

Tratamiento de Aguas Residuales Generadas en una Planta Procesadora de Lácteos en la Amazonia Ecuatoriana

Treatment of wastewater generated at a dairy processing plant in the ecuadorian amazon

Para citar este trabajo:

Chariguaman, L., Gómez, L., Guerrero, L., y Moya, R., (2024) Tratamiento de Aguas Residuales Generadas en una Planta Procesadora de Lácteos en la Amazonia Ecuatoriana. Reincisol, 3(6), pp. 2311-2331. [https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)2311-2331](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)2311-2331)

Autores:

Lesly Anabel Chariguaman-Coello

Universidad Estatal Amazónica
Ciudad: Puyo, País: Ecuador
Correo Institucional: la.chariguaman@uea.edu.ec
Orcid <https://orcid.org/0000-0001-6553-1150>

Laura Katherine Gómez-Machado

Universidad Estatal Amazónica
Ciudad: Puyo, País: Ecuador
Correo Institucional: lk.gomez@uea.edu.ec
Orcid <https://orcid.org/0009-0008-2152-0634>

Luis Enrique Guerrero-Naranjo

Universidad Estatal Amazónica
Ciudad: Puyo, País: Ecuador
Correo Institucional: le.guerreron@uea.edu.ec
Orcid <https://orcid.org/0000-0003-4745-4483>

Robinson Bryan Moya-Bayas

Universidad Estatal Amazónica
Ciudad: Puyo, País: Ecuador
Correo Institucional: ayahuasapuyupastazaecu@gmail.com
Orcid <https://orcid.org/0009-0004-8137-5628>

RECIBIDO: 20 julio 2024 **ACEPTADO:** 28 agosto 2024 **PUBLICADO** 11 septiembre 2024

El objetivo de este estudio es caracterizar y diseñar un sistema de tratamiento para las aguas residuales generadas en una planta procesadora de lácteos, ubicada en la provincia de Pastaza, en la parroquia Fátima. La planta produce una gran cantidad de aguas residuales, las cuales se descargan sin tratamiento, causando un impacto ambiental significativo en los cuerpos de agua dulce cercanos. Mediante la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas residuales, se propuso un sistema de tratamiento que incluye procesos de sedimentación, coagulación-floculación, y filtración.

Inicialmente, se midió el caudal durante siete días, obteniendo un promedio de 2.052 m³/h. Posteriormente, se realizó una caracterización de las aguas residuales mediante la toma de muestras de 1,25 L cada hora durante 8 horas, con el objetivo de obtener una muestra compuesta. Los análisis físicos, químicos y microbiológicos revelaron que los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), aceites y grasas, nitrógeno total, sólidos totales y sólidos suspendidos superaban los límites permisibles establecidos, con valores de 1874 mg/L, 3300 mg/L, 295.43 mg/L, 171.4 mg/L, 2568 mg/L y 606 mg/L, respectivamente.

Una vez identificados los parámetros a tratar, se llevó a cabo una serie de pruebas de tratabilidad utilizando un sistema combinado de métodos físicos y químicos. El tratamiento comenzó con la eliminación de grasas y aceites mediante una trampa de grasas, seguido de una filtración a través de un filtro lento de grava y arena. Se realizó un tratamiento químico mediante pruebas de jarra para determinar la dosis óptima de coagulante, encontrando que el policloruro de aluminio (PAC) era el más eficaz.

Los resultados obtenidos indican que el sistema es efectivo para reducir la carga contaminante, cumpliendo con los límites establecidos en la normativa ecuatoriana en el Anexo 1, Tabla 9 de Límites de Descarga a un Cuerpo de Agua Dulce, del Acuerdo Ministerial 097-A que expide los Anexos del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, lácteos, diseño, diseño de planta de tratamiento, Ley Ambiental, dimensionamiento de equipos

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, lácteos, diseño, diseño de planta de tratamiento, Ley Ambiental, dimensionamiento de equipos

Abstract

The objective of this study is to characterize and design a treatment system for wastewater generated in a dairy processing plant, located in the Pastaza province, in the Fátima parish. The plant produces a large amount of wastewater, which is discharged untreated, causing significant environmental impact on nearby freshwater bodies. By characterizing the wastewater physically, chemically, and microbiologically, a treatment system was proposed that includes sedimentation, coagulation-flocculation, and filtration processes.

Initially, the flow rate was measured over seven days, yielding an average of 2.052 m³/h. Subsequently, the wastewater was characterized by taking 1.25 L samples every hour for 8 hours to obtain a composite sample. Physical, chemical, and microbiological analyses revealed that the biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), oils and fats, total nitrogen, total solids, and suspended solids parameters exceeded the permissible limits established, with values of 1874 mg/L, 3300 mg/L, 295.43 mg/L, 171.4 mg/L, 2568 mg/L, and 606 mg/L, respectively.

