



**Optimización del Proceso de Clarificación en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales
(PTAR): Mejora de la Eficiencia en la Eliminación de Sólidos Suspendidos**

Juliana Hermosa Vélez

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniera Química

Asesor

Juan Miguel Marín Sepúlveda, Doctor (PhD) en Ciencias Químicas

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Química
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	Hermosa Vélez [1]
Referencia	[1] Hermosa Vélez, “Optimización del Proceso de Clarificación en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR): Mejora de la Eficiencia en la Eliminación de Sólidos Suspendidos”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas e instituciones que contribuyeron a la realización de este proyecto de investigación y a mi formación académica:

A Jehová Dios por extender su manto protector sobre mí y sobre mi familia porque a pesar del caos mundial disfruté de relativa paz y salud en la que pude actuar con la fortaleza y la sabiduría necesarias para obtener este logro.

A las empresas y a las instituciones educativas comprometidas con la preservación del medio ambiente por su incesante trabajo en la búsqueda de soluciones sostenibles para un mundo mejor.

A ENKA de Colombia por brindarme la oportunidad de llevar a cabo la práctica y proporcionar acceso a sus instalaciones y recursos, sin los cuales este estudio no habría sido posible.

A mi asesor académico, Juan Miguel Marín, por su orientación experta, apoyo constante y valiosos aportes que guiaron este trabajo desde su concepción hasta su finalización.

A mi cooperador en ENKA de Colombia, Sergio Mesa, cuya colaboración, conocimientos y experiencia fueron fundamentales para la recopilación de datos y la realización de pruebas.

A mis compañeros de clase y profesores, que me brindaron su aliento y compañía a lo largo de este desafiante pero enriquecedor viaje.

A mis amigos cercanos, quienes han sido una fuente inagotable de apoyo emocional y motivación a lo largo de este camino.

Finalmente, agradezco a mi familia por su amor, paciencia y comprensión, que me impulsó a superar obstáculos y alcanzar este logro. Gracias por su constante apoyo, por estar siempre presentes en cada desafío y por ser mi refugio en los momentos difíciles. Su sacrificio y dedicación han sido el fundamento sobre el cual construí este logro, y por eso les estoy profundamente agradecida.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
A. Antecedentes	13
III. JUSTIFICACIÓN	16
IV. OBJETIVOS	17
A. Objetivo general	17
B. Objetivos específicos	17
V. MARCO TEÓRICO	18
A. Términos de uso común en la operación de la planta de tratamiento de agua residual	18
B. Descripción del proceso:	21
i. Pretratamiento	21
ii. Tratamiento primario	22
iii. Tratamiento secundario	22
VI. METODOLOGÍA	24
A. Procedimientos Analíticos y Operativos	25
i. Principio de operación medición de fosforo y nitrógeno y DQO (Hanna)	25
ii. Dosificación de coagulante	25
iii. Pruebas de jarras	26
iv. Turbidez	27
v. SST	27
vi. Relación turbidez y SST	29
VII. RESULTADOS	30

A. Turbidez	30
B. Pruebas de jarras	33
C. pH	36
D. Nutrientes	37
E. Antiespumante	39
F. Otros parámetros	41
G. Evaluación económica	42
VIII. DISCUSIÓN	44
IX. CONCLUSIONES	46
REFERENCIAS	47

LISTA DE TABLAS

TABLA I PARÁMETROS DE CUMPLIMIENTO RESOLUCIÓN 0631 MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE.....	23
TABLA II. RESULTADOS DE NUTRIENTES A LA ENTRADA Y SALIDA DEL REACTOR MBBR.	37
TABLA III. AHORROS Y GASTOS AL IMPLEMENTAR LOS CAMBIOS SUGERIDOS....	43

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Valores de turbidez antes y después de reducir la dosificación de nutrientes en la PTAR A97.....	15
Fig. 2. Diagrama de bloques PTAR A97. Elaboración propia.....	21
Fig. 3. Toma de muestras de para la comparación de Sólidos Suspendidos y turbidez a diferentes condiciones.....	30
Fig. 4. Relación entre Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Turbidez.	32
Fig. 5. Efecto de Coagulante y Floculante en la Turbidez.	34
Fig. 6. Impacto de la eliminación de la sobredosificación en las pruebas de jarras sobre la correlación SST-turbidez.....	35
Fig. 7. Efecto del pH con el aumento de la concentración de coagulante catiónico (hidroxicloruro de aluminio).....	37
Fig. 8. Relación Dosificación de Nutrientes y Turbidez.	38
Fig. 9. Turbidez y DQO durante septiembre. Dosificaciones controladas de nutrientes desde el 11 de septiembre.....	38
Fig. 10. Relación Dosificación de Antiespumante y Turbidez.	39
Fig. 11. Turbidez y DQO durante septiembre. Dosificaciones controladas de antiespumante desde el 15 de septiembre.....	41

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

DAF	Dissolved Air Flotation
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
PAC	Policloruro de Aluminio
PET	Polietilentereftalato
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
SSED	Sólidos Sedimentables
SST	Sólidos Suspendidos Totales

RESUMEN

Este proyecto abordó la optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) A97 de ENKA Colombia, centrándose específicamente en la correlación entre turbidez y sólidos suspendidos totales (SST) con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso de clarificación. Durante la investigación, se identificaron deficiencias significativas en el sistema de flotación por aire disuelto (DAF 2) atribuidas a la sobredosificación de antiespumante y nutrientes, y las dosificaciones controladas demostraron ser eficaces en su mitigación. La relación entre el pH y la eficacia del coagulante justificó el uso del hidroxicloruro de aluminio como coagulante por su capacidad para formar flóculos rápidos y su poca dependencia del pH en comparación con coagulantes tradicionales. La exclusión de ciertos parámetros no evaluados se basó en su falta de relevancia para los cambios operativos propuestos, estableciendo así las bases para prácticas más sostenibles en el manejo de aguas residuales y contribuyendo al cumplimiento normativo y la conservación ambiental.

***Palabras clave* — PTAR, sólidos suspendidos totales, DAF, nutrientes, antiespumante, clarificación.**

ABSTRACT

This project addressed the optimization of the Wastewater Treatment Plant (WWTP) A97 of ENKA Colombia, with specific focus on the correlation between turbidity and total suspended solids (TSS) with the objective of improving the efficiency of the clarification process. During the investigation, a significant deficiency in the dissolved air flotation (DAF 2) system attributed to the excess dosing of defoamer and nutrients was identified, and the controlled dosages proved to be effective in mitigating it. The relation between pH and the effectiveness of the coagulant justified the use of aluminum hydroxychloride as a coagulant due to its ability to form fast flocs and its low dependence on pH compared to traditional coagulants. The exclusion of certain parameters that were not evaluated was based on their lack of relevance to the proposed operational changes, thus establishing the basis for more sustainable wastewater management practices and contributing to regulatory compliance and environmental conservation.

Keywords — **WWTP, total suspended solids, TSS, DAF, nutrients, defoamer, clarification.**

I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento adecuado de aguas residuales se ha convertido en un requisito fundamental en la industria actual, debido a su influencia en la conservación del medio ambiente y el cumplimiento normativo. Las empresas que llevan a cabo procesos de producción intensivos, como es el caso de ENKA de Colombia con el reciclaje de botellas PET, enfrentan el desafío de gestionar de manera eficiente y sostenible grandes volúmenes de agua utilizados en sus operaciones.

Enka de Colombia desempeña un papel crucial en la industria al llevar a cabo diversos procesos de producción, destacando la obtención de fibras y filamentos a partir del reciclaje de botellas PET. Este proceso requiere un exhaustivo lavado de las botellas, lo que conlleva un notable consumo de agua. Para garantizar un suministro constante de agua, Enka posee un permiso de captación de agua de la quebrada El Salado de Girardota, junto con la obligación de retornar una parte del agua captada, en cumplimiento de las leyes ambientales.

En la actualidad, Colombia establece regulaciones estrictas en relación con los efluentes vertidos en las fuentes hídricas del país, como lo establece la Resolución 631 de 2015, actualizada en 2021. Esto ha generado la necesidad de que las empresas implementen un tratamiento eficaz de aguas residuales. Enka de Colombia ha abordado este desafío con determinación al instalar dos Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), una en cada planta de reciclaje, A90 y A97.

En específico, el desafío de la PTAR en la planta A97, la más reciente de la compañía, reside en la clarificación del DAF 2, una fase esencial para la eliminación de lodos biológicos. Esta etapa es crítica para obtener agua tratada que cumple con los estándares de pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), color y cantidad de sólidos suspendidos. El proceso en el DAF 2 se basa en la adición de coagulante y floculante, productos químicos que generan flóculos de lodos para facilitar su posterior extracción.

Dado que la PTAR A97 opera en condiciones únicas y teniendo en cuenta su importancia, el objetivo principal del presente proyecto es analizar en profundidad los factores operativos que influyen en la eficiencia general del proceso de eliminación de sólidos suspendidos en la PTAR

A97. Este proyecto busca abordar y resolver de manera efectiva los problemas específicos en la PTAR A97, evaluando la dosificación de coagulante, considerando la adición de floculante y determinando las condiciones óptimas para una clarificación eficiente del agua. Además, se explorarán otros parámetros como el pH, la cantidad de nutrientes y la cantidad de antiespumante, con un enfoque especial en la turbidez como indicador clave del proceso de clarificación del agua.

La combinación de enfoques teóricos y prácticos en esta investigación tiene el potencial de mejorar el rendimiento de la PTAR A97, al tiempo que proporciona recomendaciones prácticas que beneficiarán tanto a Enka de Colombia como al entorno ambiental en el que opera.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de tratamiento de aguas residuales en la planta de Enka de Colombia, se enfrenta un desafío importante relacionado con la eficiencia de la clarificación del agua tratada en el conjunto reactor/DAF 2. Se ha identificado que los niveles de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en el efluente no cumplen con los parámetros estipulados, y no se dispone de un entendimiento claro sobre las causas de esta deficiencia. Esta situación plantea inquietudes en términos de cumplimiento normativo y de operación eficiente de la planta.

Es fundamental comprender cómo la eficiencia del proceso se ve afectada por parámetros clave como el suministro de nutrientes, pH, antiespumante y temperatura. Establecer correlaciones precisas entre estos factores y los niveles de SST en el efluente es esencial para determinar cómo se pueden realizar mejoras. En particular, es necesario obtener una correlación entre los niveles de SST y la turbidez, ya que esto permitirá evaluar si los SST disminuyen como resultado de los cambios realizados en estos parámetros. Establecer esta correlación se vuelve crucial, ya que evita la necesidad de realizar análisis exhaustivos de SST en el laboratorio, lo que ahorrará tiempo, recursos y energía en el proceso.

