

SEP

SES

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“MODIFICACIÓN DEL TREN DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA
INDUSTRIA QUÍMICA FARMACÉUTICA”**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO (A) QUÍMICO (A)

PRESENTA:

CITLALI MUNDO ALVAREZ

NO. CONTROL:

10281209

ASESOR(A):

M. EN C. HILDA PATRICIA MEDINA CABALLERO

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, MARZO DE 2019



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

RECIBIDO
22 FEB 2019

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Metepec, Edo. de México, 27/ febrero /2019.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA
D.I.Q.B-228/2019

HORA

OFICINA DE APOYO A LA TITULACIÓN

ING. MIGUEL ÁNGEL TERRAZAS MAGAÑA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
PRESENTE

Por este medio le informo a usted, que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral:

Nombre de la Egresada	CITLALI MUNDO ALVAREZ
Carrera	INGENIERÍA QUÍMICA
No. de Control	10281209
Nombre del Proyecto	"MODIFICACIÓN DEL TREN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA QUÍMICA FARMACÉUTICA"
Producto	TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE

Educación integral y ciencia

M. en C. MARÍA FERNANDA MÁRQUEZ QUINTANA
JEFA DEL DEPARTAMENTO



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

M. en C. HILDA PATRICIA
MEDINA CABALLERO
ASESORA

M. en C. MANUEL
ORELLANA PÉREZ
REVISOR

M. en C. MARÍA FERNANDA
MÁRQUEZ QUINTANA
REVISORA

MFMQ/stt



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Metepec, Edo. de México, **11/marzo/2019**

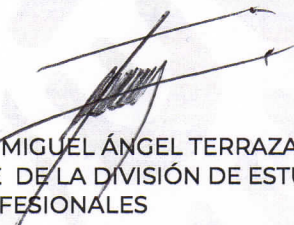
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO PROFESIONAL

C. CITLALI MUNDO ALVAREZ
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA QUÍMICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica, dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó, con respecto a su trabajo profesional en la **OPCIÓN TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL**, con el tema denominado: "**MODIFICACIÓN DEL TREN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA QUÍMICA FARMACÉUTICA**". División de Estudios Profesionales concede su autorización para que proceda la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

"Educación, integridad y ciencia"


ING. MIGUEL ÁNGEL TERRAZAS MAGAÑA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
PROFESIONALES



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE
ESTUDIOS PROFESIONALES

MATM*mppd*



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, quien a mis ojos es el claro ejemplo de aquella perfección, que ante las adversidades se torna en el más fuerte ser para reñir con valía, y quién me ha formado para luchar siempre por aquello que vale la pena.

Al personal de Organo Síntesis S.A de C.V., en especial al Dr. Bayardo Velazco por haber confiado en mí y por brindarme la oportunidad de llevar a cabo el desarrollo del proyecto. Al QFB Marco Antonio Barrueta con quien trabajamos en conjunto para el desarrollo del mismo.

A la MC. Hilda Patricia Medina Caballero, por acceder a tomar el proyecto, por su tiempo dedicado a la elaboración de la presente.

A mi familia y amigos quienes nunca perdieron la fe en mí y siempre me alentaron a seguir adelante.

Gracias.

RESUMEN

Organo Síntesis S.A. de C.V., es una empresa dedicada a la manufactura de biocidas (cuaternarios de amonio), actualmente cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales de tipo biológico, sin embargo, debido al crecimiento de la producción que se ha observado durante los años 2016 - 2017 y la introducción de nuevos productos al mercado, esta planta ha reducido notablemente la eficiencia en el tratamiento de sus efluentes, obteniendo valores para DBO_5 y DQO fuera de especificación, de acuerdo a lo señalado por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Para dar solución al problema expuesto, se propuso la aplicación de un tratamiento fisicoquímico conformado por las etapas de coagulación – floculación, oxidación química y adsorción, con la finalidad de alcanzar una reducción de por lo menos el 70% de la DQO.

Para la selección del coagulante – floculante con mayor eficiencia, se llevaron a cabo pruebas de jarras probando como coagulantes sulfato de aluminio (150 a 600 mg/L), cloruro férrico (100 a 350 mg/L) e hidróxido de calcio (100 a 400 mg/L), usando como floculante poliacrilamida aniónica en una concentración de 30 mg/L. Las pruebas de oxidación química se realizaron con peróxido de hidrógeno (125 a 750 mg/L) e hipoclorito de sodio (130 a 520 mg/L), finalmente para el proceso de adsorción, se usó carbón activado en polvo.

Las pruebas que arrojaron mejores resultados fueron la combinación de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio como coagulante, poliacrilamida como floculante, hipoclorito de sodio para el proceso de oxidación química y finalmente el carbón activado. Obteniéndose porcentajes de reducción del 70% y 90% para DBO_5 y nitrógeno total respectivamente, así como eficiencias de aproximadamente un 80 a 95% para la DQO. A partir de los resultados alcanzados, el proceso se llevó a escala de planta piloto donde las pruebas realizadas dieron resultados similares, comprobándose la efectividad del tratamiento propuesto y cumpliéndose con los límites máximos permitidos dentro de especificación para los parámetros DBO_5 y DQO.

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. FUNDAMENTOS	4
1.1 Aguas residuales de las industrias químicas	4
1.2 Aguas residuales de Organo síntesis S.A. de C.V.	4
1.3 Características de las aguas residuales	5
1.4 Legislación y Normatividad.....	10
1.5 Sistemas de tratamiento de aguas residuales	15
1.6 Coagulación - floculación	16
1.7 Sedimentación	18
1.8 Oxidación química	19
1.9 Adsorción	24
1.10 Tratamiento de lodos residuales	24
2. MÉTODO.....	26
2.1 Origen de los efluentes contaminados dentro de la empresa	28
2.2 Caracterización del agua residual.....	29
2.3 Establecimiento de parámetros objetivo	32
2.4 Pruebas preliminares de tratabilidad a nivel laboratorio de los procesos fisicoquímicos propuestos	33
2.5 Elección del tren para el tratamiento de aguas residuales a partir de las pruebas preliminares realizadas.....	40
2.6 Ensayos de tratabilidad a escala laboratorio con volúmenes de 1 y 10 Litros de agua residual.....	41
2.7 Pruebas a nivel planta piloto	45
2.8 Evaluación y comparación de resultados en las diferentes escalas de volumen	46
2.10 Tratamiento y disposición de lodos.....	46
3. RESULTADOS.....	50
3.1 Origen de los efluentes contaminados.....	50
3.2 Características del agua residual cruda.....	51
3.3 Parámetros objetivos al final del tratamiento	57
3.4 Propuesta del tren de tratamiento	58
3.5 Resultados en el laboratorio.....	61
3.6 Establecimiento del tren de tratamiento de aguas residuales	77
3.7 Agua residual a volumen de 1 L.....	79
3.8 Caracterización de agua residual a volumen de 10 L.....	82
3.9 Resultados en planta piloto	85
3.10 Evaluación de resultados de los diferentes volúmenes probados	89
3.11 Tratamiento y disposición de lodos.....	90
CONCLUSIONES.....	93
RECOMENDACIONES	94

FUENTES CONSULTADAS	95
ANEXO A	101
ANEXO B	109

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Curva generalizada durante la cloración al punto de ruptura	23
Figura 2. 1 Diagrama de metodología general	26
Figura 2. 2 Ejemplo de hoja de registro para la caracterización del agua residual	30
Figura 2. 3 Diagrama general de análisis y propuesta de tratamiento.....	33
Figura 2. 4 Metodología para selección parámetros de operación a pequeña escala	34
Figura 2. 5 Prueba de jarras.....	37
Figura 2. 6 Reactor de 1 L.....	42
Figura 2. 7 Reactor a volumen de 10 L.....	44
Figura 2. 8 Diagrama de la planta piloto para el tratamiento de aguas residuales.....	46
Figura 3. 1 Red de drenaje de Organo Síntesis S.A. de C.V	52
Figura 3. 2 Tren de tratamiento general	59
Figura 3. 3 Comparación entre % DQO final de la prueba y dosis del sulfato de aluminio	62
Figura 3. 4 Comparación entre % DQO final de la prueba y dosis del cloruro férrico	64
Figura 3. 5 Comparación entre % DQO final de la prueba y dosis del hidróxido de calcio	65
Figura 3. 6 Comparación entre % DQO final de la prueba y dosis del hidróxido de calcio + sulfato de aluminio	66
Figura 3. 7 Comparación entre % DQO final de la prueba y dosis del hidróxido de calcio + cloruro férrico	67
Figura 3. 8 Comparación de coagulantes óptimos	68
Figura 3. 9 Comparación DQO final de la prueba y dosis del peróxido de hidrógeno (muestra tratada previamente con hidróxido de calcio + sulfato de aluminio)	70
Figura 3. 10 Comparación DQO final de la prueba y dosis del peróxido de hidrógeno (muestra tratada previamente con hidróxido de calcio + cloruro férrico).....	71
Figura 3. 11 Dosis óptima para oxidación con hipoclorito de sodio (tratamiento previo con hidróxido de calcio + sulfato de aluminio).....	72
Figura 3. 12 Dosis óptima para oxidación con hipoclorito de sodio (tratamiento previo con hidróxido de calcio + cloruro férrico).....	73
Figura 3. 13 Comparación de oxidantes óptimos	74
Figura 3. 14 Dosis óptima para carbón activado (tratamiento previo con hidróxido de calcio + sulfato de aluminio e hipoclorito de sodio)	75
Figura 3. 15 Dosis óptima para carbón activado (tratamiento previo con hidróxido de calcio + cloruro férrico e hipoclorito de sodio).....	76
Figura 3. 16 Comparación de dosis óptimas del carbón activado	77
Figura 3. 17 Etapas de tren de tratamiento definido	78
Figura 3. 18 Comparación de resultados de porcentaje de reducción en cada parámetro del agua.....	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Artículos de la Ley de Aguas Nacionales aplicables al presente trabajo	11
Tabla 1. 2 Normas Oficiales Mexicanas en materia de aguas residuales	13
Tabla 1. 3 LMP para contaminantes para descargas a ríos NOM-001-SEMARNAT-1996.....	14
Tabla 1. 4 NMX en materia de aguas residuales aplicables al presente trabajo	14
Tabla 1. 5 Potenciales de oxidación	20
Tabla 1. 6 Aplicación y dosis de cloración en aguas residuales	22
Tabla 2. 1 Coagulantes y floculantes utilizados en las 5 pruebas de jarras	36
Tabla 2. 2 Oxidantes empleados en las pruebas de oxidación química	38
Tabla 2. 3 Dosificación del adsorbente usado en la prueba de adsorción	39
Tabla 2. 4 Características y especificaciones del reactor a volumen de 1 L	41
Tabla 2. 5 Características y especificaciones del reactor a volumen de 10 L	44
Tabla 2. 6 Características y especificaciones de los componentes de la planta piloto	45
Tabla 3. 1 Caracterización de aguas residuales; promedio diario	53
Tabla 3. 2 Promedio de la caracterización de aguas residuales	55
Tabla 3. 3 Monitoreo de producción en el periodo de caracterización del agua residual.....	57
Tabla 3. 4 Parámetros objetivos	58
Tabla 3. 5 Prueba de jarras con sulfato de aluminio	62
Tabla 3. 6 Prueba de jarras con cloruro férrico	63
Tabla 3. 7 Prueba de jarras con hidróxido de calcio	64
Tabla 3. 8 Prueba de jarras con hidróxido de calcio + sulfato de aluminio	65
Tabla 3. 9 Prueba de jarras con hidróxido de calcio + cloruro férrico	66
Tabla 3. 10 Tabla comparativa de coagulantes óptimos	67
Tabla 3. 11 Oxidación con H_2O_2 muestra previamente tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 18\text{H}_2\text{O}$	69
Tabla 3. 12 Oxidación con H_2O_2 muestra previamente tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$	70
Tabla 3. 13 Oxidación con NaClO , muestra previamente tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 18\text{H}_2\text{O}$	71
Tabla 3. 14 Oxidación con NaClO , muestra previamente tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$	72
Tabla 3. 15 Tabla comparativa de oxidantes óptimos	73
Tabla 3. 16 Adsorción con carbón activado en polvo, tratamiento previo con $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 18\text{H}_2\text{O}$ y NaClO	75
Tabla 3. 17 Adsorción con carbón activado en polvo, tratamiento previo con $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$ y NaClO	75
Tabla 3. 18 Tabla comparativa de carbón activado óptimo	76
Tabla 3. 19 Reactivos, dosis y tiempo de reacción que se establecieron para tratar 1L de agua residual cruda.....	78
Tabla 3. 20 Características del agua residual inicial y final a volumen de 1 L.....	80
Tabla 3. 21 Promedio de valores obtenidos a volumen de 1 L vs especificación de la NOM-001-SEMARNAT-1996.....	81
Tabla 3. 22 Caracterización de agua residual tratada a un volumen de 10L.....	83

Tabla 3. 23 Promedio de valores a volumen de 10 L y especificación de la NOM-001- SEMARNAT-1996	84
Tabla 3. 24 Variación de los resultados a volumen de 1 L y 10 L.....	85
Tabla 3. 25 Ajuste de dosificación para tratamiento en planta piloto	85
Tabla 3. 26 Caracterización de agua residual a un volumen de 2800L	87
Tabla 3. 27 Promedio de valores a volumen de 2800 L y especificación de la NOM-001- SEMARNAT-1996	88
Tabla 3. 28 Porcentajes de reducción	89
Tabla 3. 29 Humedad de lodos dentro del laboratorio	91
Tabla 3. 30 Peso de cada tambo de almacenamiento de lodos de los 5 lotes de prueba en planta.....	91
Tabla 3. 31 Número de cargas y Kg de lodos cargados a la centrífuga	91
Tabla 3. 32 Kg de lodos obtenidos al final de la centrifugación y humedad perdida en cada uno.....	92

INTRODUCCIÓN

Organo síntesis S.A de C.V es una empresa química mexicana con más 50 años de antigüedad, dedicada a la manufactura de productos químicos enfocados a satisfacer las necesidades en los ámbitos farmacéutico, textil, de pinturas, petroquímica, cuidado e higiene personal, desinfección hospitalaria de veterinaria, limpieza institucional y acondicionamiento de aguas para piscinas. Las familias de productos que actualmente maneja la empresa son sales cuaternarias de amonio, cuaternarios de amonio poliméricos, agentes acondicionadores y surfactantes. Así mismo, de acuerdo a la gran demanda que exigen los clientes, se ampliaron las líneas de producción existentes fabricando nuevos productos.

La empresa se fomenta y apoya el equilibrio que debe tener el negocio con el medio ambiente. Por esa razón sus políticas van encaminadas a:

- Cumplir con la actual legislación y normatividad ambiental vigente.
- Reducir y prevenir de manera continua los riesgos hacia el medio ambiente.
- Realización de programas de auditoría para la revisión de cumplimiento en las áreas y sectores críticos dentro de la planta.
- Establecer objetivos y metas a mediano plazo para el buen cumplimiento y la mejora continua hacia la protección del medio ambiente.

México cuenta con normativas que regulan los niveles de contaminación de los efluentes residuales que son descargados tanto a bienes nacionales, como a la red de alcantarillado; por lo que es importante que las empresas tengan conocimiento de las características que presentan sus efluentes residuales, y actuar con ética, profesionalismo y responsabilidad al descargar sus efluentes.

La empresa únicamente llevaba a cabo un tratamiento biológico a los efluentes residuales provenientes de sus procesos industriales, sanitarios y comedor. A partir del año 2016, incrementó el volumen de producción de varias líneas, lo que se vio reflejado en el aumento considerable de compuestos orgánicos en sus aguas residuales, y como consecuencia en las concentraciones de los parámetros de DQO y DBO₅. Según estudios realizados por un laboratorio externo acreditado, los valores promedio después del tratamiento biológico a los efluentes residuales fueron de 822.0 mg/L para DQO y 200.6 mg/L para DBO₅, presentando, por lo tanto, valores mayores a los límites máximos permitidos de 300 y 150 mg/L,

respectivamente, según lo señalado por la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que rige las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, cabe aclarar que dicha NOM, no señala límites máximos permisibles para DQO, sin embargo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), establece condiciones de descarga para las aguas residuales de las empresas, entre ellas la DQO.

Por esta razón, se tomó la decisión de abrir una oportunidad de mejora en el área ambiental dada la problemática presentada con anterioridad, y se propuso optimizar y/o modificar su tren de tratamiento de aguas residuales, con la finalidad de cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996, evitando la descarga de agua contaminada y el pago de multas.

Teniendo en cuenta los procesos de producción, así como los valores de DBO₅ y DQO de las aguas residuales, se determinó que la etapa de tratamiento biológico no tenía impacto en la reducción de DQO, por lo tanto, era necesario realizar una modificación en la planta tratadora de aguas residuales de la empresa.

En este proyecto se realizó la modificación en el tren de tratamiento de la planta tratadora de aguas residuales, con la finalidad de cumplir los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996. El interés preponderante se enfocó en la reducción de un 70% para el valor de DQO.

Primeramente, se muestra la parte de fundamentos en el cual se hace una breve presentación de aquellos temas que serán la base teórica para el desarrollo metodológico y experimental; Algunos de los temas presentados son: las características de aguas residuales, la legislación y normatividad en territorio nacional, que rige el tema de aguas residuales y residuales tratadas, por último, se dan a conocer aquéllos sistemas para el tratamiento de aguas residuales que fueron aplicables al proyecto.

En la parte de metodología, se plasma una descripción detallada de los puntos secuenciales que fueron desarrollados para realizar la parte experimental. Además se detallan cada una de las pruebas realizadas para establecer el tratamiento específico desarrollado para las aguas residuales problema.

Por último, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas y se selecciona el proceso de tratamiento a las aguas residuales de la empresa, en función de los criterios establecidos para la elección del mejor tratamiento.

1. FUNDAMENTOS

1.1 Aguas residuales de las industrias químicas

Las aguas residuales son aquéllas que contienen una composición variada de sustancias que alteran la calidad del agua purificada. Todas las aguas residuales vertidas, desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial, son denominadas aguas residuales industriales (Rodríguez et. al. 2012).

Los efluentes industriales contienen con frecuencia sustancias que no se eliminan por un tratamiento convencional, por estar en concentraciones elevadas, o bien por su naturaleza química. Muchos de los compuestos orgánicos e inorgánicos que se han identificado en aguas residuales industriales son objeto de regulación especial, debido a su toxicidad o a sus efectos biológicos a largo plazo (Rodríguez et al., 2012).

La industria de productos químicos utiliza o produce por lo general ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico, amoníaco, nitrato y sulfato amónico, y esto produce aguas residuales que contienen amonio y nitrato, por lo que se hace necesario su debido tratamiento (SPENA GROUP, 2016).

1.2 Aguas residuales de Organo síntesis S.A. de C.V.

Es una empresa dedicada a la manufactura de productos químicos denominados biocidas, definidos por la legislación europea actual como sustancia o sustancias activas, destinadas a destruir, contrarrestar, neutralizar o ejercer un control de otro tipo sobre cualquier organismo nocivo por medios químicos o biológicos. Los biocidas son clasificados en cuatro grandes grupos: desinfectantes, conservantes, plaguicidas y otros biocidas (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2016). De los cuales la empresa solo realiza fabricación de desinfectantes y conservadores enfocados a satisfacer las necesidades actuales de los mercados.

El ramo de desinfectantes, abarca productos destinados para higiene humana y veterinaria, así como para la desinfección de equipos, recipientes, utensilios y superficies que están en

contacto con alimentos, y para el agua potable. Y en el área de conservadores se incluyen conservadores en forma de películas para proteger maderas y materiales de construcción.

La estructura molecular base de los biocidas son los surfactantes. Los surfactantes son especies químicas con una naturaleza o estructura polar– no polar, con tendencia a localizarse convenientemente en la interfase, formando una capa monomolecular adsorbida en la interfase. En función de sus propiedades fisicoquímicas pueden ser iónicos o no-iónicos. A su vez, los surfactantes iónicos, se clasifican en aniónicos, catiónicos y anfóteros.

Específicamente, los fabricados en la empresa son de la clasificación catiónicos que son aquéllos que en solución forman iones, con carga positiva en el grupo hidrófobo de la molécula. En general, son compuestos cuaternarios de amonio o una amina grasa en medio ácido. Los Compuestos de Amonio Cuaternario (QACs), por sus siglas en inglés, poseen dos regiones en su estructura molecular, un hidrocarburo, que es hidrofóbico, y otra región hidrofílica o polar. Contienen un átomo de nitrógeno unido a 4 sustituyentes alquílicos o arílicos. El nitrógeno tiene carga positiva que se mantiene independiente del pH del medio, distinguiéndolo así de los anfóteros y sales de aminas (Rodríguez et al., 2012).

Los derivados del amonio cuaternario se dividen por generaciones: de primera generación a quinta generación. Siendo los de primera y segunda generación, cloruro de benzalconio (BKC) y cloruro de benzetonio (BZT), respectivamente, los que tienen mayor demanda de fabricación dentro de la empresa.

1.3 Características de las aguas residuales

Las aguas residuales tienen ciertas características, las cuales sirven de referencia para saber en qué grado de calidad se encuentra el agua y qué tipo de tratamiento es apto aplicar para su restablecimiento, el cual dependerá del uso para el que estén destinadas dichas aguas.

Los parámetros de caracterización se pueden clasificar en tres grupos: físicos, químicos y biológicos.

1.3.1 Características físicas

Color

El color es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible; El color en el agua puede deberse a la presencia del contenido natural de metales o iones metálicos en disolución, humus o residuos orgánicos, plancton o desechos industriales (CECOFI, 2001). El color verdadero, es el color del agua de la cual se ha eliminado la turbiedad. El término color aparente engloba no sólo el color debido a sustancias disueltas sino también a las materias en suspensión y se determina en la muestra original sin filtrarla o centrifugarla. El color puede determinarse por espectrofotometría o por comparación visual (Severiche, 2013).

Color APHA

El color por lo general hallado en mediciones de agua y aguas residuales es el color Platino Cobalto (Pt-Cob), también conocido como color APHA o Hazen. Estos nombres son comúnmente utilizados en diferentes aplicaciones, pero están basados en procedimientos idénticos. Mediciones estándares con Pt-Co/PHA/Hazen están basadas en la escala Hazen de color que fue introducida en 1892 por el químico Allen Hazen. Este color varía de un aspecto amarillo claro hasta marrón. Su rango va de 0-500 en Unidades de Color Platino (PCU) siglas en ingles. Una unidad de color es el color producido por 1 mg/L de platino en forma de ion cloroplatino. Los valores de color medidos por comparación con los estándares de platino-cobalto se pueden expresar como PCU, Pt-Co, APHA, o unidades Hazen en función de los procedimientos específicos. En los Estados Unidos, la Regulación Nacional de Agua Secundaria para beber indica que el máximo de unidades de color es un 15. La Organización Mundial de Salud (OMS), recomienda que el consumo de agua de color no exceda de 15 unidades de color verdadero. (Químico Técnica Industrial, S.R.L., 2017)

Turbidez

La turbidez es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a la presencia de materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos (Severiche, 2013).

Las partículas suspendidas absorben calor de la luz del sol, haciendo que las aguas turbias se vuelvan más calientes, y reduciendo así la concentración de oxígeno en el agua (el

oxígeno se disuelve mejor en el agua más fría), por lo que algunos organismos no pueden sobrevivir en agua caliente.

La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua (Gonzales C., 2011).

Conductividad

Las sales disueltas en agua se descomponen en iones cargados positivamente y negativamente. La conductividad se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos. Los iones más positivos son sodio (Na^+), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{+2}). Los iones más negativos son cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}), carbonato (CO_3^{-2}), bicarbonato (HCO_3^{-1}). (Severiche, 2013).

Materia flotante

Todo aquel material que quede retenido en una malla de entre 2.8 mm y 3.3 mm de abertura (CECOFI, 2010), correspondiente a los No. De malla 7 y 6 respectivamente, de acuerdo a la norma ASTM, tamices E-11, y la ISO 3310-1 ASTM E-11/95; ASTM son las siglas de American Society of Testing Methods.

Sólidos sedimentables

Los sólidos sedimentables se definen como aquéllos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono Imhoff) en el transcurso de un periodo de 60 minutos. Los sólidos sedimentables, expresados en unidades de mL/L, constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtiene en la decantación del agua residual

Sólidos coloidales y disueltos

La fracción filtrable de los sólidos corresponde a sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal está compuesta por las partículas de materia de tamaños entre 0.001 y 1 micrómetro. Los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua. No es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación.

Normalmente, para eliminar la fracción coloidal es necesaria la oxidación biológica o la coagulación – floculación complementadas con la sedimentación (Metcalf & Eddy, 1995).

1.3.2 Características químicas

Grasas y aceites

Las grasas y aceites son los compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como de hidrocarburos del petróleo que son extraídos de la muestra utilizando hexano como disolvente (Aguamarket, 2016).

Alcalinidad

La alcalinidad se refiere a la presencia de sustancias hidrolizables en agua y que como producto de hidrólisis generan el ion hidroxilo (OH^-), como son las bases fuertes, y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos; contribuyen también en forma importante a la alcalinidad los carbonatos y fosfatos. La presencia de boratos y silicatos en concentraciones altas también contribuyen a la alcalinidad del medio (CECOFI, 2001).

Demanda química de oxígeno (DQO)

Se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno como $\text{mg O}_2/\text{L}$. Debido a sus propiedades químicas únicas, el ion dicromato es el oxidante especificado en la mayoría de los casos. En estos test el ion dicromato se reduce a ion crómico (Cr_3^+) (Hanna Instruments, 2017).

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Se define como la cantidad de oxígeno usado por los microorganismos no fotosintéticos a una temperatura de 20°C , para metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente (CECOFI, 2001).

Nitrógeno total

Los compuestos nitrogenados se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza. Las fuentes de nitrógeno incluyen además de la degradación natural de la materia orgánica, fertilizantes, productos de limpieza y tratamiento de aguas potables. Debido a que el

nitrógeno es un nutriente esencial para organismos fotosintéticos, es importante el monitoreo y control de descargas del mismo al ambiente.

Fósforo total

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órgano fosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes y procesos biológicos.

Las consecuencias biológicas causadas por el alto contenido de sales nutritivas (fosfatos, nitratos) conducen al crecimiento excesivo de algas, que con el tiempo son desintegradas por microorganismos aerobios, consumiendo de esta forma el oxígeno del agua. Posteriormente inicia una desintegración anaeróbica de la biomasa, de esta forma se originan biogases tales como metano, hidrógeno sulfurado y amoníaco, dando como resultado, la muerte de especies acuáticas.

Compuestos de amonio cuaternario

Su acción bactericida es atribuida a la inactivación de enzimas, desnaturalización de proteínas esenciales y la rotura de la membrana celular. Habitualmente son considerados como desinfectantes a concentraciones de 0.25% a 1.6% para la desinfección de superficies como suelos y paredes. El direccionamiento de corriente con cuaternarios de amonio hacia un sistema de tratamiento biológico de efluentes puede ocasionar la inactivación de los microorganismos del biorreactor. En un estudio realizado se pusieron a prueba tres diferentes concentraciones de amonio cuaternario (1.25, 5.2 y 12.5) ppm sobre la actividad metanogénica de los gránulos anaerobios provenientes de un reactor biológico industrial (AME). Los resultados muestran el porcentaje de inhibición del 7.2% de la actividad metanogénica en presencia de 1.25 ppm de amonio cuaternario; Concentraciones de 12.5 ppm y hasta 60 ppm de amonio cuaternario produjeron una inhibición casi total de la AME (96.1%); A una concentración mayor a 5 ppm de amonio cuaternario en el agua de lavado podría afectar la actividad microbiológica normal de un reactor biológico anaerobio, produciendo la inactivación parcial del consorcio microbiano (Molina C. et al., 2013).

1.3.3 Características biológicas

El grupo de bacterias coliformes se aplica como prueba general de monitoreo de calidad del agua y se ha utilizado en todo el mundo a lo largo de los últimos 100 años para llevar a cabo estudios de agua potable, contaminación de sistemas acuáticos, fuentes de contaminación de aguas residuales crudas y sistemas de tratamiento de aguas residuales y aguas recreativas (Rodríguez et al., 2012).