Once the parameters to be treated were identified, a series of treatability tests were conducted using a combined system of physical and chemical methods. The treatment began with the removal of fats and oils using a grease trap, followed by filtration through a slow sand and gravel filter. Chemical treatment was performed using jar tests to determine the optimal coagulant dose, with Aluminum polychloride (PAC) being found to be the most effective.

The results obtained indicate that the system is effective in reducing the pollutant load, complying with the limits established in Ecuadorian regulations in Annex 1, Table 9 of Discharge Limits to Freshwater Bodies, under Ministerial Agreement 097-A, which issues the Annexes of the Unified Text of Secondary Legislation of the Ministry of Environment (TULSMA).

Keywords: wastewater treatment, dairy, design, treatment plant design, Environmental Law, equipment sizing

Keywords: wastewater treatment, dairy, design, treatment plant design, Environmental Law, equipment sizing

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital que cubre más del 70% de la superficie terrestre, presente en océanos, lagos, ríos, y también en el aire y el suelo. Su importancia radica en su capacidad para sustentar la vida, regular el clima global y modelar el paisaje terrestre mediante su fuerza. Según Fernández Cirelli (2012), el agua posee propiedades únicas que la hacen esencial para la vida, siendo un solvente extraordinario y un reactivo fundamental en numerosos procesos metabólicos; además, su alta capacidad calorífica y la propiedad de expandirse al congelarse la convierten en un recurso flexible e invaluable. A nivel global, los océanos contienen aproximadamente el 97.5% del agua del planeta, mientras que solo el 2.5% es agua dulce y de esta última, aproximadamente el 80% está atrapada en glaciares, nieve y hielo en los polos, el 19% se encuentra en agua subterránea y apenas el 1% está disponible en la superficie, principalmente en lagos y humedales (Fernández Cirelli, 2012).

La creciente preocupación por la escasez y contaminación del agua es un tema crucial tanto a nivel global como local. Al-Tayawi, Sisay, Beszédes y Kertész (2023) destacan que, a pesar de que más del 70% de la superficie terrestre está cubierta por agua, solo el 3% de esta es agua dulce y adecuada para el consumo humano, mientras que el 97% restante es agua salada. Este limitado suministro de agua dulce está bajo presión debido a la creciente demanda y la contaminación existente en la actualidad. La descarga directa de aguas residuales sin tratamiento previo es una de las principales causas de la contaminación del agua, exacerbada por factores como el consumo energético, los desechos radiactivos y la industria del teñido, entre otros (Al-Tayawi et al., 2023).

Por otro lado, Gleick (2000) subraya la importancia del agua como recurso esencial y los desafíos asociados con su distribución y gestión. Aunque el agua es un recurso precioso y limitado, con el 97% de ella en los océanos y la mayoría del agua dulce restante en los casquetes polares, la falta de acceso a agua potable afecta a más de 1.000 millones de personas en el mundo (Gleick, 2000). La creciente población y la demanda de agua para la producción de alimentos plantean desafíos adicionales, aunque también existen avances prometedores en técnicas como la desalación y el reciclaje de aguas residuales (Gleick, 2000).

La industrialización ha facilitado la búsqueda de fuentes de ingresos a distintas escalas, con la industria láctea destacándose como una de las más extensamente desarrolladas a nivel mundial. Sin embargo, esta actividad genera altos niveles de contaminación, especialmente en la producción de leche, quesos y mantequillas (Saxena et al., 2019). En este contexto, el agua juega un papel crucial en todos los aspectos de la industria láctea, desde la limpieza de instalaciones y equipos hasta los procesos de producción. El agua utilizada en la industria láctea tiende a acidificarse rápidamente, produciendo ácido láctico y contaminándose con sustancias orgánicas disueltas, sales minerales, lactosuero, grasas y aceites (Coppola et al., 2020).

La planta procesadora de lácteos, ubicada en la parroquia Fátima, provincia de Pastaza, no dispone de un sistema adecuado para el tratamiento de sus aguas residuales. Esta deficiencia impacta negativamente en el entorno y en la calidad de vida de los residentes, causando una notable contaminación que afecta tanto al medio ambiente como a la comunidad local. La parroquia, con una población de 941 habitantes dedicados principalmente a la ganadería y la agricultura, depende de los ríos cercanos para su suministro de agua. Sin embargo, estos cuerpos de agua presentan altos índices de contaminación debido a las aguas residuales descargadas por la planta, afectando gravemente a los ecosistemas acuáticos y a los habitantes de la región (Ministerio del Ambiente, 2021).

