

Eficiencia de un sistema combinado para la remoción de carga orgánica de efluentes**Efficiency of a combined system for the removal of organic load from dairy effluents**APAZA-AQUINO, Hugo¹

Universidad Nacional Agraria La Molina

RESUMEN

Uno de los principales residuos que se genera en la industria láctea es el lactosuero, por su alta carga orgánica representa un serio problema ambiental cuando es desechado a cuerpos naturales receptores, alterando su calidad ambiental. Se evaluó la eficiencia de un sistema combinado compuesto por la electrocoagulación y filtro biológico; para lo cual se realizó el proceso de electrocoagulación en un reactor de régimen batch con electrodos de aluminio y hierro, el filtro biológico fue empaquetado con biomasa compuesta por: *Bacillus spp*, *Acinetobacter spp*, *Lactobacillus spp* y *Streptococcus spp*. La electrocoagulación fue el responsable de disminuir en más del 80% de la carga orgánica y el filtro biológico trabajando con una carga orgánica promedio de 1405 mg/L de DBO₅ contribuyó en la disminución del remanente de la carga orgánica; el sistema combinado de electrocoagulación - filtro biológico con recirculación logró una eficiencia de remoción para la DQO del 89,7 % y para la DBO₅ del 89,8 %, con un pH final de 7,37. Existen diversas tecnologías para tratar aguas residuales de la industria láctea, pero la aplicación un sistema combinado podría ser una alternativa para tratar aguas residuales lácteas por la eficiencia que se obtuvo.

Palabras clave: Aguas residuales, electrocoagulación, filtro biológico, lácteo, lactosuero.

ABSTRACT

One of the main residues generated in the dairy industry is whey, due to its high organic load it represents a serious environmental problem when it is disposed of to receiving natural bodies, altering its environmental quality. The efficiency of a combined system composed of electrocoagulation and biological filter was evaluated; for which the electrocoagulation process was carried out in a batch reactor with aluminum and iron electrodes, the biological filter was packed with biomass composed of: *Bacillus spp*, *Acinetobacter spp*, *Lactobacillus spp* and *Streptococcus spp*. Electrocoagulation was responsible for reducing the organic load by more than 80% and the biological filter working with an average organic load of 1405 mg / L of BOD₅ contributed to the reduction of the remaining organic load; the combined electrocoagulation-biological filter system with recirculation achieved a removal efficiency for COD of 89.7% and for BOD₅ of 89.8%, with a final pH of 7.37. There are various technologies to treat wastewater from the dairy industry, but the application of a combined system could be an alternative to treat dairy wastewater due to the efficiency obtained.

Keywords: Wastewater, electrocoagulation, biological filter, dairy, whey.

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista UCV HACER Campus Chiclayo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

Recibido: 21 de octubre de 2020**Aceptado:** 17 de diciembre de 2020**Publicado:** 04 de enero de 2021

¹Ingeniero Biotecnólogo, Magíster en Ciencias Ambientales, Investigador – Asociación de Investigación Científica BIOS, e-mail: hapaza89@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-1592-7461>

INTRODUCCIÓN

Una de las principales actividades agropecuarias en el Perú es en torno a los productos lácteos; la demanda de productos lácteos está aumentando en diferentes países, lo que se significa el desarrollo de la industria láctea y a su vez el aumento en la generación de desechos (Ahmad et al., 2019). Las industrias de lácteos consumen grandes volúmenes de agua, además generan una gran cantidad de aguas residuales con un gran volumen de lodos heterogéneos (Ahmad et al., 2019; Akansha et al., 2020; Ashekuzzaman et al., 2019; López & Harnisth, 2016), sus efluentes residuales a menudo contienen altos niveles de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (Reilly et al., 2019; A. M. Rojas et al., 2015; Sharma, 2014). Pero a su vez también son aguas residuales ricas en nutrientes que requieren tratamiento antes de que puedan ser liberadas al medio ambiente (Gopinatha et al., 2019),

Entre los principales residuos que genera la industria láctea es el lactosuero, el cual es un líquido que permanece después de la recuperación de la cuajada formada durante la producción de queso, el cual contiene un 80-90% del volumen total de la leche (Gassmann et al., 2016); una parte importante del suero de leche se emplea en la alimentación animal, más otra, es vertida a los cuerpos acuáticos, contaminando las fuentes naturales de agua (Pais Chanfrau et al., 2017). Si no se trata adecuadamente y se deposita directamente en cuerpos naturales, puede causar graves problemas ambientales e incluso puede afectar a los seres humanos, organismos que viven en el agua y agricultura (Ahmad et al., 2019). Por lo tanto es necesario el tratamiento de los efluentes lácteos, en la que principalmente está el lactosuero, con la finalidad de reducir los niveles de contaminantes antes de descargar o reutilizar el agua (Reilly et al., 2019).