1.4 Legislación y Normatividad

Como se mencionó anteriormente, el agua residual tiene que contar con ciertas características para poder ser desechada, las cuales varían en función del uso o destino final que se le dará. En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es el organismo a nivel federal encargado de legislar en materia de aguas residuales.

1.4.1 Legislación

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) emitida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. Dicha ley consta de diez títulos y 36 capítulos. En la tabla 1.1, se resumen los títulos, capítulos y artículos de la Ley de Aguas Nacionales, que son de interés para el desarrollo del proyecto.

1.4.2 Normatividad

En México existen dos tipos de Normas que regulan la calidad de los productos y servicios; por un lado se encuentran las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) cuyos lineamientos son de observancia obligatoria, y las Normas Mexicanas (NMX) que sólo expresan una recomendación de parámetros o procedimientos.

Las Normas Oficiales Mexicanas en materia de aguas residuales y lodos (Tabla 1.2), establecen los parámetros que deben cumplir las aguas residuales y residuales tratadas para ser vertidas.

Tabla 1. 1 Artículos de la Ley de Aguas Nacionales aplicables al presente trabajo

Titulo	Capítulos	Artículos	Aplicación para las personas físicas o morales
Título séptimo. Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas y Responsabilidad por Daño Ambiental	1. Prevención y control de la contaminación del agua.	85	Realizarán las medidas necesarias para prevenir la contaminación y, en su caso, reintegrar las aguas referidas en condiciones adecuadas y mantener el equilibrio de los ecosistemas vitales.
		86 BIS 2	Se prohíbe arrojar lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales y demás desechos o residuos que por efecto de disolución o arrastre, contaminen las aguas de los cuerpos receptores.
		88 BIS	Deberán contar con permiso de descarga de aguas residuales; tratar las aguas residuales para su vertido a los cuerpos receptores y cumplir las NOM; es responsabilidad de la empresa hacer conocimiento de los contaminantes en las aguas residuales que generen y mantener condiciones de operación satisfactorias.
	2. Responsabilidad por el daño ambiental.	96 BIS 1	Las personas morales que descarguen aguas residuales, en violación a las disposiciones legales, y que causen contaminación en un cuerpo receptor, asumirán la responsabilidad de reparar o compensar el daño ambiental causado en términos de la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.
Décimo. Medidas de Apremio, Seguridad, Infracciones, Sanciones y Recursos	1. Medidas de Apremio y Seguridad	de 118 y 2 BIS	En caso de existir daño o deterioro a la salud, a las aguas nacionales o a la biodiversidad CONAGUA, podrá: Clausurar temporal del aprovechamiento de aguas nacionales; Suspender las actividades que dan origen al proceso generador de las descargas de aguas residuales.

Continuación. Tabla 1.1

Título	Capítulos	Artículos	Aplicación para las personas físicas o morales
2. Infracciones administrativas	y	sanciones	119 CONAGUA sancionará conforme a lo previsto por esta ley las siguientes actividades: a. Descargar en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales en contravención a lo dispuesto en la presente ley; b. Arrojar o depositar cualquier contaminante, en contravención a las disposiciones legales en ríos; c. No cumplir con las obligaciones consignadas en los títulos permiso de descarga; d. No informar a CONAGUA, de cualquier cambio en sus procesos cuando con ello se ocasionen modificaciones en las características o en los volúmenes de las aguas residuales que hubieren servido para expedir el permiso de descarga correspondiente.
			120 Las faltas a que se refiere el Artículo anterior serán sancionadas administrativamente por CONAGUA con multas.
			121 Para sancionar las faltas a que se refiere este Capítulo, las infracciones se calificarán conforme a: a. La gravedad de la falta; b. Las condiciones económicas del infractor; c. Derogada, y d. La reincidencia.

Tabla 1. 2 Normas Oficiales Mexicanas en materia de aguas residuales

Clave	Autor	Responsabilidad	Publicación en el D.O.F.
NOM-001-SEMARNAT-1996	México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	6 de enero de 1996
NOM-002-SEMARNAT-1996	México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.	3 de junio de 1996
NOM-003-SEMARNAT-1997	México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.	Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.	21 de septiembre de 1998
NOM-004-SEMARNAT-2002	México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.	Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.	15 de agosto de 2003

Organo Síntesis S.A. de C.V se basa en el cumplimiento de la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 debido a que los efluentes tratados son vertidos a un río. En la Tabla 1.3 se muestran los parámetros con los valores permitidos para descarga a ríos.

Tabla 1. 3 Límites máximos permisibles para descargas a ríos NOM-001-SEMARNAT-1996

Parámetros (mg/L)	Promedio mensual	Promedio diario
Temperatura (°C) (1)	N.A	N.A
pH (U-pH)	8-10	8-10
Grasas y aceites (2)	15	25
Materia flotante	AUSENTE	AUSENTE
Sólidos sedimentables (mL/L)	1	22
Sólidos suspendidos totales	150	200
Demanda bioquímica de oxígeno	150	200
Nitrógeno total	40	60
Fósforo total	20	30
Arsénico	0.2	0.4
Cadmio	0.2	0.4
Cianuros	1.0	3.0
Cobre	4.0	6.0
Cromo	1.0	1.5
Mercurio	0.01	0.02
Níquel	2	4
Plomo	0.5	1
Zinc	10	20

(1) Instantáneo
(2) Muestra simple promedio ponderado
N.A = No aplica

En cuanto a Normas Mexicanas (NMX) en materia de aguas, se encuentran:

Tabla 1. 4 NMX en materia de aguas residuales aplicables al presente trabajo

CLAVE	FECHA	DESCRIPCIÓN
NMX-AA-003-1980	25/03/1980	Aguas residuales- muestreo
NMX-AA-004-SCFI-2013	13/11/2013	Análisis de agua-medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba (cancela a la NMX-AA-004-SCFI-2000).
NMX-AA-028-SCFI-2001	17/04/2001	Análisis de agua-determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO ₅) y residuales tratadas-método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-1981).
NMX-AA-030/1-SCFI-2012	21/05/2013	Análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- método de prueba - parte 1 - método de reflujo abierto - (cancela a la NMX-AA-030-SCFI-2001).
NMX-AA-036-SCFI-2001	01/08/2001	Análisis de agua-determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba (cancela a la NMX-AA-036-1980).
NMX-AA-038-SCFI-2001	01/08/2001	Análisis de agua-determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba (cancela a la NMX-AA-038-1981).

Continuación. Tabla 1.4

**NMX-AA-093-
SCFI-2000**

18/12/2000

Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba (cancela a la NMX-AA-093-1984).

En muchas ocasiones estos parámetros son rebasados, incumpliendo las normativas, por lo que se hace necesario realizar un tratamiento a las aguas residuales, antes de ser vertidas ya sea en los ríos, alcantarillados o antes de ser usadas para reúso humano.

1.5 Sistemas de tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es una combinación de procesos que ayudan a mejorar la calidad de las aguas residuales ya sean de origen doméstico o industrial. Para desarrollar un buen proceso, se deben tomar en consideración las características de calidad que presenta el agua a tratar, ya sean físicas, químicas y/o biológicas, su origen, el uso que se le dará después del tratamiento (destino final), el espacio o terreno y el capital con que se cuenta (economía). Estos tratamientos se pueden clasificar en:

- Tratamientos físicos. Las operaciones llevadas a cabo en el tratamiento de las aguas residuales, en las que los cambios en las características y propiedades del agua se realizan mediante la aplicación de las fuerzas físicas, (Metcalf & Eddy, 1995). Algunos de estos procesos físicos son sedimentación y mezclado.
- Tratamientos fisicoquímicos. Son los procesos empleados en el tratamiento de las aguas residuales en los que las transformaciones se producen mediante reacciones químicas. Con el fin de alcanzar los objetivos de tratamiento del agua residual, los procesos químicos unitarios se llevan a cabo en combinación con las operaciones físicas unitarias. Algunas de estos tratamientos son la coagulación floculación, la oxidación química y la adsorción.
- Tratamientos biológicos. Los objetivos del tratamiento biológico son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica con ayuda de microorganismos (Metcalf & Eddy, 1995). El proceso de tratamiento biológico consiste en el control del medio ambiente de los microorganismos

de modo que se consigan condiciones de crecimiento óptimas (Nodal, 2000). Algunos ejemplos de tratamientos biológicos son el tratamiento con lodos activados, biodiscos y lagunas biológicas.

La aplicación de los diferentes tipos de tratamientos de aguas residuales se realizará dependiendo de las necesidades de depuración del agua problema. Para el presente proyecto, solo se tomaron en cuenta tratamientos de tipo físico y fisicoquímico como mezclado, sedimentación, coagulación floculación, oxidación química y adsorción, debido a que fueron los tipos de tratamiento aplicables para contrarrestar los parámetros característicos del agua problema.

1.6 Coagulación - floculación

Mediante coagulación-floculación, es posible conseguir efluentes clarificados básicamente libres de materia en suspensión o en estado coloidal y se puede llegar a eliminar del 80% al 90% de la materia total suspendida, entre el 40% y el 70% DBO₅, del 30% al 60% de la DQO y entre el 80% y el 90% de las bacterias.

La coagulación floculación se lleva a cabo en dos etapas. En la coagulación, las partículas coloidales que contiene el agua son desestabilizadas; en la floculación, las partículas anteriormente desestabilizadas son aglomeradas para tener una rápida sedimentación. A continuación se describirán estos dos procesos.

1.6.1 Coagulación

Consiste en desestabilizar los coloides, unirlos para facilitar la sedimentación a partir de la adición de productos químicos y finalmente el mezclado rápido. El mezclado se puede llevar a cabo mediante diversos sistemas, entre los que se encuentran: resaltos hidráulicos en canales, dispositivos Venturi, por bombeo, mediante mezcladores estáticos, y mediante mezcladores mecánicos (Nemerow, 1977).

Algunos de los coagulantes comúnmente empleados en el tratamiento de aguas residuales son sulfato de alúmina $Al_2(SO_4)_3$, 18 H₂O, cloruro férrico FeCl₃, sulfato férrico Fe₂(SO₄)₃, sulfato ferroso FeSO₄, 7 H₂O y cal. Estos productos químicos al ser vertidos en el agua

residual reaccionan para que las partículas coagulen (Metcalf & Eddy, 1995). Entre estos, el sulfato de aluminio parece que es el más efectivo para producir la coagulación de vertidos con compuestos carbonosos, mientras que los sulfatos de hierro son más efectivos cuando hay presencia de proteínas en los vertidos (Nemerow, 1977).

Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, se presenta en forma granular blanco (o marrón cuando el contenido en hierro es mayor que el 0,5%). Se utiliza para el tratamiento de aguas residuales como agente coagulante. Las dosis de sulfato de aluminio usadas para aguas superficiales varían normalmente de 5 a 50 mg/L. Cabe señalar que un factor importante para llevar a cabo la coagulación química es la alcalinidad en el agua.

Cloruro férrico

El cloruro de hierro (III) o tricloruro de hierro (FeCl_3) (tradicionalmente llamado cloruro férrico) perteneciente al grupo de los haluros metálicos, es un compuesto químico utilizado a escala industrial. El cloruro férrico en solución al 40% se utiliza como coagulante para tratamiento de aguas y efluentes, se comercializa habitualmente a granel.

Las sales de hierro y aluminio son los coagulantes más utilizadas en los tratamientos de agua.

Cal

La cal se usa habitualmente para mejorar el proceso de coagulación ya que ayuda a la precipitación de las partículas. Por lo general, la cantidad de cal que hay que añadir suele ser mucho mayor cuando se emplea sola que cuando se emplea la cal en combinación con otro coagulante.

1.6.2 Flocculación

La flocculación consiste en la aglomeración, mediante un mezclado continuo y lento de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico. Tan pronto como se agregan coagulantes a una suspensión coloidal, se inician una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas presentes en la suspensión, las cuales tienen así oportunidad de unirse por sucesivas colisiones hasta formar flóculos que crecen con el tiempo (Restrepo, 2009). Para

llevar a cabo este proceso se usan productos químicos, ya sea de origen natural o sintético. Algunos de los más comúnmente usados son los polímeros y la poliacrilamida.

Polímeros

Por lo regular se recurre a almidones modificados (por ejemplo: de patata) y alginatos, para la floculación de sólidos en suspensión y coloides desestabilizados. Los almidones tienen un gran peso molecular, forman cadenas largas y pueden tener carga eléctrica (iónicos) o ser no iónicos. Los polielectrolitos pueden ser aniónicos (-) o catiónicos (+) (Tejero et al, s.f).

Poliacrilamida

Usada para tratamiento de aguas. Son polímeros lineales hidrosolubles sintetizados bajo polimerización de alto grado, fácilmente solubles en agua, casi insolubles en el benceno, el éter, los alifáticos, la acetona y otros solventes orgánicos comunes. Tienen propiedades valiosas como la floculación, el espesamiento, la propiedad de cizallamiento, la resistencia a la fricción y la dispersabilidad.

La Poliacrilamida Aniónica $(C_3H_5NO)_n$, es especialmente usada para el tratamiento de aguas residuales que contienen partículas en suspensión, es altamente concentrador, posee cargas positivas, y reduce el valor de pH de agua neutra o alcalino.

1.7 Sedimentación

La sedimentación consiste en la separación, por la acción de la gravedad, de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua. Esta operación se emplea para la eliminación de arenas, de la materia en suspensión en floculo biológico en los decantadores secundarios en los procesos de fango activado, tanques de decantación primaria, de los floculos químicos cuando se emplea la coagulación química, y para la concentración de sólidos en el proceso de espesamiento de fango. Existen tres tipos de sedimentación: sedimentación discreta, sedimentación con floculación y sedimentación por zonas. Para los fines prácticos del presente trabajo, solo se hace referencia de la sedimentación con floculación.

1.7.1 Sedimentación con floculación

En este tipo de sedimentación tiene lugar cuando la velocidad de sedimentación de las partículas aumenta debido a la aglomeración de éstas, va acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación, por lo regular este tipo de sedimentación se lleva a cabo en los sedimentadores primarios y como en este caso, después de realizar el proceso de coagulación floculación.

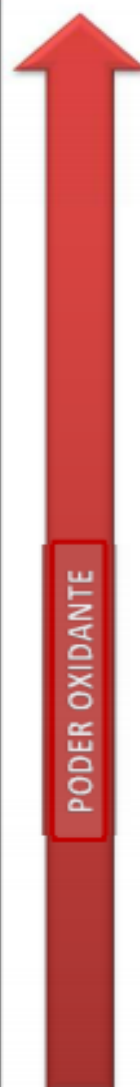
1.8 Oxidación química

La oxidación de sustancias orgánicas que contiene el agua residual, tiene como objetivo la reducción de ciertas moléculas de gran tamaño difíciles de degradar por vía biológica. Esta oxidación se lleva a cabo por etapas con formación de productos intermedios. En el método del proyecto, se enfocó en la reducción de las moléculas de cuaternarios de amonio que presenta el agua problema. En caso de una oxidación completa de sustancias orgánicas, éstas se transforman en los productos finales inorgánicos, agua y dióxido de carbono.

Existen diferentes productos y técnicas para llevar a cabo una oxidación química de compuestos orgánicos en las aguas residuales en la Tabla 1.5 se muestran algunas especies oxidantes con sus respectivos potenciales de oxidación, sin embargo para fines del presente proyecto, solo se mencionan aquéllas que sirvieron de referencia para su desarrollo.

Tabla 1. 5 Potenciales de oxidación

Semirreacción producida en el electrodo	Potencial estándar reducción, E° (V)	Comportamiento de la especie o del electrodo
$F_2 + 2e \leftrightarrow 2F^-$	2,87	ESPECIES OXIDANTES FRENTE AL ELECTRODO DE HIDRÓGENO. PRODUCEN LA REACCIÓN $H_2 \leftrightarrow 2H^+ + 2e$ Y EN EL PROCESO SE REDUCEN (SEMI-REACCIÓN DE REDUCCIÓN: CÁTODO)
$Co^{3+} + 1e \leftrightarrow Co^{2+}$	1,82	
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \leftrightarrow 2H_2O$	1,78	
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \leftrightarrow MnO_2 + 2H_2O$	1,68	
$Ce^{4+} + 1e \leftrightarrow Ce^{3+}$	1,61	
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \leftrightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	1,49	
$ClO_4^- + 8H^+ + 8e \leftrightarrow Cl^- + 4H_2O$	1,37	
$Cl_2 + 2e \leftrightarrow 2Cl^-$	1,36	
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \leftrightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1,33	
$Au^{3+} + 3e \leftrightarrow Au$	1,31	
$O_2 + 4H^+ + 4e \leftrightarrow 2H_2O$	1,23	
$MnO_2 + 4H^+ + 2e \leftrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	1,21	
$2IO_3^- + 12H^+ + 10e \leftrightarrow I_2 + 6H_2O$	1,19	
$IO_3^- + 6H^+ + 6e \leftrightarrow I^- + 3H_2O$	1,08	
$Br_{2(l)} + 2e \leftrightarrow 2Br^-$	1,06	
$NO_3^- + 4H^+ + 3e \leftrightarrow NO + 2H_2O$	0,96	
$2Hg^{2+} + 2e \leftrightarrow Hg_2^{2+}$	0,90	
$ClO^- + H_2O + 2e \leftrightarrow Cl^- + 2OH^-$	0,90	
$Hg^{2+} + 2e \leftrightarrow Hg$	0,85	
$Ag^+ + e \leftrightarrow Ag$	0,80	
$Hg_2^{2+} + 2e \leftrightarrow 2Hg$	0,80	
$NO_3^- + 2H^+ + 1e \leftrightarrow NO_2 + H_2O$	0,78	
$Fe^{3+} + 1e \leftrightarrow Fe^{2+}$	0,77	
$O_2 + 2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2O_2$	0,68	
$MnO_4^- + 1e \leftrightarrow MnO_4^{2-}$	0,56	
$I_2 + 2e \leftrightarrow 2I^-$	0,53	
$Cu^+ + 1e \leftrightarrow Cu$	0,52	
$Cu^{2+} + 2e \leftrightarrow Cu$	0,34	
$Cu^{2+} + 1e \leftrightarrow Cu^+$	0,16	
$Sn^{4+} + 2e \leftrightarrow Sn^{2+}$	0,15	
$2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2$	0,00	Electrodo referencia hidrógeno Potencial 0,00V tomado arbitrariamente



1.8.1 Oxidación con peróxido de hidrógeno

Una de las tecnologías que se han ido desarrollando en los últimos tiempos son los procesos de oxidación avanzada (POA). Estos procesos tienen por objetivo la eliminación de compuestos solubles no biodegradables, presentes en las aguas residuales.

El proceso consiste en una oxidación química en condiciones suaves de presión y temperatura, hasta la mineralización completa de contaminantes. El agente oxidante es una especie denominada hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) con una elevadísima capacidad oxidante, y con tiempos de reacción muy cortos.

Debido a la altísima reactividad de estas especies es posible eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos, logrando así una reducción de DQO y toxicidad en las aguas residuales tratada (IQD Invesquia, s.f).

Uno de los métodos clásicos de producción de radical hidroxilo consiste en la adición de sales de hierro como catalizador en presencia de peróxido de hidrógeno. Esta adición es conocida como reactivo Fenton, y tiene como resultado uno de los agentes oxidantes más potentes. El hierro puede ser añadido como sal ferrosa o férrica como se muestra en la reacción:



Estos radicales inician una cadena de reacciones para eliminar toda la materia oxidable. En concreto, los radicales hidroxilos reaccionan con compuestos orgánicos, generando radicales orgánicos que aceleran el grado de oxidación (Garcés, 2011).

1.8.2 Oxidación con cloro

La cloración es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas debido a su fuerte capacidad de oxidación (Ramalho, 1996).

Algunos autores sugieren ciertos intervalos de dosificación de cloro al agua residual dependiendo de la aplicación (Tabla 1.6).

Tabla 1. 6 Aplicación y dosis de cloración en aguas residuales (Metcalf & Eddy, 1995)

Aplicación	Intervalo de dosis mg/L
Reducción de DBO	0.5 – 2 ^b
Oxidación de sobrenadante de digestor	20 – 140
Eliminación de grasas	2 – 10
Desinfección después de precipitación química	2 – 6

^b Por mg/L de DBO₅ eliminada

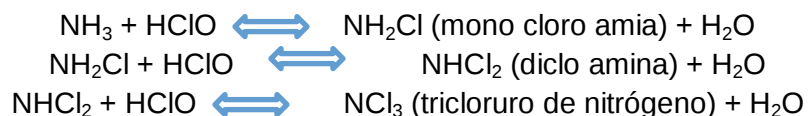
Cuando se añade cloro al agua, ya sea como gas o bien como solución, el cloro reacciona para formar ácido hipocloroso (HClO), que posteriormente se disocia de acuerdo con las siguientes reacciones químicas:



Como el HClO es un ácido débil, una parte importante del cloro residual está formada por HClO sin disociar.

El agua residual no tratada siempre contiene nitrógeno en forma de amoníaco y diversas formas de materia orgánica combinada. El efluente procedente de la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales contiene cantidades significativas de nitrógeno, generalmente en forma de amoníaco o en forma de nitrato.

Dado que el ácido hipocloroso es un agente oxidante de gran actividad, reaccionará rápidamente con el amoníaco presente en el agua residual para formar tres tipos de cloraminas, de acuerdo a las siguientes reacciones:



El cloro presente en estos compuestos recibe el nombre de cloro combinado disponible.

Cloración al punto de ruptura

Consiste en la adición de cloro al agua residual para oxidar el nitrógeno amoniacal de la solución a nitrógeno gas y otros compuestos estables. La cloración al punto de ruptura también constituye un método alternativo para el control del nitrógeno. Las ventajas que presenta la cloración al punto de ruptura son: se puede oxidar todo el amoníaco, el proceso se puede emplear a continuación de otros procesos de eliminación de nitrógeno para refinar la eliminación de dicho constituyente, simultáneamente se consigue la desinfección del efluente, insensible a la presencia de sustancias tóxicas y a la temperatura, bajo costo de inversión, es adaptable a instalaciones existentes.

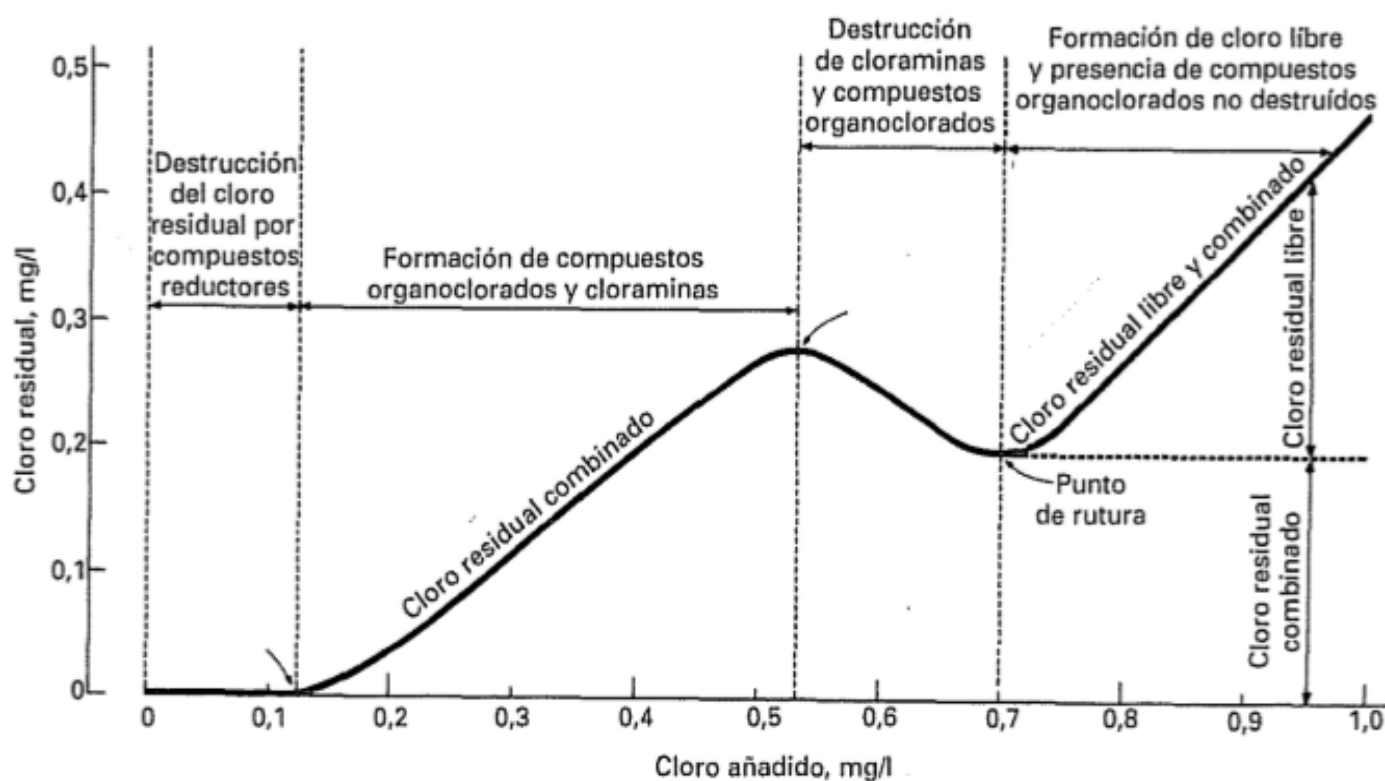


Figura 1. 1 Curva generalizada durante la cloración al punto de ruptura (Metcalf & Eddy, 1995)

La reacción global para describir el fenómeno de punto de ruptura se muestra a continuación.



1.9 Adsorción

La adsorción es usada para la eliminación de materia orgánica no eliminada con métodos convencionales de tratamiento químico y biológico. También se emplea para decolorar el agua residual antes de su vertido final.

Adsorción es un fenómeno superficial mediante el cual se logra la concentración de un soluto en la superficie de un sólido, esta acción sucede dicha superficie se pone en contacto con una solución, por lo que una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales (fuerzas de Van der Waals) (Ramalho, 1996).

El tratamiento del agua residual con carbón activado suele estar considerado como un proceso posterior de tratamiento terciario o de pulido (Metcalf & Eddy, 1995), debido a que este tratamiento puede eliminar parte de la materia orgánica disuelta, así como color, olor y sabor en el agua, los cuales no suelen ser removidos en el tratamiento primario y/o secundario.

El carbón activado en polvo se puede añadir al efluente tratado, dentro de un tanque de contacto. Una vez transcurrido el tiempo de contacto deseado, se deja que el carbón sedimente en el fondo del tanque y seguidamente se extrae del mismo el agua tratada. Debido a que el carbón activado en polvo contiene partículas muy finas, el proceso de extracción se puede facilitar agregando coagulante o llevar a cabo un proceso de filtración (Metcalf & Eddy, 1995).

1.10 Tratamiento de lodos residuales

Los lodos generados durante el proceso de coagulación floculación, deben de ser sometidos a un tratamiento previo a su disposición final. Por lo general, los tratamientos previos de espesamiento aplicados a estos lodos residuales son: espesamiento por gravedad, espesamiento con filtro prensa y centrifugación. Para fines del presente proyecto, solo se describirá el proceso de espesamiento por gravedad y centrifugación.

- **Espesamiento por gravedad.** Por lo regular son tanques de sección circular en los que se dispone un mecanismo rotativo. El objetivo de estos espesadores es conseguir un lodo concentrado a extraer por el fondo. La sedimentación en los espesadores se lleva a cabo en condiciones de sedimentación zonal.
- **Centrifugación.** Esta forma de espesamiento de lodos se ha aplicado crecientemente en los últimos años, los componentes de la centrífuga son: carcasa fija, cuba rotativa, transportador interior rotativo, partes motrices (motor, reductor), válvula de entrada de lodos, válvula de salida de sólidos, válvula de salida de líquidos. Los sólidos del lodo se compactan por fuerza centrífuga, contra la pared interior de la cuba rotativa, siendo luego arrastrados por el transportador hacia la salida. El líquido se descarga por el extremo opuesto.

2. MÉTODO

En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de las etapas del proceso seguido, para la definición de las condiciones de operación consideradas para el tren de tratamiento de aguas residuales de la empresa.