En cumplimiento del Artículo 5.2.4.9 del Anexo I del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, que establece la obligación de tratar adecuadamente las aguas residuales para cumplir con los parámetros de descarga (Ministerio del Ambiente, 2021), la planta procesadora de lácteos ha decidido implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales. Este proyecto tiene como objetivo mejorar la calidad de vida de los residentes y reducir el impacto ambiental en la zona. El Gerente General de la planta ha autorizado el desarrollo del proyecto para proponer un sistema de tratamiento de aguas residuales, alineándose con la normativa ambiental vigente, el Acuerdo Ministerial 097-A publicado el 04 de noviembre del 2015 con Registro Oficial Nro. 387, contribuyendo de esta manera a la protección del medio ambiente y a la sociedad aledaña.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Proyecto

La planta procesadora de lácteos está situada en el Km 3 de la vía Napo, en la parroquia Fátima, del cantón y provincia de Pastaza. Limitada al norte con la parroquia Teniente Hugo Ortiz, al sur con la cabecera cantonal Puyo, al este con la parroquia Diez de Agosto, y al oeste con el cantón Mera. De acuerdo a datos del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza (2017), la parroquia Fátima cuenta con una extensión de 93 km², su temperatura varía entre 18°C y 24°C y está atravesada por importantes ríos como el Anzu, el Arajuno, el Guamanyacu y el Puyo.

Tipo de Estudio

El estudio se clasifica como experimental ya que implica la recolección y análisis de datos para determinar los componentes necesarios del sistema de tratamiento.

Técnicas

Las técnicas empleadas para la caracterización fisico-química y microbiológica del agua residual se rigen a los procedimientos descritos en el manual del laboratorio de Servicios Ambientales de la Universidad Nacional de Chimborazo, basados en el "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" versión del 2017 y en el manual de Análisis de Agua, Métodos HACH.

Recolección de datos y muestras

Para la recolección de muestras del agua residual generada en la planta procesadora de lácteos, se adoptará un enfoque de muestreo compuesto que consiste en combinar varias muestras recolectadas en diferentes tiempos desde la tubería de descarga de la planta de estudio, tomando en cuenta las técnicas de muestreo establecidas en el INEN (2013).

Las muestras se tomaron en intervalos de hora durante la jornada laboral, desde las 08:00 am hasta las 15:00 pm. Se utilizaron botellas de 1,25 L y un balde de 20 L para la recolección. Las muestras recolectadas cada hora se almacenaron en agua fría dentro de las botellas correspondientes para preservar su calidad. Una vez completada la recolección de muestras a lo largo del día, se preparó una muestra compuesta homogénea para los análisis posteriores, tomando en cuenta que es crucial que la muestra compuesta se mantenga y transporte a temperaturas bajas

hasta el laboratorio, para evitar cualquier alteración que pueda comprometer la precisión de los resultados de la caracterización primaria.

Caracterización del Agua Residual del estudio

Se realizó en total tres caracterizaciones de las aguas residuales, caracterización primaria: las aguas residuales recolectadas inicialmente; caracterización secundaria: aguas residuales pre tratadas con tratamiento físico y caracterización final: las aguas residuales tratadas fisicoquímicamente.

La caracterización primaria de las muestras de agua residual se realizó en el Laboratorio de Servicios Ambientales de la Universidad Nacional de Chimborazo.

En este proceso, se determinaron los siguientes parámetros:

pH (Standard Methods 4500 - H - B): Este método permite la determinación del pH del agua. El principio básico de la medición electrométrica del pH es la determinación de la actividad de los iones de hidrógeno por medida potenciométrica utilizando un electrodo de hidrógeno estándar y un electrodo de referencia. El electrodo de hidrógeno consiste de un electrodo de platino a través del cual se burbujea gas de hidrógeno en una presión de 101 kPa.

Conductividad eléctrica (PE-LSA-02): Para determinar la conductividad eléctrica de una solución, se calibra el medidor de conductividad con soluciones estándar conocidas, se prepara la muestra asegurándose de que esté a una temperatura estable y libre de partículas sólidas, y luego se introduce los electrodos del medidor en la muestra. Se deja que el medidor estabilice la lectura y se registra el valor de conductividad, anotando también la temperatura si no se compensa automáticamente

Aceites y grasas (EPA 418.1): Este método es para la medición de petróleo extraíble de fluorocarbono-113 hidrocarburos de aguas superficiales y salinas, desechos industriales y domésticos. La muestra se acidifica a un pH bajo (<2) y se extrae en serie con fluorocarbono-113 en un embudo de separación. Las interferencias se eliminan con sílice gel adsorbente. El análisis infrarrojo del extracto se realiza por directa comparación con los estándares.

Detergentes (Standard Methods 5540 - C mod): Los tensoactivos entran a las aguas y aguas residuales principalmente mediante la descarga de desechos acuosos del lavado doméstico e industrial y otras operaciones de limpieza. El método comprende tres extracciones sucesivas de medio acuoso ácido que contiene exceso

de azul de metileno en cloroformo (CHCl_3), seguido de un retrolavado acuoso y medición del color azul en el CHCl_3 por espectrofotometría a 652 nm.

Color real (Standard Methods 2120 – C): En esta sección, una introducción proporciona definiciones, pretratamiento para la eliminación de turbidez y orientación en la selección de métodos. Los nuevos métodos son la espectrofotometría de longitud de onda única (2120C).