El presente estudio se centra en la investigación de diversos aspectos relacionados con el proceso de clarificación en el conjunto reactor/DAF 2 de la planta de tratamiento de aguas residuales de Enka de Colombia. Se busca comprender la correlación existente entre los niveles de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y la turbidez del efluente tratado, así como evaluar la influencia de la cantidad de antiespumante, el suministro de nutrientes, la adición de floculante, el pH y otros parámetros en la eficiencia de la clarificación. Estos aspectos son esenciales para optimizar el proceso de clarificación y garantizar el cumplimiento de los estándares normativos.

A. Antecedentes

La calidad del agua se evalúa a través de diversos parámetros, y uno de los indicadores comunes es la concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST), expresada en miligramos por

litro (mg/L). Además, la calidad del agua también se refleja en su apariencia visual, asociada con la claridad, medida específicamente como turbidez en Nephelometric Turbidity Units (NTU).

En investigaciones previas, se ha destacado la posibilidad de una correlación entre los parámetros de turbidez y sólidos suspendidos totales (SST). No obstante, esta aparente correlación se ve afectada por diversas inconsistencias en las mediciones, derivadas de la complejidad de los componentes de las partículas suspendidas. La señal resultante puede variar debido a factores como las diferencias en el tamaño, la forma y la composición de las partículas, así como a la estabilidad de los instrumentos de medición, las condiciones de iluminación, la carga orgánica y la actividad biológica [1].

Esta variabilidad se explica por el fenómeno en el cual las partículas suspendidas interfieren con la transmisión de la luz a través del agua, impactando la claridad del cuerpo de agua. En situaciones de aguas puras o muy claras, la transmisión de luz suele ser prácticamente continua, con un efecto mínimo de dispersión. Sin embargo, la interacción entre la luz y los sólidos suspendidos depende de la complejidad de factores como el tamaño, la forma y la composición de las partículas, así como de la longitud de onda de la luz incidente. Además de la dispersión de la luz, las partículas también pueden absorberla, reduciendo su intensidad y ejerciendo un impacto directo en las mediciones de turbidez [2].

Estudios realizados por Holliday, Daraigan, Omar, MatJafri y Baker [2] han buscado establecer una relación entre la turbidez expresada en NTU y los SST en muestras puras, sin exposición a ambientes exteriores. Estos experimentos han revelado una fuerte relación entre la turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST), como se ilustra en la Ecuación 1:

$$\text{Turbidez} = a \cdot \text{SST}^b \quad \text{Ecuación (1)}$$

Estos antecedentes proporcionan un contexto teórico esencial para comprender la relación entre la turbidez y los SST en la evaluación de la calidad del agua [2].

Por otro lado, en Enka de Colombia ya se había presentado un problema con la clarificación en el DAF 2 de la PTAR A97 durante el mes de marzo del 2023. Ante esta situación, se emprendió un análisis detallado de los parámetros variables presentes en el reactor y el DAF 2, donde se identificó el problema. Entre las variables estudiadas la dosificación de nutrientes surgió como un factor clave.

Como respuesta a estos hallazgos, se tomó la decisión de reducir la dosificación de nutrientes a partir del jueves 16 de marzo. Los resultados obtenidos a partir de esta fecha indican un impacto positivo en la eficiencia del proceso:

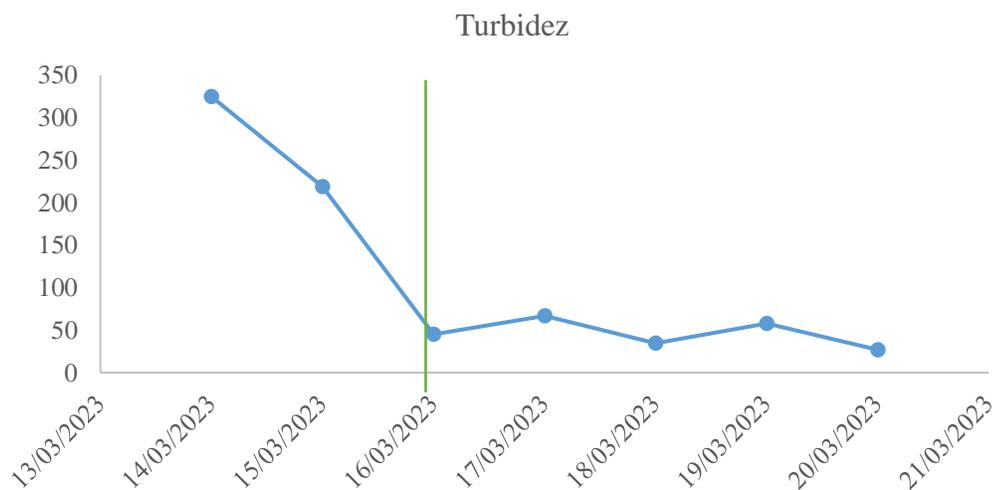


Fig. 1. Valores de turbidez antes y después de reducir la dosificación de nutrientes en la PTAR A97.

Actualmente, se busca mejorar la eficiencia del clarificador y se propone utilizar la turbidez como el parámetro principal para evaluar la presencia de sólidos suspendidos totales. Esta estrategia tiene como objetivo optimizar el proceso al reducir el tiempo y los recursos requeridos para la recolección de datos sobre los sólidos suspendidos totales (SST). Al centrarse en la turbidez como indicador clave, se busca establecer una correlación directa y eficiente entre la turbidez y los niveles de SST.

III. JUSTIFICACIÓN

La justificación de este proyecto de práctica se fundamenta en la necesidad de abordar un desafío crucial en el tratamiento de aguas residuales en la planta de Enka de Colombia, específicamente en la eficiencia de la clarificación del agua tratada en el conjunto reactor/DAF 2. La identificación de que los niveles de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en el efluente no cumplen con los parámetros establecidos ha generado preocupaciones tanto en términos de cumplimiento normativo como de operación eficiente de la planta.

Los procesos como el reciclaje de botellas PET, demandan el manejo eficiente y sostenible de considerables volúmenes de agua, convirtiendo la clarificación en un aspecto crucial para cumplir con los estándares ambientales y operativos. La falta de una comprensión clara sobre las causas de la deficiencia en la clarificación subraya la necesidad de una investigación detallada y la implementación de soluciones prácticas.

Este proyecto aportará significativamente al campo de la ingeniería al profundizar en los factores operativos que afectan la eficiencia del proceso de eliminación de sólidos suspendidos en la PTAR A97. La investigación proporcionará información valiosa sobre la dosificación de coagulante, la posible adición de floculante y las condiciones óptimas para una clarificación eficiente del agua. En última instancia, el proyecto busca mejorar el rendimiento de la PTAR A97 y contribuir a prácticas más sostenibles en la gestión del agua, beneficiando tanto a Enka de Colombia como al entorno ambiental en el que opera.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Identificar el efecto de los parámetros de operación en el desempeño de la operación de la PTAR A97, con un enfoque en la mejora de la clarificación del agua y la separación de sólidos suspendidos.

B. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre las mejores prácticas y enfoques relevantes en el tratamiento de aguas residuales y la clarificación del agua en plantas similares a la PTAR A97.
- Determinar las dosis óptimas de coagulante evaluando la viabilidad de la adición de floculante si es requerido en el proceso de tratamiento de aguas residuales.
- Establecer la influencia de diferentes variables como el pH, la cantidad de nutrientes y la cantidad de antiespumante en la eficiencia de la clarificación y separación de sólidos suspendidos en la PTAR A97.
- Simplificar la monitorización de SST en la planta de tratamiento de aguas residuales estableciendo una correlación que permita estimar los niveles de SST (Sólidos Suspendidos Totales) a partir de las mediciones de turbidez.
- Identificar tendencias y patrones que impacten en el rendimiento de la planta de tratamiento.
- Proporcionar una propuesta basada en los hallazgos y análisis realizados, que contribuya al mejoramiento de la clarificación del agua y la separación de sólidos suspendidos en la PTAR A97.

V. MARCO TEÓRICO

A. *Términos de uso común en la operación de la planta de tratamiento de agua residual*

Agua residual: Se refiere al agua que ha sido utilizada en procesos industriales, domésticos o agrícolas y que contiene contaminantes [3]. Para este tipo de aguas, se hace necesario tratarla antes de su liberación al medio ambiente o su reutilización [4].

Carga orgánica: Es la cantidad de materia orgánica, como compuestos carbonados, disuelta en el agua residual. La carga orgánica es un indicador de la contaminación del agua y su capacidad para consumir oxígeno en procesos biológicos [5].

CO₂: El dióxido de carbono (CO₂) es un gas inerte sin color, olor y capacidad inflamable, que se disuelve eficazmente en el agua, generando ácido carbónico (H₂CO₃) como producto de su disolución. Esta característica es fundamental en el proceso de tratamiento de aguas residuales, donde se utiliza para ajustar y reducir el pH del agua, contribuyendo a condiciones óptimas para los procesos subsiguientes. La inyección de CO₂ en el agua conlleva a la formación de ácido carbónico, lo que permite controlar y adecuar el pH a niveles específicos requeridos para garantizar la efectividad del tratamiento [6].

Coagulante: Un coagulante es una sustancia química que se agrega al agua residual para neutralizar las cargas eléctricas de partículas y coloides, lo que facilita su aglomeración y dan origen a la formación de flóculos para su posterior eliminación [7]. En este proceso se utiliza hidroxiclorigen de Aluminio como coagulante.

DAF (Flotación con Aire Disuelto): Es un proceso de tratamiento de aguas que implica la introducción de aire en el agua para crear burbujas que adhieren partículas y sólidos suspendidos, permitiendo su separación y eliminación [8].

DBO (Demanda Biológica de Oxígeno): La DBO es la cantidad de oxígeno disuelto requerida por microorganismos para descomponer la materia orgánica presente en el agua. Es un indicador de la contaminación orgánica del agua [9].

DQO (Demanda Química de Oxígeno): Es una medida química utilizada para determinar la cantidad de materia orgánica y compuestos químicos oxidables presentes en una muestra de agua. Representa la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente estas sustancias presentes en el agua. La DQO es un indicador importante de la contaminación orgánica en el agua [9].

Filtración: Es un proceso de separación que implica pasar el agua a través de un medio poroso, como arena o membranas, para eliminar partículas y sólidos suspendidos.

Floculante: Un floculante es una sustancia química, como un polímero, que se agrega al agua residual para formar flóculos a partir de partículas coaguladas, facilitando su eliminación [7].