Existen diversas tecnologías y métodos para tratar los efluentes lácteos, tales como: fotocatalisis solar (Afsharnia et al., 2018), reactor UASB (Liviac & Vela, 2016), reactor de biofilm de lecho móvil -MBBR (A. D. Santos et al., 2020), tratamiento con membranas compuestas (Catenacci et al., 2020), humedales subsuperficiales (Nocetti, 2018), tratamiento por electrofloculación (Gassmann et al., 2016),

nanofiltración (Posada, 2016), mediante enzimas obtenidas por fermentación de cáscaras de frutas/verduras, melaza y agua (Sambaraju & Sree, 2020); incluso utilizando coagulantes naturales como el *Guazuma Ulmifolia* (Lopes et al., 2020) o el mucílago de *Opuntia Ficus* (Lisintuña et al., 2020). Pero también se aplicaron sistemas combinados, por ejemplo la combinación de poliacrilamida (PAM) y coagulantes Tanfloc (M. Do Santos et al., 2020). Todos estos sistemas mencionados presentan sus ventajas y desventajas pero todos apuntan a la reducción de la carga orgánica que viene a ser el principal componente en los efluentes lácteos.

Por otra parte diversos métodos basados en la electroquímica se aplican para tratar las aguas residuales ya que este tipo de tecnologías reducen el uso de productos químicos y eliminan los contaminantes más persistentes en comparación con los tratamientos físicos y químicos tradicionales (Meas et al., 2010). Es por eso que la electrocoagulación es una tecnología emergente que se presenta como alternativa para el tratamiento de aguas residuales (Arango-Ruiz, 2014); la electrocoagulación es un tratamiento electroquímico de aguas y aguas residuales, el cual emplea una celda electroquímica en la que se aplica voltaje de corriente continua a los electrodos de sacrificio, los cuales son comúnmente hierro o aluminio (Barrera-Díaz et al., 2018). Dentro de las principales ventajas de la electrocoagulación esta que remueve la mayor cantidad de carga orgánica en menor tiempo, en comparación con los métodos tradicionales.

Otra de las tecnologías que tienen bastante acaparamiento son los procesos biológicos, los filtros biológicos que emplean como principales agentes a los microorganismos permiten una depuración eficiente de efluentes con menor carga contaminante. Se puede desarrollar procesos anaeróbicos como aeróbicos o facultativos, los procesos biológicos anaerobios se caracterizan por la transformación del contenido en materia orgánica en productos de valor añadido como el biogás o el hidrógeno, y sus aplicaciones como biocombustibles (Fernández et al., 2016). La aplicación de microorganismos eficientes ayuda al proceso de descomposición de la materia orgánica, mejorando las características fisicoquímicas de aguas residuales (Tirado et al., 2016). Por lo mencionado un tratamiento

combinado podría ser una alternativa para tratar efluentes de la industria láctea.

Se tiene como objetivo principal determinar la eficiencia del sistema combinado de electrocoagulación y filtro biológico en la remoción de carga orgánica de los efluentes lácteos.

METODOLOGÍA

Recolección y análisis fisicoquímico de las muestras

Se trabajó con el efluente lácteo generado por la planta piloto de leche de la Universidad Nacional Agraria La Molina, todas las muestras fueron recolectadas en el punto de la poza de vertimiento final. Esta planta procesa principalmente: queso, leche embolsada y yogurt, lo cual genera una alta variabilidad en el efluente; siendo la principal composición del efluente general el lactosuero desechado y el efluente propio de los diversos procesos, razón por la cual se trabajó con una muestra compuesta de lactosuero y efluente en relación 1:6, se tomaron muestras representativas que se caracterizaron según los parámetros que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1
Parámetros evaluados y metodología de análisis.

Parámetro	Unidad	Método
pH	Unidades de pH	SM N° 4500 H ⁺ - B
Temperatura	°C	SM N° 2550 - B
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	8000 HACH digestión reactor*
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/l	SM N° 5210 - B
Conductividad	μS/cm	SM N° 2510 - B
Turbidez	NTU	SM N° 2130 - B

SM: Standard Methods for the examination of water and wastewater.

*Para la determinación de DQO se empleó viales de digestión de rango de 0 - 1500 mg/L.

El sistema combinado consistió en tratar primero el efluente con un sistema de electrocoagulación para reducir la mayor cantidad de carga orgánica, para posteriormente complementarlo con un filtro biológico.

Pruebas preliminares de electrocoagulación

Se trabajó en régimen batch de capacidad de 3,5 L, se usaron electrodos de aluminio y hierro, a un distanciamiento de 15 mm entre electrodos, con una densidad de corriente de 39,95 A/m² y tiempo de reacción de 30 minutos. El primer experimento se realizó con el efluente generado después de la elaboración de queso fresco, el segundo con el lactosuero generado después de la elaboración de queso fresco y el tercero con una muestra con relación 1:6 de lactosuero y efluente respectivamente.

Pruebas de electrocoagulación

Se construyó un reactor de régimen batch de material acrílico tal como se aprecia en la Figura 1, con dimensiones de 26,5 cm de largo, 16 cm de ancho y 14 cm de alto, con una capacidad de 5,93 litros, se instaló una llave de paso en la parte inferior de la celda para la obtención de muestras, dentro del reactor se acondicionaron separadores de acrílico para sostener los electrodos sumergidos de hierro y aluminio dispuestas en paralelo, con dimensiones de 7 cm x 10 cm y espesor de 3 mm y con separaciones de 15 mm entre los electrodos. El proceso de electrocoagulación se realizaron con la muestra compuesta 1:6 (lactosuero - efluente), bajo las siguientes condiciones: pH 6,8 (valor en la mezcla 1:6 del lactosuero con el efluente lácteo), densidad de corriente de 44,39 A/m² y tiempo de reacción de 45 minutos. Después de cada lote de electrocoagulación se dejó sedimentar por un periodo de 1 hora.