Turbiedad (Standard Methods 2130 – B): El procedimiento implica primero calibrar el turbidímetro con soluciones estándar de turbidez conocidas. Luego, se coloca una muestra en un frasco adecuado y se mide la turbidez utilizando el turbidímetro. Finalmente, se registra la turbidez en unidades NTU (Nephelometric Turbidity Units).

Sólidos totales (Standard Methods 2540 – B): Una muestra bien mezclada se evapora en un plato pesado y se seca a peso constante en un horno a 103 a 105 ° C. El aumento de peso sobre el del plato vacío representa los sólidos totales.

Sólidos suspendidos (Standard Methods 2540 – D): Una muestra bien mezclada se filtra a través de un filtro de fibra de vidrio estándar pesado y el residuo retenido en el filtro se seca a un peso constante de 103 a 105 ° C. El aumento en peso del filtro representa el total de sólidos en suspensión. Si el material suspendido obstruye el filtro y prolonga la filtración, puede ser necesario aumentar el diámetro del filtro o disminuir el volumen de muestra. Para obtener una estimación del total de sólidos suspendidos, calcule la diferencia entre el total de sólidos disueltos y el total de sólidos.

Demanda química de oxígeno (DQO) (Standard Methods 5220 – D mod): Cuando se digiere una muestra, el ion dicromato oxida el material COD en la muestra. Esto da como resultado el cambio de cromo del estado hexavalente (VI) al estado trivalente (III). Ambas especies de cromo están coloreadas y absorben en la región visible del espectro.

Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO5) (Standard Methods 5210 – B): El método consiste en llenar con muestra, a rebosar, una botella hermética del tamaño especificado e incubarla a la temperatura específica durante 5 d. El oxígeno disuelto se mide inicialmente y después de la incubación, y la DBO se calcula a partir de la diferencia entre DO inicial y final.

Fósforo total (Standard Methods 4500 – P – E mod): El molibdato de amonio y el tartrato de potasio y antimonilo reaccionan en medio ácido con ortofosfato para formar un heteropoliácido-ácido fosfomolibdico, que se reduce a azul de molibdeno intenso con ácido ascórbico.

Cloruros (Standard Methods 4500 – Cl – B): El cloro liberará yodo libre de las soluciones de yoduro de potasio (KI) a pH 8 o menos. El yodo liberado se titula con una solución estándar de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) con almidón como indicador. Valorar a pH 3 a 4 porque la reacción no es estequiométrica a pH neutro debido a la oxidación parcial de tiosulfato a sulfato.

Nitrógeno total (Standard Methods 4500 – N – B mod): En presencia de H_2SO_4 , sulfato de potasio (K_2SO_4) y catalizador sulfato cúprico (CuSO_4), el nitrógeno amino de muchos materiales orgánicos se convierte en amonio. El amoniaco libre se convierte en amonio. Después de la adición de la base, el amoniaco se destila de un medio alcalino y absorbido en ácido bórico o ácido sulfúrico. El amoniaco puede ser determinado colorimétricamente, mediante un electrodo selectivo de amoniaco, o mediante titulación con un ácido mineral estándar.

Coliformes fecales (Standard Methods 9222 – D): Filtrar la muestra a través de un filtro de membrana. Coloque la membrana en agar mFC que contenga anilina azul como indicador. Incubar a 44.5C por 22-24 h. Las colonias que tienen varios tonos de azul son positivas para coliformes fecales. El color azul indica la capacidad de fermentar la lactosa en ácido. Requisitos: ingredientes para agar mFC; tampón para enjuague y diluciones; platos de cultivo (50x10 mm); la membrana de 0.65 micras filtra los filtros de membrana micrométrica, certificados para retener completamente los coliformes fecales. Refrigeración; autoclave; colector de filtro múltiple y estéril; pipetas estériles; fórceps, alcohol. Incubadora a 44.5 + -0.2C. Un microscopio de disección binocular de campo amplio de baja potencia (10-15 aumentos) o equivalente.

Estos resultados fueron comparados con lo establecido en el Anexo 1 en la Tabla 9-Límites de Descarga a un Cuerpo de Agua Dulce, del Acuerdo Ministerial 097-A que expide los Anexos del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA).

La caracterización de las aguas residuales secundarias y final se las realizó en el Laboratorio de Análisis Técnicos de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

Tratamiento de las Aguas Residuales

El tratamiento de las aguas residuales de la planta procesadora de lácteos se realizó mediante un enfoque físico-químico, compuesto por los siguientes tratamientos y pasos:

-Tratamientos Físicos

Trampa de Grasas: El proceso inicia con la separación de grasas y aceites utilizando una trampa de grasas a escala de laboratorio. Se empleó un recipiente rectangular con tuberías de entrada y salida y pantallas plásticas para retener las grasas con un tiempo de retención para 20 litros de agua residual de 3 minutos.