Lodo: El lodo es el residuo sólido que se separa del agua durante el proceso de tratamiento. Puede contener material orgánico e inorgánico.

MBBR: Los sistemas MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) son procesos biológicos avanzados, en los cuales el crecimiento de la biomasa se da sobre un soporte o medio sólido, denominado "biocarrier", formando un lecho suspendido que se moviliza en todo el volumen de agua que pasa por el tanque de aireación. Los biocarriers poseen un área superficial considerable y protegida, por lo que proporcionan una mayor área disponible para el crecimiento de los microorganismos, por tanto, el volumen requerido de reactor es menor que el de un sistema aerobio convencional.

pH: El pH es una medida de la acidez o alcalinidad del agua. Es importante en el tratamiento de aguas, ya que puede influir en la eficacia de los productos químicos y procesos [10].

Prueba de jarras: Una prueba de jarras es un procedimiento de laboratorio en el que se mezcla agua residual con coagulantes y floculantes en jarras para evaluar la eficacia de estos productos químicos en la clarificación del agua.

PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales): Una PTAR es una instalación diseñada para tratar aguas residuales antes de su descarga al medio ambiente o su reutilización.

Reactor: Es un recipiente donde ocurre una o varias reacciones a partir de procesos biológicos realizados por microorganismos [9]. En el caso de la planta de tratamiento de aguas, se lleva a cabo la descomposición de materia orgánica por microorganismos aerobios. El reactor biológico reduce tanto la DBO como la DQO, pero su eficacia al eliminar la DQO puede ser variable, ya que se incluye tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable. La fracción biodegradable se reducirá eficazmente, pero la fracción no biodegradable puede no reducirse de manera significativa. Para el proyecto se evaluará la DQO como indicador principal.

Sólidos disueltos: Son partículas en el agua que están disueltas a nivel molecular y no pueden separarse mediante procesos de filtración convencionales. Incluyen la materia coloidal, los compuestos orgánicos solubles e inorgánicos (sales) [11].

Sólidos sedimentables: Son partículas en el agua que, debido a su tamaño y peso, tienden a asentarse en el fondo de un tanque o reactor. Se refiere a una fracción del total de sólidos en el agua que se separan de la misma por acción de la gravedad [11].

Sólidos suspendidos: Son partículas en el agua que se mantienen en suspensión y no se asientan naturalmente. Pueden ser separados por filtración a través de un papel de filtro estandarizado [11].

Temperatura: La temperatura del agua es un factor importante en los procesos biológicos y químicos de tratamiento de aguas residuales, ya que puede afectar la velocidad de las reacciones y la solubilidad de los compuestos.

Turbidez/turbiedad: La turbidez se refiere a una expresión de las propiedades ópticas de un líquido que ocasiona que los rayos de luz se dispersen y absorban, en lugar de mantener una trayectoria recta a través de una muestra. Esta dispersión de la luz es resultado de la presencia de materia, tanto en suspensión como disuelta, en el líquido [12].

B. Descripción del proceso:

El proceso puede evidenciarse en la Fig. 2:

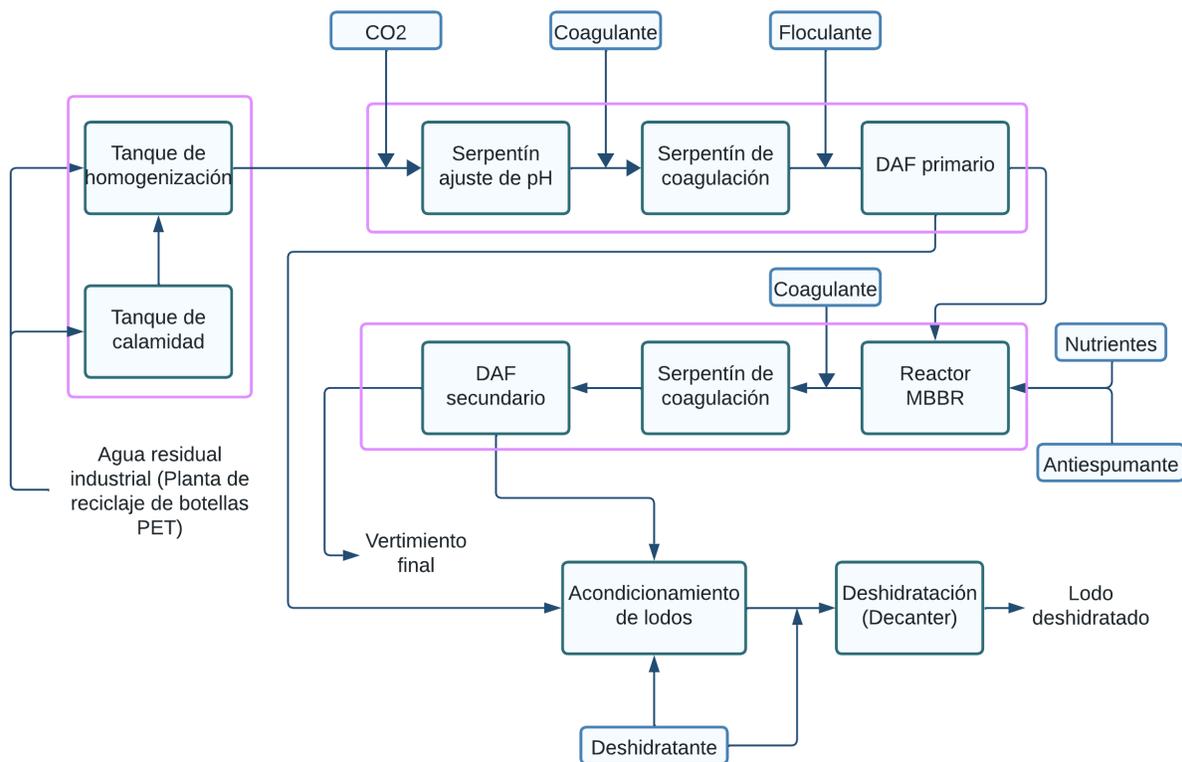


Fig. 2. Diagrama de bloques PTAR A97. Elaboración propia.

i. Pretratamiento

Se inicia con un pretratamiento que comprende un tanque de homogenización y un tanque de calamidad. El tanque de homogenización tiene la función de homogenizar el agua residual, amortiguando las variaciones en sus características. El tanque de calamidad se utiliza para almacenar temporalmente agua con condiciones especiales o un aumento inesperado de caudal.

ii. Tratamiento primario

En esta fase, se utiliza un serpentín de neutralización al que se le inyecta CO₂ para neutralizar el pH elevado del agua, que es consecuencia del uso de soda en el lavado de botellas. Además, se incorpora el proceso de coagulación mediante la inyección de coagulante en el serpentín de coagulación. Antes de ingresar a la celda de flotación por aire disuelto (DAF), se lleva a cabo el proceso de floculación mediante la inyección de polímero floculante en el serpentín de reacción.

La separación sólido-líquido se realiza en la celda DAF 1, donde se toma una corriente de agua clarificada y se mezcla con aire atmosférico. Posteriormente, se aumenta la presión para disolver el aire y se recircula al inicio de la unidad. Cuando esta corriente ingresa a la celda y se reduce su presión, se liberan microburbujas de aire disuelto en el agua. Estas microburbujas ayudan a flotar las partículas en suspensión que han sido previamente desestabilizadas, gracias a la adición de productos químicos en los procesos de neutralización, coagulación y floculación.

iii. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario de las aguas residuales se compone de varias etapas fundamentales para la eliminación exitosa de la carga orgánica contaminante. El objetivo central en esta fase es lograr la completa oxidación de los compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Este proceso es llevado a cabo en el reactor biológico MBBR, donde la actividad metabólica de microorganismos en un entorno rico en oxígeno es la responsable de esta transformación. Aquí, la carga orgánica contaminante se convierte en dióxido de carbono (CO₂) y agua, al mismo tiempo que se estimula la generación de nueva biomasa.

Posteriormente, se procede a la separación de la biomasa generada y el agua tratada en un DAF secundario. En este proceso, se inyecta coagulante en el serpentín de coagulación para facilitar la clarificación del agua. A diferencia del DAF primario, no se requiere el uso de floculante en el DAF secundario. El agua fluye directamente desde el serpentín de coagulación al DAF

secundario, donde se realiza la separación sólido-líquido de manera similar a la etapa anterior del DAF primario.

El agua clarificada que emerge del DAF secundario se dirige directamente hacia el efluente, donde se encuentra sujeto a los estrictos lineamientos establecidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, específicamente la Resolución 0631 [13]. Estos requisitos varían según el tipo de servicio prestado o la actividad llevada a cabo por la empresa. En el caso de Enka de Colombia, que opera en el sector de actividades asociadas con servicios y otras actividades relacionadas con el reciclaje de materiales plásticos y afines, es imprescindible cumplir con los parámetros indicados en la TABLA I.

TABLA I
PARÁMETROS DE CUMPLIMIENTO RESOLUCIÓN 0631 MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y
DESARROLLO SOSTENIBLE.

Parámetros generales	Unidades	Reciclaje de materiales plásticos y similares
pH	Unidades de pH	6.00 a 9.00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	500.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L O ₂	200.00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	200.00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	1.00
Grasas y aceites	mg/L	20.00
Fenoles	mg/L	0.20
Formaldehído	mg/L	Análisis y reporte
Sustancias Activas al Azul de Metileno	mg/L	Análisis y reporte

El cumplimiento de la Resolución 0631 se convierte en un aspecto crucial, ya que el efluente final debe satisfacer los parámetros establecidos para garantizar que no represente una amenaza para el medio ambiente. Sin embargo, se ha identificado que los niveles de SST en el efluente no cumplen con los parámetros estipulados, y no se cuenta con un conocimiento preciso de las causas que originan esta deficiencia. Por lo tanto, se hace evidente la necesidad de llevar a cabo un análisis exhaustivo del proceso de tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de obtener una clarificación óptima y, en consecuencia, asegurar que el efluente de Enka de Colombia cumpla con los estándares ambientales requeridos.

VI. METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación se basa en un enfoque mixto, combinando elementos cualitativos y cuantitativos. El proceso se dividió en diversas fases de ejecución para abordar el problema de la clarificación en el agua residual. Inicialmente, se realizó una fase de observación para identificar variables clave que pudieran influir en la efectividad del proceso de clarificación.

Para la recopilación de datos, se emplearon diversas técnicas e instrumentos de medición. Se tomaron mediciones de parámetros críticos, como el pH, las concentraciones de nutrientes (fósforo y nitrógeno) y la demanda química de oxígeno (DQO). También se evaluó la cantidad de antiespumante en el conjunto reactor/DAF 2, aunque inicialmente se consideró investigar la influencia de otros factores, como la alcalinidad, la edad de los lodos y el tiempo de retención de los tanques.

