.org/10.6036/ES9048>.

Darade, R.V., y Ghodake, S.S. (2012). An overview of whey beverages. *Research Journal of Animal Husbandry and Dairy Science*, 3(1), 41-44.

Djekic, I., Miocinovic, J., Tomasevic, I., Smigic, N., y Tomic, N. (2014). Environmental life-cycle assessment of various dairy products. *Journal of Cleaner Production*, 68, 64-72.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.054>

DOF, Diario Oficial de la Federación (2022). *NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021*.  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0).

Domingues, L., Lima, N., y Teixeira, J.A. (1999). Novas metodologias para a fermentação alcoólica do soro de queijo. *Actas da 6.a Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente*, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 3, 271-280.  
<https://hdl.handle.net/1822/3671>.

Ergüder, T.H., Tezel, U., Güven, E., y Demirer, G.N. (2001). Anaerobic biotransformation and methane generation

potential of cheese whey in batch and UASB reactors. *Waste Management*, 21(7), 643-650.  
[https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00114-8).

Farizoglu, B., Keskinler, B., Yildiz, E., y Nuhoglu, A. (2007). Simultaneous removal of C, N, P from cheese whey by jet loop membrane bioreactor (JLMBR). *Journal of Hazardous Materials*, 146(1-2), 399-407.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.051>.

Frigon, J.C., Breton, J., Bruneau, T., Moletta, R., y Guiot, S.R. (2009). The treatment of cheese whey wastewater by sequential anaerobic and aerobic steps in a single digester at pilot scale. *Bioresource Technology*, 100(18), 4156-4163.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.077>.

Gannoun, H., Khelifi, E., Bouallagui, H., Touhami, Y., y Hamdi, M. (2008). Ecological clarification of cheese whey prior to anaerobic digestion in upflow anaerobic filter. *Bioresource Technology*, 99(14), 6105-6111.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.037>.

Garay, P.A., Villalva, F.J., Paz, N.F., Goncalvez de Oliveira, E., Ibarguren, C.,

Alcocer, J.C., Curti, C.A., y Ramón, A.N. (2021). Formulation of a protein fortified drink based on goat milk whey for athletes. *Small Ruminant Research*, 201, 106418. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2021.106418>.

Girard, J.M., Roy, M.L., Hafsa, M.B., Gagnon, J., Faucheux, N., Heitz, M., Tremblay, R., y Deschênes, J.S. (2014). Mixotrophic cultivation of green microalgae *Scenedesmus obliquus* on cheese whey permeate for biodiesel production. *Algal Research*, 5, 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.03.002>.

Gutiérrez-Hernández, C.A., Hernández-Almanza, A., Hernández-Beltran, J.U., Balagurusamy, N., y Hernández-Teran, F. (2022). Cheese whey valorization to obtain single-cell oils of industrial interest: An overview. *Food Bioscience*, 50, 102086. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102086>.

Kothari, R., Pathak, V.V., Kumar, V., Singh, D.P. (2012). Experimental study for growth potential of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* on dairy wastewater: An integrated approach for treatment and biofuel production. *Bioresource Technology*, 116, 466-470.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.121>.

Lavelli, V., y 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>.

Mata, T.M., Martins, A.A., y Caetano, N.S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>.

Mawson, A.J. (1994). Bioconversions for whey utilization and waste abatement. *Bioresource Technology*, 47(3), 195-203. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90180-5](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90180-5).

Minhalma, M., Magueijo, V., Queiroz, D.P., y de Pinho, M.N. (2007). Optimization of “Serpa” cheese whey nanofiltration for effluent minimization and by-products recovery. *Journal of Environmental Management*, 82(2), 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.12.011>.

Mollea, C., Marmo, L., y Bosco, F. (2013). Valorization of cheese whey, a by-product from the dairy industry. En I. Muzzalupo (Ed.). *Food Industry* (pp. 549-588). Intech Open. <http://dx.doi.org/10.5772/53159>.