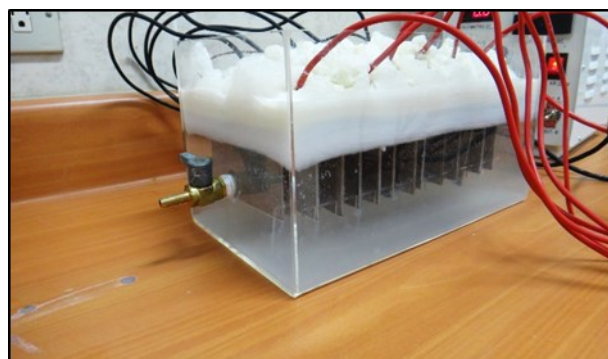


Figura 1. Sistema de electrocoagulación.

Una vez tratado parcialmente el efluente por la electrocoagulación, este efluente sirvió como alimentación para el filtro biológico.

Diseño y construcción del biofiltro

El filtro se dimensionó en función al volumen promedio de efluente que se generaba en la etapa de electrocoagulación y a su concentración en DBO_5 , con estos valores se dimensionó el volumen del filtro considerando los parámetros de tiempo de retención hidráulica (TRH) y la carga espacial de DBO_5 . El filtro se construyó con las siguientes características: diámetro 3 cm, altura 100 cm, y volumen total de 0,706 L estos valores se obtuvieron del cálculo que se muestra en la sección de resultados, se construyó el filtro en material acrílico transparente tal como se aprecia en la Figura 2. Se empleó como material de soporte piedra Pómez, con un diámetro aproximado de 0,5 cm, la distribución del efluente se realizó mediante mangueras de plástico, se empaco con biomasa compuesta por los microorganismos de: *Bacillus spp*, *Acinetobacter spp*, *Lactobacillus spp* y *Streptococcus spp*, las cuales fueron aislados de la misma planta piloto.

Evaluación del sistema combinado de electrocoagulación - filtro biológico

Para la alimentación del filtro biológico se dispuso de un recipiente de plástico de capacidad de 4,5 L donde se almacenó el efluente proveniente de la etapa de la electrocoagulación y este efluente tratado mediante una bomba peristáltica se llevó a la parte superior del filtro biológico para distribuirla uniformemente a través del área de sección transversal; el agua que atravesaba el filtro percolador se recolectaba en un recipiente de plástico de capacidad de 1,5 litros, donde se dejaba sedimentar el efluente para separar la biomasa desprendida. Se realizó la evaluación del sistema con recirculación, para lo cual se trabajó a un flujo de 1ml/min. La evaluación se realizó en la sexta semana de funcionamiento del sistema, se tomó muestras cada 24 horas.

Para evaluar la eficiencia del sistema se determinó mediante la medición de condiciones iniciales y las condiciones finales después de la salida del filtro biológico, para lo cual se determinó los parámetros fisicoquímicos como la DQO, DBO_5 , turbidez, pH, conductividad.

$$\text{Eficiencia} = \left(\frac{DQO_0 - DQO_t}{DQO_0} \right) \times 100$$

Donde:

C_0 : Concentración de DQO a la entrada

C_t : Concentración de DQO a la salida



Figura 2. Sistema del filtro biológico.

RESULTADOS

Tras realizar el proceso de electrocoagulación a 3 tipos de muestra (lactosuero, efluente y mezcla 1:6 de lactosuero - efluente), se obtuvieron los porcentajes de remoción de turbidez que se muestra en la Tabla 2. Cuando se realizó la electrocoagulación en las muestras de lactosuero, tras finalizar el proceso se apreció una capa de grasa con cierta cantidad de sarro depositada en los electrodos, algo contrario se apreció en los experimentos llevados a cabo con las muestras de efluente lácteo. En la Figura 3 se aprecia muestras después haber sedimentado tras haber aplicado el proceso de la electrocoagulación.

Tabla 2

Resultados de los parámetros fisicoquímicos tras realizar el proceso de la electrocoagulación.

Parámetro	Unidad	Lactosuero	Efluente	Mezcla (1:6)
pH	valor	6,93	8,95	8,9
Temperatura	°C	26,7	28,5	27,8
Conductividad	mS/cm	5,54	3,58	3,65
% Remoción turbidez	valor	31,58	99,3	96,43

Fuente. Elaboración propia.

Los efluentes lácteos se caracterizan por su elevada carga orgánica, el cual es producto del aporte orgánico del lactosuero desechado en sus aguas, como a su vez de las aguas de lavado. Pero el volumen mayoritario que es representado por las aguas de lavado presenta una carga orgánica baja, pero no representa el promedio de un efluente lácteo ya que este varía dependiendo del proceso productivo, razón por la cual se realizó una mezcla 1:6 de lactosuero - efluente para tener una muestra que represente un efluente lácteo con una carga contaminante promedio, al realizar la prueba de electrocoagulación a esta muestra compuesta se llegó a obtener una remoción de turbidez de 96,43 %.