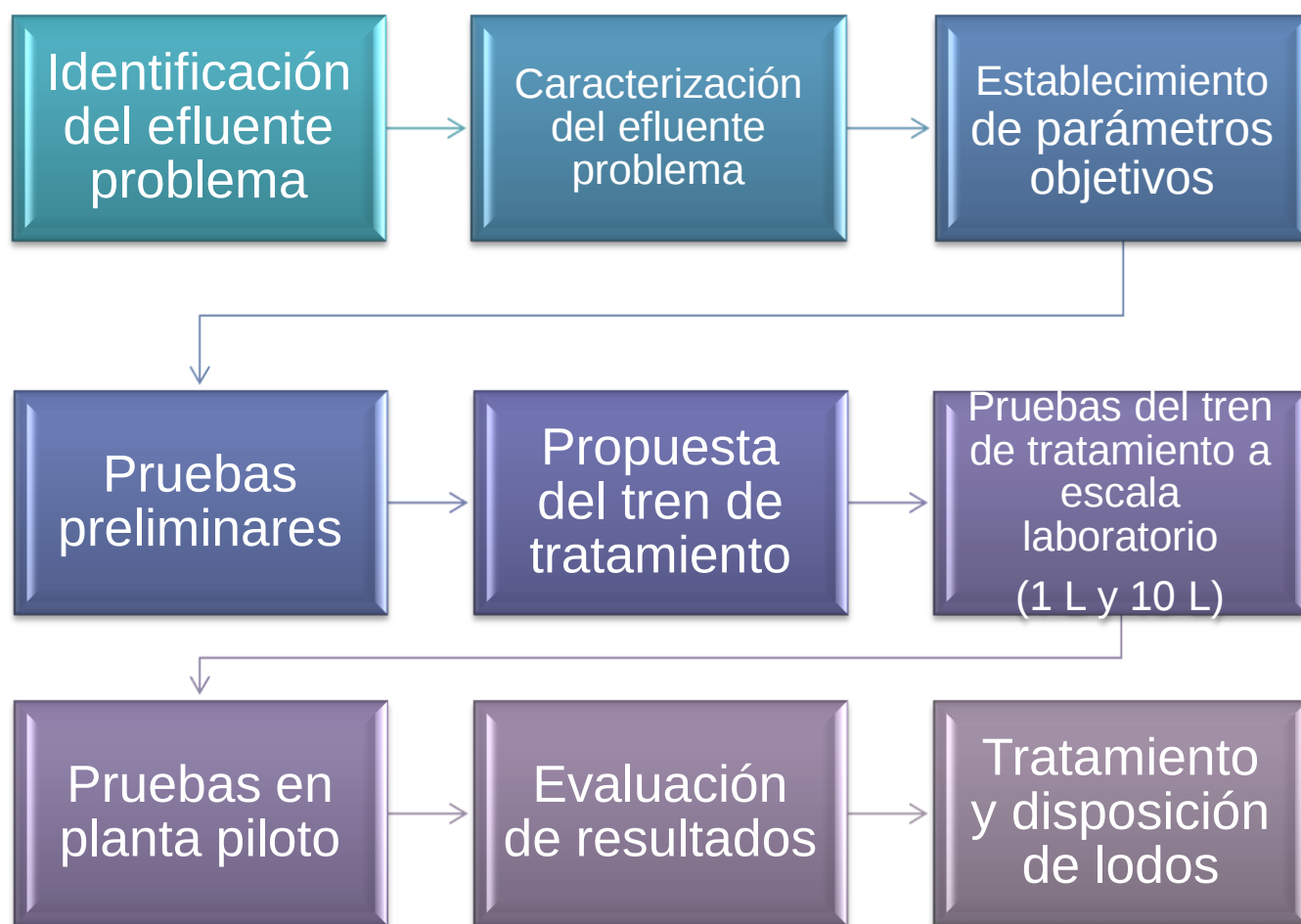


Figura 2. 1 Diagrama de metodología general

Como primera etapa se llevó acabo la identificación de las redes de alcantarillado dentro de la empresa, así como aquellos puntos en los que son vertidos los efluentes de lavado de reactores y el punto donde se juntan todas estas corrientes.

Identificados estos puntos, se prosiguió a caracterizar el agua residual de la empresa, para lo cual se realizaron análisis fisicoquímicos para la determinación de sólidos suspendidos, sólidos totales, sólidos sedimentables, materia flotante, turbidez, conductividad, color APHA, DQO, pH, grasas y aceites y alcalinidad. También se solicitó una caracterización externa para determinación de metales pesados como plomo, níquel, mercurio, zinc, cadmio y los contaminantes básicos faltantes como DBO_5 , nitrógeno, fósforo, arsénico y cianuro, tomando como base los límites máximos permitidos (LMP) establecidos en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. La caracterización se complementó con pruebas por Cromatografía de líquidos (HPLC), para identificación de compuestos y/o productos disueltos procedentes del proceso de producción en la empresa.

Se hizo un análisis de los resultados obtenidos de la caracterización, con respecto a los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, con la finalidad de identificar aquellos parámetros que se encontraban fuera de especificación. Con base en la información, se propuso una serie de procesos fisicoquímicos de tratamiento para la depuración de las aguas residuales de la empresa, de tal forma que el efluente tratado cumpliera con la calidad requerida.

Una vez propuestos los procesos fisicoquímicos, se realizaron pruebas preliminares de tratabilidad a nivel laboratorio con volúmenes de 500 mL de agua residual, con la finalidad de determinar los parámetros de operación adecuados (reactivos, concentraciones, tiempos, entre otros) para cada proceso propuesto. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos del tren de tratamiento con las condiciones seleccionadas para volúmenes de agua mayores, 1 y 10 L.

Finalmente se prosiguió a escalar el tren de tratamiento a una planta piloto con una capacidad de 2800 L con lo cual se obtuvo el margen de error de pruebas a nivel laboratorio hasta el escalamiento y se evaluó la eficiencia del tratamiento en la planta piloto.

Por último se evaluó la forma más adecuada para dar tratamiento a los lodos generados.

2.1 Origen de los efluentes contaminados dentro de la empresa

Como primera etapa se realizó una evaluación de la procedencia de los contaminantes de los efluentes residuales, por lo que se le pidió a la empresa, proporcionara los planos de redes de drenajes y alcantarillados dentro de la planta.

Obteniendo dichos planos, se realizó un análisis visual de las diferentes secciones generadoras de agua residual. Siguiendo dichos planos se realizó un recorrido por la planta de producción, laboratorios, comedor y sanitarios como comprobación y ubicación de los puntos de descarga observadas en los planos.

Debido a los constantes cambios de campañas de fabricación de los productos enlistados con anterioridad, la empresa se ve obligada a realizar lavados a los reactores donde se lleva a cabo su fabricación, generándose efluentes residuales con una gran cantidad de estos productos.

De acuerdo con información proporcionada por la empresa, se tuvo conocimiento que el agua procedente del lavado del área de producción de cloruro de benzetonio (planta BZT) era desechada directamente al cárcamo de recolección de aguas residuales; para posteriormente ser sometida a tratamiento biológico dentro de la misma empresa y así ser descargadas al río. El agua residual proveniente de los procesos restantes, era recolectada por separado en tótems de plástico y posteriormente era dosificada en pequeñas cantidades al mismo cárcamo de recolección de la planta de tratamiento biológico.

La planta de tratamiento de la empresa tiene una capacidad de 11 m³/d, siendo diseñada y construida por una empresa externa denominada Biotecnología Ambiental. El tren de tratamiento consta de las siguientes etapas:

- Igualación
- Tratamiento biológico a base de biodiscos
- Separación de sólidos
- Desinfección
- Tratamiento de lodos

2.2 Caracterización del agua residual

Se realizó la consulta de las diferentes normas mexicanas (NMX) vigentes en materia de agua residual, las cuales fueron obtenidas de la página web de la SEMARNAT; posteriormente se hizo un listado de aquellos análisis fisicoquímicos que se pudieran realizar dentro de la misma empresa, para lo cual se tomó en cuenta la existencia y disponibilidad de los materiales, equipos y reactivos de acuerdo a las especificaciones de cada norma mexicana.

Por otro lado se realizaron análisis de cromatografía de líquidos (HPLC), con la finalidad de conocer si el agua residual contenía productos fabricados y/o usados dentro de la empresa, tales como: cloruro de bencetonio, cloruro de benzalconio, aminocompuesto y clorocompuestos, y en caso de presencia, conocer su concentración.

También se llevaron a cabo análisis de cromatografía de gases (GC) para conocer el contenido de contaminantes volátiles como: alcoholes, bis (2-cloroetil) éter, tolueno y percloroetileno. Cabe mencionar que ambos análisis cromatográficos fueron realizados por personal interno y equipos especializados de la misma empresa.

Otra serie de análisis: Demanda biológica de oxígeno, fósforo total, metales pesados y cianuros; fueron solicitados con una empresa externa especializada en análisis de agua residual.

A continuación se describe el muestreo realizado por la empresa para la caracterización del agua a tratar.

2.2.1 Muestreo (NMX-AA-003-1980)

Se tomaron ocho muestras simples dos veces a la semana de agua residual durante 4 semanas, siendo el volumen de cada muestra de 2 L, en el punto de muestreo definido por la empresa como “Cárcamo”, donde se encuentra la mezcla de agua proveniente de las plantas de fabricación de producto, laboratorios, agua proveniente de sanitarios y cocina así como agua pluvial.

Cabe señalar que durante estas cuatro semanas se llevó un registro de los productos y procesos de fabricación realizados, como referencia de los posibles contaminantes que pudiese llegar a contener dicha agua, para lo cual se realizó un formato de hoja de registro donde se detallan datos como número de muestra tomada, fecha, hora de muestreo, productos y procesos realizados durante la jornada de ese mismo día (Figura 2.2).

HOJA DE REGISTRO DE MUESTRA DE AGUA RESIDUAL

Fecha y hora de muestreo		
Semana		
No. De muestra		
Punto de muestreo:		
Volumen de la muestra tomada		
Nombre y firma de la persona que efectuó el muestreo		
Productos fabricados y/o procedimientos realizados		
Observaciones		

Figura 2. 2 Ejemplo de hoja de registro para la caracterización del agua residual

A continuación, se detalla el procedimiento que se realizó para la toma de muestras para su caracterización, tomando como base la norma mexicana para muestreo NMX-AA-003-1980.

Materiales

- Frasco de vidrio con tapa plástica con capacidad de 2 L.
- Lazo con una longitud aproximada de 2 m.
- Cubeta de plástico con capacidad de 10 L.

Procedimiento

1. Se localizó el punto de muestreo del agua residual “cárcamo” donde es colectada de las diferentes secciones de la empresa.
2. Se tomó una cubeta de 10 L de capacidad, la cual fue sumergida en el cárcamo a modo de extraer agua y regresarla a una altura determinada de tal forma que el agua fuera homogenizada. Se repitió la operación 5 veces.
3. Concluido el proceso de homogenización se tomaba el frasco de vidrio con capacidad de 2 L, y se sumergía en dicho cárcamo hasta una profundidad de 1.50 m aproximadamente.
4. El frasco era enjuagado con la misma agua residual un par de veces, posteriormente se dejaba que dicho frasco se llenara hasta su mayor capacidad e inmediatamente era tapado.
5. El frasco se rotulaba con los datos: fecha, hora, número de muestra y nombre de la persona que efectuó el muestreo.
6. La muestra tomada era llevada inmediatamente al laboratorio de análisis para realizar su caracterización.

2.2.2 Preservación de la muestra

La preservación de las muestras se llevó a cabo de acuerdo a las especificaciones de cada norma mexicana, en caso de ser necesario. En particular, la NMX-AA-005-SCFI-2000, señala acidificación inmediata de la muestra a pH 2 para la determinación de grasas y aceites; por otro lado la NMX-AA-030-1-SCFI-2012 para determinación de DQO, indica la acidificación de la muestra a pH 3.

Acidificación

Equipo y reactivos

- Potenciómetro
- Pipeta
- Perilla
- Ácido clorhídrico 1:1

Procedimiento

1. Con ayuda de una pipeta y perilla se tomaba una cierta cantidad de ácido clorhídrico 1:1
2. Ésta era vertida lentamente en la muestra de agua residual a acidificar.
3. Se homogenizaba perfectamente la mezcla del ácido con el agua.
4. Se tomaba el pH de la muestra hasta alcanzar la lectura de acidificación requerida de acuerdo las normas mencionadas para la determinación de grasas y aceites o DQO.

Refrigeración

Las muestras fueron preservadas en refrigeración a una temperatura de 4°C, cada muestra identificada respectivamente, cerrada adecuadamente para evitar derrames del líquido.

Los procedimientos seguidos para la determinación de los diferentes parámetros según las NMX correspondientes, se muestran en el Anexo A.

2.3 Establecimiento de parámetros objetivo

Para poder proponer un tren de tratamiento para las aguas residuales, fue necesario establecer los valores de los parámetros del agua residual obtenidos de los estudios de caracterización, que estaban fuera de especificación y era necesario controlar.

El efluente tratado sería descargado al río, por lo que se debía cumplir los LMP indicados en la NOM-001-SEMARNAT-1996. Cabe señalar que el parámetro DQO no se encuentra dentro de las especificaciones de la norma, sin embargo al tener un alto valor se convierte en un problema ambiental. Por lo cual, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) establece como condición particular de descarga para industrias químicas, un valor para DQO de 300 mg/L como límite máximo permitido para verter al río las aguas residuales.

Una vez establecidos los parámetros deseados en el agua tratada se procedió a realizar una exhaustiva y extensa investigación bibliográfica para sustentar y determinar cuál podría ser el tren de tratamiento adecuado para cumplir con el objetivo.

En la figura 2.3 se muestra la metodología que se siguió para llegar a dicho fin. Primeramente se muestra una etapa de comparación entre la NOM-001-SEMARNAT- 1996

con los resultados de la caracterización del agua residual problema, con la finalidad de identificar aquellos parámetros que se encontraban fuera de especificación y de esta forma poder llegar a proponer los procesos de tratamiento para dar solución al problema.

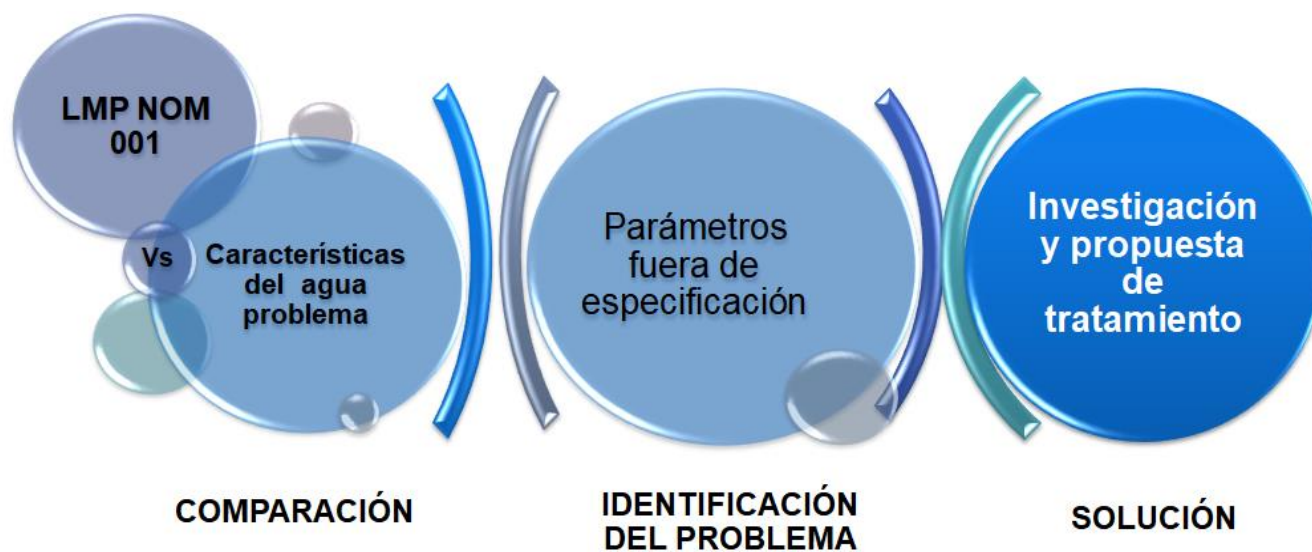


Figura 2. 3 Diagrama general de análisis y propuesta de tratamiento

2.4 Pruebas preliminares de tratabilidad a nivel laboratorio de los procesos fisicoquímicos propuestos

Una vez hecha la propuesta para el tren de tratamiento, se realizaron pruebas preliminares a nivel laboratorio para evaluar la tratabilidad del agua por medio de los diferentes procesos propuestos, y de esta forma seleccionar los reactivos, concentraciones, tiempos que presenten resultados favorables en la reducción de los parámetros que se encuentran fuera de especificación según la NOM-001.-SEMARNAT-1995.

Para la selección de los reactivos a usar se consideraron los siguientes factores:

- Condiciones de almacenamiento y transporte. Los reactivos deben ser poco perecederos, seguros y fácil de manejar.
- Disponibilidad en el mercado.
- Facilidad de dosificación.

En general, la metodología aplicada para las pruebas preliminares con volúmenes de 500 mL de agua se muestra en la figura 2.4.

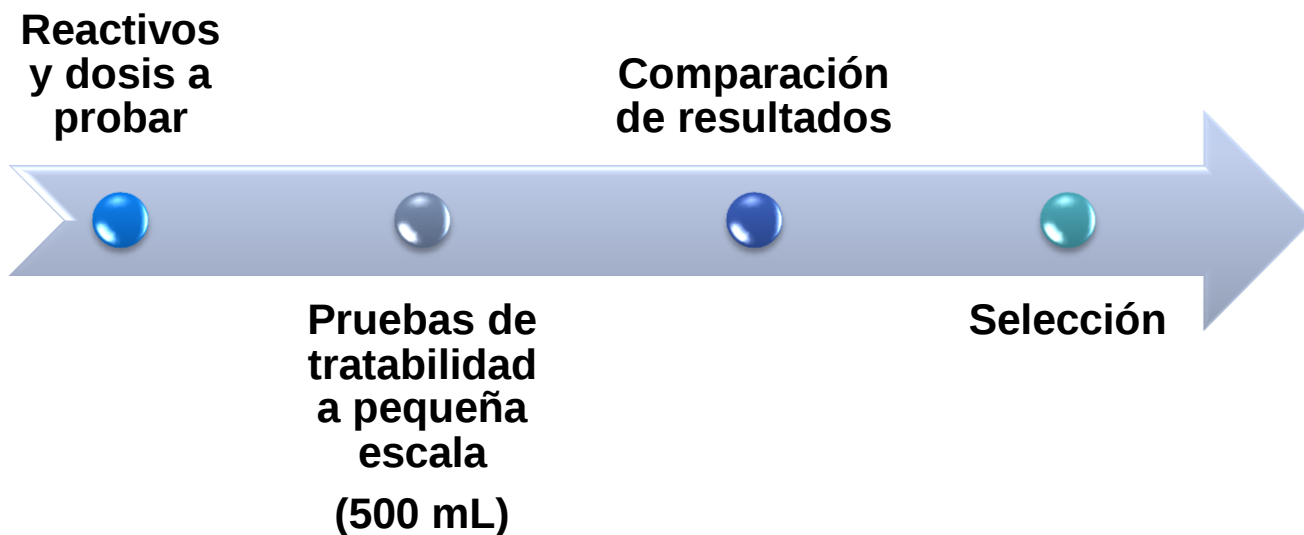


Figura 2. 4 Metodología general para selección parámetros de operación a pequeña escala

Para la elección los coagulantes y floculantes óptimos del proceso fisicoquímico a proponer, se realizaron pruebas de jarras. Los factores que influyeron en la comparación para la selección del coagulante fueron:

- Reducción de DQO
- Turbiedad final
- Color
- pH

El floculante se usó con la finalidad de obtener mayor velocidad de sedimentación, los factores que influyeron para la selección del floculante fueron:

- Velocidad de sedimentación
- Turbiedad final

2.4.1 Prueba de jarras para la selección del coagulante - floculante y la dosis óptima a emplear

Para realizar la prueba de jarras, debido a que la empresa no contaba con equipo especializado, se optó por realizar una adaptación con parrillas de agitación y barras magnéticas.

Materiales y equipo

- 6 Vasos de precipitados de 1000 mL
- 6 Agitadores magnéticos
- 6 Parrillas de agitación con regulador de velocidad.
- Balanza analítica
- Matraces volumétricos de 100 y 200 mL
- Turbidímetro
- Comparador visual APHA

Reactivos

Coagulantes:

- Solución de sulfato de aluminio al 10%
- Solución de hidróxido de calcio al 10%
- Solución de cloruro de férrico al 10%

Floculante:

- Solución de poliacrilamida aniónica al 0.1%

Preparación de las soluciones

Se prepararon soluciones madre de sulfato de aluminio, cloruro férrico e hidróxido de calcio y el floculante poliacrilamida aniónica a probar, en concentraciones tales que las cantidades adecuadas para utilizarse en las pruebas de coagulación – floculación se pudieran medir de forma conveniente.

Se realizaron 5 pruebas de jarras para elegir el coagulante que mostrara un mejor desempeño, las condiciones de cada uno de los ensayos se muestran en la tabla 2.1. El procedimiento se describe a continuación:

Tabla 2. 1 Coagulantes y floculantes utilizados en las 5 pruebas de jarras

Concentración de solución madre del coagulante = 10%

Concentración del floculante = 0.1%

Concentración del floculante = 30 mg/L en cada una de las pruebas

Mezcla rápida: Velocidad de agitación = 100 rpm, tiempo de agitación = 1 min

Mezcla lenta: Velocidad de agitación = 40 rpm, tiempo de agitación = 5 min

Volumen de la muestra = 500 mL

No. de prueba de jarras	Coagulante	Concentración del coagulante (mg/L)
1	$\text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$	100, 150, 200, 250, 300, 350
2	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 18\text{H}_2\text{O}$	150, 200, 300, 400, 500, 600
3	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	100, 150, 200, 250, 300, 400
4	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{FeCl}_3$	$\text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O} = 150$; $\text{Ca}(\text{OH})_2 = 100, 150, 200, 250, 300, 400$
5	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 18\text{H}_2\text{O} = 300$; $\text{Ca}(\text{OH})_2 = 100, 150, 200, 250, 300, 400$

Procedimiento

1. Con una pipeta, se añadió la dosis correspondiente de coagulante a cada vaso para obtener las concentraciones mostradas en la tabla.
2. Se puso en marcha la agitación rápida a 100 rpm por un tiempo de 1 min en cada una de las parrillas con los respectivos vasos.
3. Posteriormente se disminuyó la velocidad de agitación de cada parrilla hasta su mínima potencia (40 rpm).
4. Se usaron concentraciones de 30 mg/L del floculante poliacrilamida en cada prueba dejando en agitación lenta (40 rpm) por 5 min.
5. Se suspendió la agitación y se contó el tiempo de sedimentación de los flóculos.
6. Se realizó una decantación del sobrenadante y se realizaron determinaciones de turbiedad, color y pH, para poder evaluar los resultados observados.
7. Se repitió el mismo procedimiento para cada uno de los coagulantes propuestos en la Tabla 2.1. Finalmente se compararon los resultados de cada prueba y se realizó la selección del más efectivo.

A continuación, se ejemplifica la prueba de jarras número uno (Figura 2.5), tomando como prueba el coagulante sulfato de aluminio.

Prueba de jarras No. 1

Coagulante a probar: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 18\text{H}_2\text{O}$

Concentración de la solución madre: 10% (100, 000 mg/L)

Floculante: Poliacrilamida aniónica

Concentración del floculante: 0.1% (1000 mg/L) = 30 mg/L

No. De vasos: 6

Volumen de muestra: 500 mL

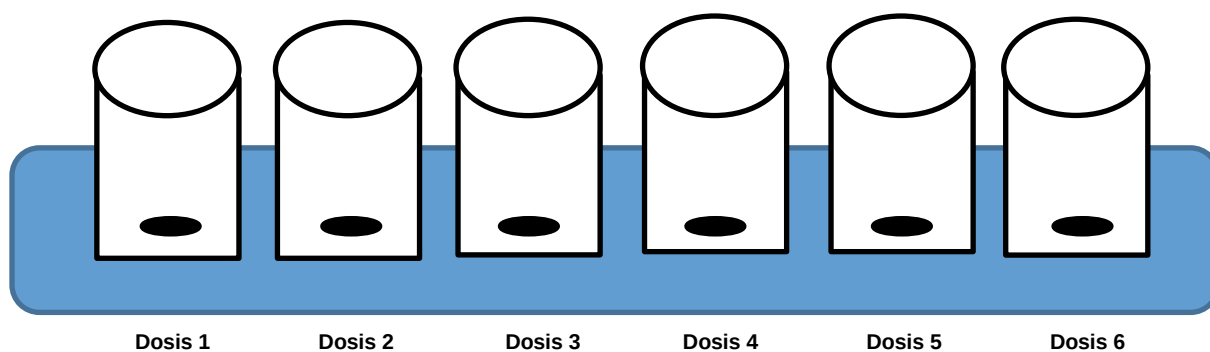


Figura 2. 5 Prueba de jarras

Para determinar la dosis óptima en el proceso de coagulación floculación, se eligieron aquellos vasos que presentaron mayor porcentaje de reducción de DQO, además de tomar en cuenta los que produjeron un coágulo compacto, claramente visible. Como requisitos adicionales, se buscó que las dosis adecuadas dieran una turbiedad y un color aceptablemente bajos de acuerdo a la naturaleza del agua natural.

2.4.2 Selección del oxidante y la dosis óptima a emplear en el tren de tratamiento del agua residual

Para la oxidación química fueron puestos a prueba dos reactivos, hipoclorito de sodio (NaClO) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que de acuerdo a la fuente bibliográfica Metcalf & Eddy son de gran efectividad para el proceso.

Se eligieron las condiciones que presentaron los mejores resultados en el proceso de coagulación – floculación, para llevar a cabo las pruebas de oxidación química, que se detallan en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Oxidantes empleados en las pruebas de oxidación química

Concentración de solución madre NaClO = 13%; H_2O_2 = 25%
 Mezcla rápida: Velocidad de agitación = 100 rpm, tiempo de agitación = 30 min
 Volumen de la muestra = 500 mL

No. De prueba	Oxidante	Concentración, mg/L
1	NaClO	130, 195, 260, 325, 390, 520
2	H_2O_2	125, 250, 375, 500, 625, 750

Material y equipo

- 6 Vasos de precipitados de 1000 mL
- 6 Agitadores magnéticos
- 6 Parrillas de agitación con regulador de velocidad.

Reactivos

- Peróxido de hidrógeno al 35% (grado industrial)
- Hipoclorito de sodio al 13% (grado industrial).

Procedimiento

1. Para cada una de las pruebas con los oxidantes, se ocuparon seis vasos de precipitados y se colocaron en las parrillas de agitación con sus respectivas barras magnéticas.
2. Con una pipeta, se añadieron 6 diferentes dosis de oxidante en cantidades crecientes a cada uno de los vasos (Tabla 2.2).
3. Se puso en marcha la agitación rápida (150 rpm) de las parrillas durante 30 min.
4. Se suspendió la agitación.
5. Se realizaron análisis de DQO, pH, turbidez y color, a cada uno de los vasos para comprobar la eficiencia en la reducción de cada prueba y realizar la selección del oxidante con mejor desempeño.

La selección del oxidante se realizó en función de los siguientes factores:

- Porcentaje de reducción de DQO
- Turbiedad final
- Color
- pH

2.4.3 Determinación de dosis óptima de adsorbente a emplear en el tren de tratamiento del agua residual

Tomando como base el mejor oxidante obtenido del ensayo anteriormente descrito; se procedió a probar 6 cantidades diferentes de carbón activado, y así determinar la dosis más efectiva, para el proceso de adsorción. En la Tabla 2.3, se indica las condiciones de la prueba.