Najar-Almanzor, C.E., Velasco-Iglesias, K.D., Nunez-Ramos, R., Uribe-Velázquez, T., Solis-Bañuelos, M., Fuentes-Carrasco, O.J., Chairez, I., García-Cayuela, T., y Carrillo-Nieves, D. (2023). Microalgae-assisted green bioremediation of food-processing wastewater: A sustainable approach toward a circular economy concept. *Journal of Environmental Management*, 345, 118774. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118774>.

Nazos, T.T., Stratigakis, N.C., Spantidaki, M., Spantidaki, A.L., y Ghanotakis, D.F. (2023). Characterization of cheese whey effluents and investigation of their potential to be used as a nutrient substrate for *Chlorella* biomass production. *Waste and Biomass Valorization*, 14, 3643-3655. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02081-z>.

Nham, Q., Legrand, C., y Lindehoff, E. (2024). Microalgal production and nutrient recovery under mixotrophic mode using cheese whey permeate. *Bioresource*

*Technology*, 410, 131250. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131250>.

Osorio-González, C.S., Sandoval-Salas, F., Hernández-Rosas, F., Hidalgo-Contreras, J.V., Gómez-Merino, F.C., y Ávalos de la Cruz, D.A. (2018). Potencial de aprovechamiento del suero de queso en México. *Agroproductividad*, 11(7), 101-106.

Ozcelik, D., Suwal, S., Ray, C., Tiwari, B.K., Jensen, P.E., y Poojary, M.M. (2024). Valorization of dairy side-streams for the cultivation of microalgae for value added food products, *Trends In Food Science & Technology*, 146, 104386. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104386>.

Panghal, A., Patidar, R., Jaglan, S., Chhikara, N., Khatkar, S.K., Gat, Y., y Sindhu, N. (2018). Whey valorization: current options and future scenario – a critical review. *Nutrition & Food Science*, 48(3), 520-535. <https://doi.org/10.1108/NFS-01-2018-0017>.

Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., y Kishore, V.V.N. (2000). State of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 135-156.

[https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00014-3).

Rivas, J., Prazeres, A.R., Carvalho, F., y Beltrán, F. (2010). Treatment of cheese whey wastewater: Combined Coagulation-Flocculation and Aerobic Biodegradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(13), 7871-7877. <https://doi.org/10.1021/jf100602j>.

Slavov, A.K. (2017). General characteristics and treatment possibilities of dairy wastewater – A review. *Food Technology and Biotechnology*, 55(1), 14-28. <https://doi.org/10.17113/ftb.55.01.17.4520>.

Smithers, G.W. (2008). Whey and whey proteins—From ‘gutter-to-gold’. *International Dairy Journal*, 18(7), 695–704. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008>.

Tsolcha, O.N., Tekerlekopoulou, A.G., Akrotos, C.S., Bellou, S., Aggelis, G., Katsiapi, M., Moustaka-Gouni, M., y Vayenas, D.V. (2016). Treatment of second cheese whey effluents using a Choricystis-based system with simultaneous lipid production, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91, 2349-2359. <https://doi.org/10.1002/jctb.4829>.

Vicente, A.M. (1996). *Curso de Industrias Lácteas*, Mundi-Prensa Libros SA.

Walzem, R.L., Dillard, C.J., y German, J. B. (2010). Whey components: Millennia of evolution create functionalities for mammalian nutrition: What we know and what we may be overlooking. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 42(4), 353-375. <https://doi.org/10.1080/10408690290825574>

Zandona, E., Blažić, M., y Režek Jambrak, A. (2021). Whey utilization: Sustainable uses and environmental approach. *Food Technology and Biotechnology*, 59(2), 147–161. <https://doi.org/10.17113/ftb.59.02.21.6968>.

Zúñiga-Estrada, M., Vázquez-Rodríguez, G.A., Aguilar-Arteaga, K., Coronel-Olivares, C., y López-Molina, A. (2016). Tratamiento de agua residual doméstica en un fotobiorreactor de lecho móvil. En A.M. Sales Cruz, M.A. Morales Cabrera, M.d.R. Enríquez Rosado, J.R. Robledo Ortiz, N. Ramírez Corona, A. Bonilla Petriciolet, J.A. Ochoa Tapia (Eds.) *Memorias del XXXVII Encuentro Nacional de la AMIDIQ* (pp. BIO652-BIO655). Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química.