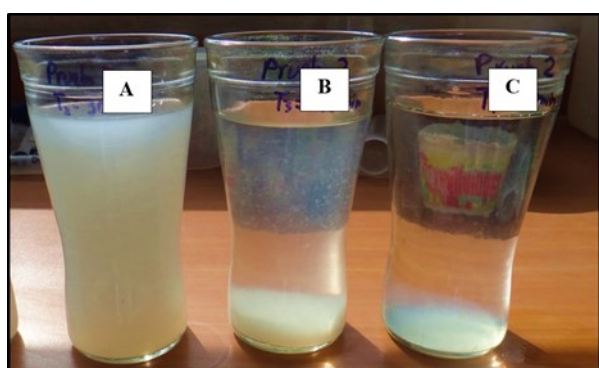


Figura 3. Muestras después de haber realizado el proceso de electrocoagulación. (A) Lactosuero, (B) mezcla 1:6 y (C) efluente.

En la Tabla 3 se muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica de las muestras donde 1 corresponde al efluente de alimentación (mezcla efluente-lactosuero en relación 1:6) antes de ingresar al sistema en conjunto y la muestra 2 corresponde a después de ser tratado por el sistema de electrocoagulación, éste efluente último representa la alimentación para el filtro biológico.

Tabla 3
Caracterización del efluente de alimentación y después de haber realizado la electrocoagulación.

Parámetro	Unidad	Muestra	
		1	2
pH	Valor	6,82	9,17
Temperatura	°C	20,9	21
Conductividad	mS/cm	3,96	3,87
DQO	mg/L	23880	3672
DBO ₅	mg/L	7960	1405
Turbidez	NTU	2390	7,98

Fuente. Elaboración propia.

En la Tabla 4 se presenta los resultados de los parámetros fisicoquímicos tras haber realizado la evaluación del sistema en conjunto.

Tabla 4
Resultados de la eficiencia del filtro biológico con recirculación.

Parámetro	Unidad	Muestra				
		1	2	3	4	5
pH	Valor	7,3	7,37	7,5	7,28	7,39
Temperatura	°C	22	21,8	20,5	21,2	20,3
Conductividad	mS/cm	3,97	3,92	3,89	3,95	3,94
Eficiencia de remoción de DQO	%	29,7	33,2	31,6	28,6	32,1
Eficiencia de remoción de DBO ₅	%	44,4	42,2	38,4	43,4	41,5
Turbidez	NTU	8,53	8,38	8,1	7,89	8,3

Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados mostrados en las Tablas 3 y 4, el sistema combinado de electrocoagulación - filtro biológico con recirculación tuvo una eficiencia del 89,74 % en cuanto a la remoción de la DQO y 89,79 % en cuanto a la remoción de DBO₅, con un pH final de 7,37; estos resultados obtenidos es debido a que el sistema de electrocoagulación sería la responsable de remover el mayor porcentaje de carga orgánica y el menor restante sería complementado con el filtro biológico, al trabajar con ambos sistemas combinados se logra reducir efectivamente la carga orgánica.

Se ensayó a una carga orgánica superior a 3000 mg/L pero a un flujo de 1ml/min, lográndose la mayor remoción de DQO en 33,2 %. Si bien es cierto que se puede obtener mayores porcentajes de remoción ampliando el TDH o trabajando con mayor área superficial, se debe considerar diversos factores como: los microorganismos empleados, el tiempo de residencia y las condiciones climáticas, ya que la actividad de los microorganismos se ven favorecidos a temperaturas entre 20 - 37°C.

Otro de los factores muy importantes a tener en cuenta en los filtros biológicos son los medios de soporte, ya que la formación del área de la biopelícula, encargada de degradar la materia orgánica dependerá del medio de soporte. Los

medios de soporte más empleados por su mayor área específica son los de material de plástico, pero cuando no se disponga de recursos para emplearlos se puede emplear como medio de soporte las piedras, astillas de madera etc. Se empleó como soporte la piedra Pómez por la porosidad que presenta la cual es adecuada para la adherencia de los microorganismos a ésta y por la factibilidad para conseguirlo, se evidencio la formación del biofilm alrededor de las piedras, pero a su vez también hubo descascaramiento de la biomasa muerta; pero como se realizó un proceso de sedimentación esta se logró retirar en gran parte; pero no es muy optima la remoción de la carga orgánica debido a que la piedra Pómez no tiene una considerable área específica por ahí que baja la eficiencia del filtro biológico en la remoción de la carga orgánica, usualmente se emplea soportes de material plástico por su área específica que es mucho mayor a cualquier soporte.