Tabla 2. 3 Dosificación del adsorbente usado en la prueba de adsorción

Mezcla rápida: Velocidad de agitación = 100 rpm, tiempo de agitación = 30 min
Volumen de la muestra = 500 mL

No. De prueba	Adsorbente	Concentración, g/L
1	Carbón activado	0.5, 1, 2, 3, 4, 5

Materiales y equipo

- 6 Vasos de precipitados de 1000 mL
- 6 Agitadores magnéticos
- 6 Parrillas de agitación con regulador de velocidad.
- Balanza analítica
- Equipo de filtración al vacío

Reactivos

- Carbón activado en polvo
- Tierra de diatomeas, SiO₂ (75%)
- Agua destilada

Procedimiento

1. Se pesaron seis diferentes cantidades de carbón activado en polvo (0.5 g, 1 g, 2 g, 3g, 4 g, 5 g), se añadió una cantidad diferente a cada vaso.
2. Se puso en marcha la agitación de las parrillas durante 30 min a una misma velocidad para cada prueba (100 rpm).
3. Posteriormente se suspendió la agitación.
4. Para retirar el carbón activado, se sometió a una filtración a vacío usando tierra de diatomeas.
5. Se realizaron pruebas de DQO, DBO, olor y color, al agua filtrada.
6. Se compararon resultados para elegir la dosis que presentara un mejor desempeño en la reducción de DQO, DBO y color.

El adsorbente propuesto fue probado para determinar la dosis y efectividad, los factores considerados para la dosificación fueron:

- Porcentaje de reducción de DQO
- Porcentaje de reducción de DBO
- Eliminación de olores
- Color

2.5 Elección del tren para el tratamiento de aguas residuales a partir de las pruebas preliminares realizadas

Se hizo un análisis comparativo de los diferentes resultados que se obtuvieron en la experimentación a nivel laboratorio para determinar los reactivos, concentraciones y condiciones de operación, a ser empleados en el tratamiento. Se trazaron gráficas para observar con mayor claridad los resultados obtenidos para la evaluación de las pruebas preliminares a escala laboratorio.

Teniendo esta información, se prosiguió a establecer las diferentes etapas del tren de tratamiento propuesto, especificando los parámetros de operación elegidos.

2.6 Ensayos de tratabilidad a escala laboratorio con volúmenes de 1 y 10 Litros de agua residual

Después de haber establecido el tren de tratamiento para el agua residual problema a partir de las pruebas preliminares en el laboratorio, se prosiguió a realizar 2 ensayos del tren propuesto con volúmenes mayores de agua, 1 L y 10 L.

Se realizaron cinco ensayos a escala de 1 L, y cinco ensayos a escala de 10 L. Para los ensayos con volumen de 1 L, se usó un reactor de vidrio cuyas especificaciones se pueden ver en la tabla 2.4. En la figura 2.6 se muestra la forma del reactor usado.

Tabla 2. 4 Características y especificaciones del reactor a volumen de 1 L

Característica		Descripción
Forma		Reactor circular
Material		Cristal
Capacidad del reactor	1.5 L	
Volumen de trabajo	1 L	
Agitación		Regulador de velocidad, eje y agitador de paletas
Accesorios		Válvulas: válvula de compuerta para drenado en el fondo del reactor
Alimentación		Parte superior del reactor (directo)

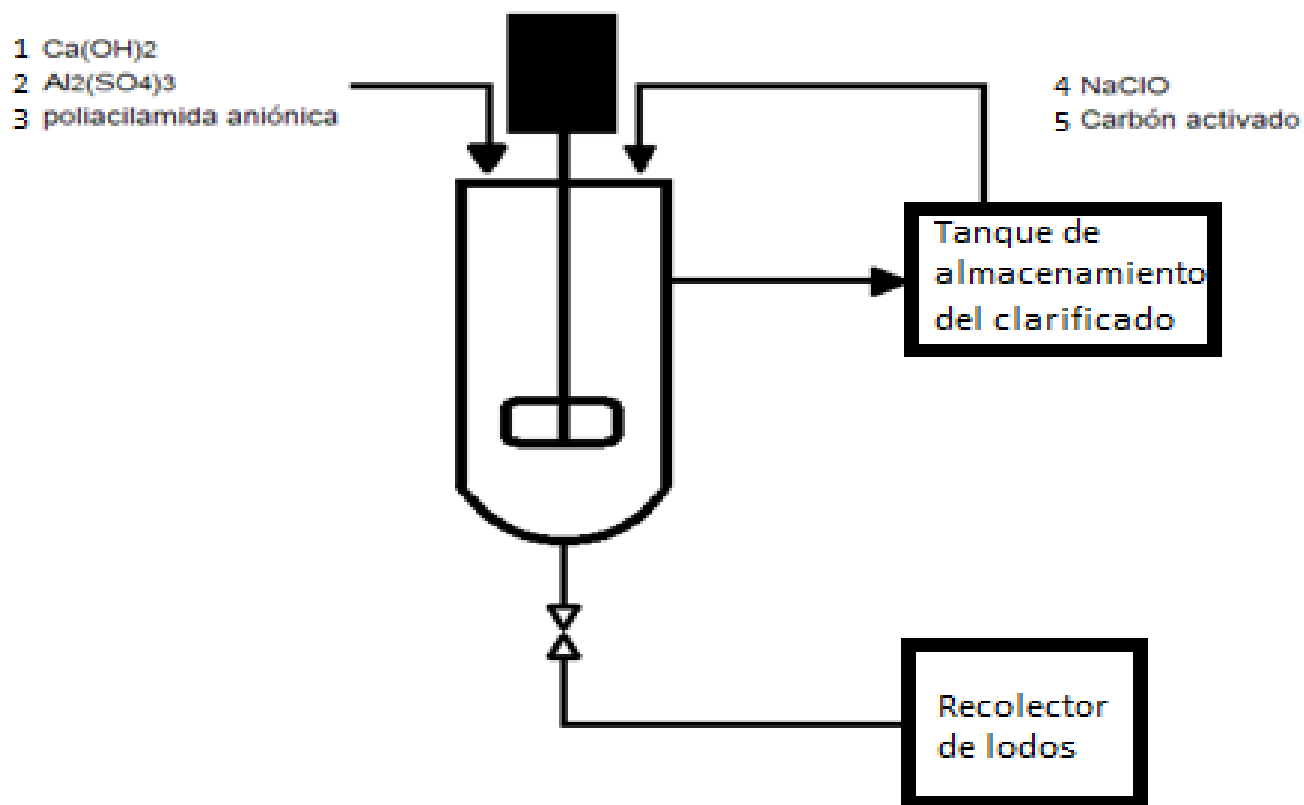


Figura 2. 6 Reactor de 1 L

A continuación, se establece los reactivos, materiales y procedimiento que se siguió para realizar los ensayos con el reactor de 1 L.

Materiales y equipo

- Balanza analítica
- Probeta de 1 L
- Agitador de paletas con motor y regulador de velocidad
- Reactor de cristal con capacidad de 1 L
- Equipo de filtración al vacío

Reactivos

- Coagulante elegido
- Solución de poliacrilamida al 0.1%

- Oxidante
- Carbón activado

Preparación de la poliacrilamida

1. Se pesó un gramo de poliacrilamida en polvo.
2. Se transfirió a un matraz volumétrico con capacidad de 1 L y se aforó con agua destilada.
3. Se sometió a agitación hasta obtener una mezcla homogénea.

Procedimiento

1. Se montó el reactor y se adicionó un litro de muestra del agua residual problema medido con la probeta.
2. Se inició la agitación rápida (100 rpm) y se adicionó la dosis de coagulante seleccionado en las pruebas preliminares por 1 min.
3. Posteriormente se disminuyó la velocidad de agitación a 40 rpm y se agregó la poliacrilamida aniónica, dejando en agitación por 5 min para posteriormente suspender la agitación completamente.
4. Se dejaron en sedimentación los flóculos formados, alrededor de 20 – 30 min.
5. El efluente clarificado se decantó a un recipiente provisional y los lodos fueron retirados del reactor para posteriormente ser tratados.
6. Se introdujo nuevamente el efluente clarificado al reactor poniendo nuevamente en agitación rápida.
7. Se agregó el oxidante elegido en las concentraciones obtenidas por las pruebas preliminares, dejando en reacción por 30 min.
8. Posteriormente se agregó la dosis seleccionada de carbón activado en polvo con la misma velocidad de agitación, por un tiempo de 30 min.
9. Se detuvo agitación y se prosiguió a realizar el proceso de filtración al vacío usando tierra de deatomeas. El clarificado obtenido se sometió a análisis fisicoquímicos de DQO, SST, ST, pH, turbidez, color APHA y conductividad, así como HPLC.

Para realizar las pruebas a un volumen de 10 L se hicieron ajustes de dosificación de cada reactivo, dejando los tiempos de contacto sin variación a los de escala de 1 L. Se usó un reactor construido en la misma empresa, en la Tabla 2.5 se detallan las características del dicho reactor. El procedimiento que se siguió fue el mismo que el usado a volumen de 1 L,

con excepción de que en este caso se remplazó la agitación con un agitador tipo hélice con su respectiva flecha y regulador de velocidad, la forma del reactor se muestra en la figura 2.7.

Tabla 2. 5 Características y especificaciones del reactor a volumen de 10 L

Característica	Descripción
Forma	Reactor circular, fondo cónico
Material	Acero inoxidable
Capacidad del reactor	11 L
Volumen de trabajo	10 L
Agitación	Regulador de velocidad, eje y agitador de hélice
Accesorios	Válvulas: válvula de compuerta para drenado en el fondo del reactor; válvulas (2) de drenado en la parte lateral
Alimentación	Parte superior del reactor (directo)

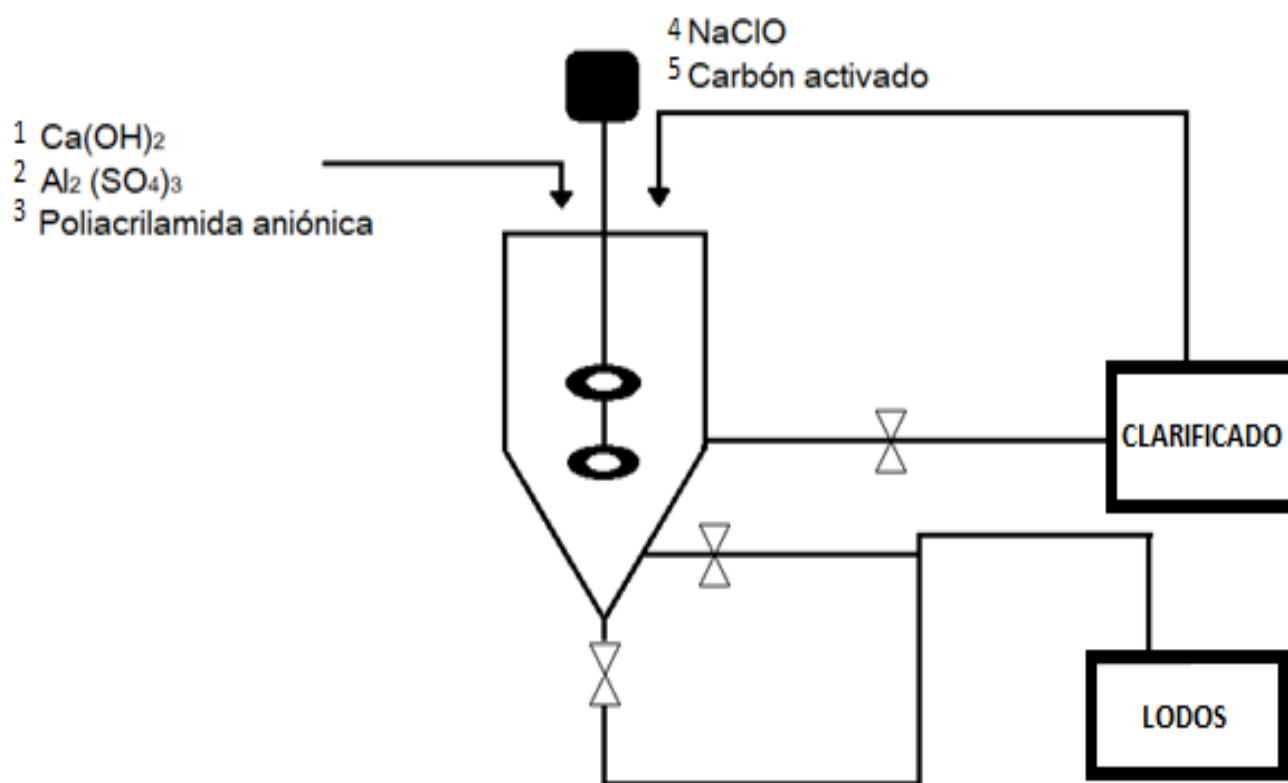


Figura 2. 7 Reactor a volumen de 10 L

2.7 Pruebas a nivel planta piloto

Para realizar pruebas de escalamiento a nivel planta piloto, la empresa montó una planta del tren de tratamiento a una escala de 2800 L (Figura 2.7), se realizaron los cálculos para el ajuste de la dosificación para cada uno de los reactivos empleados de acuerdo al volumen a tratar, así como también se elaboró el procedimiento de operación (manual) para dicha planta, el cual se describe en el apartado de resultados. También se realizaron cinco lotes de prueba.

La planta piloto montada por la empresa consta de 2 reactores, un tanque de almacenamiento de agua tratada y un filtro de platos. Las características de cada componente de la planta piloto se describen en la Tabla 2.6 y en la figura 2.8, se muestra el diagrama de la planta piloto.

Tabla 2. 6 Características y especificaciones de los componentes de la planta piloto

Proceso	Equipo	Temperatura y presión de trabajo	Equipamiento
Coagulación floculación	TF-01 Tanque circular de acero inoxidable con fondo cónico, con capacidad de 2800 L.	Ambiente / atmosférica	Tapa superior para carga de reactivos químicos. Motor para agitación y agitador de hélice con regulador de velocidad de 30 – 120 rpm. Bomba de alimentación y válvula lateral y al fondo del tanque.
Oxidación – adsorción	TD-01 Tanque circular de acero inoxidable con fondo cónico, con capacidad de 3000 L.	Ambiente / atmosférica	Tapa superior para carga de reactivos químicos. Bomba de alimentación. Válvula lateral y válvula al fondo del tanque con conexión al filtro de platos con recirculación del efluente.
Almacenamiento de agua tratada	TA-01 Tanque de fierro cilíndrico con capacidad de 3000 L.	Ambiente / atmosférica	Tanque con medidor de volumen. Tapa superior y bomba de alimentación.
Filtración	Filtro de platos de acero inoxidable con capacidad de filtración de 180 L	Ambiente / 4 kg	14 platos horizontales con volumen de trabajo de 180 L y capacidad de torta de 15 kg. Manómetro.

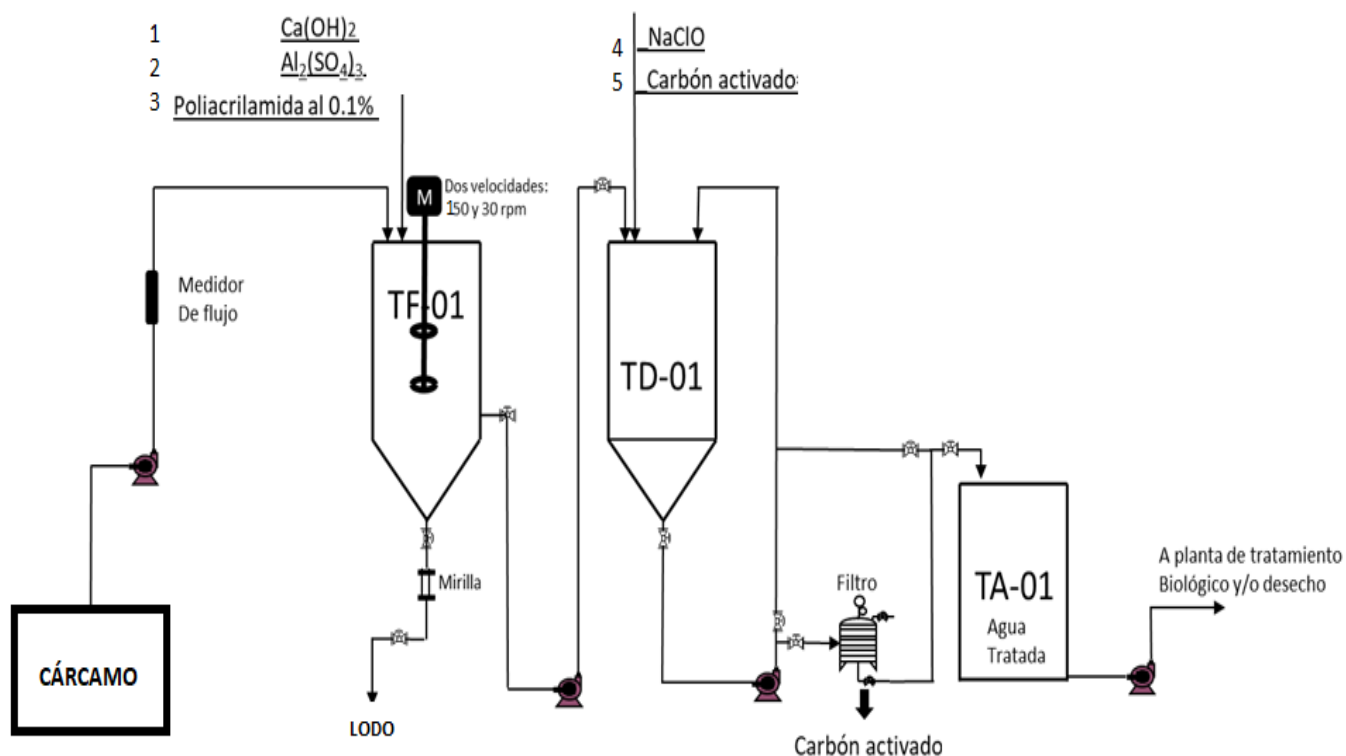


Figura 2. 8 Diagrama de la planta piloto para el tratamiento de aguas residuales

2.8 Evaluación y comparación de resultados en las diferentes escalas de volumen

Este apartado consistió en hacer una comparación de los resultados presentados en los ensayos a las diferentes escalas trabajadas de 1 L, 10 L y 2800L. Se calculó un promedio de los diferentes lotes y posteriormente se compararon en una gráfica de barras, con la finalidad de visualizar los resultados obtenidos.

Esta práctica ayudó a identificar los puntos de mejora en la planta piloto, ya que, las condiciones del tratamiento fueron completamente distintas en comparación con el sistema totalmente controlado dentro del laboratorio.

2.10 Tratamiento y disposición de lodos

Después del proceso de coagulación – floculación, se obtienen lodos que deben de ser tratados adecuadamente.

Los tratamientos comúnmente dados a estos residuos consisten en el espesamiento y secado con la finalidad de reducir el espacio de almacenamiento. En algunos casos se aplican procesos para recuperar los metales que estos contienen.

En este caso solo se realizó un estudio de los lodos residuales para hacer un proceso de espesamiento, con la finalidad de determinar la masa que se obtendrá cuando el lodo complete el proceso de secado y por otra parte la cantidad de humedad que contienen al ser extraídos del proceso de coagulación floculación. A continuación se explicará este proceso realizado en laboratorio y los resultados obtenidos tanto en el laboratorio como en las pruebas en planta piloto.

2.10.1 Determinación de humedad de los lodos en el laboratorio

Materiales y equipo

- Contenedores de plástico
- Matraz bola con boca esmerilada
- Probeta
- Rotoevaporador

Procedimiento

1. Los lodos obtenidos del proceso de coagulación floculación dentro del laboratorio, fueron almacenados en recipientes de plástico, posteriormente se dejaron en sedimentación el mayor tiempo posible para poder extraer una mayor cantidad de agua.
2. Posteriormente se fueron tomando muestras de 50 mL para continuar con el secado.
3. Se pesó el matraz bola con boca esmerilada y posteriormente se vertieron los 500 mL de muestra.
4. Nuevamente se pesó el matraz con la muestra y posteriormente el matraz fue insertado en el equipo rotoevaporador. Se dejó en funcionamiento hasta evaporar totalmente el agua que contenía la muestra.
5. Una vez que se observa la muestra completamente seca (polvo), se extrajo el matraz y se pesó nuevamente.
6. Se tomaron los datos y se hizo el cálculo de pérdida de agua que se obtuvo.

2.10.2 Espesamiento de lodos en planta piloto

Para el proceso de espesamiento de lodos obtenidos en planta piloto, se llevó a cabo el proceso de centrifugación de lodos obtenidos de los cinco lotes de prueba de tratamiento de aguas residuales. Dichos lodos fueron almacenados por lotes, en 10 tambos con capacidad de 200 L.

Estos tambos se llevaron hacia el equipo de centrifugación donde fue desarrollado dicho proceso. A continuación se describe a detalle:

1. Se energizó el equipo “Centrífuga” la cual se ubica dentro de la empresa, y se puso en marcha, destapando el punto de alimentación para verter lodos.
2. Se comenzó con la alimentación a la centrífuga manualmente con ayuda de dos operadores, los cuales usaron como herramienta de trabajo un par de cubetas con capacidad de 10 y 15 L respectivamente.

Nota 1: El tiempo de alimentación se llevó a cabo en un periodo de 90 min, con un tiempo de vertido de cada tambo de 15 a 20 min.

Nota 2: Debido a la capacidad del equipo, solo fue posible cargar 4 de 10 tambos (lote 4 y lote 5) en la primera prueba. Segunda carga, lote 3 y solo un tambo del lote 2 (163.7 Kg). Tercera carga, lote 1 y segundo tambo del lote 2 (129.0 kg).

Nota 3: En la segunda y tercera carga, se optó por solo alimentar tres tambos, debido a que en la carga 1 se observó mayor retención de agua en el sólido.

3. Concluida la etapa de alimentación a la centrífuga, esta fue cerrada y se dejó en funcionamiento por un periodo de tiempo de 2 horas con la finalidad de permitir una buena separación de la fase sólida y líquida.
4. Después de dejar 2 horas en escurrimiento, el equipo se apagó dejando que se estabilizara y se detuviera por completo.
5. Se abrió el punto de alimentación y se comprobó si efectivamente la torta de lodos retenida estaba parcialmente seca.
6. Confirmando la sequedad de la torta retenida, fue vertida en bolsas plásticas para su pesaje y almacenamiento.

2.10.3 Disposición de lodos

Después de realizar el espesamiento de lodos en la centrífuga, estos fueron almacenados y llevados a disposición en el área de ecología. La empresa contrató a una empresa externa la cual se encargó de retirar y de dar un tratamiento especial a los residuos.

3. RESULTADOS

3.1 Origen de los efluentes contaminados

De acuerdo a los planos de drenaje dentro de la empresa Organo Síntesis S.A. de C.V. (Figura 3.1), se observó que las aguas residuales descargadas al cárcamo de recolección provienen de los diferentes sectores de la empresa; el 80% proviene de agua generada en producción, 10% pertenece a laboratorios, 5% proviene de baños, regaderas y cocina y el 5% restante es proveniente del agua pluvial.

Con el análisis de producción dentro de planta, se observó que las descargas de agua son generadas principalmente de los lavados de equipos usados para la fabricación de los diferentes productos que ofrece la empresa.

El 80% de la producción está dirigida a la fabricación de los siguientes productos:

- Clorocompuesto
- Aminocompuesto
- Cloruro de bencetonio

Debido a estas actividades es posible encontrar en el agua de lavado de equipos e instalaciones compuestos como cloruro de bencetonio (BZT), tolueno y dicloroetil éter (DCEE), este último encontrado en el agua que se desecha de las bombas de vacío. El BZT es un cuaternario de amonio muy soluble en agua, mientras que el tolueno es insoluble.

El otro 20 % de las actividades productivas se debe a la fabricación de:

- Cloruro de benzalconio
- Óxido de laurildimetilamina
- Policuaternarios de amonio
- Cloruro de miristildimetil bencilamonio
- BIT-TD (mezcla de bencilisotiazolinona y N-formal)
- DIVO's (mezcla de ácido sulfúrico con otros ácidos)
- Cloruro de estearil dimetil bencilamonio
- Lauramida DEA

En este análisis, se observa que estos productos son principalmente tensoactivos catiónicos, tensoactivos no iónicos, alguicidas, fungicidas y en general biocidas, así como también una gran cantidad de solventes orgánicos.

3.2 Características del agua residual cruda

En la Tabla 3.1, se presentan los resultados durante los meses de mayo a junio de 2017 obtenidos en el estudio de caracterización realizado durante un periodo de cuatro semanas como se mencionó en el método, para determinar el grado de contaminación del efluente a tratar.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 3.1, la descripción general del agua residual cruda que proviene de las diferentes secciones de Organo Síntesis S.A. de C.V y que se juntan en un mismo punto es la siguiente: agua de color característico marrón amarillento con olor fétido, mantiene ausencia de materia flotante y mínima presencia de sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales, se encuentra en un rango de pH aceptable que oscila entre 8 y 10, además contiene cierta cantidad de grasas y/o aceites.

En los resultados de la caracterización de las aguas residuales mostradas en la tabla 3.1, es importante resaltar los valores elevados para los parámetros DQO y DBO₅ (699-920 mg/L) y nitrógeno total (100 mg/L); por ello el proceso de tratamiento se centrará en la reducción de estos valores. En cuanto a metales pesados y cianuros, se presentan cifras muy pequeñas que no provocan mayor consecuencia a la alteración de agua.

Por otra parte, también es importante destacar los resultados que se obtuvieron en las pruebas de cromatografía de líquidos (HPLC) ya que se arrojaron resultados de presencia del producto BZT en una concentración de 12 ppm como mínima y 19 ppm como máxima; se debe recordar que el cloruro de benzetonio (BZT), actúa como agente biocida a una concentración de 1 ppm.



Figura 3. 1 Red de drenaje de Organo Síntesis S.A. de C.V

Tabla 3. 1 Caracterización de aguas residuales; promedio diario

Análisis	Fecha	27/Abr/17	15/May/17	18/May/17	23/May/17	29/May/17	05/Jun/17	12/Jun/17	15/Jun/17
Apariencia		Líquido turbio	Líquido turbio	Líquido turbio	Líquido turbio	Líquido turbio	Líquido turbio	Líquido turbio	Líquido turbio
Olor		Fétido	Fétido	Fétido	Fétido	Fétido	Fétido	Fétido	Fétido
Color verdadero, APHA		30	30	30	30	50	30	30	30
Turbidez, NTU		61	63	85	37.44	40.3	44	55	63
Conductividad, µS		721	662	970	1643	959	413	995	937
Materia flotante		Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos sedimentables, mg/L		Menor a 1.0	Menor a 1.0	Menor a 1.0	Menor a 1.0	Menor a 1.0	Menor a 1.0	Menor a 1.0	Menor a 1.0
SST, mg/L		7	10	6	10	2	10	6	6
pH		8.28	8.71	7.79	10.37	9.32	8.44	8.55	8.02
Grasas y aceites, mg/L		13.1	12.8	14.8	11.4	16.2	11.2	10.3	13.9
Alcalinidad , mg/L		208	280	286	250	270	210	297	243
DQO, mg/L		764	810	879	706	916	699	920	881
DBO, mg/L		70	96	330	102	360	120	310	208
Contenido de BZT, mg/L		13	18	18	13	19	12	18	16
Contenido de tolueno, mg/L		0.50	1.50	1.20	1.0	2.0	1.0	1.0	2.0
Nitrógeno total, mg/L		142	124	137	109	160	110	142	100
Fosforo total, mg/L		4	3.8	4.5	4.8	3.9	4.2	5	4.6

Continuación. Tabla 3.1

Arsénico, mg/L	Menor a 0.018	Menor a 0.018	Menor a 0.018	Menor a 0.018	Menor a 0.018	Menor a 0.018	Menor a 0.018	Menor a 0.018
Cadmio, mg/L	Menor a 0.043	Menor a 0.043	Menor a 0.043	Menor a 0.043	Menor a 0.043	Menor a 0.043	Menor a 0.043	Menor a 0.043
Cianuros, mg/L	Menor a 0.020	Menor a 0.020	Menor a 0.020	Menor a 0.020	Menor a 0.020	Menor a 0.020	Menor a 0.020	Menor a 0.020
Cobre, mg/L	Menor a 0.204	Menor a 0.204	Menor a 0.204	Menor a 0.204	Menor a 0.204	Menor a 0.204	Menor a 0.204	Menor a 0.204
Cromo, mg/L	Menor a 0.215	Menor a 0.215	Menor a 0.215	Menor a 0.215	Menor a 0.215	Menor a 0.215	Menor a 0.215	Menor a 0.215
Mercurio, mg/L	Menor a 0.002	Menor a 0.002	Menor a 0.002	Menor a 0.002	Menor a 0.002	Menor a 0.002	Menor a 0.002	Menor a 0.002
Níquel, mg/L	Menor a 0.18	Menor a 0.18	Menor a 0.18	Menor a 0.18	Menor a 0.18	Menor a 0.18	Menor a 0.18	Menor a 0.18
Plomo, mg/L	Menor a 0.127	Menor a 0.127	Menor a 0.127	Menor a 0.127	Menor a 0.127	Menor a 0.127	Menor a 0.127	Menor a 0.127
Zinc, mg/L	Menor a 0.211	Menor a 0.211	Menor a 0.211	Menor a 0.211	Menor a 0.211	Menor a 0.211	Menor a 0.211	Menor a 0.211
Coliformes f., NMP/100 mL	570	501	351	328	485	364	350	530
Huevos de helminto, H/L	Menor a 1	Menor a 1	Menor a 1	Menor a 1	Menor a 1	Menor a 1	Menor a 1	Menor a 1

Realizando un promedio de los resultados anteriores, se hizo una comparación con las especificaciones que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Tabla 3.2), con la finalidad de observar cuales son los parámetros que se encuentran fuera de especificación y de esta forma tener un punto de partida para proponer un tren de tratamiento adecuado para el tipo de agua que se presenta.