Filtro Lento de Grava y Arena: Tras la separación inicial, el agua residual se filtró a través de un filtro lento compuesto por grava y arena. Este método busca eliminar sólidos suspendidos y es conocido por su eficacia en la clarificación, facilidad de construcción y bajo costo.

-Tratamiento Químico

Test de Jarras: Se empleó para determinar las dosis óptimas de coagulantes y floculantes. El procedimiento incluyó medir la turbiedad y el pH inicial de la muestra, ajustar el pH si es necesario, y añadir los coagulantes y floculantes a la muestra. Después de agitar a 200 rpm durante 5 minutos y reposar por 30 minutos, se midieron nuevamente la turbidez y el pH para evaluar la eficacia del tratamiento.

Tratamiento con Sulfato de Aluminio: Se realizaron siete pruebas con diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio, de 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16 ml; manteniendo una agitación constante de 200 rpm durante 5 minutos. El pH se ajustó a 7,9 con 2,5 ml de NaOH y la turbidez inicial fue de 225 NTU.

Tratamiento con Policloruro de Aluminio (PAC): Se realizaron nueve pruebas con distintas dosificaciones de PAC de 1, 2, 3, 3.5, 4, 4.5, 6, 8 y 10 ml, con agitación a 200 rpm durante 5 minutos. El pH se ajustó a 7,8 con 2,5 ml de NaOH y la turbidez inicial fue de 225 NTU.

Tratamiento con Cloruro Férrico: Se prepararon ocho muestras con diferentes dosis de cloruro férrico, con 2, 3, 3.5, 4, 4.5, 6, 8 y 10 ml, sin ajuste de pH, ya que este coagulante es más efectivo en pH bajos. El pH inicial fue de 3,8 y la turbidez inicial fue de 225 NTU.

Tratamiento con Polielectrolito: Se utilizaron las muestras con mejores resultados de PAC (3,5 ml) y cloruro férrico (3,5) a las cuales se les añadieron 0.25, 0.5, 0.75 y 1 ml de polielectrolito a una concentración de 0,05%, con agitación a 200 rpm durante 5 minutos.

Prueba de Sedimentación: Se colocó el agua tratada en una probeta de 1000 ml, se dejó reposar y se registró el volumen de lodo a intervalos determinados hasta que se estabilizó. Los datos obtenidos se graficaron para evaluar la eficacia del tratamiento.

RESULTADOS

Caracterización primaria

Tabla 1. Caracterización primaria del agua residual

PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO/ PROCEDIMIENTO	RESULTADO	U(K=2)	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE AM. 097-A, Anexo 1, tabla 9
pH	-	PE-LSA-01	7,92	+/- 0,08	6-9
Conductividad	µS/cm	PE-LSA-02	489	+/-8%	-
*Aceites y grasas	mg/l	EPA 418.1	295,43	N/A	30,0
Detergentes	mg/l	STANDARD METHODS 5540 - C mod	0,47	N/A	0,5
Color Real	Upt-co	STANDARD METHODS 2120 - C	1645	N/A	Inapreciable en dilución:1/20
Turbiedad	FTU - NTU	STANDARD METHODS 2130 - B	244	N/A	-
*Sólidos Totales	mg/L	PE-LSA-04	2568	+/-6%	1600

*Sólidos Suspendidos	mg/L	STANDARD METHODS 2540	606	N/A	130
*DQO	mg/L	STANDARD METHODS 5220 - D mod	3300	+/- 10%	200
*DBO ₅	mgO ₂ /l	STANDARD METHODS 5210 - B	1874	N/A	100
Fósforo Total	mg/l	STANDARD METHODS 4500 - P - E	9,49	N/A	10,0
Cloruros	mg/l	STANDARD METHODS 4500 - Cl - E	354,5	N/A	1000
*Nitrógeno Total	mg/l	STANDARD METHODS 4500 - N - B mod	171,4	N/A	50,0
Coliformes Fecales	UFC/100ml	STANDARD METHODS 9222 - D	<1 (Ausencia)	N/A	2000

* Parámetros que se encuentran fuera de Norma

Fuente: Laboratorio de Servicios Ambientales S.A., (Ministerio del Ambiente, 2021)

Caracterización primaria secundaria

Tabla 2. Caracterización del agua residual después del tratamiento físico

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE AM. 097-A, Anexo 1, tabla 9
pH	-	3,8	6-9

*Aceites y grasas	mg/l	18	30,0
Turbiedad	FTU – NTU	225	-
*Sólidos Totales	mg/l	1287	1600
Sólidos Suspendidos	mg/l	251	130
DQO	mg/l	2534	200
DBO ₅	mgO ₂ /l	1026	100
Nitrógeno Total	mg/l	147,3	50,0

* *Parámetros que cumplen con la Normativa después del tratamiento físico.*

Fuente: Laboratorio de Análisis Técnicos de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, (Ministerio del Ambiente, 2021)