DISCUSIÓN

A pesar de que existen diversas tecnologías para tratar efluentes lácteos, todas estas como cualquier tecnología presentan sus ventajas y desventajas. Un solo proceso para tratar un efluente tan complicado como es el lácteo no basta, como cualquier sistema de tratamiento involucra etapas, donde incluso se combinan tecnologías como el presente trabajo donde se aplicó una combinación para lograr la mayor remoción posible, la electrocoagulación fue la encargada de remover la mayor cantidad de materia orgánica y este efluente tratado parcialmente que aún tiene parte remanente de carga orgánica fue tratado complementariamente con el filtro biológico es así como se logra remover la mayor cantidad de materia orgánica. En diversos estudios se opta por realizar sistemas combinados para lograr mayores eficiencias en el tratamiento de efluentes lacteos, por ejemplo: Akansha et al. (2020), lograron la eliminación de DQO del 97% cuando utilizaron un proceso combinado de electrocoagulación y fitorremediación, de alguna u otra forma se complementan dichos procesos; por su parte Ji et al. (2020) evaluó el desempeño del tratamiento de aguas residuales lácteas mediante un sistema integrado que consta de un reactor anaeróbico Baffled (ABR) y un reactor anaeróbico de flujo

ascendente (UASB) y Hernández (2017) aplica una combinación de floculación y fotocatalisis. Pero en todas estas combinaciones al igual que el presente trabajo se aplica una tecnología que en primera instancia reduzca la mayor cantidad de la carga contaminante y luego es complementado con otra tecnología para que se logre la reducción de contaminantes remanentes.

En los ensayos de electrocoagulación tras ejecutar la mejor combinación de los factores de densidad de corriente, pH y tiempo, se obtiene un pH de 9,17 el cual es alcalino, pero después de realizar el tratamiento con el filtro biológico este se redujo, probablemente se deba a la acción de las bacterias lácticas, ya que estas generan ácidos como productos de sus metabolismos logrando que disminuya el valor de pH, lo cual es conveniente ya que al finalizar el tratamiento se obtuvo un valor de pH de 7,37, con este valor de pH no representa ningún problema para la descarga a cuerpos receptores de agua, por eso resulta muy adecuado trabajar con un consorcio microbiano donde las diversas reacciones bioquímicas ayudan a la degradación de la materia orgánica en conjunto.

En términos generales la electrocoagulación representa una buena alternativa para reducir la mayor cantidad de carga orgánica, ya que es un proceso factible para el tratamiento de las aguas residuales lácteas, caracterizado por el alto contenido de aceite y grasas, DQO, DBO (Sharma, 2014). Las condiciones óptimas que permiten obtener los mayores porcentajes de remoción de DQO se lograron a valores similares a las que reporta Arango (2012) a un pH inicial del agua de 5, una densidad de corriente eléctrica de 43,23 A/m³ y un tiempo de 15 minutos. En contraste con la eficiencia obtenida distintos valores se reportan en otros trabajos tales como el desarrollado por Silva et al. (2015) donde trabajando con una muestra promedio de DQO entre 2060 - 5249mg L⁻¹ y utilizando electrodos de aluminio a 21 minutos, con un pH inicial cercano a 5,0 y densidad de corriente de 61, 6A m⁻² logran una reducción en la DQO de 57% y Sharma (2014) revela que la DQO en fase acuosa se eliminó eficazmente en 87% con condiciones de intensidad de corriente óptima, pH y tiempo de electrólisis de 3A, 9, 75 minutos respectivamente para 1070 mg/dm³, por otra parte Bassala et al. (2017) reporta que a condiciones óptimas de densidad de corriente de 0,65 Am⁻² y pH inicial

de 6, la eficiencia de remoción fue del 80% para DQO y por su parte Melchior et al. (2016) reportan que se logra reducir en el orden del 97 % para la DQO de aguas residuales lácteas, empleando como electrodos aluminio y hierro. A pesar de que existe cierta variación en los resultados expuestos en contraste con estos autores se debe considerar la variante que cada quien realice, las características iniciales del efluente, el tipo de queso que se procesa porque dependiendo de esto se genera un efluente característico.

Existe una relación proporcional directa entre la densidad de corriente aplicada y las eficiencias de remoción, pero se debe tener en cuenta la temperatura ya que a mayor densidad de corriente aplicada mayor es la temperatura en el reactor de electrocoagulación; por otra parte el factor número de placas influye en el estudio ya que a mayor número de placas existen mejores resultados (López & Harnish, 2016). Otro de los factores a considerar es el valor del pH durante el proceso de electrocoagulación se evidenció el aumento del pH, llegando a tener un valor final de 9,17; pero se debe considerar que la disolución química del Al está fuertemente influenciada por el pH, en la que a pH alcalinos puede aumentar la velocidad de disolución en varios órdenes de magnitud (Prieto-García et al., 2014), lo cual influiría fuertemente en el proceso y calidad final del efluente tratado.

Complementando el sistema propuesta fue a través de un filtro biológico, el empacamiento se realizó con microorganismos, ya que estos ayudan en el proceso de descomposición de la materia orgánica, mejorando las características fisicoquímicas de aguas residuales (Tirado et al., 2016). Se trabajó con cepas nativas como *Bacillus*, porque ya tienen adaptación natural a dichas condiciones, se obtienen mejores eficiencias en la biodegradación de efluentes lácteos mediante el uso de aislados microbianos obtenidos a partir de lodos activados (Porwal et al., 2015), entre los microorganismos de mayor relevancia se encuentra a *Bacillus*, esta cepa es frecuente en los efluentes lácteos, así Venkateswarulu et al.(2020) aisló e identificó la cepa *Bacillus subtilis* de una fuente de aguas residuales de la industria láctea, de la misma forma en la mayoría de los microorganismos identificados por Garcha et al.(2016) de efluente lácteos reporta a *Bacillus*.