Tabla 3. 2 Promedio de la caracterización de aguas residuales

Análisis	Resultados de caracterización (P.M)	Especificación NOM- 001- SEMARNAT- 1996 (P.M)
Apariencia	Líquido turbio	N/A
Turbidez, NTU	56.1	N/A
Color verdadero, APHA	32.5	N/A
Olor	Fétido	N/A
pH	8.7	5 – 10
Conductividad, µS	912.5	N/A
Grasas y aceites, mg/L	12.9	15
Sólidos sedimentables, mg/L	Menor a 1	1
Materia flotante	Ausencia	AUSENCIA
Sólidos suspendidos, mg/L	7.1	150
Sólidos totales, mg/L	875	N/A
DQO, mg/L	822	N/A
DBO₅, mg/L	199.5	150
Alcalinidad	255.5	N/A
Contenido de BZT, mg/L	16	N/A
Contenido de tolueno, mg/L	1.3	N/A
Nitrógeno total, mg/L	128	40
Fosforo total, mg/L	4.35	20
Arsénico, mg/L	0.018	0.2
Cadmio, mg/L	Menor a 0.0427	0.2
Cianuros, mg/L	Menor a 0.020	1.0
Cobre, mg/L	Menor a 0.204	4.0
Cromo, mg/L	Menor a 0.215	1.0

Continuación Tabla 3.2

Mercurio, mg/L	Menor a 0.0021	0.01
Níquel, mg/L	Menor a 0.18	2.0
Plomo, mg/L	Menor a 0.1273	0.5
Zinc, mg/L	Menor a 0.211	10
Coliformes fecales, NMP/100 mL	535	1000 – 2000
Huevos de helminto, H/L	Menor a 1	1

* (P.M), Promedio Mensual

* N/A, No Aplica

Como se observa en la tabla anterior, los parámetros cuyos valores promedio que se encuentran muy por encima de la especificación de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 son:

- DBO₅, con un promedio de 200 mg/L
- Nitrógeno total, con un promedio de 128 mg/L

Esto perjudica directamente a la empresa ya que el hecho de desechar agua con este grado de contaminación, pudiera llegar a ser acreedor de sanciones de acuerdo a lo indicado en la legislación mostrada en el apartado de metodología de este mismo.

Por otro lado, se identificaron cinco parámetros para los cuales no existe un valor de control, debido a que la NOM-001-SEMARNAT-1996, no considera la descarga de contaminantes industriales a cuerpos de agua naturales, ellos son:

- DQO, con un valor promedio de 822 mg/L
- Contenido de BZT, promedio de 16 mg/L
- Sólidos totales
- Alcalinidad
- Contenido de tolueno

Cabe señalar que la NOM-001-SEMARNAT-1996, no especifica un parámetro para el control de DQO. CONAGUA establece una condición particular de descarga para este parámetro el cual se especifica es de 300 mg/L, como se mencionó anteriormente en la metodología.

En la tabla 3.3 se muestran las fechas de muestreo y las actividades realizadas dentro del área de producción. Las fechas mostradas, son las mismas fechas en las que se realizó el muestreo, con este seguimiento se tiene conocimiento de los productos arrojados junto con los efluentes, siendo estos BZT y tolueno.

Tabla 3. 3 Monitoreo de producción y/o actividades en el periodo de caracterización del agua residual

Fecha	27/abril/2017	15/Mayo/2017	18/Mayo/2017	23/Mayo/2017
Producción y/o actividades	Aminocompuesto	Clorocompuesto	Clorocompuesto	BZT
	Clorocompuesto	Purificación de tolueno	Aminocompuesto	Aminocompuesto
				Clorocompuesto
Fecha	29/Mayo/2017	05/Junio/2017	12/Junio/2017	15/Junio/2017
Producción y/o actividades	PQA 21	Purificación de tolueno	BZT	BZT
	DUO		Aminocompuesto	Aminocompuesto
	Aminocompuesto	Aminocompuesto		

3.3 Parámetros objetivos al final del tratamiento

Antes de proponer un tren, se establecieron los valores a los que deberían llegar los parámetros que están fuera de especificación al finalizar el tratamiento. En la tabla 3.4 se señalan aquellos parámetros puestos a consideración así como los valores objetivos que se tendrán al final del proceso de depuración.

Al no tener resultados de alto valor en cuanto a metales pesados y cianuros, en este apartado no se tomaron en consideración, por lo que solo se prestó especial atención a aquellos parámetros que se encontraron fuera de especificación.

Como características adicionales, se esperaba obtener un efluente completamente clarificado, libre de olores fétidos, en un rango de turbidez de 0 NTU a 1 NTU, con un color

verdadero no mayor a 10 APHA y en general que cumpla con la mayor cantidad de características de un efluente de buena calidad.

Tabla 3. 4 Parámetros objetivos

Parámetro	Valor objetivo	Especificación NOM-001-SEMARNAT-1996 (Promedio diario)
Grasas y aceites, mg/L	Menor a 10	25
Materia flotante	Ausente	Ausente
Sólidos sedimentables, mL/L	0	2
SST, mg/L	Menor a 100	200
DBO₅, mg/L	Menor a 150	200
DQO, mg/L	Menor a 300	N/A
Nitrógeno total, mg/L	Menor a 30	60
Fósforo total, mg/L	Menor a 15	30
BZT, mg/L	Menor a 1	N/A
Color verdadero	10 APHA	N/A
Olor	Inodoro	N/A
Turbidez	0 NTU	N/A

3.4 Propuesta del tren de tratamiento

De acuerdo a la naturaleza y características que presentó el agua residual proveniente de Organo Síntesis S.A. de C.V., se realizó un análisis de las diferentes fuentes de información y se optó por realizar una serie de tratamientos fisicoquímicos.

A continuación, se presenta un diagrama que muestra la secuencia de operaciones consideradas para el tren de tratamiento propuesto, así como una breve explicación de cada proceso justificando su aplicación.

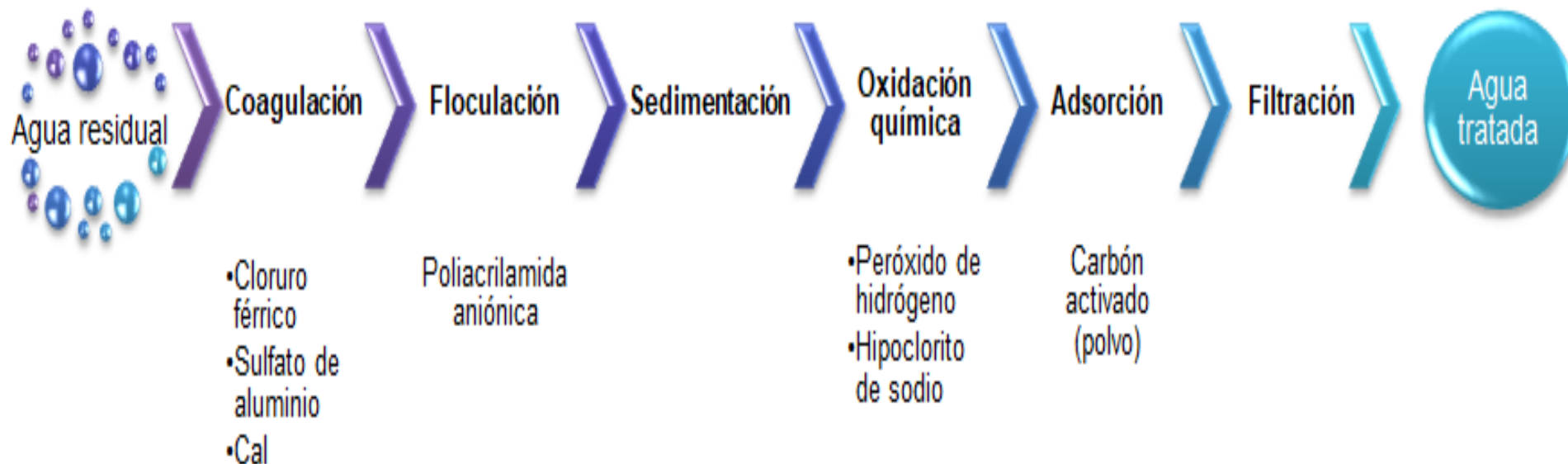


Figura 3. 2 Tren de tratamiento general

3.4.1 Coagulación – floculación

El objetivo del proceso de coagulación floculación es conseguir efluentes con un porcentaje de reducción de entre el 20 a 40% de la DBO₅ y del 30% al 40% de la DQO ya que con este método se eliminará la materia coloidal que se encuentra en el agua, al ser eliminada, el agua quedará con menor porcentaje de carga de materia no degradable y degradable.

Como se mostró en los resultados de caracterización (tabla 3.2), la turbiedad se encuentra en un promedio de 56 NTU y el color aparente y color verdadero demuestran una mala calidad del agua, por lo que aunado a la disminución de DQO y DBO₅, también se esperan resultados muy favorables para reducción de color y turbidez.

Debido a que el pH del agua a tratar se encontraba entre 7 y 8, no era necesario modificar para realizar el proceso de coagulación floculación y por otra parte se evitaron gastos adicionales.

3.4.2 Sedimentación

Uno de los efectos secundarios en la aplicación del proceso de coagulación floculación, es la generación de sólidos floculados (aglomerados), para los cuales se debe de tener en cuenta un proceso de sedimentación, de esta forma se obtiene un efluente clarificado y notablemente con una mejor calidad visual.

3.4.3 Oxidación química

Se probaron tanto el método de oxidación empleando cloro como reactivo principal y el método Fenton, el cual ha ganado gran popularidad en los últimos años como método de oxidación para efluentes que necesitan un tratamiento específico, como el que se presenta en este caso.

Con la aplicación al tren de tratamiento de oxidación química, se espera obtener resultados favorables con una reducción de DQO de 60% al 80%.

3.4.3.1 Oxidación con cloro

Con la aplicación de hipoclorito de sodio, se pretendió obtener una reducción aproximada del 40% al 70% de la DQO inicial de la muestra a tratar.

3.4.3.2 Oxidación Fenton

Con la aplicación de peróxido de hidrógeno en presencia de sales de hierro, se esperó obtener una reducción aproximada del 40% al 70% de la DQO inicial de la muestra a tratar.

3.4.4 Adsorción

Se propuso la aplicación de adsorción con carbón activado en polvo con la finalidad de eliminación de la materia orgánica y materia coloidal, con lo cual se esperó obtener resultados de disminución de DQO del 50% hasta un 70%. Por otro lado, la adsorción sobre carbón activado también se empleó con la finalidad de eliminar tanto el cloro residual libre como del combinado.

3.4.5 Filtración

Se optó por realizar una filtración posterior a la adsorción con la finalidad de retirar el carbón activado en polvo que se encontraba en suspensión por todo el cuerpo de agua tratado.

3.5 Resultados en el laboratorio

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a nivel laboratorio, con la finalidad de establecer el tren de tratamiento con las dosificaciones y tiempos de contacto, con los cuales es posible obtener los valores objetivo, de los parámetros bajo estudio.

3.5.1 Prueba de jarras para coagulación – floculación

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada una de las pruebas de jarras preliminares de coagulación – floculación.

3.5.1.1 Sulfato de aluminio

En la Tabla 3.5, se muestran los resultados de la prueba de jarras usando sulfato de aluminio. La primera columna corresponde a las características iniciales de la muestra y posteriormente se muestran los resultados de turbiedad, color y pH obtenidos al final de la prueba:

Tabla 3. 5 Prueba de jarras con sulfato de aluminio

Dosis del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, mg/L	0	150	200	300	400	500	600
DQO (mg/L)	702	670	664.3	650.7	623.1	620.2	617.1
Color (APHA)	30	40	30	30	30	30	30
pH	8.64	6.02	4.46	4.10	4.04	4.04	4.04
Turbiedad (NTU)	43.7	13.6	10.1	9.6	8.0	15.6	15.03
% de reducción de DQO	0	4.5	5.4	7.3	11.2	11.6	12.1

Analizando la tabla 3.5, se observa una DQO inicial de 702 mg/L; con la adición de sulfato de aluminio se observa una disminución de dicho parámetro. La reducción máxima de 12.1%, se logró con la adición de 600 mg/L del coagulante, mientras tanto el color se mantiene al igual que el inicial, pH disminuye y turbiedad disminuye notablemente.

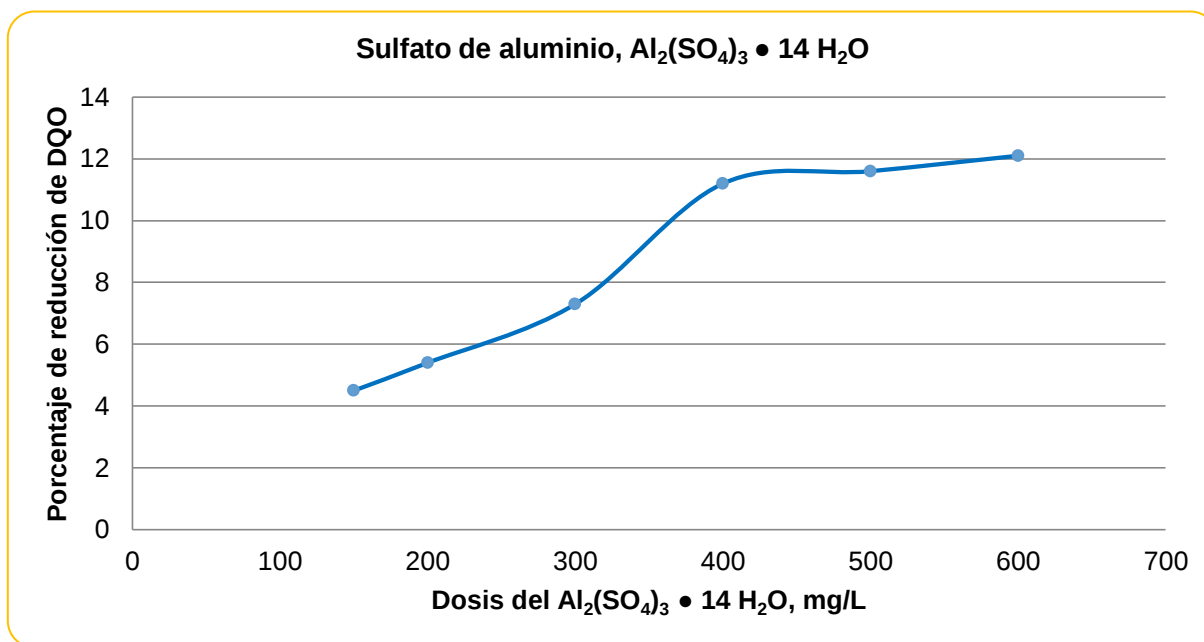


Figura 3. 3 Comparación entre porcentaje de DQO final de la prueba y dosis del sulfato de aluminio

En la figura 3.3, se muestra una gráfica del porcentaje de reducción de DQO usando como coagulante sulfato de aluminio en diferentes concentraciones. El punto en el que se observa mayor cambio es en la adición de 400 mg/L de coagulante con lo cual se obtiene reducción de 11.2%.

3.5.1.2 Cloruro férrico

En la tabla 3.6, se muestran los resultados obtenidos de la segunda prueba de jarras donde fue puesto a prueba el cloruro férrico:

Tabla 3. 6 Prueba de jarras con cloruro férrico

Dosis del $\text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$, mg/L	0.0	100	150	200	250	300	350
DQO (mg/L)	621	605.5	583	580	577.3		
Color (APHA)	40	40	40	80	70	-	-
pH	8.4	6.75	6.34	4.35	5.5	-	-
Turbiedad (NTU)	40.4	4.81	4.57	5.1	5.03	-	-
% reducción de DQO	0	2.5	6.1	6.6	7.0	-	-

En adición de una dosis mayor a 250 mg/L, la muestra torna un color anaranjado, por lo que se concluye que dosis mayores a las mencionadas no funcionan para el proyecto.

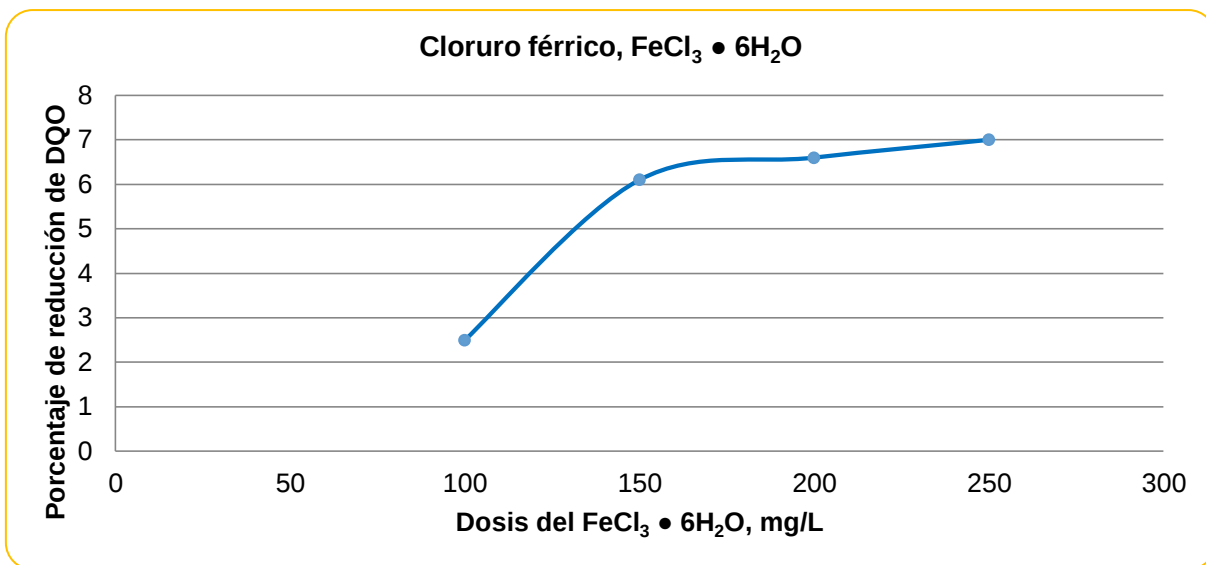


Figura 3. 4 Comparación entre porcentaje de DQO final de la prueba y dosis del cloruro férrico

En la gráfica 3.4, se observa que el comportamiento en la adición de floculante al agua residual es positivo en cuanto a la reducción de DQO, teniendo valores máximos de reducción de 7%.

3.5.1.3 Hidróxido de calcio

En la tercera prueba de jarras se usó hidróxido de calcio al 10%, la dosificación para cada vaso de precipitados se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3. 7 Prueba de jarras con hidróxido de calcio

Dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mg/L	0.0	100	150	200	250	300	400
DQO (mg/L)	621	621	618.3	600.7	589.1	581.4	578
Color (APHA)	40	100	30	30	30	30	30
pH	8.4	9.8	10.4	11.20	11.50	11.50	11.70
Turbiedad (NTU)	40.4	35.41	10.05	9.72	19.71	21.05	28.72
% reducción de DQO	0	0	0.43	3.2	5.1	6.4	7.0

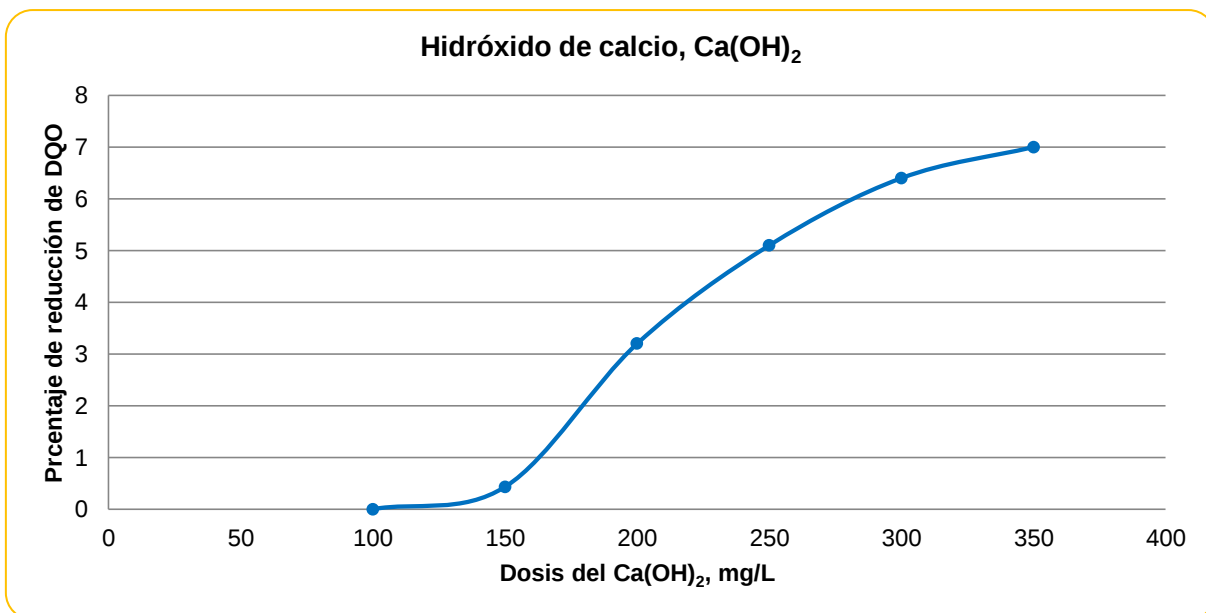


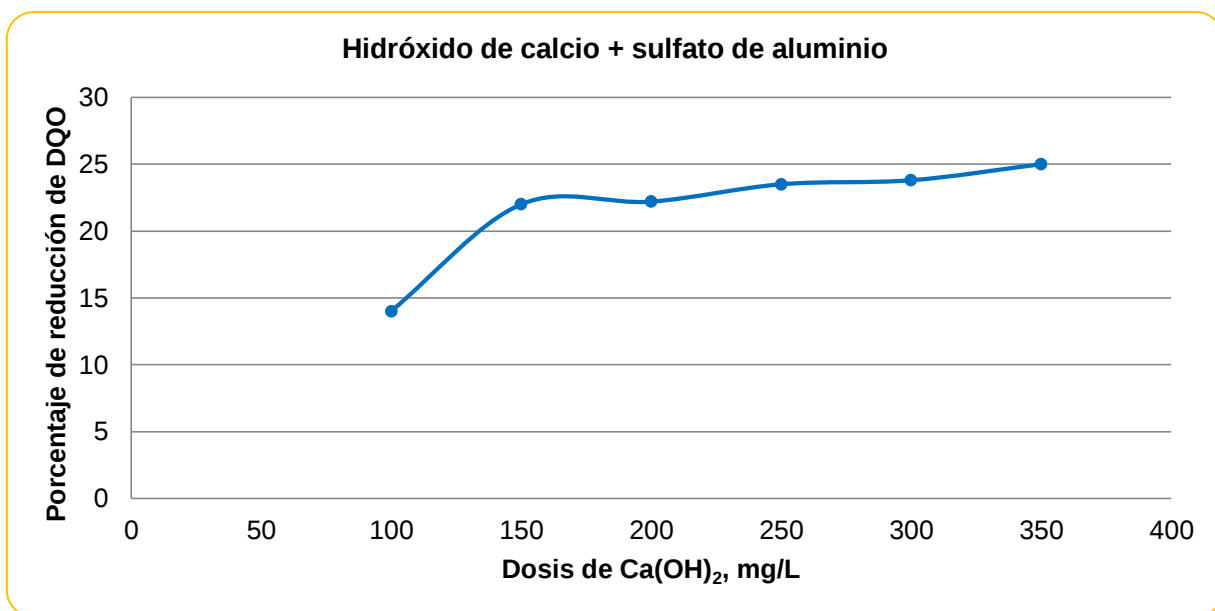
Figura 3. 5 Comparación entre porcentaje de DQO final de la prueba y dosis del hidróxido de calcio

3.5.1.4 Sulfato de aluminio + hidróxido de calcio

Se hizo una prueba con solución de hidróxido de calcio (coagulante 1), seguidamente se adicionó solución de sulfato de aluminio (coagulante 2), la dosis del sulfato de aluminio usada en esta prueba fue la misma en los seis vasos de prueba , ya que se tomó la dosis que arrojó mejores resultados en las pruebas anteriores, se optó por variar solo la dosificación del hidróxido de calcio debido a que el hidróxido de calcio en este caso solo fue usado con la intención de aumentar la alcalinidad del agua, lo que conlleva a desestabilizar las partículas coloidales rápidamente. Las dosis adicionadas se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3. 8 Prueba de jarras con hidróxido de calcio + sulfato de aluminio

Dosis del Ca(OH)_2 , mg/L	0.0	100	150	200	250	300	400
Dosis del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 18 \text{H}_2\text{O}$, mg/L	0.0	400	400	400	400	400	400
DQO (mg/L)	768	660.3	600.0	597.1	587.0	584.7	576.4
Color (APHA)	40	30	30	30	30	30	30
pH	8.7	9.0	9.0	9.17	9.25	9.7	10.3
Turbiedad (NTU)	66	3.05	1.07	1.6	2.08	3.51	3.25
% de reducción de DQO	0	14.02	22.0	22.2	23.5	23.8	25



*La dosis del sulfato de aluminio es constante en cada prueba

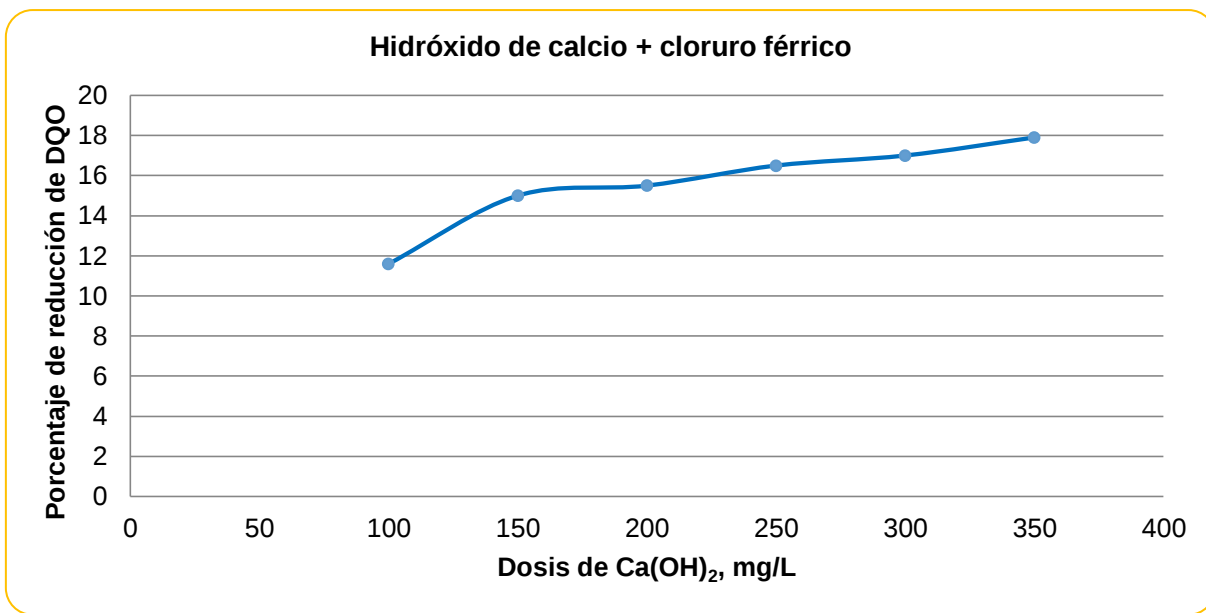
Figura 3. 6 Comparación entre porcentaje de DQO final de la prueba y dosis del hidróxido de calcio + sulfato de aluminio

3.5.1.5 Cloruro férrico + hidróxido de calcio

En esta prueba se combinó hidróxido de calcio (coagulante 1) y seguidamente cloruro férrico. La dosificación usada y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.9; de igual forma, en la primera columna se muestran los datos iniciales de la muestra y posteriormente los obtenidos al final de la prueba.