Caracterización final

Tabla 3. Caracterización del Agua Residual Tratada

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE AM. 097-A, Anexo 1, tabla 9
pH	-	7,92	6-9
Aceites y grasas	mg/l	18	30,0
Turbiedad	FTU – NTU	8	-
Sólidos Totales	mg/l	1287	1600
Sólidos Suspendidos	mg/l	14	130
DQO	mg/l	178	200
DBO ₅	mgO ₂ /l	91	100
Nitrógeno Total	mg/l	33	50,0

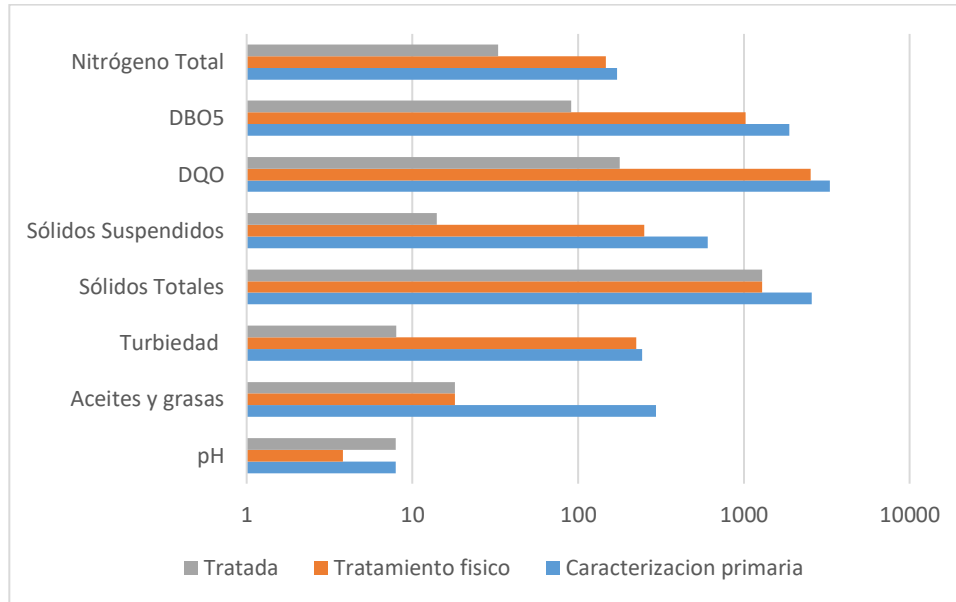
*Fuente: Laboratorio de Análisis Técnicos de la Facultad de Ciencias,
(Ministerio del Ambiente, 2021)*

Tabla 4. Estadística descriptiva de los parámetros según sus tratamientos

Parámetros	pH	Aceites y grasas	Turbiedad	Sólidos Totales	Sólidos Suspensos	DQO	DBO ₅	Nitrógeno Total
Media	6,54666 6667	110,476 6667	159	1714	290,333 3333	2004	997	17,2333 333
Error típico	1,37333 3333	92,4766 6667	75,6989 6521	427	172,023 5772	939,396 26	514,911 9666	42,6874 0381
Mediana	7,92	18	225	1287	251	2534	1026	147,3
Desviación estándar	2,37868 3109	160,174 2852	131,114 4538	739,585 6948	297,953 5758	1627,08 2051	891,853 6876	73,9367 5225
Varianza de la muestra	5,65813 3333	25655,8 0163	17191	546987	88776,3 3333	2647396	795403	5466,64 3333
Coefficiente de asimetría	- 1,73205 0808	1 ,732050 808	- 1,69122 197	1 ,732050 808	0 ,583699 688	- 1,31028 5079	- 0,14616 9737	- 1,52732 9658
Rango	4 ,12	2 77,43	2 36	1 281	5 92	3 122	1 783	1 38,4
Mínimo	3,8	18	8	1287	14	178	91	33
Máximo	7,92	295,43	244	2568	606	3300	1874	171,4
Suma	19,64	331,43	477	5142	871	6012	2991	351,7