El proceso de muestreo incluyó la toma de muestras en diferentes días y horas en la salida del DAF secundario, registrando datos relacionados con el pH, el suministro de nutrientes y el uso de antiespumante. La recopilación de datos se realizó manualmente, y posteriormente se realizaron análisis estadísticos utilizando el software Minitab.

Las pruebas de laboratorio incluyeron pruebas de jarras, mediciones de nutrientes, turbidez, sólidos suspendidos totales, pH y DQO. Se estableció una correlación entre la turbidez y los SST a la entrada y salida del reactor, lo que facilitará la evaluación de la eficiencia de la separación. Se identificaron áreas de mejora, y se evaluó el impacto económico de los cambios propuestos en los parámetros de operación. Finalmente, se resumieron los resultados y conclusiones del estudio en un informe final de investigación.

A. *Procedimientos Analíticos y Operativos*

i. *Principio de operación medición de fosforo y nitrógeno y DQO (Hanna)*

Para la medición de fosforo, nitrógeno y DQO, se emplea un fotómetro para tratamiento de aguas residuales de la marca Hanna Instruments. El principio de operación se basa en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, específicamente en la absorción de la luz. Cuando un haz de luz atraviesa una sustancia, esta puede absorber parte de la radiación, lo cual sucede en reacciones químicas específicas entre la muestra y un reactivo, dando como resultado la formación de un compuesto que absorbe la luz. La absorción lumínica depende tanto de la longitud del camino óptico a través de la muestra como de las propiedades físico-químicas de la sustancia, siguiendo la Ley de Lambert-Beer. Manteniendo constantes los demás factores, la concentración "c" de la sustancia puede calcularse a partir de la absorbancia.

ii. *Dosificación de coagulante*

La dosis de coagulante es un parámetro crítico en el proceso de coagulación y clarificación del agua, ya que su cantidad influye directamente en la eficiencia del proceso. Como lo señala Cogollo Flórez [7], el uso de una cantidad insuficiente de coagulante no logra neutralizar por completo las cargas de las partículas en suspensión, lo que resulta en una formación limitada de microflóculos y, en consecuencia, en un aumento de la turbidez en el agua tratada. Por otro lado, un exceso de coagulante puede provocar la inversión de las cargas de las partículas, generando una gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños y velocidades de sedimentación muy bajas, lo que igualmente conduce a un incremento en la turbidez del agua tratada. Por lo tanto, es fundamental determinar la cantidad óptima de coagulante a utilizar, lo que se logra mediante ensayos de pruebas de jarras [14] (iii).

En el caso particular de la PTAR de A97, se utiliza como coagulante hidroxiclورو de aluminio. Particularmente las especies de aluminio (o hierro) tienen la capacidad de desestabilizar coloides y partículas de dos maneras. En primer lugar, las especies catiónicas se adhieren a las partículas cargadas negativamente, lo que neutraliza su carga y permite que se agrupen. También

pueden adsorberse en la superficie de las partículas, formando puentes de unión entre ellas. En segundo lugar, en situaciones de aguas de baja turbidez, se puede producir la precipitación de $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ o $\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$ antes de lograr la neutralización de cargas, lo que lleva a la captura de la materia coloidal en el precipitado de hidróxido, eliminándola del agua mediante barrido [15].

iii. Pruebas de jarras

Las pruebas de jarras son un componente esencial en la optimización del proceso de clarificación del agua a nivel industrial. Este enfoque permite calcular la dosis adecuada de un coagulante inorgánico, adaptada a las características específicas del agua cruda.

El procedimiento se desarrolla en varias etapas [16]:

Se inicia con la obtención de una muestra de agua cruda tomada en la entrada del proceso, antes de la adición de cualquier producto químico. Esta muestra se divide en volúmenes específicos, que se utilizan para llenar varios vasos de prueba. En los vasos de prueba, se añade una solución coagulante en diferentes dosis, seleccionadas en función de experiencias previas. En situaciones en las que el agua presenta una alta turbidez, es posible que se requieran dosis más elevadas. En ciertos escenarios, también se puede introducir floculante. Los contenidos de los vasos se someten a un proceso de agitación durante un período predeterminado, seguido por un período de reposo. A continuación, se registra la eficacia de la separación o el tamaño de los flóculos generados. En caso necesario, el agua se deja decantar durante un tiempo específico, tras lo cual se extrae cuidadosamente una muestra de la capa clarificada utilizando una pipeta o jeringa. Posteriormente, se procede a medir la turbidez u otro parámetro específico que se utiliza para cumplir los objetivos del tratamiento.

Durante las pruebas de jarras, se realiza un monitoreo de la turbidez para identificar cualquier cambio en el proceso de clarificación del agua. Cuando se observan variaciones, se procede a ajustar la dosis de coagulante. Este ajuste se realiza para lograr una eficiente formación de flóculos. Posteriormente, la concentración de coagulante que ha demostrado ser efectiva en las pruebas de jarras se utiliza en la planta de tratamiento de agua. Durante este proceso a escala real,

se espera que los valores de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y turbidez se asemejen a los resultados obtenidos en las pruebas de jarras.

iv. Turbidez

La turbiedad o turbidez se define como la propiedad óptica de una suspensión, que provoca que la luz se disperse o absorba en lugar de transmitirse en línea recta a través de la muestra. En el contexto del agua, la turbidez se origina por la presencia de partículas de material suspendido [17]. Este fenómeno afecta la capacidad de la luz para atravesar el agua de manera clara, y su medición es crucial para evaluar la calidad del agua, ya que altos niveles de turbidez pueden indicar la presencia de contaminantes o la necesidad de tratamientos específicos.

Los turbidímetros funcionan según principios ópticos que se basan en la dispersión de la luz incidente a medida que atraviesa una masa de agua. Esta dispersión de la luz es causada por la presencia de partículas suspendidas en el agua.

El análisis de la turbidez se enfoca en estudiar las propiedades ópticas que resultan en la dispersión y absorción de la luz en lugar de su transmisión en línea recta a través del agua. La turbidez causa un enturbiamiento o una disminución en la transparencia del agua. Cuando la luz incide en las partículas presentes en la columna de agua, su trayectoria se modifica, lo que conlleva a una dispersión de luz desde su dirección original [2].

v. SST

El término "sólidos" se refiere a la materia suspendida o disuelta presente en aguas y aguas residuales. Debido a la amplia variedad de materiales inorgánicos y orgánicos presentes en los análisis de sólidos, las pruebas que se realizan son relativamente simples de llevar a cabo [17].

Los sólidos suspendidos comprenden la materia que permanece suspendida sobre un filtro cuando filtramos una muestra de agua residual previamente agitada. La determinación de estos sólidos está sujeta a errores significativos si no se toman las precauciones adecuadas, ya que un

exceso de sólidos podría obstruir los poros del filtro. Además, pequeños errores en la medición o la pérdida de material del filtro pueden tener un impacto considerable en los resultados.

Es de suma importancia que los filtros sean preparados meticulosamente y llevados a un peso constante antes de su utilización. Esto garantiza la precisión y fiabilidad de los resultados, ya que cualquier desviación en el peso inicial del filtro puede afectar la medición de los sólidos suspendidos. Este procedimiento cuidadoso es esencial para obtener datos confiables en los análisis de aguas y aguas residuales, contribuyendo así a la exactitud de la evaluación de la calidad del agua [17].

El procedimiento es relativamente sencillo y consta de los siguientes pasos: primero, se coloca el filtro en un embudo Buchi o un crisol Gooch, y se introduce el conjunto en una estufa a 103 °C durante una hora. Luego, se deja enfriar en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente con el fin de obtener un peso constante, registrando el peso del conjunto. A continuación, se coloca el crisol con el filtro en un sistema de filtración al vacío, se mide el peso inicial de la muestra de agua, y se procede a filtrar la muestra bien mezclada utilizando succión. Después de la filtración, se toma el peso final de la muestra y se lava el filtro con agua desionizada. Posteriormente, se retira el crisol con el filtro y se seca en una estufa a 103–105 °C por una hora. Finalmente, se enfría el crisol con el filtro en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y se pesa el crisol con el filtro en una balanza analítica. Este procedimiento garantiza la obtención de resultados precisos [17].

Para realizar el cálculo de los sólidos suspendidos totales, se hace uso de la siguiente ecuación:

$$SST(ppm) = \frac{D - E}{W - S} \cdot 10^6 \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde D: Peso del crisol con el filtro y los sólidos retenidos

E: Peso del crisol con el filtro

W: Peso inicial de la muestra

B: Peso residual de la muestra

vi. *Relación turbidez y SST*

La turbidez se presenta como un indicador crítico en el proceso de clarificación del agua en la planta de tratamiento de Enka de Colombia. Para comprender con precisión su relación con la cantidad de Sólidos Suspendidos Totales (SST), se realizó un minucioso registro de datos tanto a la entrada como a la salida del DAF secundario (DAF 2). Este proceso de medición es factible debido a que la composición de los lodos en ambas ubicaciones es prácticamente idéntica. El propósito es establecer una correlación sólida entre los niveles de turbidez y los SST, lo que permitirá obtener una evaluación rápida y confiable de los SST al medir simplemente la turbidez.

Para llevar a cabo este análisis, se recurrió al software Minitab, lo que facilitó el cálculo de coeficientes en las ecuaciones utilizadas. Este enfoque no solo simplificará y agilizará significativamente la tarea de medición de los SST, beneficiando tanto a los operadores como a la eficiencia del proceso, sino que también respaldará los resultados con una sólida base estadística. La utilización de esta metodología garantiza una evaluación precisa y eficiente de los niveles de SST, y además se traduce en un ahorro de recursos valiosos, en términos de tiempo y costos asociados con las mediciones de SST.

VII. RESULTADOS

A. Turbidez

Durante el desarrollo de esta investigación, se llevaron a cabo un total de 93 análisis de sólidos suspendidos con el objetivo de establecer comparaciones con los niveles de turbidez. Un componente fundamental de estos análisis fue la diferenciación entre dos condiciones distintas: la primera se llevó a cabo manteniendo una sobredosificación de antiespumante, mientras que la segunda se efectuó tras eliminar esta sobredosificación.