Tabla 3. 9 Prueba de jarras con hidróxido de calcio + cloruro férrico

Dosis del Ca(OH)_2 , mg/L	0.0	100	150	200	250	300	400
Dosis del $\text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$, mg/L	0.0	150	150	150	150	150	150
DQO (mg/L)	768	678.4	653.0	648.8	640.7	636.8	630.2
Color (APHA)	40	40	40	30	30	30	30
pH	8.7	9.25	9.8	9.8	10.35	11.3	10.9
Turbiedad (NTU)	66	4.13	3.05	2.8	1.6	3.25	3.66
% de reducción de DQO	0	11.6	15.0	15.5	16.5	17	17.9



*La dosis del cloruro férrico es constante en cada prueba.

Figura 3. 7 Comparación entre porcentaje de DQO final de la prueba y dosis del hidróxido de calcio + cloruro férrico

Dos resultados de las pruebas de jarras se asemejaron al porcentaje de reducción de DQO buscado, las cuales fueron las combinaciones de hidróxido de calcio + sulfato de aluminio e hidróxido de calcio + cloruro férrico.

En la tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos del porcentaje de reducción de DQO (como el parámetro con mayor prioridad en la reducción) que se obtuvieron de los dos coagulantes seleccionados como los óptimos para el tratamiento del agua problema.

Tabla 3. 10 Tabla comparativa de coagulantes óptimos

Coagulante	Porcentaje de reducción de DQO					
$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 18\text{H}_2\text{O}$	14.02	22.0	22.2	23.5	23.8	25
$\text{Ca(OH)}_2 + \text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$	11.6	15.0	15.5	16.5	17	17.9

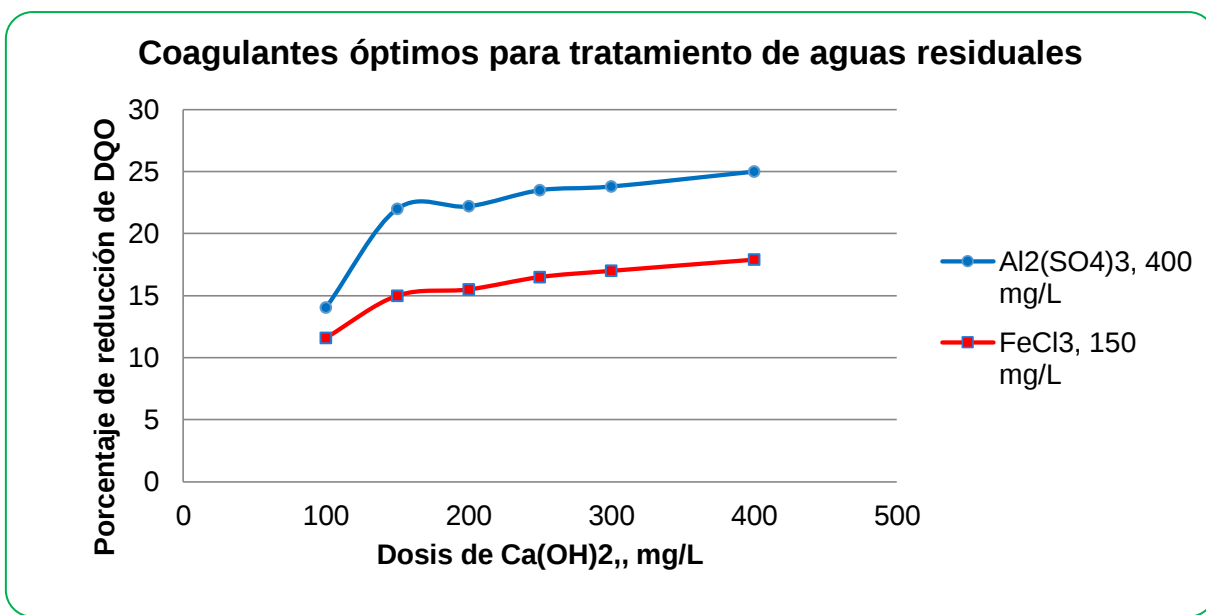


Figura 3. 8 Comparación de coagulantes óptimos

En base a la comparación realizada entre las dos combinaciones de coagulantes óptimo para la reducción de DQO, se puede observar que la combinación de hidróxido de calcio + sulfato de aluminio muestra una reducción máxima del 25% con una dosis de 400 mg/L de hidróxido de calcio + 400 mg/L de sulfato de aluminio y mínima del 15% usando 100 mg/L de hidróxido de calcio + 400 mg/L de sulfato de aluminio. El punto donde se muestra un cambio mayor fue agregando 150 mg/L de hidróxido de calcio + 400 mg/L de sulfato de aluminio, por lo que esta última dosificación fue la que se eligió como dosis óptima ya que se obtuvo reducción del 22%, muy cercana a la máxima obtenida de 25%, pero con una dosis considerablemente menor, de 150 mg/L de Ca(OH)_2 , y un costo menor de reactivo.

Por otra parte, la combinación de hidróxido de calcio + cloruro férrico presentó resultados por debajo de los obtenidos en comparación de la mezcla anterior, obteniendo porcentaje de reducción mínimo del 11.6% en adición de 100 mg/L y 150 mg/L de hidróxido de calcio y cloruro férrico respectivamente y un máximo de 17.9% adicionando 400 mg/L de hidróxido de calcio y 150 mg/L de cloruro férrico. En este caso también se eligió como dosis más adecuada 150 mg/L de hidróxido de calcio y 150 mg/L de cloruro férrico, ya que dio una reducción de 15%, acercándose a la máxima obtenida del 18%.

Ambas concentraciones elegidas de sulfato de aluminio y cloruro férrico fueron sometidas a proceso de oxidación química posteriormente.

3.5.2 Oxidación química

Las pruebas realizadas para llevar a cabo la oxidación del agua y obtener una reducción de DQO, se llevaron a cabo probando dos diferentes oxidantes en las muestras que en el proceso de coagulación floculación se consideraron como óptimas. Los oxidantes considerados para la prueba de oxidación química son peróxido de hidrógeno e hipoclorito de sodio, ambos de grado industrial.

Los resultados obtenidos después del proceso de oxidación se muestran en las tablas 3.11 a 3.14, los cuales son función de, las dosis de oxidante agregado a cada vaso con un volumen de muestra de 500 mL.

3.5.2.1 Peróxido de hidrógeno

Tabla 3. 11 Oxidación con H_2O_2 muestra previamente tratada con $Ca(OH)_2 - Al_2(SO_4)_3 \bullet 18H_2O$

Dosis del H_2O_2 (mg/L)	0.0	25	250	375	500	625	750
Turbidez, NTU	65	9.3	8.8	8.6	7.1	7.3	7.5
Color, APHA	40	30	30	30	30	30	30
pH	9.2	4.07	4.05	4.03	4.0	4.0	4.0
DQO, mg/L	907	1014	1023	1036	1040	1048	1160

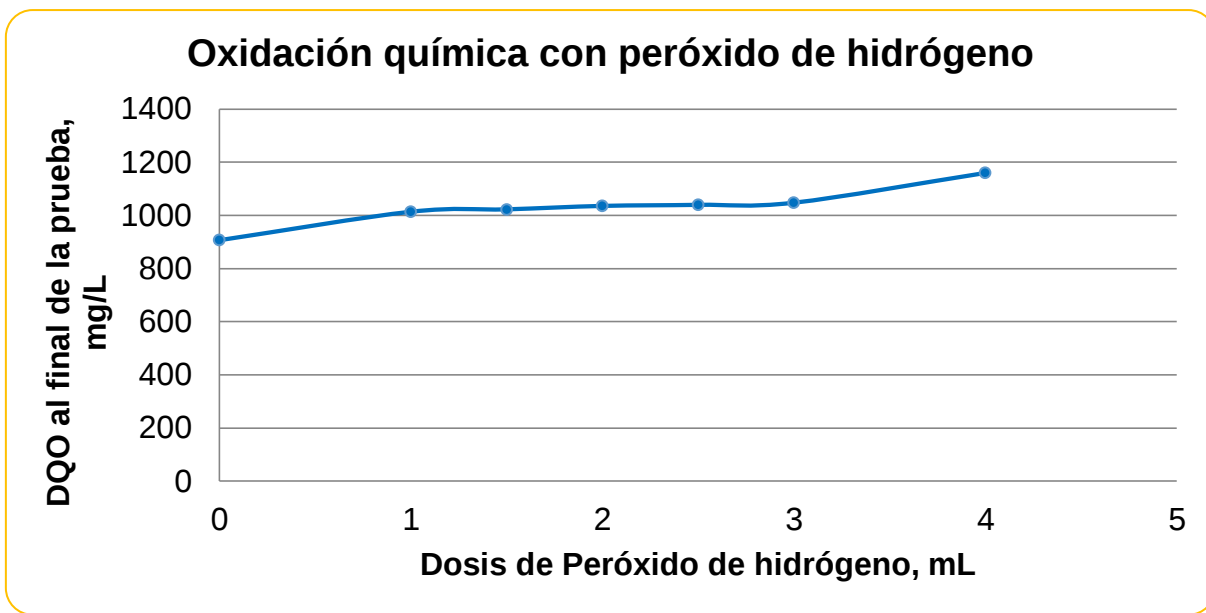


Figura 3. 9 Comparación DQO final de la prueba y dosis del peróxido de hidrógeno (muestra tratada previamente con hidróxido de calcio + sulfato de aluminio)

Tabla 3. 12 Oxidación con H_2O_2 muestra previamente tratada con $Ca(OH)_2 - FeCl_3 \bullet 6H_2O$

Dosis (mg/L)	0.0	125	250	375	500	625	750
Turbidez, NTU	33	4.5	3.2	3.0	3.0	2.8	1.5
Color, APHA	40	30	20	20	20	20	20
pH	7.6	8.7	9.4	9.8	9.85	9.8	9.7
DQO, mg/L	340	954	1008	1236	1547	1785	1979

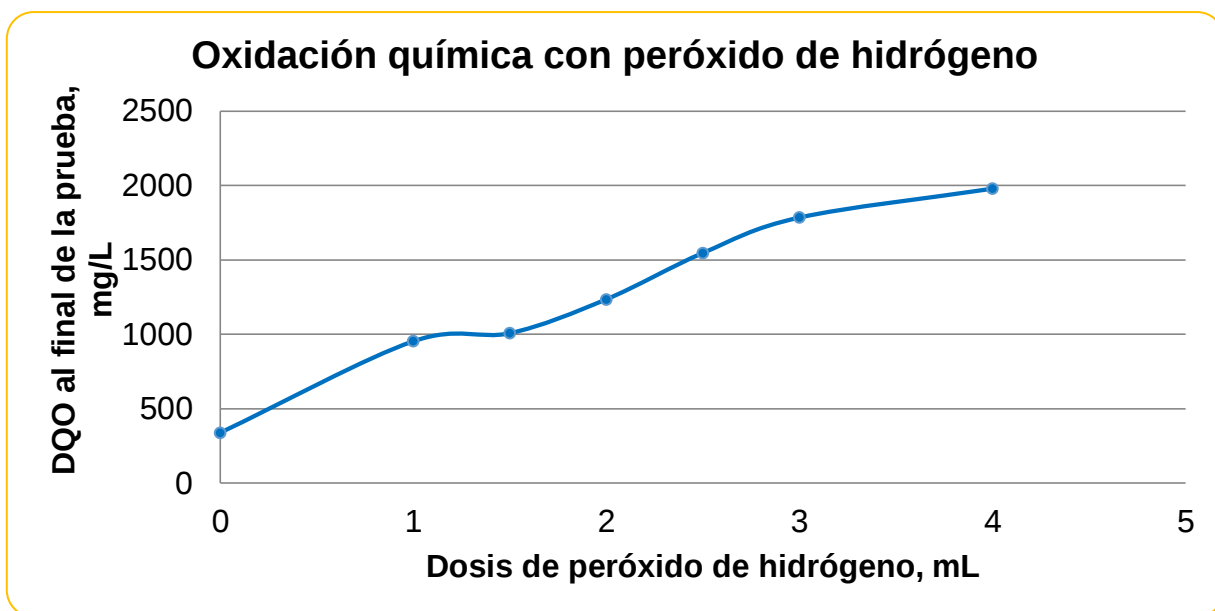


Figura 3. 10 Comparación DQO final de la prueba y dosis del peróxido de hidrógeno (muestra tratada previamente con hidróxido de calcio + cloruro férrico)

3.5.2.2 Hipoclorito de sodio

Tabla 3. 13 Oxidación con NaClO, muestra previamente tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$

Dosis (mg/L)	0.0	130	195	260	325	390	520
Turbidez, NTU	65	2.0	1.9	2.6	2.2	1.7	1.4
Color, APHA	40	20	20	20	20	10	10
pH	9.2	4.03	4.05	4.02	4.0	4.0	4.0
DQO, mg/L	340	254	227	184	176	160	150
% de reducción DQO	0	25.3	33.2	46	48.2	53	56

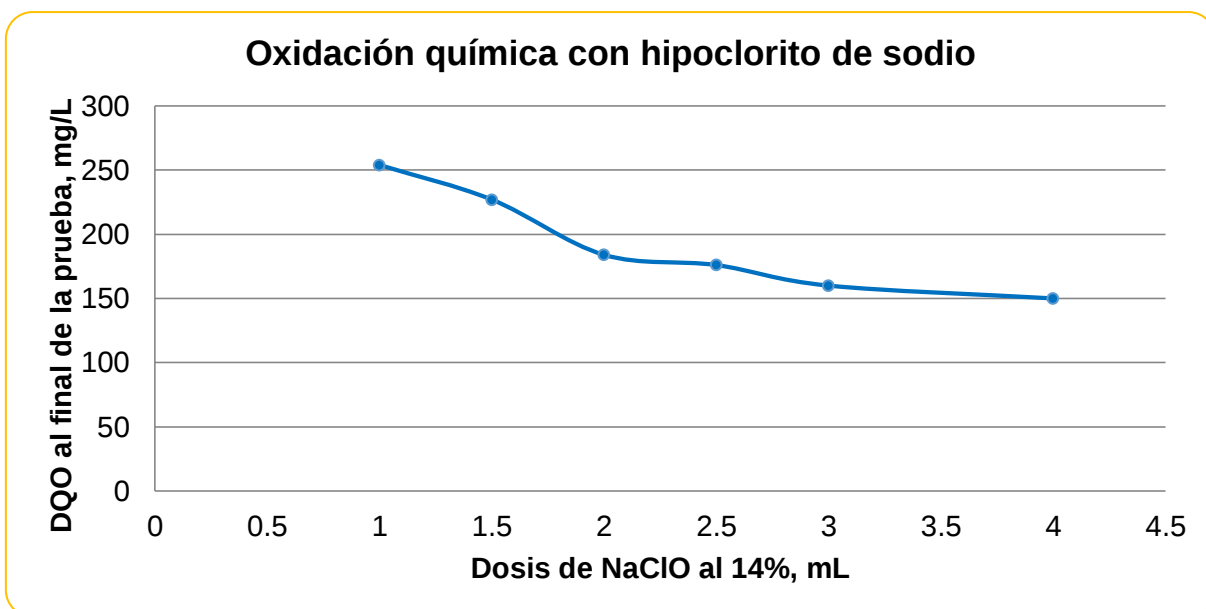


Figura 3. 11 Dosis óptima para oxidación con hipoclorito de sodio (tratamiento previo con hidróxido de calcio + sulfato de aluminio)

Tabla 3. 14 Oxidación con NaClO, muestra previamente tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$

Dosis (mg/L)	0.0	130	195	260	325	390	520
Turbidez, NTU	33	2.7	2.4	1.8	1.7	1.7	1.6
Color, APHA	40	20	20	10	10	10	10
pH	7.6	10.6	10.8	10.7	10.5	10.7	10.8
DQO, mg/L	340	275	240	226	211	200	194
% de reducción de DQO	0	19.1	29.4	33.5	38	41.1	43

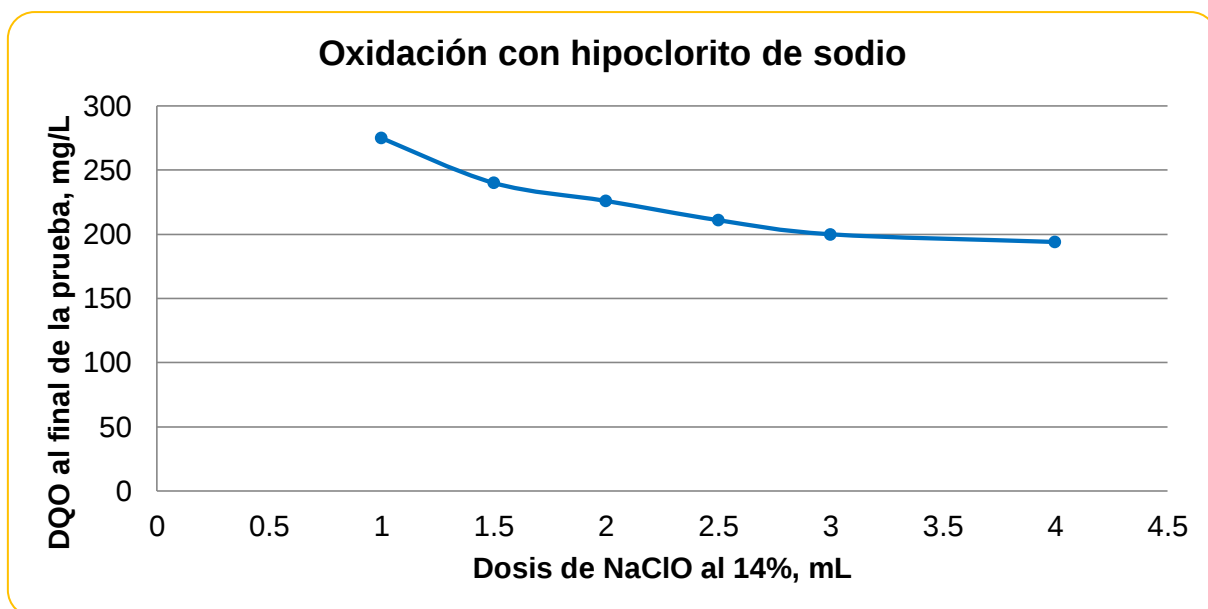


Figura 3. 12 Dosis óptima para oxidación con hipoclorito de sodio (tratamiento previo con hidróxido de calcio + cloruro férrico)

Después de realizar cada una de las pruebas anteriores, se calculó el porcentaje de reducción de DQO de cada una de las pruebas con la finalidad de comparar los resultados y de esta forma poder hacer la elección del oxidante óptimo para el tratamiento.

A continuación se muestra la tabla 3.16 con los porcentajes de reducción de DQO que presentaron las pruebas hechas con peróxido de hidrógeno y con hipoclorito de sodio, posteriormente los datos fueron graficados (figura 3.13), para obtener una relación visual de los resultados.

Tabla 3. 15 Tabla comparativa de oxidantes óptimos

Oxidante	Coagulante	Porcentaje de reducción de DQO					
		125	250	375	500	625	750
Dosis H ₂ O ₂ , mg/L							
Dosis HClO, mg/L		130	195	260	325	390	520
H ₂ O ₂	Ca(OH) ₂ – Al ₂ (SO ₄) ₃ • 14-18H ₂ O	0	0	0	0	0	0
H ₂ O ₂	Ca(OH) ₂ – FeCl ₃ • 6H ₂ O	0	0	0	0	0	0
NaClO	Ca(OH) ₂ – Al ₂ (SO ₄) ₃ • 14-18H ₂ O	25.3	33.2	46	48.2	53	56
NaClO	Ca(OH) ₂ – FeCl ₃ • 6H ₂ O	19.1	29.4	33.5	38	41.1	43

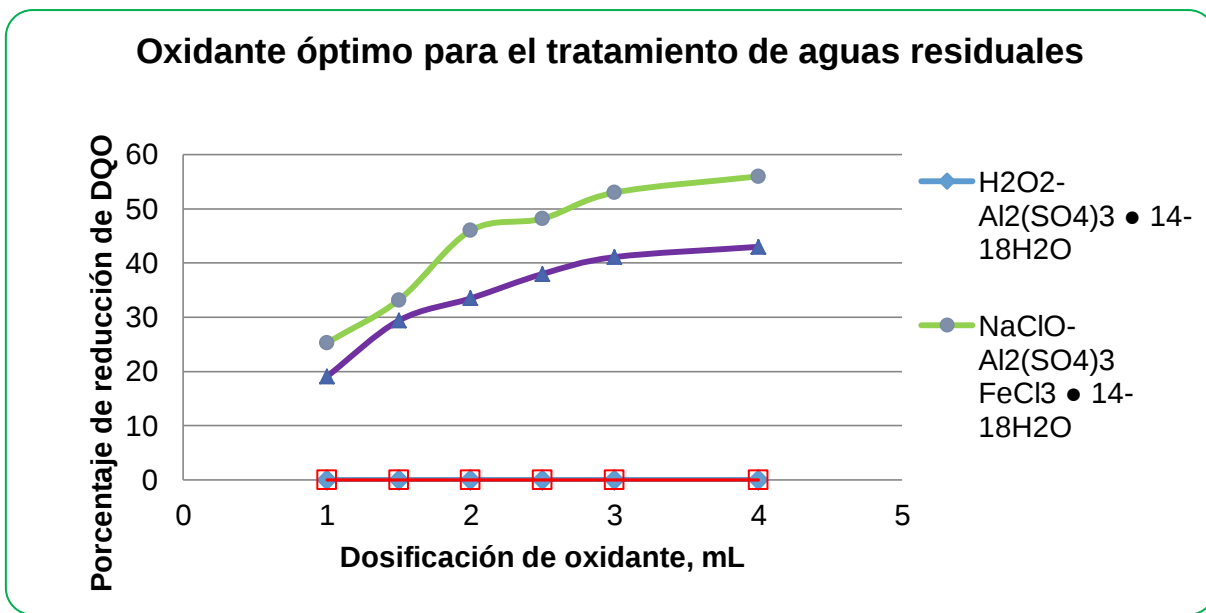


Figura 3. 13 Comparación de oxidantes óptimos

En conclusión, se puede decir que el peróxido de hidrógeno no presentó resultados favorables para la reducción de DQO, sin embargo, la adición de hipoclorito de sodio en combinación con sulfato de aluminio e hidróxido de calcio como tratamiento previo, arrojaron resultados de reducción de hasta un 56 %, aunque los resultados son buenos, el objetivo es reducir la DQO hasta un 70 % como mínimo. Para llegar a dicho valor; se continuó con el proceso de adsorción con carbón activado en polvo.

3.5.3 Adsorción

Concluidas las dos etapas anteriores, se prosiguió a realizar el proceso de adsorción adicionando a la muestra a tratar (cada una con un volumen de 500 mL), carbón activado en polvo como reactivo adsorbente, para lo cual se realizaron 2 pruebas, una de ellas usando la muestra con la que se obtuvieron los mejores resultados (tratamiento previo con hidróxido de calcio-sulfato de aluminio e hipoclorito de sodio) y la segunda (tratamiento previo con hidróxido de calcio- cloruro férrico e hipoclorito de sodio), haciendo una variación de la dosis del carbón activado en cada una de las muestras. Finalmente se compararon los resultados y se obtuvo de esta forma la dosis óptima. Los resultados de las pruebas con carbón activado se presentan en la tabla 3.17 y tabla 3.18, la primera columna muestra la DQO inicial de la muestra y posteriormente la obtenida después de la dosificación.

Tabla 3. 16 Adsorción con carbón activado en polvo, tratamiento previo con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 18\text{H}_2\text{O}$ y NaClO

Dosis del carbón activado (g)	0.0	0.5	1	2	3	4	5
DQO, mg/L	585.12	175	96	76	56.17	40.4	23.4

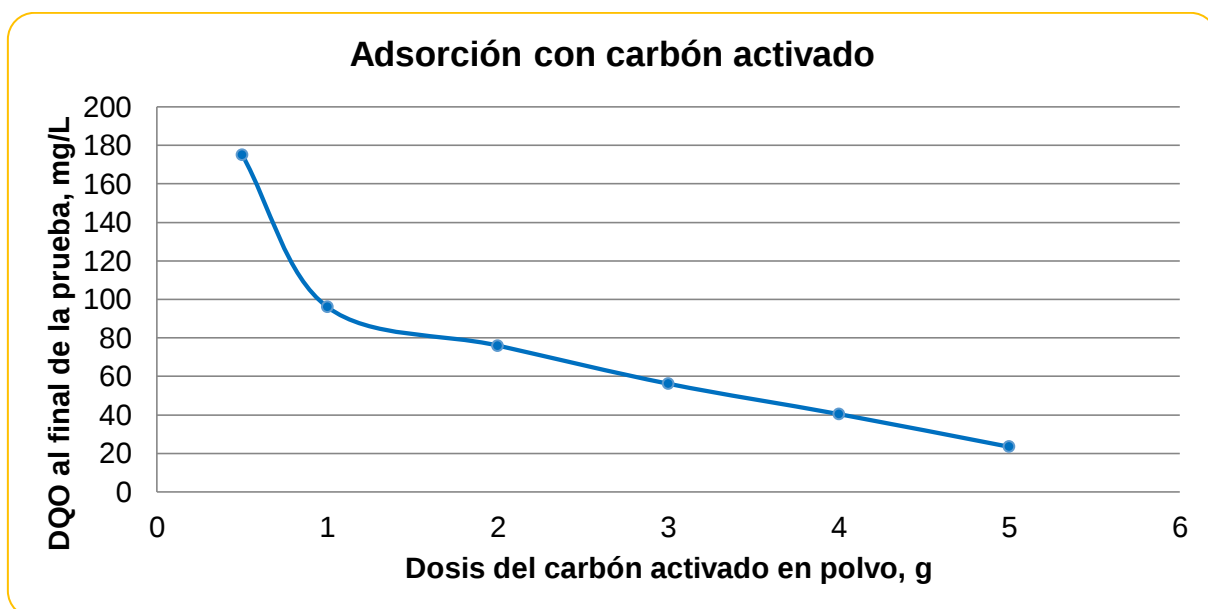


Figura 3. 14 Dosis óptima para carbón activado (tratamiento previo con hidróxido de calcio + sulfato de aluminio e hipoclorito de sodio)

Tabla 3. 17 Adsorción con carbón activado en polvo, tratamiento previo con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - $\text{FeCl}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$ y NaClO

Dosis del carbón activado (g)	0.0	0.5	1	2	3	4	5
DQO, mg/L	585.12	273.2	237.5	221.7	200.7	153.3	126

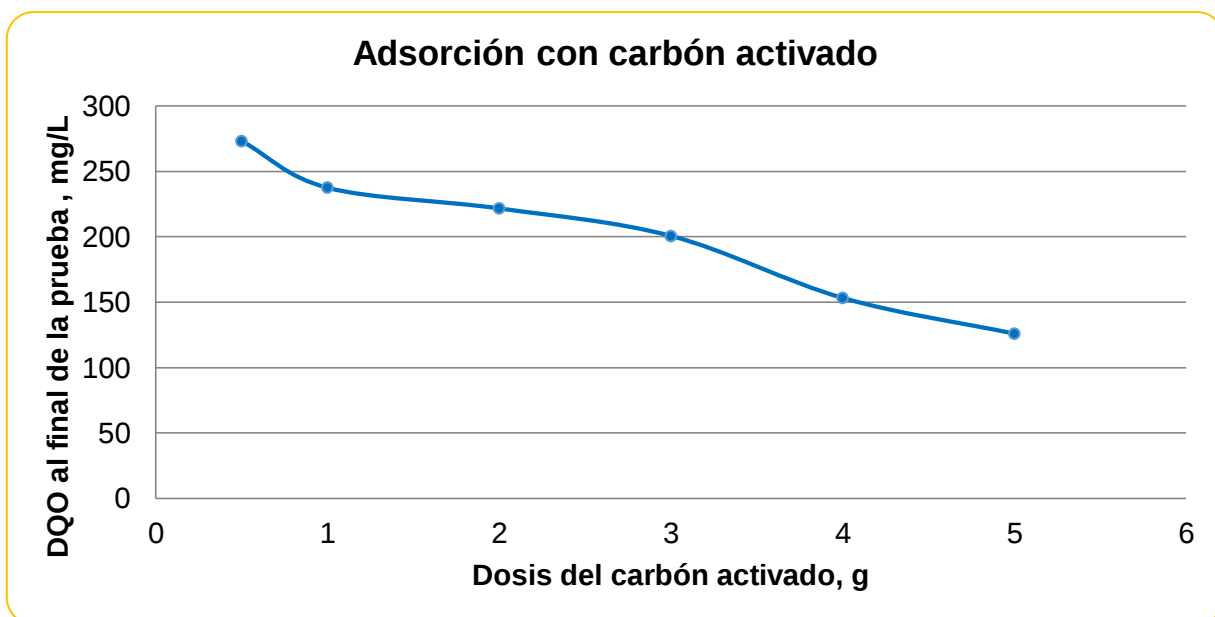


Figura 3. 15 Dosis óptima para carbón activado (tratamiento previo con hidróxido de calcio + cloruro férrico e hipoclorito de sodio)

En la tabla 3.19 se muestran los resultados obtenidos del porcentaje de disminución de la DQO y la dosificación vertida de carbón activado a cada prueba., posteriormente en la figura 3.16, se hace una comparación visual de los resultados obtenido para concluir la dosis óptima.