Se emplea la piedra pómez por su alta porosidad que tiene lo cual lo hace propicio para generar abundante biofilm, ya que en ella se desarrolló la biomasa que permitió el tratamiento biológico, pero se pueden emplear otros soportes como columnas empacadas de Olote, piedra tezontle y astilla de pino para dichos soportes pueden ser una alternativa para el tratamiento de efluentes lácteos (C. Rojas et al., 2019).

A pesar de que existen diversos sistemas biológicos como la aplicación de los reactores UASB, este tipo de reactores resulta eficiente para el tratamiento de suero de queso diluido (35°C) en la reducción de DQO, pero trabajando con tiempos de residencia hidráulicos entre 0,45 y 1,75 días (Liviach & Vela, 2016); el tiempo prolongado no favorece cuando se trabaje con volúmenes considerables y además como en el sistema de electrocoagulación ya removió gran parte de la carga orgánica es poco el tiempo de residencia que es necesario para complementar dicho tratamiento como el que se mostró en el presente estudio.

Por los resultados obtenidos el filtro biológico representa una tecnología sencilla y eficaz para el tratamiento de aguas residuales lácteas. Además el empleo de filtros biológicos resulta muy eficiente en la reducción de cargas orgánicas menores. Tal como mencionan Ahmad et al. (2019) los métodos de tratamiento físico-químico y biológico se utilizan para tratamiento de residuos lácteos, sin embargo, se prefieren los métodos biológicos debido a la mejor eficiencia en la eliminación de DQO soluble y a su vez por los costos reducidos.

Por lo descrito los efluentes lácteos si no se tratan representan un problema ambiental serio, pero existen diversas alternativas para evitar la contaminación que estas puedan ocasionar. Pero más que tratar los efluentes es aprovechar los nutrientes que tienen los residuos de las industrias lácteas. Una alternativa es mediante la búsqueda de tecnologías que utilicen al suero de leche como materia prima de partida (Motta-Correa & Mosquera M., 2015; Pais Chanfrau et al., 2017).

Existe un valor nutricional como las proteínas de la leche y los lípidos que se pierden en los flujos de desechos y existe una mayor demanda de un método eficaz para la recuperación de estos macronutrientes (Gopinatha et al., 2019). Una

forma de aprovechar es mediante la generación de productos a partir del suero de leche, por ejemplo producción de ácido láctico a partir del lactosuero utilizando *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus* (A. M. Rojas et al., 2015), producción de bebidas fermentadas de lactosuero (Villegas et al., 2016) con la adición de jugo de *Aloe Vera* y pulpa de *Rubus Glaucus Bent* (Rodríguez et al., 2019), también se pueden obtener una diversidad de productos tales como la obtención de componentes principales como proteína, lactosa, grasa y agua, a partir de procesos como la filtración por membranas, la hidrólisis, la fermentación y aprovechamiento biológico a partir de microorganismos. (Motta-Correa & Mosquera M., 2015). Incluso para producir biomasa de *Chlorella vulgaris* (Rodrigues-Sousa et al., 2021); también se puede emplear como materia prima para la producción de galactooligosacáridos (Gómez & Sánchez, 2019). Diversas tecnologías se pueden emplear tales como las ondas estacionarias de ultrasonido de alta frecuencia para recuperar lípidos de aguas residuales lácteas (Kurup et al., 2020).

Por todo lo descrito mejor aún está en generar y aplicar una economía circular tomando como fuente sustrato los residuos y efluentes de la industria láctea (Stanchev et al., 2020).

CONCLUSIONES

El sistema combinado de electrocoagulación - filtro biológico con recirculación logró una eficiencia del 89,7 % para la remoción de la DQO, con un pH final de 7,37; sin embargo, con estos resultados no se logró alcanzar el límite para el cumplimiento de los Valores Máximos Admisibles establecido por la normativa Peruana el cual es de 1000 mg/L, se especula que el THR fue corto y que la biomasa empleada en el filtro no fue la adecuada, debido a que los microorganismos empleados no son los más óptimos para la remoción de carga orgánica, dado que se empleó principalmente microorganismos lácticos. Durante el proceso de electrocoagulación el valor de pH aumento considerablemente, pero dicho valor fue neutralizado cuando se aplicó el filtro biológico debido a la acción de las bacterias lácticas, produciendo una disminución de pH en el efluente tratado.