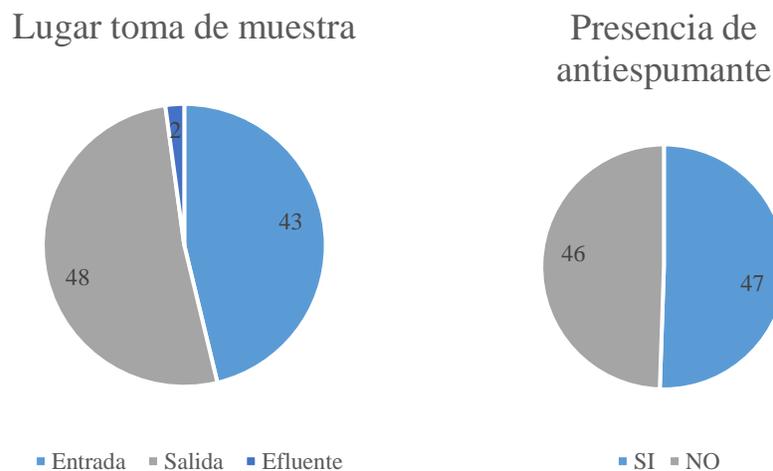


Fig. 3. Toma de muestras de para la comparación de Sólidos Suspendidos y turbidez a diferentes condiciones.

Los resultados de este análisis exhaustivo revelaron dos correlaciones significativas. La primera correlación se estableció en presencia de sobredosificación de antiespumante, y la segunda, en ausencia de la misma. Estas correlaciones destacan la importancia crucial de este parámetro en el proceso de tratamiento.

Es relevante señalar que se realizaron tres tipos de correlaciones para cada situación, tanto con antiespumante como sin él. Se llevaron a cabo correlaciones lineales, correlaciones cuadráticas y correlaciones de la forma $Turbidez (NTU) = a \cdot SST^b$ siguiendo la forma que se tiene en estudios anteriores [2]. Para esta última forma, se desea obtener los sólidos suspendidos totales en

función de la turbidez, por lo que se utilizó la ecuación de la forma $SST = \left(\frac{Turbidez}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$. Los resultados obtenidos revelaron coeficientes de determinación (R^2) de 0.6519, 0.8113 y 0.7588 respectivamente, proporcionando una medida de las relaciones observadas.

Utilizando minitab se obtienen las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones lineales:

Con antiespumante

$$SST = 0.5884 \cdot Turbidez \quad Ecuación (3)$$

Sin antiespumante

$$SST = 0.9983 \cdot Turbidez \quad Ecuación (4)$$

Ecuaciones cuadráticas:

Con antiespumante

$$SST = 0.6346 \cdot Turbidez - 0.00008 \cdot Turbidez^2 \quad Ecuación (5)$$

Sin antiespumante

$$SST = 2.0672 \cdot Turbidez - 0.0028 \cdot Turbidez^2 \quad Ecuación (6)$$

Ecuaciones de potencia [2]:

Con antiespumante

$$SST = \left(\frac{Turbidez}{1.12623}\right)^{\frac{1}{1.07088}} \quad Ecuación (7)$$

Sin antiespumante

$$SST = \left(\frac{Turbidez}{0.00643133}\right)^{\frac{1}{1.87348}} \quad Ecuación (8)$$

En la Fig. 4, se exhiben los resultados derivados de la medición de sólidos suspendidos totales (SST) en conjunto con los niveles de turbidez correspondientes. Estos datos se comparan con los valores predichos mediante las ecuaciones que modelan la relación entre SST y turbidez.

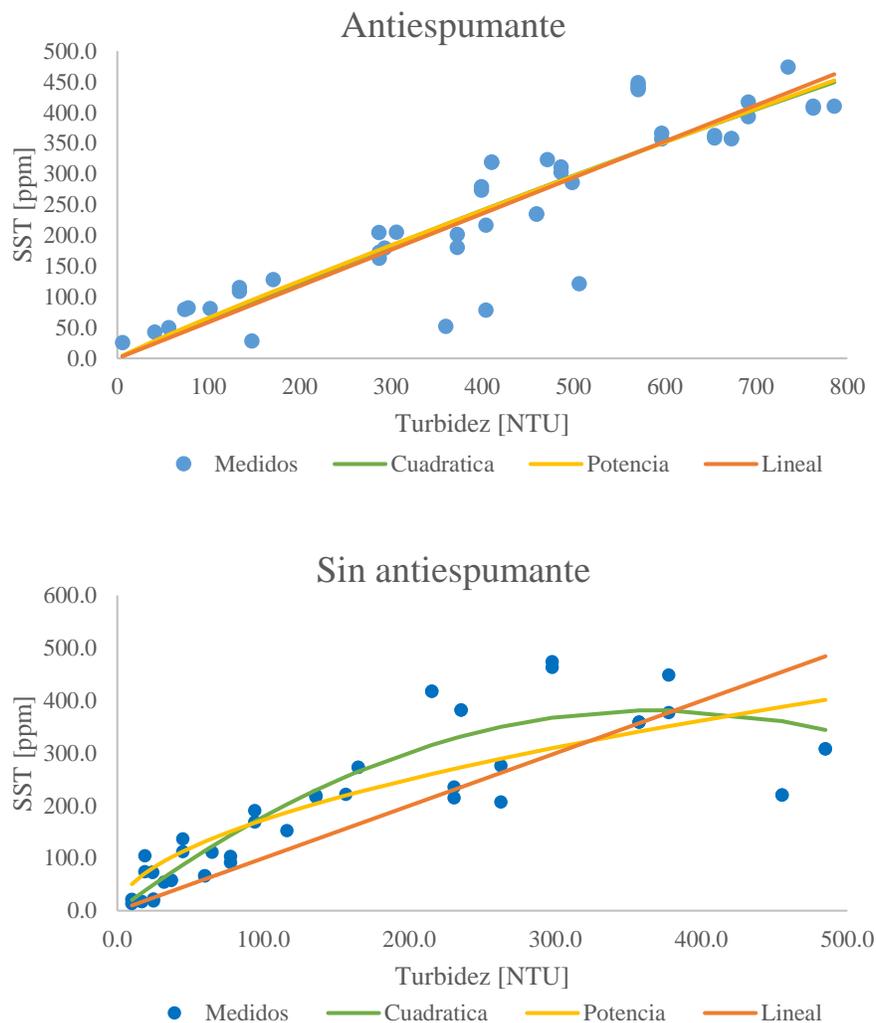


Fig. 4. Relación entre Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Turbidez.

La elección entre las diferentes correlaciones depende de la naturaleza de los datos y del fenómeno que se está estudiando.

En general, la ecuación lineal es más simple y fácil de usar, por otro lado, la ecuación cuadrática es una relación más flexible y usualmente se prefiere un modelo de este tipo cuando se

explica bien los datos. La ecuación de potencia podría ser preferible debido a que estudios anteriores han utilizado la forma $SST = \left(\frac{\text{Turbidez}}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$ con éxito en situaciones similares y ha demostrado ser efectiva lo que podría considerarse como una razón para preferirla. Sin embargo, analizando los coeficientes de determinación (R^2), el R^2 más alto (0.8113) en la correlación cuadrática sugiere que este modelo podría estar representando de manera más precisa la relación existente en los datos.

Según Riley [1], la turbidez no puede predecir con precisión la concentración de sólidos suspendidos totales, ya que la relación carece de precisión para satisfacer las necesidades operativas y reglamentarias. Sin embargo, la correlación entre turbidez y sólidos suspendidos totales (SST) puede ser utilizada para la toma de decisiones diarias. No obstante, es crucial adoptar un enfoque consciente, considerando las limitaciones y riesgos asociados. Reconocer las limitaciones de la correlación es esencial, ya que, aunque útil para decisiones rápidas, no garantiza la precisión de las estimaciones de SST. Se recomienda un monitoreo continuo, comparando regularmente las estimaciones de SST derivadas de la turbidez con mediciones directas. Dada la sensibilidad de la correlación a cambios en las condiciones del agua, se aconseja realizar análisis directos de SST periódicamente para asegurar que la calidad del agua cumpla con los límites reglamentarios.

B. Pruebas de jarras

En las pruebas de jarras se observaron varios aspectos relevantes: En primer lugar, se pudo apreciar cómo la turbidez se comporta en función de la concentración de coagulante, llegando a un punto óptimo en el que se produce una eficiente separación de lodos del clarificado. Sin embargo, a medida que se excede esta concentración óptima, la eficacia de separación disminuye debido a una sobredosificación de coagulante. Esto se explica por el hecho de que una cantidad insuficiente de coagulante no logra neutralizar por completo la carga de las partículas, resultando en una alta turbidez residual, mientras que una concentración excesiva de coagulante provoca la inversión de la carga de las partículas y la formación de una gran cantidad de microflóculos con velocidades de sedimentación muy bajas, lo que también se traduce en una turbidez residual elevada [14].

Además, se llevaron a cabo pruebas adicionales con diferentes concentraciones de floculante, lo que mostró una notable mejora en la eficiencia de clarificación. Estas pruebas demostraron cómo la adición de floculante puede influir positivamente en la formación y separación de los flóculos, contribuyendo a una mejor clarificación del agua.

En la Fig. 5 se proporciona una representación del impacto en la turbidez al aplicar coagulante y floculante, de esta manera, se ilustra de manera clara y concisa cómo la adición de estos agentes químicos incide en la claridad del agua.

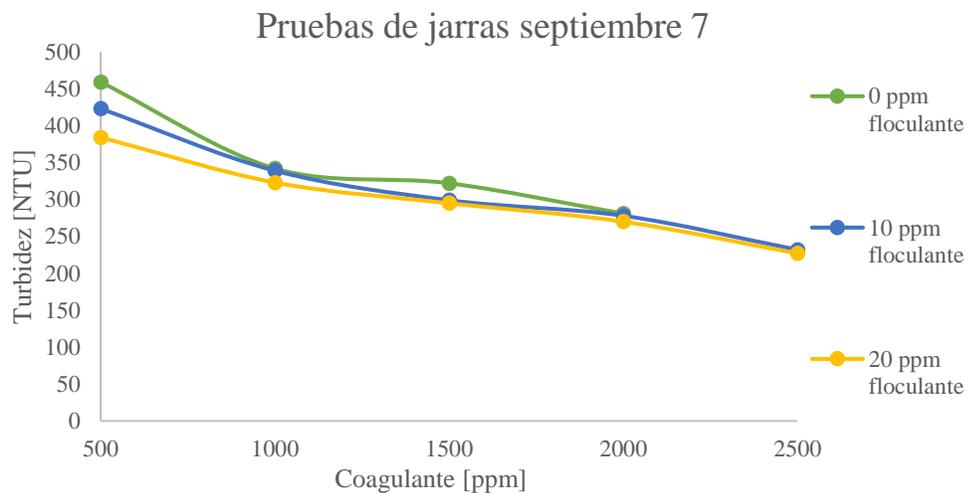


Fig. 5. Efecto de Coagulante y Floculante en la Turbidez.