Tabla 3. 18 Tabla comparativa de carbón activado óptimo

Adsorbente Dosis, g	Coagulante	Oxidante	Porcentaje de reducción de DQO					
			0.5	1	2	3	4	5
Carbón activado	Ca(OH) ₂ – Al ₂ (SO ₄) ₃	NaClO	70.1	83.6	87.0	90.4	93.1	96.0
Carbón activado	Ca(OH) ₂ – FeCl ₃	NaClO	57.3	59.4	62.1	65.7	73.8	78.5

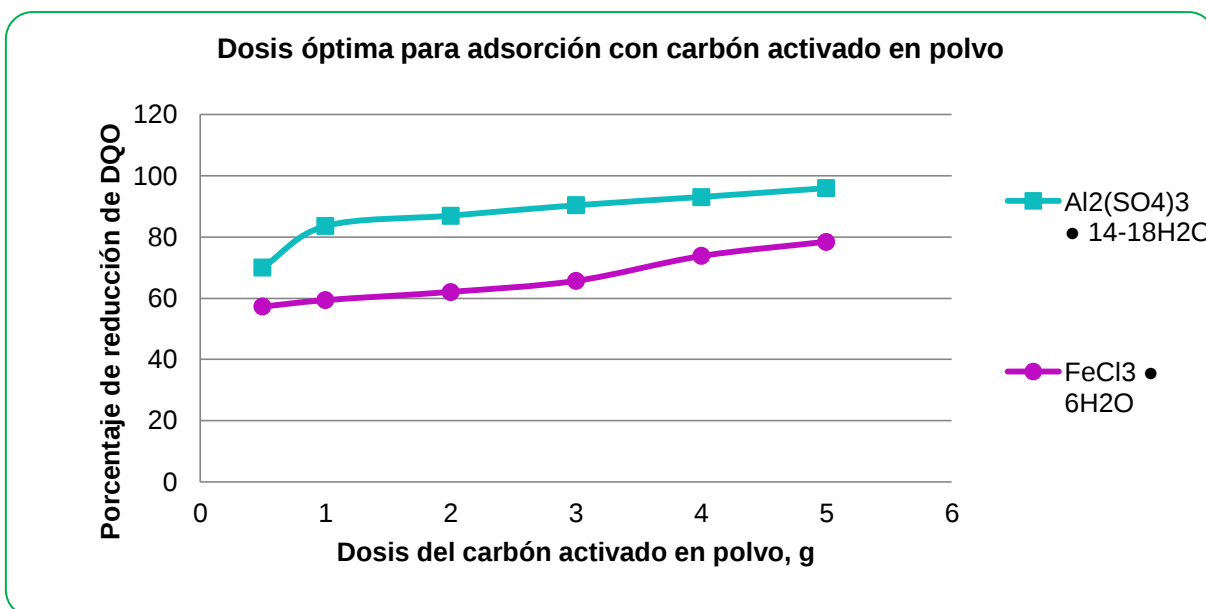


Figura 3. 16 Comparación de dosis óptimas del carbón activado

Se observa reducción de la DQO de hasta un 96% aplicando el tratamiento con hidróxido de calcio-sulfato de aluminio e hipoclorito de sodio como oxidante, y con la adición de 5 g de carbón activado en polvo como tratamiento de refino, por lo que esta prueba fue tomada como referencia para realizar las pruebas posteriores.

3.6 Establecimiento del tren de tratamiento de aguas residuales

Haciendo un análisis comparativo de los resultados obtenidos de los diferentes procesos realizados experimentalmente (coagulación- floculación, oxidación química y adsorción), se tomaron aquellos reactivos que presentaron mejores resultados en dicha experimentación para la reducción de DQO específicamente. La empresa optó por reducir las dosificaciones de cada uno de los reactivos para disminuir costos. A continuación se presenta el tren de tratamiento (figura 3.17) definido como tratamiento para las aguas residuales procedentes de las diferentes secciones de la empresa Organo Síntesis S.A. de C.V.



Figura 3. 17 Etapas de tren de tratamiento definido

Los reactivos, dosis y tiempos de contacto finales para el tratamiento de un litro de agua residual proveniente de la empresa Organo Síntesis S.A. de C.V, se resumen en la tabla 3.19.

Tabla 3. 19 Reactivos, dosis y tiempo de reacción que se establecieron para tratar 1L de agua residual cruda

Reactivo	Dosis mg/L	Tiempo de reacción, min
Hidróxido de calcio, Ca(OH)_2	100	1
Sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \bullet 14-18\text{H}_2\text{O}$	400	1
Poliacrilamida aniónica al 0.1 %	30	5
Hipoclorito de sodio, NaClO	390	30
Carbón activado en polvo	1 g/L	30

Para tratar un litro de agua residual cruda, se adiciona hidróxido de calcio e inmediatamente se agrega sulfato de aluminio ambas en presencia de agitación rápida (100 rpm) aproximadamente. Con el propósito de realizar el proceso de coagulación floculación, posteriormente se reduce la agitación a una agitación lenta (50 rpm) aproximadamente. Posteriormente, se suspende la agitación con la finalidad de agregar la poliacrilamida aniónica usada como floculante y se deja en sedimentación por un tiempo estimado de 30 min. A continuación, el agua clarificada es decantada para continuar con el proceso de tratamiento. La muestra se vuelve a poner a agitación rápida y se agrega el hipoclorito de sodio que actúa como oxidante dejando en contacto con agitación rápida por un tiempo de 30 min. Por último se agrega carbón activado en polvo en agitación rápida por un tiempo de 30 min y posteriormente se realiza una filtración para eliminar las partículas del carbón activado que contiene el agua.

Después de definir el tren de tratamiento, se hicieron pruebas repetitivas del procedimiento de tratamiento del agua residual.

3.7 Agua residual a volumen de 1 L

Después de haber especificado los reactivos, dosis y tiempo de contacto de cada uno en el tratamiento de aguas residuales, se hicieron repetidas pruebas para asegurar la efectividad del tratamiento propuesto, en la tabla 3.21 se muestran los resultados obtenidos de las cinco pruebas realizadas a volumen de 1 L. En la tabla 3.22 se presentan los valores promedio obtenidos para cada parámetro, con la finalidad de comparar los resultados con los valores que especifica la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 3. 20 Características del agua residual inicial y final a volumen de 1 L

Análisis	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Apariencia	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal
Turbidez, NTU	59	0.5	66	0.7	60	0.7	55	0.8	50	0.8
Color V, APHA	30	5	30	5	30	5	30	5	30	5
Olor	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO
pH	9.0	7.0	8.3	7.9	8.1	8.9	9.3	8.2	11.0	8.0
Conductividad, µS	1078	1600	950	1760	1087	1705	1261	1690	1032	1745
Grasas, mg/L	13.3	0.67	15.2	0.7	12.3	0.8	12.7	0.85	10.9	0.88
Sólidos sedimentables, mg/L	<1	0	<1	0	<1	0	<1	0	<1	0
Materia flotante, mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SST, mg/L	60	14	82	15	55	18	79	16	79	17
DQO, mg/L	630	180	705	210	723	220	795	218	698	187
DBO, mg/L	58	18	65	18	78	16	81	20	68	19
BZT, mg/L	16	5	17	6	18	5	18	7	16	7
Tolueno, mg/L	0.7	0	0.8	0	0.9	0	1.3	0	0.8	0
Coliformes fecales, NMP/100 ml	1100	0	900	0	1005	0	730	0	1300	0

Observando los resultados anteriores se puede notar una gran diferencia en algunos parámetros haciendo una comparación del agua residual cruda y la tratada, entre los cambios más destacados se encuentra la apariencia, la turbidez, el color, el olor, pH, grasas, DBO, contenido de BZT, coliformes fecales y sobre todo reducción de DQO.

Tabla 3. 21 Promedio de valores obtenidos a volumen de 1 L vs especificación de la NOM-001-SEMARNAT-1996

Análisis	Promedio parámetro inicial	Promedio parámetro final	Especificación NOM- 001- SEMARNAT- 1996 (P.M)	% de reducción
Apariencia	L turbio	L cristalino	N/A	N/A
Turbidez, NTU	58	0.7	N/A	98.8
Color V, APHA	30	5	N/A	83.3
Olor	Fétido	Inodoro	N/A	N/A
pH	9.1	8.0	5 – 10	N/A
Conductividad, µS	1081.5	1700	N/A	N/A
Grasas, mg/L	12.9	0.78	15	94
Sólidos sedimentables, mg/L	Menor a 1	0	1	100
Materia flotante	Ausencia	Ausencia	Ausencia	N/A
SST, mg/L	71	16	150	77.5
DQO, mg/L	710	203	N/A	71.4
DBO₅, mg/L	70	18.2	150	74
BZT, mg/L	17	6	N/A	64.7
Tolueno, mg/L	0.9	0	N/A	100
Coliformes fecales, NMP/100 mL	1007	0	1000 – 2000	100

Después de promediar los valores obtenidos de la caracterización del agua residual antes y después de aplicar el tratamiento, se realizó una comparación con la normatividad, aquellos parámetros que se encuentran resaltados en la tabla son los aplicables a la normativa a excepción de DQO y contenido de BZT, los cuales se incluyeron debido a que fueron considerados factores importantes en la alteración del efluente natural. Observando los

resultados para contaminantes básicos se puede concluir que en todos los casos se logró la disminución del valor inicial, quedando finalmente dentro de especificación.

3.8 Caracterización de agua residual a volumen de 10 L

Después de realizar cinco repeticiones a volumen de 1 L, se prosiguió a hacer otra serie de cinco repeticiones más, aumentando a un volumen de 10 L, para lo cual se usaron condiciones similares para el tratamiento, por lo que el procedimiento de caracterización fue el mismo que el usado a volumen de 1 L.

En la Tabla 3.22 se muestran los resultados obtenidos de cada una de las cinco pruebas realizadas, a cada muestra se le realizaron análisis antes y después de ser tratada, posteriormente se muestra una tabla adicional (tabla 3.23) donde se realizó un promedio de los cinco resultados previos y finalmente se compararon los resultados obtenidos con los valores que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Haciendo una comparación de los resultados obtenidos en el análisis de los parámetros antes y después de las cinco pruebas de tratamiento a las aguas residuales con volumen de 10 L, se observa que entre cada prueba no existe una variación de resultados significativa, cada una de las pruebas muestra resultados similares, lo que indica que el tratamiento aplicado arroja resultados favorables para llevar a cabo el tratamiento en planta piloto

Obteniendo los resultados del promedio de cada uno de los parámetros analizados y mostrados en la tabla 3.23, se observa que aquellos que presentaron un mayor porcentaje de reducción son: turbidez con una reducción de 98%, grasas y aceites 92%, sólidos sedimentables 100%, DQO 69%, tolueno 98% y coliformes fecales 100%.

Tabla 3. 22 Caracterización de agua residual tratada a un volumen de 10L

Análisis	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Apariencia	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal
Turbidez, NTU	58	1	56	1.5	56	0.9	57	1.1	56	0.8
Color V, APHA	30	5	30	5	30	5	30	5	30	5
Olor	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO
pH	9	7	10	8	9	7.9	11	9	10	8
Conductividad, µS	990	1600	1150	1800	1210	1760	1100	1556	1109	1560
Grasas, mg/L	12	0.8	11	0.9	10	0.7	9	0.8	12	1
Sólidos sedimentables, mg/L	<1	0	<1	0	<1	0	<1	0	<1	0
Materia flotante, mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SST, mg/L	70	23	69	20	80	25	67	22	79	24
DQO, mg/L	650	185	700	200	554	190	710	212	636	190
DBO, mg/L	90	30	136	57	120	61	170	63	112	43
BZT, mg/L	15	5	17	5.9	15	6	17	6.3	16	6.1
Tolueno, mg/L	0.6	0.01	0.7	0.01	0.88	0.02	0.98	0.02	0.8	0.01
Coliformes fecales, NMP/100 ml	1450	0	1300	0	11860	0	1100	0	1390	0

Tabla 3. 23 Promedio de valores a volumen de 10 L y especificación de la NOM-001-SEMARNAT-1996

Análisis	Promedio parámetro inicial	Promedio parámetro final	Especificación NOM-001- SEMARNAT- 1996 (P.M)	% de reducción
Apariencia	Líquido turbio	Líquido cristalino	N/A	N/A
Turbidez, NTU	56.7	1.06	N/A	98
Color V, APHA	30	5	N/A	83.3
Olor	Fétido	NaClO	N/A	N/A
pH	9.8	8.0	5 – 10	N/A
Conductividad, µS	1111	1655	N/A	N/A
Grasas, mg/L	10.8	0.84	15	92.3
Sólidos sedim, mg/L	Menor a 1	Ausente	1	100
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausencia	N/A
SST, mg/L	73	22.8	150	69
DQO, mg/L	650	193	N/A	69
DBO₅, mg/L	125	50.8	150	59.4
BZT, mg/L	16	6	N/A	59.4
Tolueno, mg/L	0.8	0.01	N/A	98
Coliformes fecales, NMP/100 mL	1285	0	1000 – 2000	100

En la tabla 3.24, se hace una comparación de la variación que existe entre los parámetros a volumen de 1 L y 10 L de agua residual tratada

Haciendo una comparación de resultados, se puede observar que la diferencia de tratar 1 L y 10 L de agua residual en condiciones similares resulta mínima, ya que no se observa variación para algunos parámetros como: apariencia, color verdadero, olor, pH, sólidos sedimentables, materia flotante, BZT, tolueno y coliformes fecales, por otro lado se observó una variación del 5% para DQO, obteniendo mejores resultados en el tratamiento de 10 L de agua residual para dicho parámetro.

Tabla 3. 24 Variación de los resultados a volumen de 1 L y 10 L

Parámetro	Promedio volumen de 1 L	Promedio volumen de 10 L	Porcentaje de variación
Apariencia	Líquido cristalino	Líquido cristalino	N/A
Turbidez, NTU	0.7	1.06	51
Color V, APHA	5	5	0
Olor	Inodoro	Inodoro	N/A
pH	8.0	8.0	0
Conductividad, μ S	1700	1655	2.64
Grasas, mg/L	0.78	0.84	7.14
Sólidos sedim, mg/L	Ausente	Ausente	N/A
Materia flotante	Ausencia	Ausente	N/A
SST, mg/L	16	22.8	29.8
DQO, mg/L	203	193	5
DBO ₅ , mg/L	18.2	50.8	64
BZT, mg/L	6	6	0
Tolueno, mg/L	0	0.01	0
Coliformes fecales, NMP/100 mL	0	0	0

3.9 Resultados en planta piloto

Primeramente se realizaron los cálculos adecuados para ajustar la dosificación de los reactivos para un tratamiento con volumen de 2800 L, estos cálculos fueron realizados con las reglas matemáticas, regla de tres, en la tabla 2.25 se muestran las dosificaciones para tratar un litro de agua y posteriormente el ajuste para el volumen especificado.

Tabla 3. 25 Ajuste de dosificación para tratamiento en planta piloto

Reactivo	Dosis para tratar 1L de agua cruda	Dosis para tratar 2800L de agua cruda
Hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$	100 mg/L	280 g/L
Sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	400 mg/L	1120 g/L
Poliacrilamida aniónica	30 mg/L	84 g/L
Hipoclorito de sodio, NaClO	390 mg/L	1092 g/L
Carbón activado en polvo	1 g/L	2800 g/L

Se prosiguió a realizar cinco pruebas en planta piloto a un volumen de 2800 L.

En el anexo B, se presenta el manual de operación para el tratamiento de aguas residuales en planta piloto.

3.9.1 Caracterización del agua residual en planta piloto

Se tomaron muestras al principio y al final de cada una de las cinco pruebas realizadas en planta piloto para realizar análisis fisicoquímicos y caracterizar el agua. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.26. Posteriormente, en la tabla 3.27 se hizo un promedio de los valores obtenidos de los cinco resultados anteriores para poder ser comparados con las especificaciones de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Los resultados capturados en la tabla 3.26, muestran los parámetros que se obtuvieron de las muestras del agua residual antes de ser tratadas en planta piloto y los que se obtuvieron al final del tratamiento, por cada una de las cinco pruebas realizadas.

En cada uno de los parámetros analizados, se muestra una notable diferencia, observando una reducción y/o mejora de dichos parámetros, arrojando resultados dentro de especificación para aguas residuales tratadas de acuerdo a la normatividad.

En la tabla 3.27 se muestran los promedios por cada parámetro analizado antes y después del tratamiento en planta piloto, posteriormente se prosiguió a calcular porcentaje de reducción. Aquellos que muestran mejores resultados son: turbidez con un porcentaje de reducción del 98.1%, grasas y aceites 93.5%, sólidos sedimentables 100%, DQO 66.6%, DBO5 73.5%, BZT 69%, tolueno 93%, Coliformes fecales 100% y nitrógeno total 93.5%.

Tabla 3. 26 Caracterización de agua residual a un volumen de 2800L

Análisis	Prueba 1 y 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Apariencia	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal	Turbio	Cristal
Turbidez, NTU	42.4	2.6	65	0.72	54	0.6	79	0.5
Color V, APHA	30	5	30	5	30	5	30	5
Olor	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO	Fétido	NaClO
Ph	7.6	7	9	7	9	7	8.4	7
Conductividad, µS	536	900	1082	1900	832	1603	1277	1900
Grasas, mg/L	14	0.5	11.1	0.9	13	1	19	1.2
Sólidos sedimentables, mg/L	<1	0	<1	0	<1	0	<1	0
Materia flotante, mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0
SST, mg/L	73	40	56	40	53	43	60	36
DQO, mg/L	746	322	900	361	860	229	885	220
DBO, mg/L	300	31	420	120	220	108	360	84
BZT, mg/L	13	4	15	6	13	5	38	10
Tolueno, mg/L	0.7	0.03	0.6	0.04	0.54	0.06	0.58	0.04
Coliformes fecales, NMP/100 ml	1700	0	1680	0	1610	0	1660	0

Tabla 3. 27 Promedio de valores a volumen de 2800 L y especificación de la NOM-001-SEMARNAT-1996

Análisis	Promedio parámetro inicial	Promedio parámetro final	Especificación NOM-001- SEMARNAT- 1996 (P.M)	% de reducción
Apariencia	Líquido turbio	Líquido cristalino	N/A	N/A
Turbidez, NTU	60.1	1.1	N/A	98.1
Color verdadero, APHA	30	5	N/A	83.3
Olor	Fétido	NaClO	N/A	N/A
pH	8.5	7	5 – 10	N/A
Conductividad, µS	932	1576	N/A	N/A
Grasas y aceites, mg/L	14	0.9	15	93.5
Sólidos sedimentables, mg/L	Menor a 1	0	1	100
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausencia	N/A
SST, mg/L	60.5	39	150	65.5
DQO, mg/L	847	283	N/A	66.6
DBO₅, mg/L	325	86	150	73.5
Contenido de BZT, mg/L	20	6.2	N/A	69
Contenido de tolueno, mg/L	0.6	0.04	N/A	93
Coliformes fecales, NMP/100 mL	1662	0	1000 – 2000	100
Nitrógeno total	123.7	8	60	93.5
Fosforo total	4.85	4.7	0 – 30	3.09
Arsénico	0.0218	0.007	0 – 0.2	65
Cadmio	Menor a 0.043	Menor a 0.02	0 – 0.2	53.5
Cianuro	Menor a 0.02	Menor a 0.02	0 – 2.0	0
Cobre	Menor a 0.2	Menor a 0.1	0 – 6.0	50
Mercurio	Menor a 0.002	Menor a 0.002	0 – 0.01	0
Níquel	Menor a 0.18	Menor a 0.109	0 – 4.0	39.4
Plomo	Menor a 0.05	Menor a 0.05	0 – 0.4	0

3.10 Evaluación de resultados de los diferentes volúmenes probados

Finalmente se hizo una comparación de resultados del agua tratada en los diferentes volúmenes de 1L, 10L y 2800L, comparando los porcentajes de reducción de cada uno de los parámetros, los resultados se muestran en la tabla 3.28, posteriormente estos fueron graficados en barras (figura 3.18) para tener una visualización gráfica de las variaciones que existe entre cada uno.

Tabla 3. 28 Porcentajes de reducción

Parámetro	% de reducción volumen de 1L	% de reducción volumen de 10L	% de reducción volumen de 2800L
Apariencia	100	100	100
Turbidez, NTU	98.6	98	98.1
Color verdadero, APHA	83.3	83.3	83.3
Olor	-	-	-
Grasas y aceites, mg/L	94	92.3	93
Sólidos sedimentables, mg/L	100	100	100
Materia flotante	-	-	-
SST, mg/L	77.5	69	65.5
DQO, mg/L	71	69	66.4
DBO₅, mg/L	74	59.4	58
Contenido de BZT, mg/L	64.4	59.4	59.4
Contenido de tolueno, mg/L	100	98	92
Coliformes fecales, NMP/100 mL	100	100	100

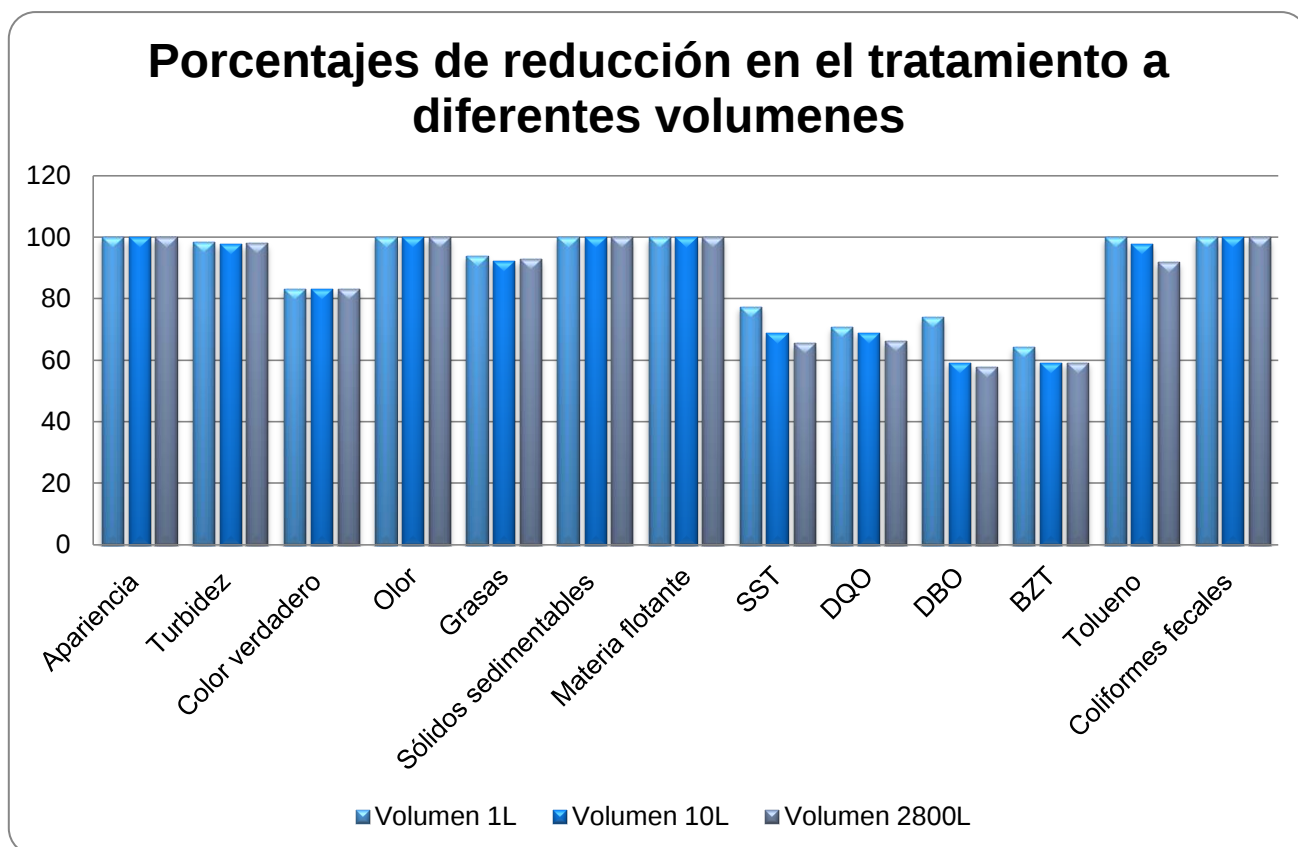


Figura 3. 18 Comparación de resultados de porcentaje de reducción en cada parámetro del agua

De acuerdo a los resultados obtenidos en la figura 3.18, se observa que el agua residual sometida a tratamiento con diferentes volúmenes, no afecta notablemente los resultados ya que en los parámetros de apariencia, turbidez, color verdadero, olor, grasas, sólidos sedimentables, materia flotante, y coliformes fecales no se observa variación. En cuanto a sólidos suspendidos totales, DQO, DBO₅, BZT y tolueno, se presenta una disminución mínima del porcentaje de reducción, a medida que el volumen aumentaba. Observándose en una ventaja en el tratamiento en planta piloto.

3.11 Tratamiento y disposición de lodos

En el estudio de espesamiento y secado de lodos obtenidos del laboratorio, se realizó con un rotoevaporador, donde una muestra de lodos de 500 mL fue vertida en un matraz bola para poder evaporar el agua. Con esto se pudo obtener un aproximado de la cantidad de

humedad que contienen los lodos obtenidos y el peso final de estos. A continuación se muestran los resultados.

3.11.1 Lodos del laboratorio

En este caso solo se muestran tres repeticiones del estudio realizado.

Tabla 3. 29 Humedad de lodos dentro del laboratorio

Muestra	Peso inicial del matraz	Peso final del matraz	Peso de muestra seca	Porcentaje de humedad perdido
1	592 g	599 g	14 g/L	98.8 %
2	485.8 g	500.1 g	28.6 g/L	97.1 %
3	490.3 g	500 g	19.4 g/L	98 %

3.11.2 Lodos de planta piloto

Los tambos de almacenamiento contenían los siguientes pesos de lodos. En la tabla se muestran 10 cifras nombradas como lotes ya que como se hizo mención cada lote de lodos fue almacenado en dos tambos.