Fuente: Autor

Figura 1: Comparación de parámetros según su tratamiento

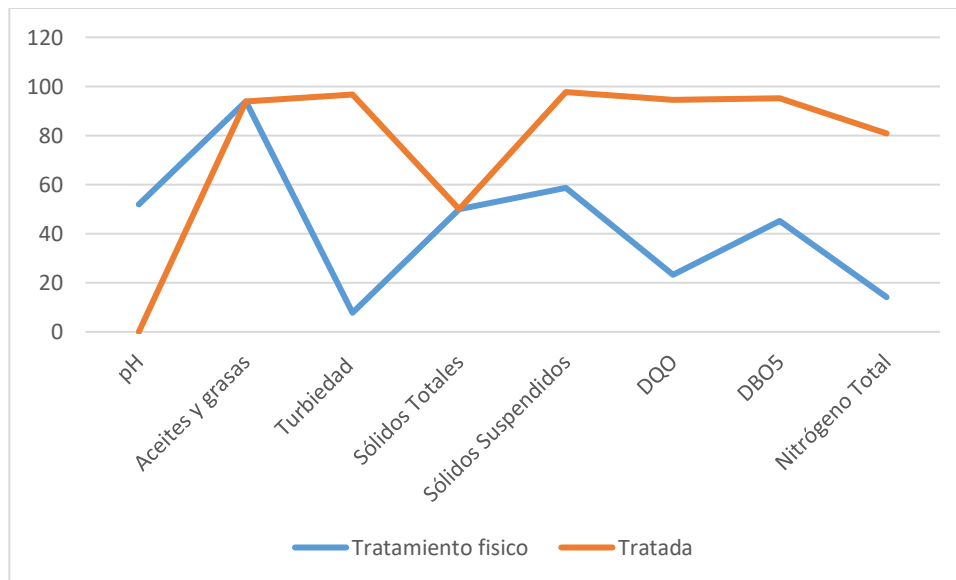


Fuente: Autor

Ecuación 1: Porcentaje de remoción

$$\text{Eficiencia de Remoción (\%)} = \frac{\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final}}{\text{Concentración inicial}} \times 100$$

Figura 2: Comparación de la eficiencia en la remoción de parámetros



DISCUSIÓN

En la caracterización inicial de las aguas residuales provenientes de la planta procesadora de lácteos, se observaron valores elevados de varios contaminantes clave, como aceites y grasas (295.43 mg/L), sólidos totales (2568 mg/L), DBO₅ (1874 mg/L) y DQO (3300 mg/L). Estos resultados están en línea con lo que se reporta en la literatura sobre efluentes industriales del sector lácteo, que generalmente presentan altas concentraciones de compuestos orgánicos, grasas y sólidos suspendidos debido a la naturaleza de los productos procesados y los subproductos generados en el tratamiento de leche y derivados lácteos (Al-Tayawi et al., 2023).

El tratamiento físico aplicado, que consistió en una trampa de grasas y un sistema de filtración con grava y arena, fue altamente efectivo en la reducción de aceites y grasas, logrando disminuir este parámetro de 295.43 mg/L a 18 mg/L. Esta remoción es crucial para evitar el impacto negativo que las grasas tienen sobre la transferencia de oxígeno en el agua y para prevenir la obstrucción de los sistemas de tratamiento posteriores (Coppola et al., 2020). Sin embargo, los sólidos totales y la DBO₅, aunque reducidos, aún permanecieron en niveles altos tras el tratamiento físico, lo que sugiere que este proceso no es suficiente para tratar completamente el efluente. Los sólidos totales pasaron de 2568 mg/L a 1287 mg/L, mientras que la DBO₅ se redujo de 1874 mg/L a 1026 mg/L, lo que aún excede los límites permisibles según las normativas ecuatorianas (Ministerio del Ambiente, 2021).

El tratamiento físico-químico, que incluyó el uso de coagulantes como el policloruro de aluminio (PAC), fue particularmente eficaz en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos y demanda química de oxígeno (DQO). La turbidez pasó de 244 NTU a 8 NTU, mientras que los sólidos suspendidos se redujeron de 606 mg/L a 14 mg/L, lo que indica una alta eficiencia de remoción. Estos resultados están respaldados por estudios previos que han demostrado que el PAC es un coagulante eficiente para la eliminación de sólidos y la mejora de la claridad del agua (Owusu Nti et al., 2021).

En cuanto a la DQO, que es un indicador clave de la carga orgánica, se observó una reducción significativa de 3300 mg/L a 178 mg/L, lo que representa una

remoción superior al 90%. Este valor final cumple con los límites establecidos por la normativa para la descarga de efluentes al recurso hídrico (Ministerio del Ambiente, 2021), lo que sugiere que el tratamiento fisicoquímico fue eficaz en la eliminación de compuestos orgánicos presentes en el efluente.

El nitrógeno total, que inicialmente presentaba una concentración de 171.4 mg/L, fue reducido a 33 mg/L tras el tratamiento completo. Si bien esta reducción es significativa, el valor final aún podría contribuir a problemas de eutrofización en cuerpos de agua receptores, especialmente en ecosistemas sensibles. Por lo tanto, es necesario considerar un tratamiento adicional para la remoción de nitrógeno, como la desnitrificación biológica, que ha demostrado ser una técnica efectiva en la reducción de este contaminante en aguas residuales industriales (Metcalf & Eddy, 2020).

Un aspecto crítico para considerar es el pH del efluente tratado. Aunque el tratamiento físico y fisicoquímico logró mantener el pH en niveles aceptables en la mayoría de las etapas (alrededor de 7.92), el tratamiento físico mostró un descenso abrupto a 3.8, lo que podría deberse a la naturaleza de los reactivos químicos utilizados. Un pH tan bajo puede generar corrosión en las infraestructuras y alterar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Se recomienda implementar un proceso de neutralización para ajustar el pH antes de la descarga del efluente (Hammer & Hammer, 2023).