Sin embargo, es importante señalar que estas pruebas de jarras fueron llevadas a cabo utilizando agua proveniente de la entrada al DAF 2, la cual es la salida del reactor MBBR. Existe la posibilidad de que estas pruebas hayan sido influenciadas por una sobredosificación de nutrientes (D) o antiespumante (E). Por ende, se repitieron las pruebas en una fecha posterior después de la eliminación de dicha sobredosificación:

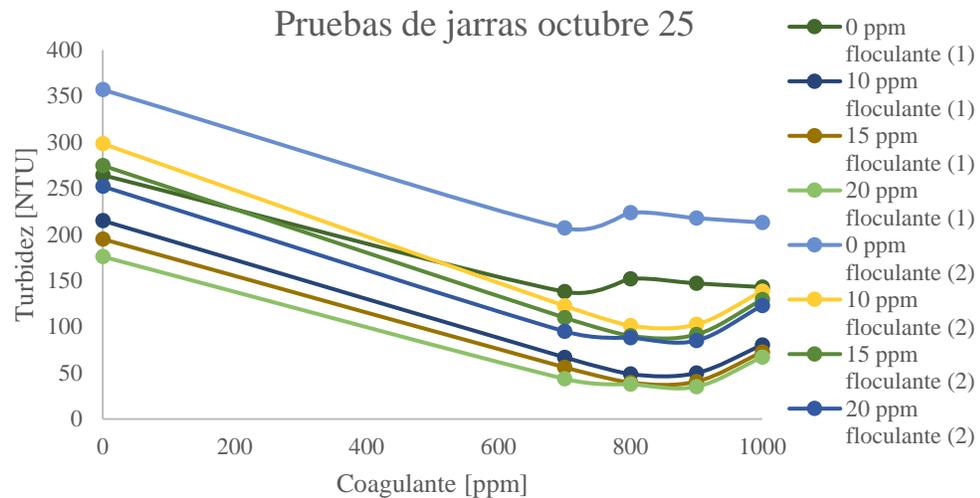


Fig. 6. Impacto de la eliminación de la sobredosificación en las pruebas de jarras sobre la correlación SST-turbidez.

En la Fig. 6, se evidencia claramente que incrementar la dosis de coagulante por encima del nivel óptimo (alrededor de 900 ppm en este caso) conduce a una inversión de las cargas de las partículas, provocando el aumento en la turbidez del agua tratada.

La incorporación de floculante ejerce un impacto notable en la reducción de la turbidez del agua. No obstante, determinar la concentración óptima de floculante puede depender de diversas variables, incluida la concentración de coagulante empleada. Por ende, resulta crucial llevar a cabo experimentos adicionales, ajustando tanto la concentración de floculante como la de coagulante, tal como se muestra en la Fig. 6. La consideración de aspectos económicos y operativos al seleccionar las concentraciones ideales es esencial. Este descubrimiento sugiere que la inclusión de floculante podría ser una opción valiosa para mejorar la eficacia del proceso de clarificación. La disminución en la turbidez, evidenciada en la Fig. 6, indica que el floculante contribuye a la formación de flóculos más grandes o a una mayor aglomeración de partículas, facilitando así su posterior eliminación del agua. Además, se observa que tanto el aumento del coagulante como del floculante conlleva a una disminución de la turbidez. Asimismo, se destaca que el incremento de floculante resulta en una reducción de la turbidez independientemente de la concentración de coagulante, subrayando la efectividad del floculante en este proceso.

C. pH

La utilización de coagulantes convencionales a menudo conlleva desafíos relacionados con la estabilidad del pH óptimo de coagulación durante la operación, lo que impacta directamente en la eficacia de la clarificación. Si el pH no se mantiene dentro del rango adecuado, la eficiencia de la clarificación se ve comprometida. Cada coagulante tiene un intervalo específico de pH donde exhibe la mínima solubilidad y se produce la máxima precipitación, dependiendo de las características químicas del agua cruda. La necesidad de agregar un acondicionador de pH varía según estas características [7].

En contraste con los coagulantes tradicionales, los policloruros de aluminio (PAC) se consideran más eficientes debido a su menor producción de lodos y menor dependencia de la temperatura y el pH [18]. Sin embargo, su eficiencia está influenciada por parámetros como la composición del agua cruda y condiciones operativas específicas.

En la PTAR A97, se utiliza el hidroxiclورو de aluminio como coagulante, una sal inorgánica de aluminio multinuclear (PAC). Este coagulante presenta una capacidad excepcional para formar flóculos con rapidez, logrando una sedimentación más veloz y una mayor capacidad de clarificación en comparación con sales de aluminio mononuclear como el sulfato de aluminio. El rango óptimo de pH para su funcionamiento se sitúa entre 5.0 y 9.0, dependiendo del contenido de carbono orgánico disuelto en el agua [7].

En la PTAR A97, el pH promedio a la entrada del clarificador secundario se mantiene alrededor de 8, eliminando la necesidad de agregar un acondicionador de pH. Además, se observa una disminución del pH en el agua clarificada con el aumento de la concentración de coagulante debido a su naturaleza catiónica, como se ilustra en los resultados de las pruebas de jarras en la Fig. 7.

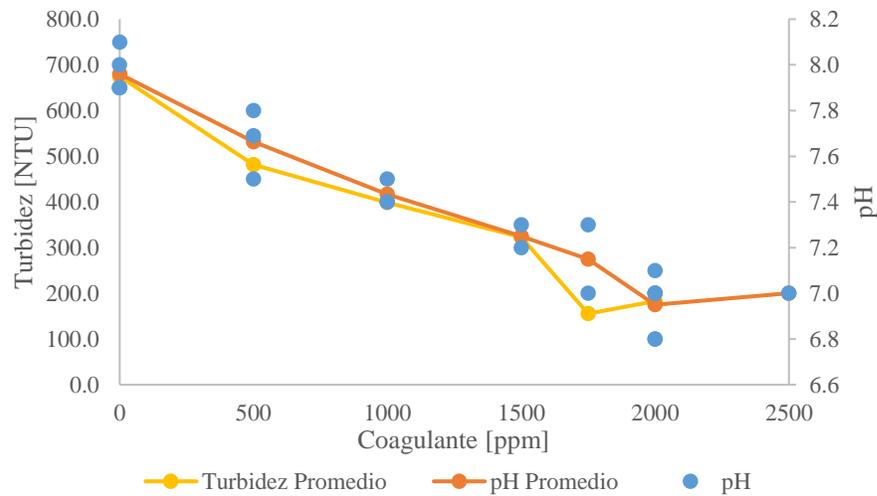


Fig. 7. Efecto del pH con el aumento de la concentración de coagulante catiónico (hidroxicloruro de aluminio).

D. Nutrientes

Previamente, se había identificado la sobredosificación de nutrientes en el reactor de la PTAR A97 como un problema que afectaba la posterior clarificación. Con el objetivo de abordar este inconveniente, se procedió a una evaluación de este parámetro, realizando mediciones de fósforo y nitrógeno tanto a la entrada como a la salida del reactor.

TABLA II. RESULTADOS DE NUTRIENTES A LA ENTRADA Y SALIDA DEL REACTOR MBBR.

	Fósforo [ppm]	Nitrógeno [ppm]
Entrada	1.6	9
Salida	4.6	11

Los resultados, detallados en la TABLA II, revelaron valores superiores en la salida, indicando un posible exceso de nutrientes. En respuesta a esta preocupación, se llevó a cabo una prueba de jarras, cuyos resultados confirmaron la presencia de inhibición del efecto del coagulante en el DAF 2 como se muestra en la Fig. 8.

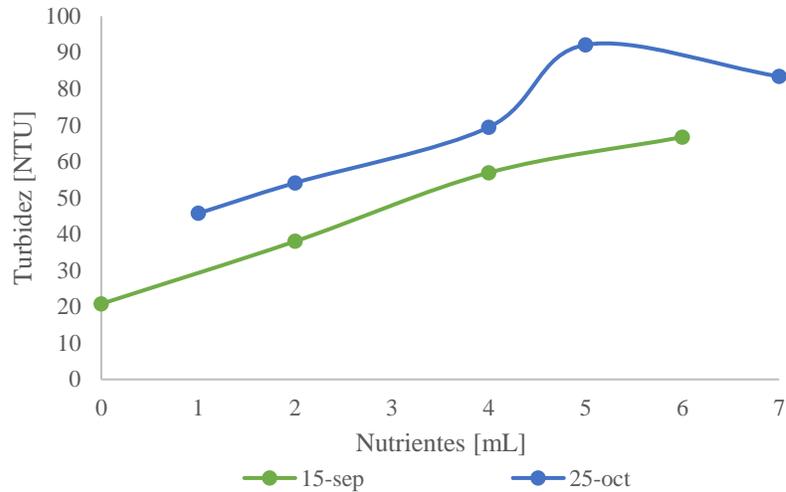


Fig. 8. Relación Dosificación de Nutrientes y Turbidez.

Debido a la sobredosificación de nutrientes en el reactor, fue necesario implementar dosificaciones controladas de nutrientes a partir del 11 de septiembre. Inicialmente se tenía considerado un consumo de entre 9 y 15 L/h de nutrientes de manera continua (24 horas); sin embargo, se encontró que con un flujo de 3 L/h era suficiente para que el reactor MBBR funcionara de manera correcta y eliminara una alta cantidad de DQO. Esto resultó en una notable reducción de la turbidez en el efluente como se muestra en la Fig. 9 así como una reducción del DQO que surgía por arrastre de los lodos desde el clarificado.

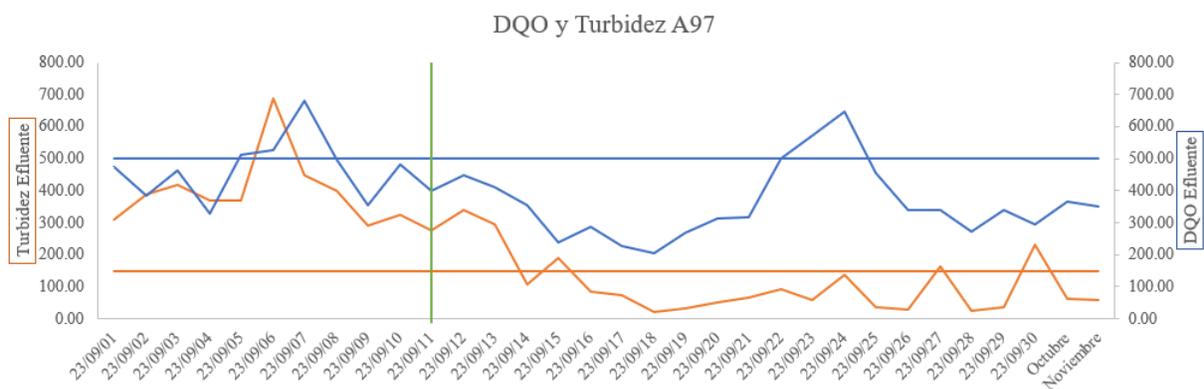


Fig. 9. Turbidez y DQO durante septiembre. Dosificaciones controladas de nutrientes desde el 11 de septiembre.