Tabla 3. 30 Peso de cada tambo de almacenamiento de lodos de los 5 lotes de prueba en planta

Lote 1	Lote 1	Lote 2	Lote 2	Lote 3	Lote 3	Lote 4	Lote 4	Lote 5	Lote 5
120 Kg	112 Kg	164 Kg	129 Kg	157 Kg	90 Kg	168 Kg	127 Kg	115 Kg	74 Kg

La carga de alimentación (Kg de lodos) en cada centrifugación fueron los siguientes:

Tabla 3. 31 Número de cargas y Kg de lodos cargados a la centrífuga

	Carga 1	Carga 2	Carga 3
Lotes del tratamiento cargados, Kg.	Lote 5: 115.3 Lote 5: 73.90 Lote 4: 168.1 Lote 4: 126.9	Lote 3: 156.9 Lote 3: 90.00 Lote 2: 163.7	Lote 2: 129.0 Lote 1: 120.0 Lote 1: 112.2
Total de lodos cargados. Kg.	484.2	410.6	361.2

Finalmente, se obtuvieron tres bolsas con lodos parcialmente secos con los siguientes pesos, las cuales corresponden a cada una de las cargas de centrifugación realizadas.

Con los resultados obtenidos, se realizó una estimación en porcentaje de la cantidad de pérdida de humedad obtenida, la cual se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 3. 32 Kg de lodos obtenidos al final de la centrifugación y humedad perdida en cada uno

Número de cargas	Kg de masa obtenidos	Porcentaje de humedad perdida
Carga 1	49.8	89.71%
Carga 2	32.4	92.11%
Carga 3	27.2	92.47%

Finalmente, estos lodos fueron entregados al departamento de ecología de la empresa para su disposición.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos con la aplicación del tren de tratamiento propuesto para la depuración del efluente problema con un volumen de agua residual de 1L, se observa que el coagulante y floculante que brinda mayor ventaja en el proceso de tratamiento es con la combinación de 1 g de hidróxido de calcio con 25 g de sulfato de aluminio como coagulantes y 30 mL al 0.01% de poliacrilamida aniónica como floculante. En la etapa de oxidación se observaron resultados favorables con la adición de hipoclorito de sodio al 13% usado como oxidante y finalmente con la adición de 5 g de carbón activado como adsorbente se obtuvieron resultados muy favorables para la depuración de los efluentes, obteniendo resultados de reducción de DQO de hasta el 96% con respecto a la DQO inicial, DBO₅ 73.5% y nitrógeno 93.5%. Cabe señalar que cada uno de los productos usados se apega a las características requeridas de acuerdo a los parámetros establecidos. Siendo este conjunto de productos muy comunes en el mercado, económicos, estables y de fácil manejo y almacenamiento.

Referente a los tres escalamientos realizados, se obtuvo mejor control de los parámetros en una escala a nivel laboratorio en comparación con las pruebas en planta piloto, esto se concluye debido a que se observó cierta variación entre cada uno de los resultados, sin embargo, este margen de error que existe entre cada prueba no es altamente significativa teniendo una variación aproximada del 6% entre cada escalamiento. A pesar de la variación en los resultados, los parámetros obtenidos en cada una de las pruebas se mantuvieron dentro de las especificaciones de la normas NOM-001-SEMARNAT-1996, para la disposición de aguas residuales a ríos y dentro del parámetro de DQO establecido por Conagua específicamente para Organo Síntesis S.A. de C.V.

Finalmente, se concluye que un tratamiento fisicoquímico, específicamente coagulación-fluculación en combinación con oxidación química y adsorción para el tipo de agua residual que se desecha en la empresa es la opción correcta para la depuración de los efluentes, obteniendo resultados óptimos, de bajo costo y sin hacer uso de un gran espacio geográfico dentro de la empresa.

RECOMENDACIONES

Dentro del tren de tratamiento en planta piloto, se observó que en el segundo reactor (reactor de oxidación), solo contaba con recirculación, por lo que se advierte, este pudo ser un factor muy considerable en el proceso de oxidación – adsorción para la reducción del rango de los parámetros problema. Por lo que para futuras pruebas se recomienda reemplazar o agregar un accesorio de aireación o agitación que incite a formar mayor turbulencia para asegurar una buena homogenización del oxidante y adsorbente que es vertido en esta etapa del proceso.

Por otro lado, se observa la producción de gran cantidad de lodos, los cuales contienen aluminio, pudiendo éste ser recuperado y regresado al proceso de coagulación floculación. Por otra parte, el espesamiento de éstos se vuelve demasiado complicado al esperar a que estos sedimenten ya que estos lodos tienen un aspecto poco compacto. Se recomienda investigar a profundidad un método de recuperación de los metales que contienen los lodos y por otra parte optimizar el espesamiento de estos intentando agregar un floculante de lodos que ayude a aglomerar mucho más las partículas formadas y de esta forma eliminar mayor cantidad de agua. Esto ayudaría en gran parte a consumir menor cantidad de energía en el proceso de centrifugación.

Se recomienda separar las aguas residuales domésticas proveniente de los sanitarios, regaderas y comedor, las cuales actualmente se juntan en el cárcamo con el agua proveniente del proceso industrial. Debido a que estas aguas domésticas presentan características dentro de especificación de acuerdo a la norma NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado. Estas por ende podrían ser desechadas al drenaje municipal.

FUENTES CONSULTADAS

Abdessemed D., Nezzal G. & Ben Aim R. (2000). Coagulation-adsorption-ultrafiltration for wastewater treatment and reuse. *Desalination* Vol.131 (307-314).

[https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)90029-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)90029-8)

Aguamarket (2016). Contaminantes del agua, grasas y aceites. Industria del Agua Iberoamericana. Santiago, Chile. Recuperado 07 de junio de 2017 de <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3039>

Ambientum. (2001). Eutrofización de aguas. *Revista ambientum*. Madrid. Recuperado 05 de Junio de 2017 de http://www.ambientum.com/revista/2001_18/2001_18_portadas/main_agua.htm

Bao-Yu Gao, Qin-Yan Yue, Yan Wang., (2007). Coagulation performance of polyaluminum silicate chloride (PASiC) for water and wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*. Vol.56 (225–230). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.02.003>

Berberidou C., Kitsiou V., Lambropoulou D., Antoniadis A., Ntonou E., Zalidis G., & Poullos L. (2016). Evaluation of an alternative method for wastewater treatment containing pesticides using solar photocatalytic oxidation and constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*. Vol. 195, Part 2, (133–139). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.010>

Beteta A., Cañizares P., Rodrigo M., Rodríguez L. & Sáez C. (2009). Treatment of door-manufacturing factories wastewaters using CDEO and other AOPs. A comparison. *Journal of Hazardous Materials* Vol.168 (358–363). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.04>

Borja. (2008). Química orgánica. Detergentes – Tensoactivos. Recuperado el 31 de Octubre de 2017 de <http://quimiorg8.blogspot.mx/2008/10/impacto-ambiental.html>

Carbajo J. (2013). Aplicación de la fotocatálisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂. Universidad Autónoma De Madrid. Madrid.

CECOFI (2001). Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. México.

CECOFI (2001). Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. México.

CECOFI (2001). Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas. México.

CECOFI (2010). Determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas. México.

Cheknane B., Ait Messaoudene N., Naceur M. & Zermane F. (2005). Fluidized bed flocculation-coagulation of seawater from the Algiers area. Desalination Vol.179 (273-280). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.11.073>

Ebrahiem E., Mohammednoor. N., & Mobarki A. (2013). Removal of organic pollutants from industrial wastewater by applying photo-fenton oxidation technology. Arabian Journal of Chemistry. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.06.012>

Felissia, Fernando E, Barboza, Olga M, Bengoechea, Dora I, & Area, María C. (2010). Reducción de la DQO recalcitrante de efluentes de pulpados semiquímicos mediante precipitación química. Revista de Ciencia y Tecnología, (13) Recuperado en 13 de junio de 2017, http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185175872010000100005&lng=es&tlng=es.

Garcés L. (2011). Fotodegradación de aguas residuales coloreadas analizadas mediante las superficies de respuesta. Producción + Limpia, Vol.6, No.1 (50-65).

Garcés L., Mejía E. & Santamaría J., (2004). La fotocátalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, Vol. 1 No.1 (83-92). Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511013>

Gil M., Soto A., Usma J., & Gutiérrez O. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. Producción + Limpia Vol.7, No.2 (52-73). Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>

GilPavas E., Dobrosz I. & Gómez M. (2016). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. Journal of Environmental Management. Vol. 191 (189-197). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.015>

González A. (2014). Manual piragüero 3 - Medición del caudal. Corantioquia. Colombia
Recuperado de [http://piragua.corantioquia.gov.co/piragua/publicaciones/3.Manual Medici%C3%B3n de Caudal.pdf](http://piragua.corantioquia.gov.co/piragua/publicaciones/3.Manual%20Medici%C3%B3n%20de%20Caudal.pdf)

González C. (2011). Monitoreo de la calidad del agua: turbidez. Servicio de extensión agrícola. Puerto Rico. Recuperado el 05 de junio de 2017 de <http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-859/maguaturbidez.pdf>

Goyenola G. (2007). Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. Red Mapsa. Recuperado el 07 de junio de 2017 de http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/Conductividad.pdf

Hanna instruments. (2017). Demanda química de oxígeno. Recuperado el 07 de junio de 2017 de <http://www.hannainst.es/blog/demanda-quimica-de-oxigeno/>

iQuímicas. (2012). Industrias químicas. Definición y clasificación. Recuperado el 25 de Mayo de 2017 de <https://iquimicas.com/industrias-quimicas-definicion-y-clasificacion/>

IQD Invesquia, S.L. (s.f). Procesos de oxidación avanzada. Recuperado el 12 de Junio de 2017 de <http://www.igdinvesquia.com>.

Metcalf & Eddy (1995). Ingeniería de las aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. McGraw Gill. Tercera Ed. España.

Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, (2016). Biocidas. Gobierno de España. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017 de <http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/biocidas/#para1>

Molina C., Machado W., Marquetti F., & Quaia E. (2013). Toxicidad del amonio cuaternario para microorganismos utilizados en el tratamiento biológico anaerobio de efluentes. Avance agroindustrial. Vol. (30), No. (3) (35-37).

Morales O., Morgan J. M. & Gûereca L. P., (2003). Tratamiento de aguas residuales. Escuela de ingeniería de Antioquia. Recuperado el 08 de Junio de 2017 de <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/flujoencanales/residuales/residuales.htm>

Nemerow L. (1977). Aguas residuales industriales. Teorías, aplicaciones y tratamientos. H. Blume Ediciones. España.

Nodal E. (2000). Procesos biológicos aplicados al tratamiento de agua residual. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Vol. 22, No. 4 (52-56). <http://unicesar.ambientalex.info/infoCT/Procesosbiologicoscu.pdf>

Noyola A. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Recuperado el 08 de junio de 2017 de http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf

QuimiNet. (2007). Tensoactivos y su clasificación. Recuperado 01 de Junio de 2017 de <http://www.quiminet.com/articulos/los-tensoactivos-y-su-clasificacion-22143.htm>

Químico técnica industrial S.R.L. (2017). Medición de color. <http://quimicotecnica.com/tip-color-measurement/>

Ramalho R. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverte. España.

Restrepo H. (2009). Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

Rigola M. (1990). Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. Marcombo, Barcelona, España.

Rodríguez, S.; Gauna, L.; Martínez, G.; Acevedo, H. & Romero, C. (2012). Relación del nitrato sobre la contaminación bacteriana del agua. Terra Latinoamericana, vol. 30, núm. 2, (111-119). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.

Sanz Tejedor A., (s.f). La industria de los agentes tensoactivos. Química Orgánica Industrial. Recuperado el 01 de junio de 2017 de <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-10.php>

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2017). Normas mexicanas en materia de agua. <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nmx-agua>

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2012). Leyes federales. México, D.F. <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-agua>

Severiche C., Castollo M. & Acevedo R. (2013) Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Físicoquímicos Básicos en Aguas. Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso. Colombia.

SPENA GROUP. (2016). Tratamiento de aguas residuales en la industria química y la industria de fertilizantes. Perú. Recuperado de <http://spenagroup.com/tratamiento-aguas-residuales-la-industria-quimica-y-fertilizantes/>

Tejero I., Suarez J., Jácome A. & Temprano J. (s.f). Tratamiento de aguas. Ingeniería de obras públicas.

Valdez E. & Vázquez A. (2003). Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales. Fundación ICA, A.C., México.

Wong S., Teng T., Ahmada A., Zuhairi A. & Najafpour G. (2006). Treatment of pulp and paper mill wastewater by polyacrylamide (PAM) in polymer induced flocculation. Journal of Hazardous Materials Vol.135 (378–388).

ANEXO A

A.1

Determinación de sólidos sedimentables (NMX-AA-004-SCFI-2013)

Materiales

- Cono de sedimentación tipo Imhoff
- Bases para conos Imhoff
- Agitador largo
- Reloj o cronómetro

Análisis

1. Se mezcló la muestra a fin de asegurar una distribución homogénea de sólidos suspendidos a través de todo el cuerpo del líquido, teniendo en consideración que el agua se encontrara a temperatura ambiente.
2. Se colocó la muestra bien mezclada en un cono Imhoff hasta la marca de 1 L y se dejó sedimentar 45 min, una vez transcurrido este tiempo se desprendió suavemente los sólidos adheridos a las paredes del cono con un agitador; manteniendo en reposo 15 min más.

A.2 Determinación de grasas y aceites (NMX-AA-005-SCFI-2000)

Materiales

- Cartuchos de extracción de celulosa para Soxhlet
- Papel filtro con tamaño de poro fino
- Embudo Büchner
- Desecador
- Pinzas

Reactivos y patrones

- Hexano (C_6H_{14});
- Suspensión de tierra de diatomeas-silice 10 g/L de agua destilada
- Ácido Clorhídrico (1:1)

Equipo

- Equipo de extracción Soxhlet
- Bomba de vacío
- Estufa eléctrica capaz de mantener 105°C
- Balanza analítica con precisión de 0.1 mg
- Equipo de filtración a vacío
- Potenciómetro
- Rotoevaporador

Análisis

1. Se reguló el pH de las muestras a menor de 2, con ácido clorhídrico 1:1.
2. Se preparó el matraz de extracción introduciéndolo a la estufa a una temperatura de 105°C, dejando enfriar en desecador y pesándolo hasta obtener el peso constante del matraz.
3. Se preparó el material filtrante colocando un papel filtro en el embudo Büchner, se colocó el embudo en un matraz Kitazato y se le agregaron 100 mL de la suspensión de tierra de diatomeas-sílice sobre el filtro, aplicando vacío y lavando con 100 mL de agua.
4. Se transfirió el total de la muestra acidificada al embudo Büchner preparado aplicando vacío hasta que se filtrara el agua por completo midiendo el volumen de la muestra.
5. Con ayuda de unas pinzas, se introdujo el material filtrante a un cartucho de extracción. Limpiando las paredes internas del embudo y el frasco contenedor de la muestra, así como la parte interna de la tapa del frasco con trozos de papel filtro previamente impregnados de disolvente (hexano); se colocaron los trozos de papel en el mismo cartucho.
6. Se dejó secar el cartucho en una estufa a 105°C por un período de 30 min. Transcurrido este período se colocó en el equipo Soxhlet.
7. Se adicionó el volumen adecuado de hexano al matraz de extracción previamente puesto a peso constante y se preparó el equipo Soxhlet. Evitando tocar con las manos el cartucho y el matraz de extracción, para ello se utilizaron pinzas.
8. Se colocó el equipo de extracción sobre la parrilla de calentamiento, controlando la temperatura del reflujo y extrayendo a una velocidad de 20 ciclos/h durante un período de 4 h.

9. Una vez terminada la extracción se retiró el matraz del equipo Soxhlet, y se evaporó el disolvente en un rotoevaporador.
10. El matraz de extracción libre de disolvente se colocó en el desecador hasta que alcanzó la temperatura ambiente.
11. Por último, se pesó el matraz de extracción y se determinó la concentración de grasas y aceites recuperables.

A.3 Determinación de materia flotante (NMX-AA-006-SCFI-2010)

Materiales

- Malla metálica con abertura de 3.3 mm
- Agitador de vidrio con gendarme
- Espátula.

Análisis

1. Se vertió una muestra de dos litros a través de la malla, teniendo cuidado de que la materia flotante que sobrenada, quedara retenida en dicha malla.
2. Se arrastró con agitador hacia la malla toda aquella materia flotante que quedara sobre la superficie de la muestra que se vertía.

A.4 Determinación de pH (NMX-AA-008-SCFI11)

Reactivos

- Agua destilada
- Disoluciones amortiguadoras de pH de referencia

Equipo

- Potenciómetro
- Electrodo de vidrio

Análisis

Para llevar a cabo la calibración del potenciómetro se siguieron las instrucciones del fabricante del equipo.

Medición del pH del agua

- Se utilizó un electrodo de vidrio comercialmente disponible con una membrana de vidrio de baja solubilidad.
- Se sumergió el electrodo y se agitó suavemente, hasta que este se estabilizara para dar la lectura.

A.5 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) (NMX-AA-030-1-SCFI-2012)

Materiales

- Equipo para reflujo, consistente en un matraz de reacción de 250 mL con boca de vidrio esmerilado conectado a un condensador de manera que no tenga pérdidas significativas de material volátil.
- Parrilla de calentamiento, capaz de llevar a la muestra a su punto de ebullición dentro de un periodo de 10 min.
- Bureta clase A.
- Perlas de ebullición.

Reactivos

- Sulfato de mercurio II (HgSO_4)
- Dicromato de potasio 0.0040 mol/L
- Sulfato de plata- ácido sulfúrico
- Sulfato ferroso amoniacal 0.012 N
- Ferroín, disolución indicadora

Análisis

1. Se transfirieron 10 mL de la muestra al matraz de reacción, y se añadieron 0.4 g de sulfato de mercurio (II) junto con 5 mL de la disolución de dicromato de potasio. Se agregaron perlas de ebullición a la porción de prueba (siempre 10 mL) y se mezcló bien.
2. Lentamente se añadieron 15 mL de la mezcla sulfato de plata-ácido sulfúrico e inmediatamente después se insertó el matraz al condensador.
3. Se llevó la mezcla de reacción a ebullición dentro de un periodo de 10 min y se continuó en ebullición por otros 110 min.

4. Se dejó enfriar el matraz y se enjuagó el condensador con una pequeña cantidad de agua destilada. Se separó el condensador y se diluyó la mezcla de reacción a aproximadamente 75 mL dejando enfriar a temperatura ambiente.
5. Se tituló el exceso de dicromato de potasio con sulfato ferroso amoniacal, adicionando 2 gotas de ferroína como indicador.

A.6 Determinación de sólidos suspendidos y sólidos totales (NMX-AA-034-SCFI-2001)

Equipo

- Estufa eléctrica, para operar a 105°C
- Bomba de vacío
- Balanza analítica con precisión de 0.1 mg
- Mufla eléctrica para operar a 600°C

Materiales

- Desecador, provisto con un desecante que contenga un indicador colorido de humedad
- Crisol Gooch de poro fino con adaptador de hule para el equipo de filtración
- Matraz Kitazato de 2 L de capacidad
- Filtro de tamaño adecuado al crisol Gooch utilizado con una porosidad de 2 µm
- Pinzas para crisol
- Guantes para protección al calor

Análisis

Preparación de cápsulas de porcelana para determinación de sólidos totales

1. Las cápsulas se introdujeron a la mufla a una temperatura de 550°C, durante 20 min como mínimo. Después de este tiempo fueron transferidas a la estufa a 105°C aproximadamente 20 min.
2. Se sacaron y se dejaron enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador.
3. Se pesaron las cápsulas y se registraron los datos.
4. Este procedimiento se repitió hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtuvo hasta que no se observó una variación en el peso mayor a 0.5 mg. Se registró como peso G.
5. *Preparación de crisoles Gooch para determinación de sólidos suspendidos*
 1. Se introdujo el filtro en el crisol con la cara rugosa hacia arriba, mojando el filtro con agua para asegurar que se adhiriera al fondo del crisol.

2. Los crisoles se introdujeron a la mufla a una temperatura de 550°C, durante 20 min como mínimo. Después de este tiempo fueron transferidos a la estufa a 105°C aproximadamente 20 min.
3. Se sacó y se dejaron enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador.
4. Se pesaron los crisoles y se repitió el ciclo hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtuvo hasta que no hubo una variación en el peso mayor a 0.5 mg. Este peso fue registrado como G3.

Determinación para sólidos totales (ST):

- Se tomaron 100 mL de muestra y se transfirieron a la cápsula de porcelana que previamente fue puesta a peso constante.
- Se llevó a sequedad la muestra en la estufa a 105°C.
- Trascurrida la evaporación completa se dejó enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y determinar su peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso G1.

$$ST = (G1 - G) / V * (1000\ 000)$$

Determinación de sólidos suspendidos totales (SST):

1. Se midió con una probeta, un volumen de 30 mL de muestra previamente homogeneizada.
2. Se filtró la muestra a través del crisol Gooch preparado anteriormente aplicando vacío, lavando el disco tres veces con 10 mL de agua destilada, dejando que el agua drenara totalmente en cada lavado.
3. Posteriormente se secó el crisol en la estufa a una temperatura de 105°C durante 1 h. se sacó el crisol para dejarlo enfriar en un desecador a temperatura ambiente y determinar su peso hasta que alcanzó peso constante el cual fue registrado como peso G4.

La expresión matemática usada para calcular el contenido de sólidos suspendidos totales de las muestras como sigue:

$$SST = (G4 - G3) * 1000\ 000 / V$$

A.7 Determinación de turbidez (NMX-AA-038-SCFI-2001)

Materiales y equipo

- Turbidímetro
- Celdas de vidrio de cristal incoloro y transparente

Análisis

1. Se encendió el equipo y se dejó estabilizando de acuerdo al manual de operación del equipo.
2. Se enjuagó la celda dos veces con muestra para evitar errores por dilución. Se llenó la celda y se tuvo la debida precaución para que dicha muestra estuviera homogénea y la celda limpia.
3. Se insertó la celda con la muestra por analizar en el orificio del turbidímetro siguiendo las instrucciones del manual de uso para la lectura de turbiedad.

A.8 Determinación de conductividad (NMX-AA-093-SCFI-2000)

Materiales y equipo

- Electrodo para medición de conductividad
- Medidor de conductividad con un error que no exceda $1\mu\text{S}/\text{cm}$.

Reactivos

- Agua purificada

Análisis

1. Se preparó el equipo para su uso de acuerdo a las instrucciones del fabricante seleccionando el electrodo con la constante de celda apropiada para el intervalo de medición en que se usará.
2. Se sumergió la celda en la disolución de prueba, teniendo cuidado de que el nivel de la disolución cubriera los orificios de ventilación de la celda, agitando la celda verticalmente para expulsar las burbujas de aire.
3. Una vez que se estabilizara la lectura, anotar el valor de conductividad.
4. Después de cada determinación, la celda se enjuagaba con agua purificada.

A.9 Determinación de alcalinidad (NMX- AA- 036- SCFI- 2001)

Materiales

- Bureta certificada o calibrada

Reactivos

- Solución indicadora de fenolftaleína
- Solución indicadora de naranja de metilo
- Ácido clorhídrico 0.02 N

Análisis

1. Se transfirieron 100 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, adicionando 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína.
2. Se realizó una titulación con la disolución valorada de ácido clorhídrico (0.02 N) hasta el vire de la fenolftaleína (de rosa a incoloro), registrando los mililitros gastados (alcalinidad a la fenolftaleína).

Nota. Solo se puede determinar la alcalinidad a la fenolftaleína cuando la muestra tiene pH igual o mayor a 8.3.
3. Posteriormente se adicionaron 2 gotas de la disolución indicadora de naranja de metilo y se continuo con la titulación hasta alcanzar el vire del naranja de metilo (de canela a amarillo), alcalinidad total.
4. Se registraron los volúmenes para ambos puntos finales.

ANEXO B

Manual de operación para el tratamiento de aguas residuales en planta piloto

Reactivos

- Hidróxido de calcio, Ca(OH)_2
- Sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Carbón activado
- Hipoclorito de sodio NaOCl
- Poliacrilamida aniónica al 0.1%
- Agua destilada

Preparación de la poliacrilamida al 0.1%

1. Pesar 84 g de poliacrilamida aniónica en polvo
2. Trasferir a un recipiente y agregar 84 L de agua destilada
3. Mantener en agitación vigorosa hasta obtener una mezcla homogénea

Procedimiento en planta

1. Comprobar que todas las válvulas de paso estén debidamente cerradas y verificar que el tanque 1 se encuentre vacío (figura B.1).
2. Abrir la válvula de paso (girar en sentido de las manecillas del reloj) (figura B.2) localizada en el cárcamo para que fluya el agua residual cruda al tanque 1 y dejar fluir 2,800 L de agua cruda para posteriormente cerrar la válvula.
3. Dirigirse a donde se encuentra el control del agitador, presionar el botón negro para dar marcha al motor de agitación (figura B.3)
4. Paulatinamente ir incrementando la velocidad de agitación hasta llegar al 50%.
5. Dirigirse nuevamente al tanque 1 y verter por el orificio 100 mg/L de hidróxido de calcio grado reactivo. Dejar en agitación por un periodo de 1 minuto.
6. Pasado el tiempo, verter por el orificio una concentración de 400 mg/L de Sulfato de aluminio y dejar por 1 minutos en agitación.
7. Concluido el tiempo, reducir la velocidad paulatinamente hasta 2 %.



Figura B.1 Tanque 1 vacío



B.2 Válvula de paso del cárcamo



B.3 Regulador de velocidad



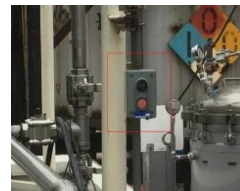
B.4 Agitación lenta

Esperar a que se establezca la velocidad de agitación en el interior del TF-01.

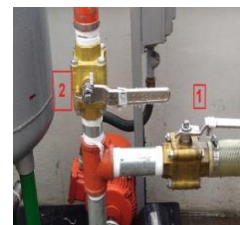
8. Agregar lentamente una dosis de 30 mg/L de Poliacrilamida. Dejar en agitación por 5 minutos (figura B.4).
9. Una vez concluido el tiempo de agitación lenta; disminuir la velocidad hasta 0 y presionar el botón rojo para apagar el motor de agitación. Dejar sedimentar los flóculos por 30 min.
10. Transcurrido este tiempo, abrir la válvula de paso localizada en el TF-01 para dar salida al efluente clarificado (figura B.5)
11. Presionar el botón negro de la botonera 1 localizada detrás del TA-01 (figura B.6) para encender la bomba de flujo que dará bombeo al efluente clarificado (agua) al TD-01. Esperar a que el efluente clarificado se drene completamente.
12. Presionar el botón rojo de la botonera 1 para apagar la bomba de flujo y cerrar la válvula de paso del TF-01.
13. Encender la bomba de recirculación del tanque TD-01 presionando el botón verde localizado sobre la misma bomba.
14. Dosificar por la escotilla del TD-01, 390 mg/ L de hipoclorito de sodio y dejar en recirculación por 30 minutos.
15. Concluido el tiempo, verter 2.8 Kg de carbón activado y dejar en recirculación 30 minutos más.
16. Cerrar la válvula de recirculación (1) y abrir la válvula de paso en dirección al filtro (2) para que el agua fluya hacia éste (figura B.7).
17. Se debe dejar recircular dentro del filtro hasta observar el agua cristalina y transparente. Una vez filtrada el agua, se almacenará en el TA-01.
18. Abrir la válvula de salida del tanque 3 (figura B.8).
19. Drenar toda el agua del tanque, se tomó una muestra para hacer análisis fisicoquímicos y biológicos y el resto fue dirigida a la planta tratadora biológica actual.



B.5 Válvula de paso del efluente clarificado



B.6 Botonera de paso de energía de bombas



B.7 Válvula de recirculación al tanque de oxidación (1), válvula de recirculación al filtro de platos (2)



B.8 Válvula de salida del efluente tratado