REFERENCIAS

- Alejo, J., & Parada, C. (2017). Desigualdad e informalidad en América Latina. el caso de Brasil. *Desarrollo y Sociedad*(78), 143 - 199. doi:10.13043/DYS.78.4
- Afsharnia, M., Kianmehr, M., Biglari, H., Dargahi, A., & Karimi, A. (2018). Disinfection of dairy wastewater effluent through solar photocatalysis processes. *Water Science and Engineering*, 11(3), 214–219. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2018.10.001>
- Ahmad, T., Aadil, R. M., Ahmed, H., Rahman, U. U., Soares, B. C. V., Souza, S. L. Q., Pimentel, T. C., Scudino, H., Guimarães, J. T., Esmerino, E. A., Freitas, M. Q., Almada, R. B., Vendramel, S. M. R., Silva, M. C., & Cruz, A. G. (2019). Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 88, 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.003>
- Akansha, J., Nidheesh, P. V., Gopinath, A., Anupama, K. V., & Suresh, M. (2020). Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process. *Chemosphere*, 253, 126652. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126652>
- Arango-Ruíz, Á. (2014). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: desarrollo y potencial de aplicación. *Journal of Engineering and Technology*, 3(1), 78–98. <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/jet/article/view/1132/978>
- Arango, A. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia*, 7(1), 59–67. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552012000100006&script=sci_abstract&lng=es
- Ashekuzzaman, S. M., Forrestal, P., Richards, K., & Fenton, O. (2019). Dairy industry derived wastewater treatment sludge: Generation, type and characterization of nutrients and metals for agricultural reuse. *Journal of Cleaner Production*, 230, 1266–1275. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.025>
- Barrera-Díaz, C. E., Balderas-Hernández, P., & Bilyeu, B. (2018). Electrocoagulation: Fundamentals and prospectives. In

- Electrochemical Water and Wastewater Treatment* (pp. 61–76). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813160-2.00003-1>
- Bassala, H. D., Kenne, G., Njine, C. B., Tchekwagep, P. M., Donkeng, J., Nanseu-Njiki, C. P., & Ngameni, E. (2017). Investigation of the efficiency of a designed electrocoagulation reactor: Application for dairy effluent treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, *111*, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.002>
- Catenacci, A., Bellucci, M., Yuan, T., & Malpei, F. (2020). Dairy wastewater treatment using composite membranes. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816823-3.00009-5>
- Do Santos, M., Carraro, A., Lopes, G., Fernandes, F., & Faroni, L. R. D. (2020). Dissolved air flotation optimization for treatment of dairy effluents with organic coagulants. *Journal of Water Process Engineering*, *36*, 101270. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101270>
- Fernández, C., Martínez, E. J., Morán, A., & Gómez, X. (2016). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. Revisión bibliográfica. *Revista ION*, *29*(1), 47–62. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016004>
- Garcha, S., Verma, N., & Brar, S. K. (2016). Isolation, characterization and identification of microorganisms from unorganized dairy sector wastewater and sludge samples and evaluation of their biodegradability. *Water Resources and Industry*, *16*, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.10.002>
- Gassmann, F., Semprini, D., Frossasco, V., Sarmiento, P. V., Peralta, J., & Rosa, M. A. (2016). *Aplicación del método de Taguchi al tratamiento de efluentes lácteos por electrofloculación*. <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/2206>
- Gómez, J. A., & Sánchez, Ó. J. (2019). Producción de galactooligosacáridos: alternativa para el aprovechamiento del lactosuero. Una revisión. *Ingeniería y Desarrollo*, *37*(1), 129–158. <https://doi.org/10.14482/inde.37.1.637>
- Gopinatha, G., Adhikari, B., & Zisu, B. (2019). Recovery of proteins and lipids from dairy wastewater using food grade sodium lignosulphonate. *Water Resources and Industry*, *22*, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2019.100114>
- Hernández, M. S. (2017). *Floculación y fotocatalisis como procesos combinados en el tratamiento de aguas residuales derivadas de la producción industrial de lácteos* [Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2580>
- Ji, S., Ma, W., Wei, Q., Zhang, W., Jiang, F., & Chen, J. (2020). Integrated ABR and UASB system for dairy wastewater treatment: Engineering design and practice. *Science of The Total Environment*, *749*, 142267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142267>
- Kurup, G. G., Adhikari, B., & Zisu, B. (2020). Application of high-frequency ultrasound standing waves for the recovery of lipids from high-fat dairy effluent. *Ultrasonics Sonochemistry*, *63*, 104944. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2019.104944>
- Lisintuña, W. F., Cerda, E. F., & Garcia, M. A. (2020). Tratamiento de aguas residuales de una industria láctea con mucílago de nopal (*Opuntia Ficus-Indica* [L.] mill.). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, *30*(2), 52–57. <https://www.revcitecal.iiiia.edu.cu/revista/index.php/RCTA/article/view/134>
- Liviác, D., & Vela, R. (2016). Tratamiento anaerobio del suero de queso en reactores discontinuos y UASB a escala laboratorio. *Anales Científicos*, *777*(2), 147–154.
- Lopes, G., Fonseca, T. C., & Carraro, A. (2020). Assessment and optimization of the use of a novel natural coagulant (*Guazuma ulmifolia*) for dairy wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, *744*, 140864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140864>
- López, P., & Harnisth, A. (2016). Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Enfoque UTE*, *7*(1), 13–21. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n1.84>
- Meas, Y., Ramirez, J. A., Villalon, M. A., & Chapman, T. W. (2010). Industrial wastewaters treated by electrocoagulation. *Electrochimica Acta*, *55*(27), 8165–8171. <https://doi.org/10.1016/>

- j.electacta.2010.05.018
- Melchioris, M. S., Piovesan, M., Becegado, V. R., Becegado, V. A., Tambourgi, E. B., & Paulino, A. T. (2016). Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery. *Journal of Environmental Management*, 182, 574–580. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.022>
- Motta-Correa, Y. O., & Mosquera M., W. J. (2015). Aprovechamiento del lactosuero y sus componentes como materia prima en la industria de alimentos. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(1), 81–91.
- Nocetti, E. (2018). *Evaluación de la eficiencia de humedales subsuperficiales para el tratamiento de efluente de una industria quesera*. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/bitstream/handle/11185/2285/15.pdf>
- Pais Chanfrau, J. M., Núñez Pérez, J., Lara Fiallos, M. V., Rivera Intriago, L. M., Trujillo Toledo, L. E., & Cuaran Guerrero, M. J. (2017). Valorización del suero de leche: Una visión desde la biotecnología. *Bionatura*, 2(4), 468–476. <https://doi.org/10.21931/rb/2017.02.04.11>
- Porwal, H. J., Mane, A. V., & Velhal, S. G. (2015). Biodegradation of dairy effluent by using microbial isolates obtained from activated sludge. *Water Resources and Industry*, 9, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.11.002>
- Posada, L. R. (2016). Nanofiltración en el manejo del lactosuero. *Journal of Engineering and Technology*, 5(2), 10–25. <https://doi.org/10.22507/jet.v5n2a4>
- Prieto-García, F., Callejas-Hernández, J., Reyes-Cruz, V. E., Marmolejo-Santillán, Y., & Prieto-Méndez, J. (2014). Electrodisolución de electrodos de aluminio durante la electrocoagulación de un lactosuero ácido. *Dyna*, 81(187), 129–136. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40757>
- Reilly, M., Cooley, A. P., Tito, D., Tassou, S. A., & Theodorou, M. K. (2019). Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters. *Energy Procedia*, 161, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.106>
- Rodrigues-Sousa, A. E., Nunes, I. V. O., Muniz-Junior, A. B., Carvalho, J. C. M., Mejia-da-Silva, L. C., & Matsudo, M. C. (2021). Nitrogen supplementation for the production of *Chlorella vulgaris* biomass in secondary effluent from dairy industry. *Biochemical Engineering Journal*, 165, 107818. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107818>
- Rodríguez, D., Hernández, A., & Rodríguez, J. L. (2019). Caracterización de una bebida fermentada de lactosuero con la adición de jugo de sábila (*Aloe Vera* L.) y pulpa de mora (*Rubus Glaucus* Bent). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 29(1), 7–14. <https://go.gale.com/ps/anonymous?id=GALE%7CA636225228&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=08644497&p=AONE&sw=w>
- Rojas, A. M., Montaña, L. P., & Bastidas, M. J. (2015). Producción de ácido láctico a partir del lactosuero utilizando *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*. *Revista Colombiana de Química*, 44(3), 5–10. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v44n3.55604>
- Rojas, C., Rodríguez, M. D. J., Garzón, M. A., Lucho, R., & Martínez, J. (2019). Biofiltración en columnas empacadas con olote, astilla de pino y piedra tezontle para el tratamiento de lactosuero. *Memorias Del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2019*, 11(9), 3067–3071.
- Sambaraju, S., & Sree, V. (2020). Eco-friendly treatment of dairy wastewater using garbage enzyme. *Materials Today: Proceedings*, 33, 650–653. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.719>
- Santos, A. D., Martins, R. C., Quinta-Ferreira, R. M., & Castro, L. M. (2020). Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment. *Energy Reports*, 6, 340–344. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2020.11.158>
- Sharma, D. (2014). Treatment of dairy waste water by electro coagulation using aluminum electrodes and settling, filtration studies. *International Journal of ChemTech Research*, 6(1), 591–599.
- Silva, G. de F., Santos, R. C., & Marques, J. A. (2015). The efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy industry. *Ciência Rural*, 45(9), 1713–1719. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141172>
- Stanchev, P., Vasilaki, V., Egas, D., Colon, J., Ponsá, S., & Katsou, E. (2020). Multilevel

- environmental assessment of the anaerobic treatment of dairy processing effluents in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121139>
- Tirado, D. F., Gallo, L. A., Acevedo, D., & Mouthon, J. A. (2016). Biotratamientos de aguas residuales en la industria láctea. *Producción + Limpia*, 11(1), 171–184. <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/1125/828>
- Venkateswarulu, T. C., Abraham, K., Krupanidhi, S., Narayana, K. P., Indira, M., Ranga Rao, A., Bharath, R., & Vidya, K. (2020). Biochemical and molecular characterization of lactase producing bacterium isolated from dairy effluent. *Journal of King Saud University - Science*, 32(2), 1581–1585. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.12.014>
- Villegas, N., Duarte, C., González, J., Díaz, J., Hernández, A., & Flores, I. (2016). Caracterización de una bebida de lactosuero fermentada con cultivos probióticos y con adición de avena molida. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 26(2), 1–5.