E. Antiespumante

Para determinar el comportamiento de la separación del clarificado en el DAF 2, se ha mantenido constante una serie de parámetros operativos, como el pH, el caudal y el oxígeno disuelto. Esto se realizó para centrarse en la evaluación exclusiva de la acción del antiespumante en la separación de sólidos suspendidos en el sistema.

Se ha comprobado mediante pruebas de jarras que la coagulación no está ocurriendo de manera efectiva al añadir una sobredosificación de antiespumante. Las pruebas de jarras se realizaron originalmente con concentraciones de entre 0 y 5 mL de antiespumante y posteriormente se llevaron hasta 50 mL con repetición. Los resultados se muestran en la Fig. 10.

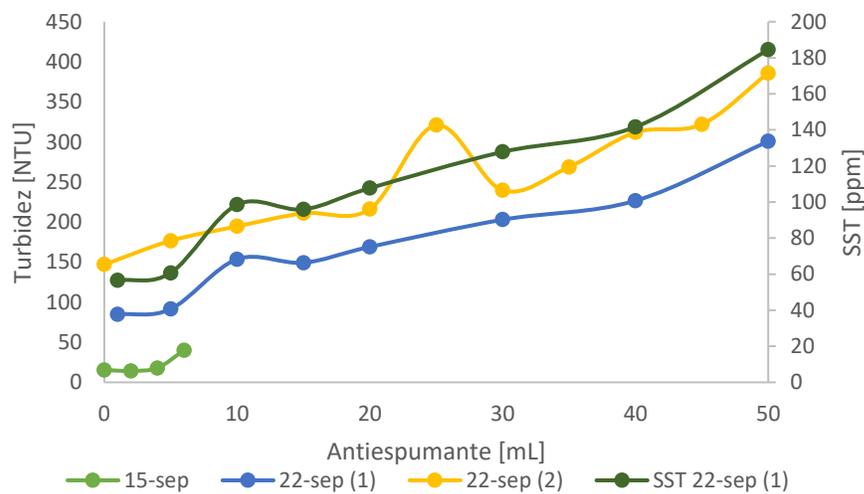


Fig. 10. Relación Dosificación de Antiespumante y Turbidez.

Al realizar ajustes para corregir la adición excesiva de antiespumante, se evidencia que la cantidad de sólidos suspendidos se mantiene estable en la entrada del del DAF 2 (salida del reactor). Sin embargo, lo que llama la atención es la marcada disminución de los sólidos suspendidos totales (SST) registrada a la salida del DAF 2 después de eliminar la sobredosificación de antiespumante. La Fig. 10 revela que la tendencia de los sólidos suspendidos totales sigue una trayectoria similar a la turbidez, resaltando la conexión entre estos parámetros y respaldando la efectividad de la corrección en la mejora de la calidad del agua tratada.

Este fenómeno sugiere una posible interacción negativa entre el antiespumante y el coagulante utilizado en el DAF 2. Se sugiere que la presencia excesiva de antiespumante en el agua residual podría estar inhibiendo la acción efectiva del coagulante, lo que resulta en una menor formación de flóculos y, por ende, en una menor capacidad de atrapar y eliminar los sólidos suspendidos en el proceso de flotación.

Es importante destacar que esta reducción en la sobredosificación de antiespumante produce mejoras significativas en la eficacia global del tratamiento. De hecho, supera los resultados obtenidos al agregar floculante al DAF 2.

Efectivamente, varios autores sugieren que algunos antiespumantes, especialmente aquellos de naturaleza tensioactiva, pueden interferir en los procesos de coagulación y floculación en el tratamiento de aguas. Según Khan [19], los resultados de sus estudios indican que las características de los tensioactivos, incluyendo su concentración y la presencia de otros iones interferentes, parecen ser factores determinantes en el comportamiento de eliminación de contaminantes en aguas naturales. Además, Carvajal [20] señala que algunas especies químicas presentes, en particular los tensioactivos, pueden afectar los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en las plantas de tratamiento de aguas, sugiriendo que la concentración de estas sustancias químicas es un factor crítico.

Esto podría explicarse por la capacidad del antiespumante para adsorberse en las partículas suspendidas o en sus superficies, alterando así las propiedades de las partículas y dificultando la neutralización de cargas por parte del coagulante. En consecuencia, se plantea la posibilidad de que el antiespumante tenga un impacto negativo en la capacidad del coagulante para agrupar y neutralizar eficazmente las partículas suspendidas en el agua.

Como respuesta a los resultados obtenidos, se tomaron medidas correctivas implementando dosificaciones controladas de antiespumante a partir del 15 de septiembre. En el diseño de la planta se propuso un flujo entre 0.75 y 12 L/h de antiespumante de manera continua (24 horas) hacia el reactor. Sin embargo, el reactor raramente presenta problemas de espuma, por lo que se define

dosificar el antiespumante manualmente de acuerdo con el criterio del operador. Esta acción conllevó a una notable reducción de la turbidez en el efluente, como se ilustra en la Fig. 11. Además, se observó una disminución significativa en la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que previamente se generaba debido al arrastre de lodos desde el clarificado.

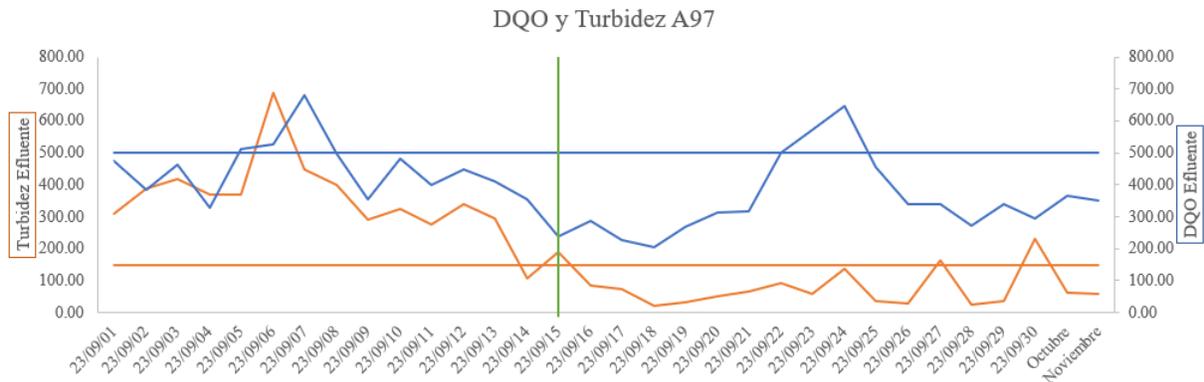


Fig. 11. Turbidez y DQO durante septiembre. Dosificaciones controladas de antiespumante desde el 15 de septiembre.¹

F. Otros parámetros

En el marco de este proyecto, se tomó la decisión estratégica de no realizar un seguimiento continuo de ciertos parámetros, como alcalinidad, edad de los lodos, tiempo de retención de los tanques y temperatura. Esta decisión se fundamentó en la identificación precisa de las variables más críticas y sensibles que desempeñarían un papel determinante en el logro de los objetivos establecidos. Entre estas variables, se destacaron el pH, los nutrientes y la dosificación de antiespumante como los factores más esenciales para abordar las problemáticas específicas relacionadas con la clarificación en la PTAR A97.

Se logró un avance significativo al identificar y aplicar una solución efectiva para abordar el problema de clarificación en la PTAR A97. La implementación de estrategias específicas, como dosificaciones controladas de antiespumante, nutrientes y la adición de floculante, fue la clave para

¹ La Figura 9 y la Figura 11 muestran un pico alrededor del 24 de septiembre, resultado del incremento en el caudal de agua debido a la transferencia de agua desde otra PTAR hacia la PTAR A97. Este aumento en el caudal se tradujo en mayores valores de DQO y turbidez en el efluente.

superar los desafíos existentes. Es importante resaltar que la selección de estas acciones se tradujo en una mejora sustancial en la eficiencia del proceso de clarificación. Este éxito fue el motivo fundamental por el cual no se llevó a cabo ni se analizó a fondo otras variables en este proyecto. Al concentrarse en las áreas críticas identificadas, se maximizó la efectividad de las intervenciones, permitiendo una solución precisa que atendió las necesidades particulares de la PTAR A97.

La exclusión de seguimiento para las variables mencionadas no implica subestimar su importancia en el proceso de tratamiento de aguas, sino más bien se deriva de la consideración estratégica de concentrar los recursos y esfuerzos en los aspectos más relevantes para alcanzar la eficiencia deseada en el clarificador.

Es crucial destacar que, si bien la alcalinidad, edad de los lodos, tiempo de retención de los tanques y temperatura son parámetros relevantes en el contexto del tratamiento de aguas, su inclusión no se consideró necesaria para este proyecto específico. Evaluar estas variables sin proponer cambios concretos en su gestión podría no aportar significativamente al objetivo central, ya que se asumió que su variabilidad no podría modificarse en el contexto operativo actual. En consecuencia, la elección de no evaluar estas variables se alinea con una estrategia centrada en optimizar de manera efectiva aquellos aspectos del proceso que sí pueden ser ajustados para mejorar la eficiencia del clarificador en la PTAR A97.

G. Evaluación económica

Con base en los resultados presentados, se identifica la necesidad de replantear las dosificaciones de nutrientes y antiespumante, además de introducir la adición de floculante al proceso de clarificación. Estos ajustes, aunque prometedores en términos de eficiencia operativa, conllevan implicaciones económicas significativas. Se llevó a cabo una evaluación detallada para estimar el ahorro potencial derivado de la reducción en el uso de antiespumante y nutrientes (urea y fosfato diamónico), así como los costos asociados con la eliminación de los análisis de SST. A su vez, se consideraron los gastos adicionales vinculados a la incorporación de floculante.

La TABLA III presenta el ahorro mensual de los gastos operativos. Esta información se basa en datos promedio de coagulante, nutrientes y antiespumante previstos al iniciar la operación de la planta. Es importante destacar que no se emplea una dosis exacta, ya que esta varía según la composición del agua tratada. Además, se consideró un caudal de 10 m³/h, aunque la planta tiene la capacidad de operar en un rango que va desde 6 m³/h hasta 15 m³/h.

TABLA III. AHORROS Y GASTOS AL IMPLEMENTAR LOS CAMBIOS SUGERIDOS.

	Cantidad antes [Kg/mes]	Cantidad después [Kg/mes]	Precio [COP/Kg]	Costo [COP/mes]
Ahorros				
Antiespumante	702.00	10.00	\$ 15,000	\$ 10,380,000
Urea	864.00	48.18	\$ 7,603	\$ 6,202,716
Fosfato diamónico	432.00	9.64	\$ 20,390	\$ 8,612,022
Análisis SST	30 análisis	4 análisis	\$ 23,800	\$ 618,800
Gastos				
Coagulante	594.00	5760.00	\$ 2,146	-\$ 11,086,236
Floculante	0.00	144.00	\$ 18,930	-\$ 2,725,920
Ahorro total mensual				\$ 12,001,382

Para facilitar la incorporación eficiente del floculante en la entrada del DAF 2, fue necesaria la adquisición de una bomba, con un costo de \$ 20,375,158 COP. Este gasto inicial se amortizará a lo largo del tiempo, y se proyecta un ahorro neto desde el segundo mes de implementación. Durante el primer año, el ahorro total, después de descontar el costo de la bomba, asciende a \$ 123,641,428 COP.

VIII. DISCUSIÓN

Las recomendaciones derivadas de este estudio se fundamentan en una evaluación detallada de los procesos y parámetros en la PTAR A97. En primer lugar, se aconseja mantener el uso del hidroxicloriguro de aluminio como coagulante, ya que ha demostrado ser eficaz en la formación de flóculos con una rápida sedimentación, contribuyendo así a una clarificación efectiva. La adición de floculante en el DAF 2 emerge como una estrategia prometedora para optimizar la eliminación de lodos biológicos, mejorando la eficiencia del proceso global.

En cuanto a los nutrientes, se destaca la importancia de mantener una dosificación controlada para evitar posibles problemas en el proceso de clarificación. La sobredosificación de nutrientes puede afectar negativamente la eficacia del tratamiento, como se evidenció en las pruebas de jarras. Por lo tanto, se recomienda un monitoreo regular y ajustes precisos en la dosificación de nutrientes para mantener un equilibrio adecuado.

Además, se subraya la importancia de mantener controlada la dosificación de antiespumante. Este aditivo, aunque es esencial para controlar la formación de espuma, debe administrarse con moderación para evitar interferencias negativas en los procesos de coagulación y floculación. La implementación de dosificaciones controladas de antiespumante demostró una reducción significativa en la turbidez del efluente.

Finalmente, es posible utilizar las correlaciones establecidas entre la turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) puesto que ofrecen la posibilidad de utilizar mediciones de turbidez como indicadores rápidos y eficientes para evaluar la carga de SST en el efluente. Implementar un monitoreo regular de la turbidez en lugar de realizar análisis de SST en laboratorio podría proporcionar una herramienta práctica para evaluar el rendimiento del sistema de tratamiento en tiempo real.

Esta estrategia permitiría una respuesta más ágil ante posibles desviaciones en los parámetros deseados, ya que la turbidez se convierte en un indicador inmediato de la presencia de sólidos suspendidos. Este enfoque simplificado podría reducir la necesidad de análisis de

laboratorio de SST, ahorrando tiempo y recursos, al tiempo que brinda una evaluación continua del cumplimiento de los estándares operativos. Implementar esta práctica podría mejorar la eficiencia operativa y facilitar la toma de decisiones para realizar ajustes en tiempo real en el sistema de tratamiento de aguas residuales.

Usando la correlación entre turbidez y SST, y ante una alta turbidez (y por ende un alto SST), se debe llevar a cabo un procedimiento específico. Se deben realizar pruebas de jarras, variando las concentraciones de coagulante y floculante, con el objetivo de obtener una turbidez y unos SST bajos, estos valores serán valores similares en la planta. Si los valores deseados de turbidez y SST no alcanzan un valor bajo, se deben medir los nutrientes (fosforo y nitrógeno) tanto a la entrada como a la salida del reactor para determinar la posibilidad de una sobredosificación. Es crucial considerar que no se pueden eliminar completamente los nutrientes, ya que esto afectaría la correcta reducción de la DQO en el reactor. Si la dosificación de nutrientes es adecuada, se procede a analizar la cantidad de antiespumante introducido al reactor, siguiendo el criterio del operador, como parte del proceso de diagnóstico y ajuste continuo del sistema.

La implementación de los cambios propuestos que incluyen la dosificación controlada de antiespumante, nutrientes y la utilización de correlaciones entre turbidez y SST, ofrece un horizonte financiero optimista. Se anticipa un significativo ahorro económico derivado de la reducción en el consumo de antiespumante y nutrientes, así como la eliminación parcial de los costosos análisis de SST. Estos ahorros contribuyen directamente a la eficiencia operativa y a la sostenibilidad económica a largo plazo de la planta de tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, la inversión en una bomba para el floculante presenta inicialmente un gasto y el impacto financiero podría ser desafiante a corto plazo. Sin embargo, es crucial considerar estos gastos como inversiones en la eficiencia y la mejora continua del proceso de tratamiento.

IX. CONCLUSIONES

En conclusión, el desarrollo de este proyecto ha permitido obtener valiosos conocimientos sobre el funcionamiento y la eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) A97 de ENKA Colombia. A través de un enfoque integral que incluyó la evaluación de parámetros clave como turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), nutrientes, antiespumante y pH, se logró identificar áreas de mejora y proponer soluciones prácticas.

En primer lugar, las correlaciones establecidas entre la turbidez y los SST han demostrado ser herramientas predictivas valiosas. La relación lineal y la ecuación de potencia, así como la relación cuadrática proporcionan una base sólida para prever los cambios en la concentración de sólidos suspendidos a partir de la turbidez del agua tratada. Esta comprensión es esencial para ajustar de manera óptima las operaciones de la PTAR, mejorando la eficiencia del proceso de clarificación.

El problema de clarificación detectado en el DAF 2, causada por la sobredosificación de antiespumante y nutrientes, resalta la importancia de un control preciso de estos componentes. La implementación de dosificaciones controladas ha demostrado ser efectiva, conduciendo a una reducción significativa en la turbidez del efluente.

La relación entre el pH y la eficacia del coagulante subraya la importancia de mantener un pH estable en el rango óptimo. El uso del hidroxiclورو de aluminio como coagulante se justifica por su capacidad para formar flóculos rápidos y su menor dependencia del pH en comparación con coagulantes tradicionales.

En conjunto, este proyecto no solo proporciona soluciones prácticas y ajustes operativos para la PTAR A97, sino que también sienta las bases para prácticas más sostenibles en el manejo de aguas residuales en la industria, contribuyendo al cumplimiento normativo y a la conservación del medio ambiente.

REFERENCIAS

- [1] S. J. Riley, «The sediment concentration–turbidity relation: its value in monitoring at Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia,» *CATENA*, vol. 32, n° 1, pp. 1-14, 1998.
- [2] A. F. Bin Omar, «Turbidimeter Design and Analysis: A Review on Optical Fiber Sensors for the Measurement of Water Turbidity,» *Sensors*, vol. 9, n° 10, p. 9 (10), 2009.
- [3] Real Academia Española, «aguas residuales - Diccionario panhispánico del español jurídico,» [En línea]. Available: <https://dpej.rae.es/lema/aguas-residuales>. [Último acceso: 04 09 2023].
- [4] BBVA, «¿Qué son y cómo se pueden clasificar las aguas residuales? - Sostenibilidad y Banca Responsable,» 27 10 2021. [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-y-como-se-pueden-clasificar-las-aguas-residuales/>. [Último acceso: 04 09 2023].
- [5] S. R.-L. y R. Reyes-Mazzoco, «Efecto de las cargas hidráulica y orgánica sobre la remoción masica de un empaque estructurado en un filtro percolador,» *Revista mexicana de ingeniería química*, vol. 8, n° 1, pp. 101-109, 2009.
- [6] C. Pallé, «El dióxido de carbono como forma sostenible de reducir el pH del agua.,» *Tecnoaqua*, vol. 34, pp. 84-88, 2018.
- [7] J. M. Cogollo Flórez, «Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio,» *Dyna*, vol. 78, n° 165, pp. 18-27, 2011.
- [8] Y.-T. Hung, L. K. Wang, M.-H. S. Wang, N. K. Shammam y J. P. Chen, *Waste Treatment in the Service and Utility Industries*, Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [9] Enka de Colombia, «Descripción del proceso y memorias de cálculo PTARI,» 2021.
- [10] L. Semerjian, «High-pH–magnesium coagulation–flocculation in wastewater treatment,» *Advances in Environmental Research*, vol. 7, n° 2, pp. 389-403, 2003.
- [11] D. C. Cárdenas Castañeda, «Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales para su reuso en el proceso productivo de una industria de jabones,» 2008.
- [12] C. W. Anderson, «Turbidity 6.7.,» de *USGS National Field Manual for The Collection of Water Quality Data, US Geological Survey.*, 2005.

-
- [13] Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolución 0631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.*, 2015.
- [14] I. D. Sierra Molina, «Análisis comparativo del policloruro de aluminio (pac) y sulfato de aluminio líquido (sal) para la optimización del proceso coagulación en la planta de tratamiento de agua potable Francisco Wiesner,» 2016.
- [15] A. Torra, F. Valero , J. Bisbal, J. Tous y A. Aribau, «Policloruro de aluminio en el proceso de potabilización de aguas superficiales.,» *Tecnología del agua*, vol. 2, n° 2, 1998.
- [16] S. Freese, D. L. Trollip y D. J. Nozaic, «Manual for testing of water and wastewater treatment chemicals.,» *Pretoria: Water Research Commission.*, 2004.
- [17] J. Sierra y J. Humberto, *Análisis de aguas y aguas residuales*, Universidad de Antioquia., 1983.
- [18] Y. Wang, «The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species,» *Separation and Purification Technology*, vol. 66, n° 3, pp. 457-462, 2009.
- [19] R. Khan, «The influence of ionic and nonionic surfactants on the colloidal stability and removal of CuO nanoparticles from water by chemical coagulation,» *International journal of environmental research and public health*, vol. 16, n° 7, p. 1260, 2019.
- [20] J. S. Carvajal Muñoz, «Fotocatálisis heterogénea para el abatimiento de tensoactivos aniónicos en aguas residuales,» *Producción+ Limpia*, vol. 6, n° 2, pp. 92-107, 2011.