Comparando estos resultados con estudios previos en plantas de tratamiento de aguas residuales del sector lácteo, se observa que las eficiencias de remoción de DBO₅ y DQO obtenidas en este estudio son comparables a los reportados en investigaciones similares. Por ejemplo, Saxena et al. (2019) reportaron eficiencias de remoción de DBO₅ superiores al 85% utilizando sistemas de coagulación y filtración, lo que concuerda con la reducción del 95% alcanzada en este estudio.

Aunque los resultados indican que el tratamiento implementado fue eficaz en la reducción de varios parámetros clave, es evidente que algunos, como el nitrógeno total y el pH, requieren un tratamiento adicional para cumplir con los estándares ambientales de descarga. Se recomienda la implementación de un tratamiento terciario, como la desnitrificación biológica para la remoción de nitrógeno y la adición de reactivos neutralizantes para corregir el pH.

Finalmente, el uso de coagulantes como el PAC demostró ser altamente efectivo, lo que sugiere que este tipo de tratamiento fisicoquímico es una opción viable y sostenible para la remoción de sólidos y materia orgánica en aguas residuales industriales del sector lácteo.

CONCLUSIONES

La caracterización inicial de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual de la planta de lácteos, utilizando métodos normalizados en APHA, AWWA, WPCF, Standard Methods 21^a edición y métodos HACH, reveló que varios parámetros excedían los límites máximos permisibles para descarga a un cuerpo de agua dulce establecidos en la Tabla 9, del anexo 1 del Acuerdo Ministerial 097-A.

Los parámetros que superaron los límites normativos fueron: DBO5 (1874 mg/L), DQO (3300 mg/L), nitrógeno total (171,4 mg/L), aceites y grasas (295,43 mg/L), sólidos suspendidos (251 mg/L) y sólidos totales (2568 mg/L). Esto destacó la necesidad de un tratamiento efectivo para reducir la carga contaminante y cumplir con los límites máximos permitidos según la normativa ambiental vigente en Ecuador.

Las pruebas de tratabilidad, que incluyeron la eliminación de grasas y aceites, filtración, y la determinación de la dosis óptima de coagulantes mediante pruebas de jarra, indicaron que el PAC al 10% (3,5 ml) y el polielectrolito al 0,05% (0,5 ml) eran las opciones más eficaces.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Tayawi, A. N., Sisay, E. J., Beszédes, S., & Kertész, S. (2023). Wastewater treatment in the dairy industry: From classical treatment to promising technologies. *Processes*, 11(7), 2133. <https://doi.org/10.3390/pr11072133>
- Coppola, S., et al. (2020). *Water management in the dairy industry*. Springer.
- Daryabeigi Zand, A., & Hoveidi, H. (2015). Evaluation of the effectiveness of aluminum sulfate and poly-aluminum chloride in wastewater treatment. *Biotechnology Reports*, 6, 18-24. https://www.biotechrep.ir/article_69189_15e78418c10724dd9a027deb22e59857.pdf

- Hammer, M. J., & Hammer, M. J. (2023). *Water and Wastewater Technology* (4th ed.). CRC Press.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2019). NTE INEN 2176:2019 AGUA. Calidad del agua. Técnicas de muestreo. <https://www.inen.gob.ec>
- Metcalf & Eddy. (2020). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Ministerio del Ambiente. (2021). Acuerdo Ministerial 097: Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. Registro Oficial. <https://www.ambiente.gob.ec/acuerdo097>
- Owusu Nti, S., Buamah, R., & Atebiya, J. (2021). Polyaluminium chloride dosing effects on coagulation and flocculation in wastewater treatment. *Water Practice & Technology*, 16(4), 1215–1223. <https://iwaponline.com/wpt/article/16/4/1215/83042>
- Saxena, R., et al. (2019). Environmental impact of dairy industry. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 2545–2552. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2271-6>
- Su, C.-H., & Cheng, C.-H. (2020). A mobile gamification learning system for improving the learning motivation and achievements. *Journal of Computer Assisted Learning*, 35(1), 30-46. <https://doi.org/10.1111/jcal.12323>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2019). Guidelines for Water Reuse. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/waterreuse/guidelines-for-water-reuse>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza. (2017). Fátima. Sistema Nacional de Información. <http://www.pastaza.gob.ec/pastaza/fatima>
- Fernández Cirelli, A. (2012). *El agua: un recurso esencial*. Instituto Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua (CETA), Universidad de Buenos Aires y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.

Eddy, M. (2007). Ingeniería de aguas residuales (2ª ed.). McGraw-Hill.

Environmental Protection Agency (EPA). (2019). Standard methods [PDF].
<https://www.standardmethods.org/>

Gleick, P. H. (2000). The World's Water 2000-2001: The Biennial Report on
Freshwater Resources. Island Press. <https://doi.org/10.5070/G311610468>

Conflicto de intereses

Los autores indican que esta investigación no tiene conflicto de intereses y, por tanto, acepta las normativas de la publicación en esta revista.

Con certificación de:

