

PROPUESTA DE MEJORAMIENTO EN EL PROCESO
DE COAGULACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES
DOMESTICAS EN LA PTAR DEL MUNICIPIO DE
PUERTO GAITÁN META

SAMUEL SANTIAGO GARCIA SANCHEZ

RAFAEL ESTIVEN PALACIOS UNDA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
BOGOTA D.C

2020

PROPUESTA DE MEJORAMIENTO EN EL PROCESO
DE COAGULACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES
DOMESTICAS EN LA PTAR DEL MUNICIPIO DE
PUERTO GAITÁN META

SAMUEL SANTIAGO GARCIA SANCHEZ

RAFAEL ESTIVEN PALACIOS UNDA

Proyecto integral de grado para optar por el título
de ÍNGENIERO QUÍMICO

Director
Felipe Correa Mahecha
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
BOGOTA D.C

2020

Orientador.

Jurado1.

Jurado2.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejo Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLES

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingeniería

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería de Química:

Dr. IVAN RAMIREZ MARIN

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres BLANCA UNDA y RAFAEL PALACIOS, los principales cimientos sobre los cuales pude apoyarme para alcanzar esta etapa de mi vida, sin ellos no existiría un mañana para mí.

RAFAEL PALACIOS UNDA

DEDICATORIA

A mis padres los cuales me apoyaron en todo momento durante mi vida universitaria.

A mi hermana por su apoyo incondicional

A mis amigos por acompañarme durante estos años

SAMUEL GARCÍA SÁNCHEZ

AGRADECIMIENTOS

A nuestro Director Felipe Correa Mahecha por su acompañamiento, sus consejos, asesorías, y seguimiento desde el comienzo hasta la finalización de este trabajo, a él siempre agradecido.

Al ingeniero Harvey Milquez Sanabria por su orientación y colaboración en la realización del trabajo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	20
1.MARCO REFERENCIA	21
1.1 MARCO TEÓRICO	21
1.1.1 Puerto Gaitán	21
1.1.2 Tratamiento de aguas residuales	21
1.1.3 Pre-tratamiento	21
1.1.4 Tratamiento primario	22
1.1.5 Tratamiento secundario	29
1.1.6 Tratamiento terciario	31
1.2 MARCO LEGAL	31
1.2.1 Constitución política	31
1.2.2 Recurso agua	32
1.2.3 Normas técnicas	33
2. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DE LA PTAR	35
2.1 METODOLOGÍA DIAGNÓSTICO	35
2.2 GENERALIDADES	37
2.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	38
2.4 SISTEMA DE TRATAMIENTO	38
2.5 COMPONENTES DEL SISTEMA	39
2.5.1 Procesos y operaciones unitarias.	39
2.6 INSPECCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PTAR	40
2.6.1 Pre-tratamiento	40
2.6.2 Tratamiento primario	43
2.6.3 Tratamiento secundario	50
2.7 MONITOREO FÍSICOQUÍMICO DEL VERTIMIENTO	50
2.7.1 Parámetros a evaluar.	50
2.7.2 Caracterización del agua residual doméstica	51
2.7.3 Porcentaje remoción de parámetros críticos	53
2.7.4 Análisis de resultados	55
3. REDUCCIÓN DE COSTOS EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN	57
3.1 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE COAGULANTES	57
3.1.1 Requerimientos de la empresa.	59
3.1.2 Revisión bibliográfica	59

3.1.3 Coagulantes y floculantes empleados en el tratamiento de aguas residuales	59
3.1.4 Criterios de selección	66
3.1.5 Ponderación de los criterios	68
3.1.6 Matriz de selección	69
3.2 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DOSIS O RANGO DE DOSIS FACTIBLES DE COAGULANTES	72
3.2.2 Revisión de los parametros de entrada de las aguas residuales estudiadas	74
3.2.3 Referentes seleccionados	75
3.2.8 Selección de coagulante y su rango de dosis factible	87
4. ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA PLANTA	89
4.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN	89
4.2 FLUJO DE COAGULANTE	89
4.3 SST, DQO Y DBO5	89
4.4 COSTOS DEL TRATAMIENTO	90
4.5 BALANCE DE MATERIA	90
5. ANÁLISIS FINANCIERO	94
5.1 COMPARACIÓN DE COSTOS ACTUALES CON LOS DE LA PROPUESTA	95
5.2 FLUJOS DE CAJA E INDICADORES FINANCIEROS	97
5.2.1 Flujo de caja sin proyecto	97
5.2.2 Flujo de caja con proyecto	98
5.2.3 Flujo de caja diferencial	98
6. CONCLUSIONES	101
7. RECOMENDACIONES	103
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Metodología diagnóstica empleada por PÉREZ, S y CABEZAS, D.	36
Figura 2. Diagrama de Procesos e Instrumentación P&ID.	37
Figura 3. Pozo de Cribado	40
Figura 4. Bombas Marca PEDROLLO MC 30/50	41
Figura 5. Desarenador	42
Figura 6. Canastillas de Retención de Finos.	43
Figura 7. Trampa de Grasas, Digestores, Sedimentador, Filtro Lento y Tanque de Retrolavado.	44
Figura 8. Sopladores	45
Figura 9. Bombas de Dosificación	46
Figura 10. Sintetizador del ión ferrato (FeO_4) ²⁻ y cloro gaseoso para la oxidación - coagulación	48
Figura 11. Separador Hidrociclónico de Lodos	49
Figura 12. Bombas de dosificación de hipoclorito de sodio	50
Figura 13. Metodología empleada para la selección de coagulantes por CAÑÓN B, L	58
Figura 14. Metodología para la revisión y selección de referentes empleada por CAMPO, M y TOBAR, C.	73
Figura 15. Metodología Análisis Financiero empleada por de PÉREZ, J y GUZMÁN, F	94

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Reporte resultados de caracterización	53
Tabla 2. Porcentajes remoción	54
Tabla 3. Cargas contaminantes	55
Tabla 4. Comparación resultados con la normatividad para vertimientos a cuerpos de agua	55
Tabla 5. Matriz de selección de los coagulantes.	70
Tabla 6. Referentes escogidos para la selección de los rangos factibles de dosificación en la PTAR de Puerto Gaitán.	75
Tabla 7. Referentes escogidos con condiciones similares	76
Tabla 8. Comparación de las dosis óptimas de coagulantes y la remoción correspondiente de DQO y SST para cada referente.	87
Tabla 9. Valores calculados a partir del balance de materia	92
Tabla 10. Precios alternativas	92
Tabla 11. Parámetros de coagulantes en PTAR	93
Tabla 12. Precio de insumos a partir de la dosis óptima	95
Tabla 13. Resumen costos proyecto	96
Tabla 14. Flujo de caja diferencial	99

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Valores de pH para entrada y salida del sistema durante 24 horas del día realizado entre el 16 y 17 de noviembre de 2018.	51
Gráfico 2. Valor caudal para entrada y salida durante las 24 horas del día, realizado entre el 16 y 17 de noviembre de 2018.	52
Gráfica 3. Condiciones del afluente de los referentes consultados comparados con las condiciones del afluente de la PTAR de Puerto Gaitán.	74
Gráfica 4. Remoción de SST vs Zona (Rango de Dosis de FeCl_3) mediante el test de jarras de la muestra tomada en la PTAR de CAÑAVERALEJO, Colombia.	77
Gráfica 5. Remoción de DQO vs Zona (Rango de Dosis de FeCl_3) mediante el test de jarras de la muestra tomada en la PTAR de CAÑAVERALEJO, Colombia.	79
Gráfica 6. Remoción de DQO y SST vs Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ mediante el test de jarras de la muestra tomada en la PTAR San Giovanni (Nápoles, Italia).	81
Gráfica 7. Remoción de DBO5 Y DQO vs Dosis de PAC para la PTAR mediante el test de jarras de la muestra tomada en la PTAR de Huangshi(China).	82
Gráfica 8. Remoción de SST Y DQO vs Dosis de FeCl_3 para la PTAR mediante el test de jarras de la muestra tomada en la EDAR de Zhongyuan (China).	84
Gráfica 9. Remoción de DQO y SST vs Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ mediante el test de jarras de la muestra tomada en la EDAR de Zhongyuan (China).	85
Gráfica 10. Remoción de DBO5, SST Y DQO vs Dosis de PAC para la PTAR mediante el test de jarras de la muestra tomada en la EDAR de Zhongyuan (China).	86

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Tipos de floculantes	26
Cuadro 2. Características de la bomba	41
Cuadro 3. Clasificación polielectrolitos más utilizados.	62
Cuadro 4. Características de los coagulantes más empleados en el tratamiento de potabilización de agua.	63
Cuadro 5. Rango óptimo de pH para cada coagulante	66
Cuadro 6. Calificación en la matriz de selección.	68

GLOSARIO

AGUA RESIDUAL: es un líquido que ha sido utilizado en actividades de producción modificando sus características, propiedades y calidad.

COAGULACIÓN: consiste en desestabilizar las micelas o coloides que tienen iones generadores de cargas electrostáticas superficiales, de manera que se anulan las cargas, las micelas se aglomerarían y la mayor densidad de estos aglomerados se sedimentan, donde el coloide se coagula

COAGULANTE: producto químico que se le añade a las aguas residuales para la neutralización de las cargas de las micelas.

DBO₅: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) es la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aerobias o anaerobias facultativas: Pseudomonas, Escherichia, Aerobacter, Bacillus), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra.

DESARENADOR: es una variante del desarenador convencional, empleado en grandes instalaciones depuradoras. En este tipo de canales aireados además de remover las arenas y otras partículas de peso específico similar, se retirarán también grasas, aceites, espumas y otro material flotante que pueden causar interferencia en los tratamientos posteriores y que, incluso, podrían promover la aparición organismos filamentosos causantes del bulking, que es donde se genera una mala sedimentación de los flóculos del fango activo en los reactores biológicos.

DQO: la demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias, es decir, en una muestra de agua bajo parámetros específicos de agente oxidante, temperatura y tiempo

EFLUENTE: son las descargas residuales derivadas de distintos vertidos originados por distintos usos del agua industrial como lavados de áreas de producción, lavados de equipos de producción y procesos de elaboración de productos.

FLOCULACIÓN: se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas en partículas floculantes, flóculos o flocs; es el proceso por el cual, una vez desestabilizados los coloides, se provee una mezcla suave de partículas para incrementar la tasa de encuentros o colisiones entre ellas sin romper o disturbar los agentes pre- formados.

FLOCULANTE: producto químico que aglomera las partículas coaguladas mejorando las características de sedimentación de los sólidos en suspensión, después del proceso de coagulación.

MATERIA ORGANICA: son compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Las estructuras básicas están formadas de proteínas, carbohidratos, lípidos y azúcares.

METODOS DE TRATAMIENTO: son aquellos tratamientos en los que predominan fenómenos físicos, químicos y/o biológicos para la descontaminación de las aguas residuales.

NEUTRALIZACIÓN: es la adición de un álcali o un ácido a un residuo, para obtener un rango de pH cercano a 7.0, se usa para proteger fuentes receptoras de descargas alcalinas o acidas, o para permitir el pos tratamiento de dichos residuos.

NTU: es la abreviación de Nephelometric Turbidity Unit, y es la unidad en la que se mide la turbidez de un fluido o la presencia de partículas en suspensión en el agua, cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá esta y más alta será la turbidez.

NORMATIVIDAD AMBIENTAL: conjunto de normas que establecen reglas o leyes que hace posible la relación del hombre con el ambiente.

PARÁMETROS DEL AGUA: es el conjunto de datos imprescindibles en la caracterización del agua residual y son orientados para evaluar o valorar el estado del agua; éstos se miden con métodos estandarizados para asegurar la precisión y exactitud de los valores obtenidos

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR): es una instalación que contiene una serie de tratamientos para el agua residual de una empresa a la que se le retiran contaminantes para obtener agua de buena calidad que no afecte la salud y al medio ambiente al ser vertida en los cuerpos receptores de agua.

SEDIMENTACIÓN: operación por la cual se remueven las partículas sólidas de una suspensión mediante la fuerza de gravedad, en algunos casos se denominan clarificación o espesamiento. Entre las formas de sedimentación usadas en la purificación del agua se encuentran la sedimentación simple y sedimentación después de coagulación y floculación o ablandamiento.

RESUMEN

En este trabajo de grado se desarrolla una propuesta para la reducción de costos en el proceso de coagulación-floculación, mediante una investigación y revisión bibliográfica de diferentes estudios consultados principalmente en SCIEDIRECT, SCIELO, EMERALD PUBLISHING y ELSEVIER donde se llevó a cabo el mejoramiento de estos procesos. Inicialmente se realizó una investigación exhaustiva en la cual se tomaron en cuenta diferentes aspectos, tales como el tipo de agua residual, contaminantes específicos, concentración de DQO, DBO₅ y SST, con estos parámetros se escogieron coagulantes que fueran eficaces en el tratamiento de ARD, evaluando la capacidad de remoción de contaminantes de cada uno de estos coagulantes, así como la dosis o rango de dosificación donde se presente los mejores resultados a nivel del proceso y económico. Luego de la consulta bibliográfica se escogieron los coagulantes sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio, ya que presentaron las mejores tendencias en la remoción de los contaminantes DQO y SST, dentro de estos se escogió finalmente el policloruro de aluminio (PAC) como el mejor candidato por su alta tasa de remoción, así como su excelente sedimentación de materia orgánica y en suspensión a bajas dosificaciones, evidenciando que en un rango de dosificación de 30 a 35 mg/L se alcanzan remociones de 78% y 94% para el DQO y SST respectivamente.

Finalmente se evaluó la rentabilidad económica de la propuesta mediante un análisis financiero, y según los resultados a partir del estudio realizado y el caudal de entrada a la planta, el costo del tratamiento de coagulación-floculación empleando el PAC con una dosis entre 30-35 mg/L, el costo total operacional oscila entre \$ 10 263 000 - \$ 11 970 000 al mes, mientras que el costo actual del tratamiento empleando cloruro férrico con una dosis de 40 mg/L es de \$ 13 066 000 al mes. Por medio de los indicadores financieros se determinó que el proyecto es económicamente viable debido a que el valor presente neto es positivo y la relación beneficio/costo fue mayor a 1.

Palabras clave: PTAR, aguas residuales domésticas, coagulación, policloruro de aluminio, DQO y SST.

INTRODUCCIÓN

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Puerto Gaitán hace parte del plan de saneamiento básico que se implementa para conservar y mejorar la calidad del agua del río Manacacías, debido a que este cuerpo de agua superficial se encarga de recibir el efluente tratado en la PTAR. La planta fue diseñada para una capacidad de 60 L/s, la cual no se cumple actualmente debido a los constantes mantenimientos y limpieza de los canales de clarificación primaria por la colmatación que se forma en ellos, por estos motivos la empresa tiene que dirigir parte de su presupuesto de funcionamiento en los procedimientos de mantenimiento generando redirección de estos recursos a esta área y discontinuidad en el proceso de clarificación debido a actividades de limpieza no planeadas de los canales colmatados (los datos de los costos de actividades de mantenimiento no fueron suministrados debido a la confidencialidad de los mismos por parte de la empresa PTAR Puerto Gaitán), por tal razón se propuso en conjunto con los directivos de la empresa PTAR Puerto Gaitán generar una propuesta en la cual se proyecte disminuir el presupuesto en el tratamiento primario para reducir parte de los recursos que se dirigen a esta etapa del tratamiento y poder contar con mayor presupuesto para las actividades de mantenimiento, todo esto mediante una alternativa que genere un ahorro en la clarificación primaria específicamente en el proceso de coagulación-floculación, ya que este es uno de los procesos que mayor demanda tiene de recursos en insumos para el tratamiento químico (encargado de la remoción principalmente de los contaminantes DBO_5 , DQO y SST), con un gasto mensual promedio de coagulante cloruro férrico (FeCl_3 al 40%) de \$ 13 066 000.

El agua residual doméstica (ARD) proveniente del alcantarillado del municipio está compuesta principalmente por material orgánico, sólidos y grasas, por tal motivo hay que tratar el agua para poder ser vertida dentro de los parámetros mínimos de emisión para este tipo de fuente receptora. Por lo tanto, en este trabajo se pretende abordar la problemática partiendo de un diagnóstico general a los procesos que lleva a cabo la PTAR, realizando un análisis de la información encontrada e identificar falencias o problemas en los mismos, con esto último describiendo el estado actual de las operaciones dentro de la PTAR.

El propósito principal de este proyecto es encontrar una alternativa diferente del coagulante cloruro férrico empleado en el tratamiento primario y/o proponer una reducción de este, para reducir la cantidad de este insumo necesario para los procesos de coagulación-floculación, con esto teniendo menos gastos que van dirigidos a esta etapa del tratamiento. Se buscan los insumos de coagulación más aptos desde la perspectiva química y económica para tratar el agua cruda a partir de las condiciones de operación y de la caracterización fisicoquímica más reciente suministrada por la empresa. De esta forma se establece la mejor alternativa con su respectivo rango de dosis por medio de una robusta revisión bibliográfica donde los referentes analizados estudien aguas con características similares y así encontrar mayores remociones o mantener las actuales en los parámetros críticos

a evaluar tales como DQO, DBO₅, y SST para cumplir con el objetivo de vertimiento y la reducción de los costos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para el mejoramiento y reducción de costos en el proceso de coagulación-floculación de las aguas residuales domésticas (ARD), en la PTAR del municipio de Puerto Gaitán (Meta).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar el diagnóstico del funcionamiento actual de las operaciones en la planta de tratamiento.
2. Determinar la dosis óptima de los coagulantes en el proceso de coagulación y floculación mediante una revisión bibliográfica.
3. Desarrollar el análisis financiero de la propuesta planteada.

1. MARCO REFERENCIA

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Puerto Gaitán. El municipio de Puerto Gaitán fue fundado el 11 de febrero de 19321 , se encuentra ubicado en el oriente del país más específicamente en el departamento del Meta. Se encuentra a 189 kilómetros al este de Villavicencio en la región del río Manacacías y es uno de los municipios con mayor área del departamento con 17.499 km². Puerto Gaitán es un Municipio con una población total de 18.556 habitantes según censo DANE 2015; de los cuales 7705 se encuentran ubicados en la cabecera municipal y 10.851 habitantes en la zona rural y cuya base economía se fundamenta en la actividad petrolera. Este municipio fue considerado por años uno de los pueblos con mayor potencial de crecimiento debido al boom petrolero que se estuvo en las últimas dos décadas. Debido a esto la población sufrió un incremento considerable estos últimos años.

1.1.2 Tratamiento de aguas residuales. En la actualidad surge la necesidad de tratar todo tipo de aguas tanto potables como residuales debido a que el agua es un recurso natural que necesita todo ser vivo para de este modo evitar la contaminación del agua y del suelo es posible mediante técnicas apropiadas de tratamiento y una buena disposición de las aguas residuales. Las concentraciones de contaminantes y nutrientes hacen parte del objeto de regulación por parte de leyes o normas y de esta manera se establece la calidad apropiada del agua de acuerdo a su aplicabilidad. En los tratamientos de agua residual predominan fenómenos tanto físicos, químicos, como biológicos en los cuales intervienen operaciones y procesos unitarios².

1.1.3 Pre-tratamiento. Tiene como objetivo remover del agua residual aquellos constituyentes que pueden causar dificultades de operación y mantenimiento en los procesos posteriores o que, en algunos casos, no pueden tratarse juntamente con los demás componentes del agua residual, como los son cuerpos sólidos gruesos y finos, donde se utilizan operaciones de tipo mecánico o físico para su remoción, algunas de ellas son:

Cribado: es la primera operación unitaria donde se empieza a tratar el agua residual, el cribado es la operación que separara el material grueso del agua, mediante el paso de esta por una criba o rejilla. Una rejilla es un dispositivo con

¹ ZARAMA, José R. Reseña historica. Pasto: Impr. del Departamento, 1942. 1 p.

² RAMALHO, Rubens Sette, et al. Tratamiento De Aguas Residuales. Barcelona: Editorial Reverté, 1996. p.91.

aberturas generalmente de tamaño uniforme³, utilizado para retener los sólidos que arrastra el agua residual. La criba puede ser de cualquier material como de láminas metálicas, de madera o de concreto, con agujeros redondos, cuadrados o de cualquier forma geométrica.

Separadores de grasa: la separación de aceites consiste en retirar el agua de los flotantes, grasas y aceites que pueden portar, y que serían susceptibles de flotación natural o inducida. Las grasas son un gran problema porque provocan y favorecen fenómenos de flotación de fangos, en procesos posteriores de decantación del agua puede llegar a perjudicar todo el mecanismo. Los tanques separadores de grasas consisten en un depósito dispuesto de tal forma que la materia flotante ascienda⁴ y permanezca en la superficie del agua residual hasta que se recoja y se elimine, mientras que el líquido va saliendo del tanque de forma continua, a través de una abertura situada en el fondo o por debajo de deflectores de espuma.

1.1.4 Tratamiento primario. Se considera como unidad de tratamiento primario a todo sistema que permite remover material en suspensión, excepto material coloidal o sustancias disueltas presentes en el agua. Su objetivo es la remoción de sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, para disminuir la carga en el tratamiento biológico. Los sólidos removidos en el proceso tienen que ser procesados antes de su disposición final⁵. Comprende operaciones de tipo físico y químico como decantación, neutralización y coagulación-floculación, por medio de la adición de pequeñas dosis de sustancias químicas.

Neutralización: también es llamado como ajuste del pH, el cual consiste en añadir una base o un ácido al agua, de tal forma obtener un pH cercano a 7.0, este se agrega cuando la alcalinidad del agua no es suficiente para reaccionar con el coagulante. En toda fuente receptora, el pH, es un factor importante para los sistemas de reacciones químicas y para ejercer control de la corrosión. La neutralización supone “la reacción de soluciones, con iones hidrógenos o hidróxido activos, para formar agua y sales neutras”. Para la neutralización de aguas ácidas se emplean reactivos alcalinos, de los cuales los hidróxidos de calcio, óxido o hidróxido de magnesio, o hidróxido de sodio (soda cáustica) suelen ser los más empleados para incrementar el pH⁶. La neutralización de aguas alcalinas se hace agregando, normalmente, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y CO₂ en forma de gas. Gran parte de los procesos de tratamiento de aguas residuales necesitan ajuste de

³ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría y Principios De Diseño. 3 ed. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008. 287p.

⁴ MARÍN GALVÍN, Rafael. Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2003.189p.

⁵ METCALF y EDDY, INC. Ingeniera sanitaria. Tratamiento, evaluación y reutilización de aguas residuales. Editorial labor, S.A. 2 ed. Barcelona1994.340p

⁶ ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Editorial escuela colombiana de ingeniera. 3 ed. Bogotá D.C .1999.321p.

pH, porque afecta en los procesos de tratamiento de forma sustancial. Tanto para la coagulación como para la floculación, cada componente tiene un rango de operación óptima el cual va a ayudar a reducir el tiempo del proceso.

Homogeneización: se utiliza para realizar una mezcla uniforme entre dos sustancias o más para realizar el proceso de estabilización. Se lleva a cabo por medio de agitadores mecánicos como paletas o por condiciones del diseño que aseguren la turbulencia para aprovechar el régimen circular⁷. La regulación del caudal de las aguas residuales se consigue a partir de ello, así como la carga de sólidos en suspensión y el DQO, se lleva a cabo en tanques de homogeneización que suelen estar sometidos a agitación. Es un método empleado para retener los vertidos en un depósito, de forma que su efluente sea suficientemente uniforme en sus características sanitarias, como lo es el pH, el color, la turbiedad, alcalinidad y el DBO, entre otros. En los procesos de tratamiento el mezclado tiene por lo general un lugar en régimen de flujo turbulento donde prevalecen las fuerzas de inercia. La velocidad y turbulencia tienen una relación directamente proporcional y por lo tanto a mayor velocidad el mezclado será mejor. Las variables controladas en este proceso son la intensidad y la duración de la mezcla, se recomienda reducir el exceso de mezcla o la mezcla reducida. El exceso de mezcla puede reducir la eficiencia de remoción, rompiendo los sólidos existentes en el agua residual y el floc formado⁸.

Coagulación: el objetivo principal de la coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, los cuales presentan una gran repulsión entre ellas, estas impiden su aglomeración y precipitación por lo que se hace necesaria la adición de un producto químico de manera que se anulan las cargas⁹, por lo que se eliminan las materias en suspensión estables; la coagulación no solo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos. Se considera como un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos. El proceso se inicia al agregar un coagulante al agua residual en pequeños lapsos de tiempo donde se llega a desestabilizar en pocos segundos. La intención de adicionar el coagulante es convertir material no sedimentable en material sedimentable. Los coagulantes se dividen en coagulantes

⁷ CABIDO, María de pilar y ESCOLÁSTICO, consuelo. Reciclado y tratamiento de residuos. Universidad nacional de educación a distancia. 85p. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioamericasp/detail.action?docID=3199391>

⁸Ibíd., p.86

⁹ CARDENAS, Yolanda. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Lima: 2000.8p.

orgánicos y los inorgánicos. Los coagulantes orgánicos-inorgánicos aportan una reducción de consumo del 30%-60%¹⁰, reduciendo considerablemente los tiempos de coagulación, mejorando la densidad del coágulo formado y eliminando o reduciendo sensiblemente la dosificación.

Existen los siguientes mecanismos de la coagulación:

- Adsorción y puente.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Compresión de la doble capa.

Adsorción y puente: la forma de obtener un tratamiento más económico es a partir de un polímero aniónico, cuando las partículas están cargadas negativamente. Este fenómeno está dado por la teoría del “puente”. “Las moléculas del polímero muy largas contienen grupos químicos que pueden adsorber las partículas coloidales. La molécula de polímero puede así adsorber una partícula coloidal en una de sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para adsorber otras partículas”¹¹. Esta es la razón por la cual se dice que las moléculas de los polímeros forman el “puente” entre las partículas coloidales. Esto puede tener una restabilización de la suspensión, por una excesiva carga de polímeros.

Adsorción y neutralización de cargas: las partículas coloidales poseen carga negativa en sus superficies, las cargas primarias atraen los iones positivos que están en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide. El potencial en la superficie del plano de cizallamiento es el potencial electrocinético cuyo nombre es el potencial ZETA. “Este potencial maneja el desplazamiento de coloides y su interacción mutua. Esta teoría es considerada como la anulación del potencial obtenido por adición de productos de coagulación-floculación, en la que la fuerza natural de mezcla debido al movimiento browniano no es suficiente requiriendo una energía complementaria necesaria¹²”. Al adicionar un exceso de coagulante al agua, se produce a la restabilización de la carga de la partícula, esto se puede explicar debido a que los excesos de coagulante son adsorbidos en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original.

Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado: las partículas coloidales que han sido desestabilizadas, pueden llegar a ser atrapadas dentro de un flóculo. Al adicionar una cantidad suficiente de coagulantes, normalmente las sales de

¹⁰ RESTREPO, Hernán. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2009. 10p. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239_2009.pdf.

¹¹ CARDENAS, Yolanda. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Lima: 2000. 8p

¹² *Ibíd.*, p.9

metales trivalente como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) o cloruro férrico (FeCl_3). La presencia de algunos aniones y de las partículas coloidales incrementan y aceleran la formación del precipitado¹³. Las partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del flóculo; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y el coagulante empleado.

Compresión de la doble capa: en el momento en que dos partículas semejantes se aproximan, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas¹⁴, esto se consigue sólo con los iones del coagulante. Al mismo tiempo se observa un potencial de atracción o fuerzas de atracción, entre las partículas llamadas fuerzas de Van der Waals, que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos últimos. Contrariamente a las fuerzas de repulsión, las fuerzas de Van der Waals no son afectados por las características de la solución.

Los factores que influyen en la coagulación son los siguientes:

pH: las características del agua determinan un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente.

Sales disueltas: las sales contenidas en el agua alteran el tiempo requerido para la floculación, cantidad de coagulante requerido, cantidad residual del coagulante dentro del efluente.

Temperatura del agua: la variación de la temperatura lleva a la formación de corrientes de densidad modificando la energía cinética y generando que la coagulación sea más lenta e ineficiente.

Dosis de coagulante: poca cantidad de coagulante no neutraliza totalmente la carga de las partículas por lo que la turbiedad es elevada; alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de las partículas aumentando el tiempo en los procesos de sedimentación y la turbiedad es igual de elevada.

Mezcla: el grado de agitación que se da a las masas de aguas durante la adición de un coagulante, determina si la coagulación es completa; la agitación debe ser uniforme e intensa para asegurar que la mezcla entre el agua y coagulante esté bien realizada.

¹³ *Ibíd.*, p.10

¹⁴ CARDENAS, Yolanda. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Lima: 2000.11p

Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floculo para favorecer su precipitación son:

- sulfato de aluminio.
- aluminato de sodio.
- cloruro de aluminio.
- cloruro férrico.
- sulfato férrico.
- sulfato ferroso.
- polieléctrolitos.

Floculación: es el proceso que sigue a la coagulación, donde una vez desestabilizados los coloides, se añade una mezcla suave de partículas para aumentar la tasa de encuentros o colisiones entre ellas sin romper o alterar los agentes preformados, dando como resultado flocs que se pueden retirar fácilmente del agua clarificada en este proceso los flocs aumentan su peso específico hasta superar el del líquido que los contiene, lo cual permite la sedimentación del aglomerado¹⁵. La floculación se debe llevar a cabo en condiciones de mezcla suave y lenta, se ve favorecida por una agitación moderada con paletas a poca velocidad. Al tener mayor contacto entre las partículas, se favorecerá la formación de flóculos, sin embargo, si la agitación es demasiado fuerte, los esfuerzos cortantes que se producen llegarán a romper el flóc en partículas más pequeñas. La agitación tiene que controlarse con mucha precaución para que los flóculos tengan un tamaño adecuado y puedan depositarse rápidamente. Los tiempos de retención típicos para floculación varían entre 5 y 30 minutos¹⁶.

Entre los principales floculantes utilizados para el proceso de tratamiento de aguas residuales están:

¹⁵ METCALF y EDDY, INC. Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evaluación y reutilización de aguas residuales. 2 ed. Barcelona 1994. 282p.

¹⁶ CARDENAS, Yolanda. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Lima: 2000. 11p

Cuadro 1. Tipos de floculantes

Tipos de floculantes	Características
Poliacrilamidas aniónicas	Caracterizados por tener grupos ionizados negativamente (grupos carboxílicos)
Poliacrilamidas no iónico	Reservas para potabilización de aguas. Son poliacrilamidas de masa molecular comprendida entre 1 y 30 millones
Poliacrilamidas catiónico	Reservadas para potabilización de aguas. Caracterizados por tener en sus cadenas una carga eléctrica positiva, debido a la presencia de grupos amino

Fuente: METCALF y EDDY, INC. Ingeniera sanitaria. Tratamiento, evaluación y reutilización de aguas residuales. 2 ed. Barcelona 1994. 283p

Espesamiento de lodos: los lodos que se generan en el tratamiento del agua tienen un alto contenido de agua que hace su volumen muy grande y causa dificultades en su manejo. Debido a esta razón es importante reducir el volumen como primer objetivo en el tratamiento de los lodos, también con el objetivo de reducir los costos de inversión y operación en el tratamiento, almacenamiento y transporte de estos. El agua contenida en los lodos se clasifica en tres tipos de acuerdo con su combinación con las partículas sólidas: agua intermedia o intersticial (alrededor del 70% del volumen del lodo), agua de adhesión y capilar (alrededor de 22%) y agua interna y de adsorción (alrededor del 8%). Al aumentar la intensidad de los enlaces, se incrementa el consumo de energía para la separación del agua¹⁷.

Para la remoción del agua contenida en los lodos existen diferentes métodos que involucran operaciones físicas en su mayoría. Para remover el agua intersticial se usa la gravedad y el proceso que permite removerla se denomina espesamiento. Para remover el agua de adhesión y el agua capilar se aplican fuerzas físicas de presión o vacío en filtros, o campos de gravedad forzados artificialmente en centrífugas. A este último proceso se le denomina deshidratación. Por último, para remover el agua interna o de adsorción hay que eliminar previamente las paredes celulares por degradación biológica y posteriormente aplicar evaporación mediante calentamiento ligero, calentamiento intenso o congelamiento¹⁸.

Sedimentación: esta etapa consiste en separar mediante la gravedad, distintas partículas que se encuentran en suspensión en el agua tratada, las cuales tienen

¹⁷ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México. 2019. p. 117.

¹⁸ Ídem.

una mayor densidad que el agua. Este proceso es utilizado para eliminar arena, materia particulada presente en el tanque de decantación primaria, de los flóculos químicos cuando se emplea la coagulación química y para la concentración de sólidos en los espesadores de fango¹⁹. El objetivo principal de la sedimentación es producir agua clarificada con una turbiedad mínima, normalmente se espera que sea de 10 NTU (unidades nefelométricas de turbidez), para obtener una filtración posterior efectiva. La sedimentación es un proceso que depende de un buen manejo de coagulación y floculación, el operario debe asegurar la obtención del mejor floc posible antes del sedimentador. En general, en los sedimentadores se debe asegurar una distribución adecuada del caudal, minimizar los cambios bruscos de flujo, asegurar una carga de rebose apropiado sobre los vertederos efluentes y controlar las cargas superficiales y los tiempos de retención²⁰. Dependiendo de la concentración y tendencia a la interacción de las partículas se pueden generar cuatro tipos de sedimentación.

Para el proceso de sedimentación se necesita un tanque de sedimentación o decantación donde fluye lentamente las aguas residuales, permitiendo que los sólidos en suspensión con una densidad mayor que el líquido circundante haga parte lentamente del lodo primario. Este lodo se separa por medio de una tubería en tanques de menor tamaño o por medio de raspadores mecánicos. El rendimiento de los tanques de sedimentación se ve afectado por los siguientes factores: periodo de retención, características de las aguas residuales, limpieza, temperatura, tamaño de las partículas, eliminación de arena, variaciones en el caudal, longitud del depósito, velocidad y densidad de las partículas, eliminación de fangos y velocidad de vertedero. Los tanques de sedimentación según su tipo se utilizan para flotación de grasas, homogeneización, reducción de DBO₅ y eliminación de materia en suspensión precipitable²¹. El metodo mas recomendado y usado para indicar la calidad de la sedimentación es el ensayo de turbiedad, el cual es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. La turbiedad del agua sedimentada debe mantenerse por debajo de 10 NTU²².

Deshidratación de lodos: la deshidratación es la eliminación del agua de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales para lograr una reducción de mayor volumen que el conseguido por el espesamiento. La deshidratación se realiza principalmente para reducir los costos de inversión y de operación que implica el manejo de lodo después de la estabilización. Con la deshidratación de lodos se logra incrementar hasta un 20% de la concentración de sólidos en el lodo.

¹⁹ METCALF y EDDY, INC. Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evaluación y reutilización de aguas residuales. Editorial labor, S.A. 2 ed. Barcelona1994.219p

²⁰ ROMERO, Jairo. Purificación del agua. Editorial escuela colombiana de ingeniera. 2Ed. Bogotá D.C .2006. 298p.

²¹ VARGAS, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Lima. 2004. p.350.

²² Ibíd., p351.

Cuando se inicia con una concentración inicial de sólidos en el lodo del 5%, se reduce el volumen en tres cuartas partes y se obtiene un material no fluido, denominado torta de lodos. La deshidratación es sólo un componente del proceso de tratamiento de aguas residuales y lodos, que deben integrarse en un sistema general de tratamiento de aguas residuales para optimizarlo y de esta forma reducir los costos totales del tratamiento²³.

Los procesos convencionales para la deshidratación artificial de los lodos pueden subdividirse en dos grupos:

- Métodos basados en la separación del agua del lodo debido a la presión externa por medio de una membrana aislante permeable al agua (filtros prensa de bandas, filtros prensa de placas, filtros al vacío).
- Métodos basados en la separación del agua mediante un aumento de la gravedad (centrífugas)²⁴.

1.1.5 Tratamiento secundario. La expresión tratamiento secundario se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios. Generalmente es utilizada para eliminar la materia biodegradable por medio de microorganismos (bacterias) que se alimentan de materia orgánica contaminante, que se encuentra disuelta o en forma coloidal, estas se convierten en las propias células de dichos microorganismos y se transforma en otros productos más simples, de manera que se degrada. Para llevar a cabo este procedimiento se necesitan diferentes reactores biológicos los cuales crean y operan a condiciones óptimas para permitir el desarrollo eficiente de los microorganismos. Los procesos biológicos que se utilizan para este proceso se clasifican en aerobios o anaerobios²⁵.

Estabilización de los lodos: el proceso de estabilización de los lodos es fundamental en el tratamiento del agua para reducir la masa de sólidos de las aguas residuales, estabilización de lodos remanentes y la obtención de subproductos dependiendo en tipo de estabilización. En las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales hay dos tipos de estabilización que son los más usados debido a los bajos costos de inversión y operación que requieren, la estabilización anaerobia y aerobia²⁶.

²³ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Óp. Cit. p. 327.

²⁴ *Ibíd.*, p. 161.

²⁵ CABIDO, María de pilar y ESCOLÁSTICO, consuelo. Reciclado y tratamiento de residuos. Universidad Nacional de educación a distancia. 89p. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioamericasp/detail.action?docID=319939>

²⁶ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Óp. Cit. p. 161.

Estabilización anaerobia: el primer tipo presentado es la estabilización anaerobia mediante esta los compuestos orgánicos presentes en la materia se convierten a metano, bióxido de carbono y masa microbiana. El proceso anaerobio involucra un complejo sistema de reacciones bioquímicas y la intervención de un gran número de microorganismos en la degradación de la materia orgánica, todo este proceso realizándose en ausencia de oxígeno para la proliferación de los microorganismos encargados de la degradación del material orgánico contenido en el agua residual. Este tipo de estabilización se aplica a la degradación de residuos orgánicos rurales (animales y agrícolas), lodos residuales de plantas de tratamiento y en el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas²⁷.

Estabilización aerobia: el segundo tipo presentado es la estabilización aerobia y una de las más utilizados debido a requiere menores costos en cuando a las estructuras necesarias para llevarla a cabo. El objetivo de la estabilización aerobia o la estabilización oxidativa bioquímica de los lodos es disminuir la cantidad de la materia orgánica biodegradable evitando así la emisión de olores por putrefacción durante su manejo y disposición. El proceso involucra la oxidación directa de la materia biodegradable por los microorganismos y la oxidación del material celular microbiano, para esto se realiza esta degradación en presencia de oxígeno que en muchos casos es alimentado mediante un proceso de aireación con bombas que inyectan aire en las primeras etapas del tratamiento del agua. En este proceso se logran porcentajes de reducción de los sólidos suspendidos volátiles de 40 – 50%, similares a los obtenidos mediante la estabilización anaerobia de los lodos. Estos lodos ya estabilizados pasan por un proceso de evaluación para determinar su aplicación o disposición final, dependiendo de las características físicas, químicas y biológicas, así como la realización de un análisis técnico financiero para evaluar la viabilidad de ingresarlos en programas de recuperación, restauración y mejoramiento de suelos, o de otro modo disponerlos en un relleno sanitario donde se realizan diversos controles que generen sostenibilidad operativa, económica y ambiental²⁸.

Aplicación de lodos residuales en suelos: los lodos residuales pueden ser aplicados en suelos y en la agricultura debido que específicamente los lodos municipales tienen un gran contenido de nutrimentos y materia orgánica. Existen factores en el suelo que ayudan a controlar el efecto contaminante de los patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos contenidos en el lodo residual cuando son aplicados al suelo. Estos aspectos deben ser analizados en los sitios de disposición para poder tomar medidas de control y adecuar las dosis necesarias²⁹.

²⁷ Ídem.

²⁸ *Ibíd.*, p. 187.

²⁹ *Ibíd.*, p. 401.

1.1.6 Tratamiento terciario. Su función consiste en eliminar ciertos contaminantes que puedan llegar a persistir en las aguas, tales como sales disueltas y microcontaminantes, al fin de eliminar gérmenes patógenos y parásitos, color, detergentes, fosfatos, compuestos nitrogenados, disminución de materias disueltas y en suspensión, reducción de la carga orgánica si esta es muy elevada, las aguas presentan altos valores de DQO y DBO₅, aun después del tratamiento secundario³⁰.

Filtración medios granulares: La remoción de la materia en suspensión ocurre en superficie y en el interior del lecho filtrante. La materia en suspensión queda atrapada en el medio poroso, ya sea en la superficie o hacia interior del medio³¹.

Arrastre con aire: Es un proceso de transferencia de masa entre fases distintas. Un contaminante gaseoso que este contenido en una fase líquida se transfiere a una corriente gaseosa libre de contaminante. Cuando el aire es introducido en el agua residual, los compuestos a eliminar son transferidos del agua al gas³².

Oxidación avanzada: Se basa en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes; se definen como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas principalmente el radical hidroxilo³³.

1.2 MARCO LEGAL

Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio "Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, la cual reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.

Por otro lado, están las disposiciones legales con las cuales se trabajará el proyecto están divididas en:

1.2.1 Constitución política.

Artículo 366. El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. Será objetivo fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de

³⁰ CABIDO, María de pilar y ESCOLÁSTICO, consuelo. Óp. Cit. p. 90

³¹ FUENTES, Manuel. Identificación de sistemas terciarios para el tratamiento de aguas residuales. Instituto mexicano de tecnología del agua. p.15

³² Ibíd.

³³ Ibíd.

saneamiento ambiental y de agua potable. Para tales efectos, en los planes y presupuestos de la Nación y de las entidades territoriales, el gasto público social tendrá prioridad sobre cualquier otra asignación.

Artículo 367. La ley fijará las competencias y responsabilidades relativas a la prestación de los servicios públicos domiciliarios, su cobertura, calidad y financiación, y el régimen tarifario que tendrá en cuenta además de los criterios de costos, los de solidaridad y redistribución de ingresos. Los servicios públicos domiciliarios se prestarán directamente por cada municipio cuando las características técnicas y económicas del servicio y las conveniencias generales lo permitan y aconsejen, y los departamentos cumplirán funciones de apoyo y coordinación. La ley determinará las entidades competentes para fijar las tarifas.

Artículo 370. Corresponde al Presidente de la República señalar, con sujeción a la ley, las políticas generales de administración y control de eficiencia de los servicios públicos domiciliarios y ejercer por medio de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, el control, la inspección y vigilancia de las entidades que los presten.

Servicios públicos

Ley 142 de 1994. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.

Ley 715 de 2001. Por la cual se dictan normas orgánicas en materia de recursos y competencias de conformidad con los artículos 151, 288, 356 y 357 (Acto Legislativo 01 de 2001) de la Constitución Política y se dictan otras disposiciones para organizar la prestación de los servicios de educación y salud, entre otros.

Ley 99 de 1993. Creación del Ministerio del Medio Ambiente y reorganización del sector público encargado del manejo del medio ambiente.

Decreto 1287 DE 2014. Por el cual se establecen criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

1.2.2 Recurso agua.

Resolución 2115 de 2007. Resolución del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Resolución 0330 de 2017. Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector agua potable y saneamiento básico- RAS.

Resolución 0844 de 2018. Por el cual se establecen los requisitos técnicos para los proyectos de agua y saneamiento básico de zonas rurales.

Decreto 1575 de 2007. Decreto del Ministerio de Protección Social por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano.

Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

Decreto 2667 de 2012. Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones.

1.2.3 Normas técnicas.

NTC-ISO 5667-1: “esta norma establece los principios generales que se deben aplicar en el diseño de programas de muestreo para los propósitos de control de calidad, la caracterización de la calidad, y la identificación de las fuentes de contaminación del agua, incluyendo los sedimentos y los lodos”³⁴.

NTC-ISO 5667-2: “esta norma constituye una guía sobre técnicas de muestreo utilizadas con el fin de obtener los datos necesarios para hacer análisis con propósitos de control de calidad, caracterización de la calidad e identificación de fuentes de contaminación del agua”³⁵.

NTC-ISO 5667-3: “esta norma suministra directrices generales sobre las precauciones que se deben tomar para preservar y transportar muestras de agua, con excepción de las muestras biológicas”³⁶.

NTC 3903: “esta norma establece un procedimiento general para determinar la dosis óptima de reactivo químico a utilizar con el fin de reducir del agua el material

³⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Calidad del agua. Muestreo. Directrices para el diseño de programas de muestreo. Bogotá: ICONTEC, 1995. 2 p. (NTC-ISO 5667-1).

³⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas generales de muestreo. Bogotá: ICONTEC, 1995. 2 p. (NTCISO 5667-2).

³⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras. Bogotá: ICONTEC, 2004. 2 p. (NTC-ISO 5667-3).

disuelto, en suspensión, coloidal y de difícil sedimentación, mediante los ensayos de coagulación, floculación y sedimentación por gravedad”³⁷.

³⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras. Bogotá: ICONTEC, 2010. 2 p. (NTC 3903).

2. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DE LA PTAR

El diagnóstico del estado actual de las operaciones de la PTAR de Puerto Gaitán es abordable desde distintas metodologías, en la mayoría de los diagnósticos que se realizan en muchos trabajos de investigación en los cuales se plantean describir el estado actual de las operaciones dentro de las plantas de tratamiento de aguas, se realiza una recolección de información mediante visitas a las plantas de tratamiento, donde se cuenta con el testimonio de los operarios, registros de campo, bases de datos, histórico de monitoreos, entre otros. Todos los datos utilizados en este capítulo en cuanto a los equipos, su funcionamiento y sus características fueron tomados del manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamientos de Puerto Gaitán³⁸.

2.1 METODOLOGÍA DIAGNÓSTICO

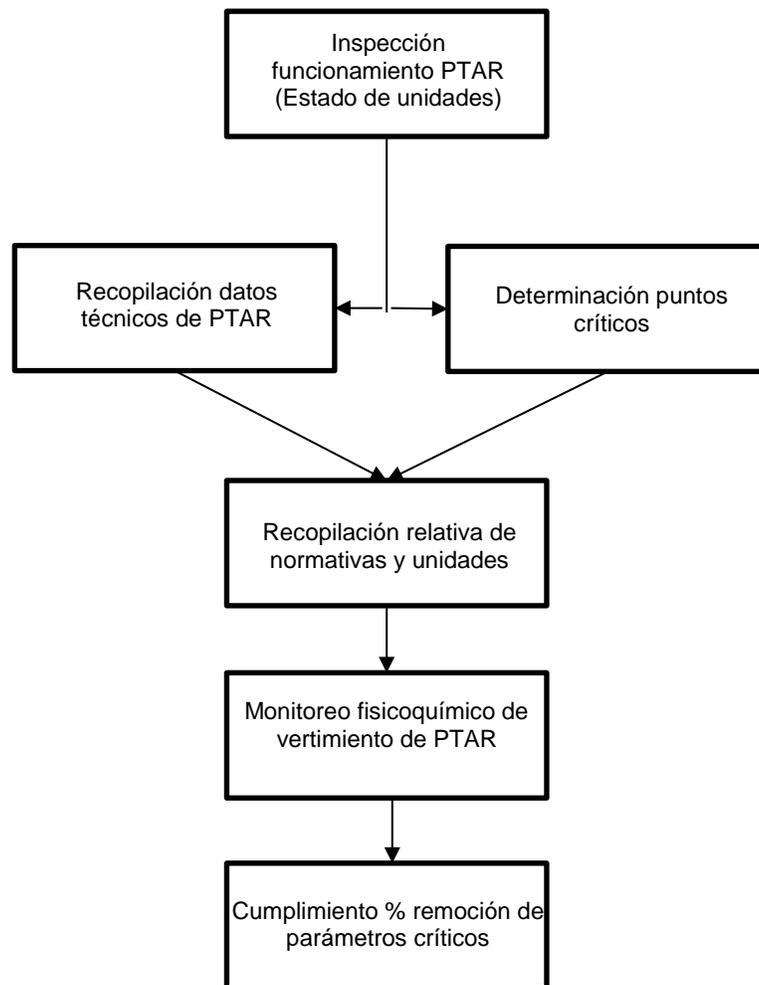
Para desarrollar este objetivo se utilizó las metodologías de diagnóstico empleadas por PÉREZ, S³⁹ y CABEZAS, D.⁴⁰, para cumplir con el objetivo de diagnóstico de manera satisfactoria. Esta metodología se esquematiza en la figura 1.

³⁸ DORLEOP LTDA. Manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Puerto Gaitán, Meta. Bogota.D.C.

³⁹ PÉREZ, Jessica. Evaluación de la Sustitución del Agente Coagulante Sulfato de Aluminio en el Proceso de Actual de Coagulación-Floculación de Agua Potable en la Empresa EAF SAS ESP. Bogotá D.C. 2017.

⁴⁰ CABEZAS, David. *Diagnóstico del estado actual de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) del aeropuerto el Edén de Armenia*. Santiago de Cali, Colombia. 2013

Figura 1. Metodología diagnóstica empleada por PÉREZ, S y CABEZAS, D.



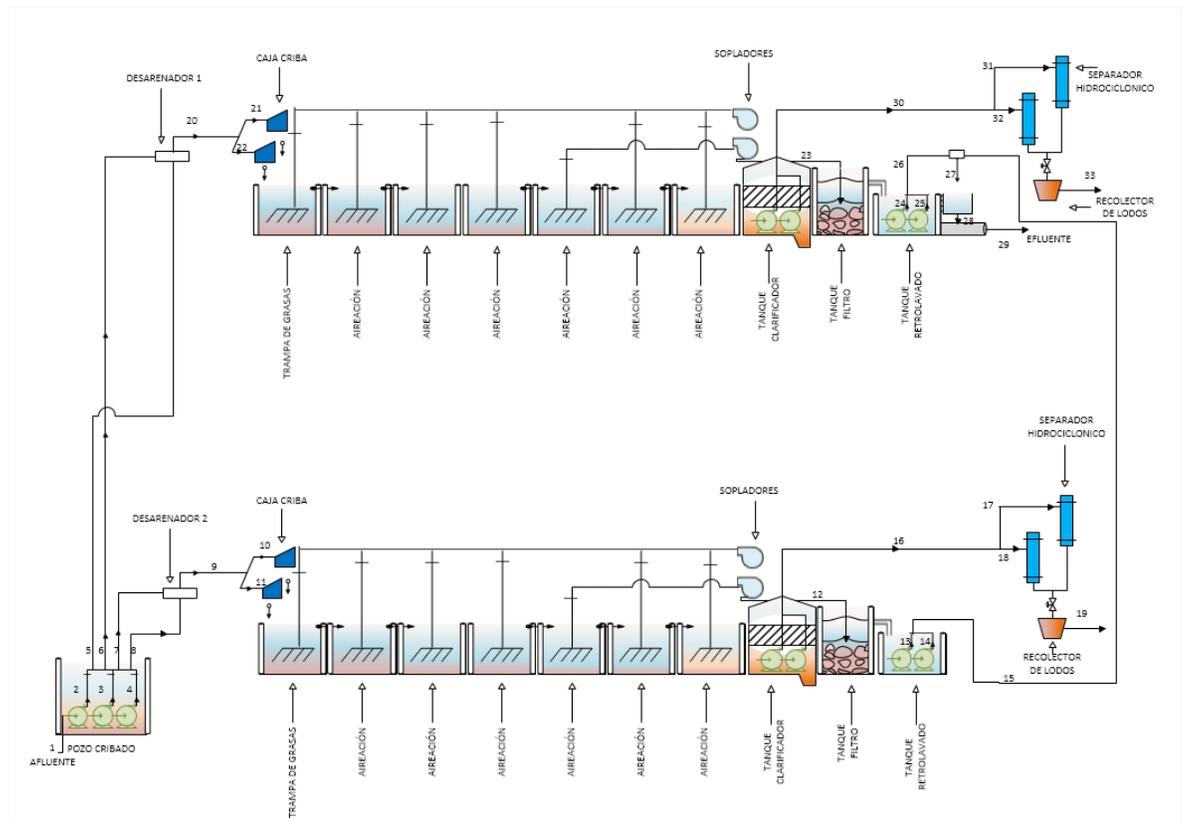
Fuente: elaboración propia, con base en PÉREZ, Jessica. Evaluación de la Sustitución del Agente Coagulante Sulfato de Aluminio en el Proceso de Actual de Coagulación-Floculación de Agua Potable en la Empresa EAF SAS ESP. Bogotá D.C. 2017; CABEZAS, David. Diagnóstico del estado actual de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) del aeropuerto el Edén de Armenia. Santiago de Cali, Colombia. 2013.

La empresa PTAR Puerto Gaitán suministró la información de la caracterización realizada en noviembre de 2018 por la empresa TECNO AMBIENTAL S.A.S, también se contó con el manual de operación de la PTAR y la información suministrada por el operario y el ingeniero a cargo, con esta información se procedió a realizar el diagnóstico describiendo las generalidades del sistema de tratamiento, sus componentes, operaciones unitarias, planes de mantenimiento, dosificación de las sustancias químicas y análisis de la caracterización de noviembre de 2018, empleando una diagnóstico que combina las metodologías que se describieron anteriormente. Es importante aclarar que la caracterización de noviembre de 2018

fue la única y más reciente que fue suministrada debido falta de presupuesto al estar administrando la segunda etapa de la PTAR y cabe añadir la coyuntura actual del COVID-19.

En la figura 2 se muestra el diagrama de procesos e instrumentación P&ID del sistema de tratamiento de aguas residuales doméstica de la PTAR de Puerto Gaitán.

Figura 2. Diagrama de Procesos e Instrumentación P&ID.



Fuente: elaboración propia.

2.2 GENERALIDADES

La unidad de tratamiento de aguas residuales fue diseñada para el tratamiento de un caudal de 60 L/s, bajo el sistema de bioaumentación por aireación extendida, dentro de esta se incluye la red y accesorios hidráulicos, eléctricos, y elementos de funcionamiento y mantenimiento.

Para la operación de la planta se cuenta con un tablero eléctrico de control con selector para operación manual o automática de los equipos y programación de los

tiempos de funcionamiento en cada etapa del proceso. Así mismo, cuenta con una instalación de sistemas de retrolavado automático, y sistemas de control y protección, además de los diferentes elementos y accesorios necesarios para el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento.

El tratamiento dentro de la planta es basado en un sistema de biodigestores secuenciales aeróbicos, bioaumentación por aeración extendida, con reactores de mezcla completa dispuestos en serie, clarificador de alta tasa, filtro de lecho mixto, recirculación, desinfección en línea para finalmente verter el agua tratada al río Manacacías.

La planta cuenta con separación de lodos estabilizados por peso, en un separador tipo hidrociclónico, con purga automática, y deshidratación por gravedad, con recirculación al inicio del proceso, esto permite una producción muy baja de lodos, los cuales pueden ser dispuestos como abono estabilizado, o en un relleno.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la PTAR es utilizada la aireación extendida con bioaumentación incorporada para el inicio de la estabilización y pretratamiento primario avanzado por electrólisis, que permite una biodigestión rápida de la materia orgánica y una disminución del DBO₅ a niveles no contaminantes, con tiempos de retención muy bajos. En una segunda fase del proceso se pasa a un clarificador-sedimentador, donde se decantan los lodos, y se retienen microorganismos, por un clarificador de alta tasa, para luego pasar por un sistema de filtrado de lecho mixto, con retrolavado incorporado. Los lodos son recirculados al inicio del proceso, pasando antes por unos separadores tipo hidrociclónico con purga de fondo incorporada, donde se separan los lodos ya maduros y estabilizados por peso, en bolsas filtrantes de 100 µm.

2.4 SISTEMA DE TRATAMIENTO

En este proceso la remoción de la carga orgánica se lleva a cabo en forma acelerada, en presencia de oxígeno, por ocho cepas de bacterias naturales saprofitas, anaeróbicas y facultativas, inofensivas para la salud de los seres vivos superiores y de la fauna acuática, incorporadas al sistema.

En el diseño se contempló la construcción de un sistema de tratamiento primario avanzado por electrólisis, por oxido reducción, con ánodo de hierro, y voltaje hasta 50v. Pretratamiento en el último receptáculo (caja llegada de alcantarillas de todos los sistemas asociados), antes de entrar a la planta; esta planta consta de desbastador, digestor aeróbico y sopladores incorporados, tanque de sedimentación, tanque de agua tratada, caseta de bombas y unidad de desinfección.

El desbastador tiene como función separar sustancias insolubles en aguas, tales como sebo y aceites, y además retiene sustancias no biodegradables que son extraídas mecánicamente. En este punto se comienza la biodegradabilidad de las grasas mediante la adición constante de bacterias, así se acelera el proceso de biodegradación de sustancias orgánicas, tales como grasas, proteínas y carbohidratos.

2.5 COMPONENTES DEL SISTEMA

La descripción y función general de los componentes del sistema se definen de la siguiente forma:

2.5.1 Procesos y operaciones unitarias. Sistema aeróbico con digestores de fases consecutivas con un tratamiento primario avanzado por electrólisis (óxido reducción por flóculos), separación de grasas, y una serie de reactores de mezcla completa en serie, y aireación extendida en cada uno, hasta un clarificador se separan, y se recirculan los lodos al principio del proceso pasando por un separador del tipo hidrociclónico, con purga de fondo para separar lodos estabilizados (lodos de mayor peso), y deshidratarlos en un sistema de filtros bolsa por gravedad, para su disposición final. En el agua recirculada se aplica una pequeña dosis de cloruro férrico e hipoclorito de sodio para lograr una reacción de oxidación - coagulación - floculación de las especies presentes en el agua después de la digestión biológica. Esta recirculación es controlada por tiempo y volumen no superior al 20% del flujo total promedio, manteniendo una circulación por la planta. La circulación de aguas en la planta se realiza por vasos comunicantes.

Luego del clarificador se pasa a un sistema de filtración en un filtro de lecho mixto compuesto por canto rodado y carbón térmico, posee un sistema de retrolavado automático con retorno al inicio de la planta y es mezclado con aire en el filtro, para finalmente pasar a un tanque de retención de agua para su desinfección, y disposición final o riego.

En general la planta mantiene dos procesos muy identificados en línea, un proceso de biodigestión completo, y un proceso físico de clarificación con separación de microorganismos y retención de lodos, permitiendo así dar cumplimiento a los requerimientos de la norma fijada para el vertimiento final y recuperación del Río Manacacias.

2.6 INSPECCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PTAR

A continuación, se describen los procesos, operaciones unitarias, los procedimientos que se llevan a cabo para el mantenimiento de los equipos y el funcionamiento de cada equipo.

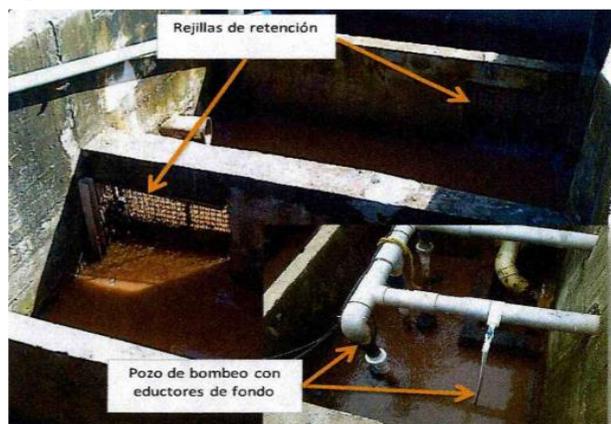
2.6.1 Pre-tratamiento. Los puntos críticos se encuentran en esta etapa del tratamiento al tener colmatación en todos sus equipos, por lo que se necesita de un constante mantenimiento para no ver afectados los tiempos de operación en el tratamiento primario.

POZO DE CRIBADO

Como el alcantarillado llega a una cota (nivel) más bajo que la línea de paso de la planta se hace necesario elevar el caudal de aguas residuales por medio de bombeo al sistema de tratamiento para así cumplir el requisito mínimo de diseño de las rejillas donde estas se deben encontrar aguas arriba para evitar obstrucción por material grueso presente en el agua residual a tratar. En la caja de llegada, se hace una ecualización y homogeneización con reductores de fondo, y un tratamiento primario donde se separan los gruesos e inorgánicos en rejillas de limpieza manual.

Paso seguido el agua es bombeada por tres bombas Pedrollo MC 30/50 de 3 HP de potencia, cada una maneja de 20 a 25 L/s, garantizando el ingreso del caudal de diseño de 60 L/s, este caudal se reparte para los dos módulos por igual, 30 L cada uno, no sobra decir que la planta está diseñada con un factor de emergencia del 20%, existe un sistema de sobrepaso por nivel alto a la salida del pozo de cribado, este es un sistema de bypass.

Figura 3. Pozo de Cribado



Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: estas rejillas deben ser retiradas y limpiadas las veces que sean necesarias, dependiendo del nivel de colmatación mínimo tres veces al día, el

operario deberá retirar el material sobrante para su adecuada disposición, además en el momento del retiro debe ser dispuesta la rejilla de reemplazo en la parte de atrás para evitar el paso de material flotante. La colmatación de estas rejillas por la acumulación excesiva de sólidos gruesos provocaría el incremento del nivel de paso y por consiguiente el sobrepaso por encima de las estructuras, lo que llevaría este material al siguiente sistema de cribado de finos.

BOMBAS SUMERGIBLES

Las tres bombas de cribado, las cuatro de recirculación y las tres de retrolavado son de la misma marca y características, en su montaje cuentan con uniones universales y cheques para su fácil extracción en caso de requerirse, cuentan cada una con su flotador de protección que apaga la bomba en caso de que no halla nivel y un flotador de nivel alto para el control de encendido.

Cuadro 2. Características de la bomba

Bomba sumergible Pedrollo MC 30/50	
Voltaje	380V
Potencia	3.0HP
Amperaje	5.7A
Caudal	100-1100 L/min
Uso	Doméstico ; Civil ; Industrial
Elevación de succión máxima	25m

Fuente: PEDROLLO MC 30/50 CARACTERÍSTICAS (en línea). Bicanal-Pedrollo (Consultado: 6 mayo de 2020). Disponible en www.pedrollo.com/public/allegati/MC%2050-70_ES_60Hz.pdf

Figura 4. Bombas Marca PEDROLLO MC 30/50



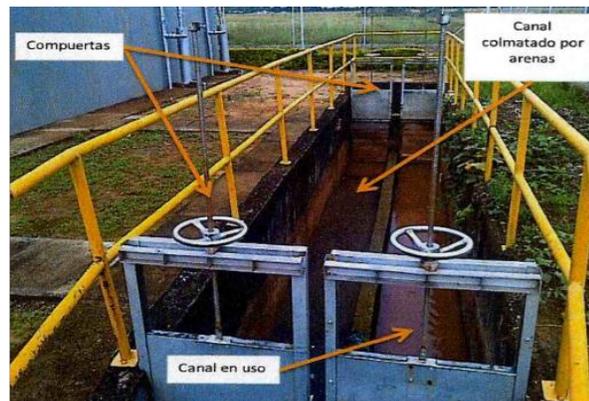
Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: en caso de taponamiento suelte la unión universal y proceda a extraer del pozo, trate de extraer manualmente la causa del atascamiento, luego haga la prueba para determinar el sentido de giro, después instale el término y póngalo en funcionamiento.

DESARENADOR

Las aguas negras llegan al desarenador que se localiza después de las rejillas tal y como se exige en el RAS-2017, en donde se lleva a cabo la separación mecánica de las arenas y de la mayoría de los sólidos sedimentables, este consta de dos canales con sus respectivas compuertas de entrada y salida, además tiene una caída a modo de resalto hidráulico en el piso de la estructura para lograr la decantación del material.

Figura 5. Desarenador



Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: dada la gran cantidad de arenas que llegan con el agua residual cada canal del desarenador se colmata en menos de tres días de operación continua, por este motivo en la rutina semanal de operación se programó la visita del camión recolector del exceso de arenas los lunes y viernes de 7 a 9 am, esto para hacer el mantenimiento de cada canal a la vez, cerrando las dos compuertas del canal y realizando dicha maniobra.

CANASTILLAS DE RETENCIÓN DE FINOS

Estas cajas de fibra de vidrio contienen canastillas de retención de finos fabricados en aluminio, estas retienen el material que pasó por las rejillas en el pozo de cribado, las canastillas se retiran y se dispone del material adecuadamente.

Figura 6. Canastillas de Retención de Finos.



Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: estas cajas deben ser limpiadas cuantas veces sea necesario, mínimo 3 veces al día, en la rutina de operación se contemplan 3 limpiezas, pero esto puede variar de acuerdo con las necesidades, luego de retirar el material sobrante el operario debe disponerlo en las bolsas dispuestas para tal fin. Si no se realiza la limpieza las cajas pueden rebozarse y causar alteraciones en las instalaciones.

2.6.2 Tratamiento primario. Se encuentran los siguientes equipos:

TRAMPA DE GRASAS, DIGESTORES, SEDIMENTADOR, FILTRO LENTO Y TANQUE DE RETROLAVADO

Esta estructura contiene compartimientos separados por muros de concreto reforzado en donde se llevan a cabo el inicio de procesos de digestión aerobia, oxidación fisicoquímica, sedimentación acelerada, pasando a la filtración y luego al tanque de almacenamiento de agua clarificada-filtrada, a este último también se le llama tanque de retrolavado por que con esta agua almacenada se realiza el retrolavado ascendente del filtro.

Figura 7. Trampa de Grasas, Digestores, Sedimentador, Filtro Lento y Tanque de Retrolavado.



Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: estas estructuras sólo requieren una revisión de posibles filtraciones o humedades en las paredes, las tapas superficiales, los sistemas de aireación y el aseo interior debe realizarse cada vez que se note una afectación del tratamiento por estas causas.

DIGESTOR AERÓBICO PRIMARIO

En el Digestor Aeróbico Primario se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica por vía aeróbica, en presencia de O_2 , donde se convierte en CO_2 , H_2O , y cenizas, gracias a la acción de las bacterias y a la inyección de aire.

DOSIFICACIÓN DE BACTERIAS

Dosis recomendada según fabricante $1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg/L} = 1 \text{ g/m}^3$ de agua a tratar

- En la PTAR de Puerto Gaitán tenemos:

Caudal: $60 \text{ L/s} = 5\,184 \text{ m}^3/\text{día}$

Dosis: $5\,184 \text{ g de bacterias/día}$

Modo de uso:

La planta está diseñada para manejar tiempos de retención de 8 horas, la dosificación se debe hacer escalonada y se deben activar las cepas de la siguiente manera:

5 184 g/3 bloques de 8 horas = 1 728 g/8 horas, entonces, 1 g de bac. \approx 1 mL de bac.

Dosis = 1728 mL/8 horas

Este volumen debe ser disuelto en 10 L de agua residual cruda y se deja reposar 10 minutos para lograr la activación de los microorganismos, luego debe aplicarse por partes iguales en cada módulo, puede ser en la caja de cribado de gruesos arriba de los tanques.

Rutina de dosificación:

1er dosis: 6 am

2da dosis: 2 pm

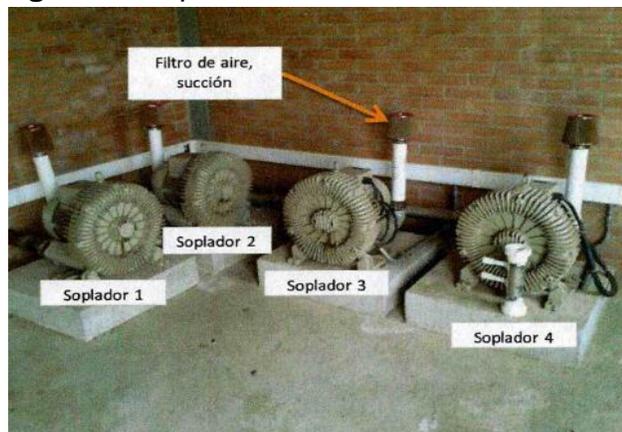
3er dosis: 10 pm

Se debe tener en cuenta que las malas prácticas de esta rutina de dosificación inciden directamente en la calidad del agua tratada.

SOPLADORES

Estos sopladores suministran el aire requerido para elevar el contenido de oxígeno disuelto en el agua residual y así optimizar los procesos de digestión de la carga contaminante por medio de la acción de microorganismos aerobios, estos además constan de una manguera neumática y un dissipador de calor para cada uno en la tubería de descarga, además de un filtro de aire en la tubería de succión.

Figura 8. Sopladores



Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: se debe realizar una revisión preventiva cada 6 meses de uso continuo, igualmente se deben chequear el estado de las mangueras y accesorios del equipo. Se debe tener cuidado al acercarse a estos equipos, pues se puede

sufrir algún tipo de quemadura, ya que estos equipos logran temperaturas altas en su operación normal.

DIGESTOR SECUNDARIO

En el digester secundario donde ocurre la sedimentación, aireación, nitrificación, desnitrificación es dividido en compartimentos mediante cortinas de concreto, con la finalidad de darle el tiempo requerido al agua y hacerla circular en forma zigzag y flujos ascendentes. En los dos primeros compartimentos se continúan los procesos de degradación de la materia orgánica, al igual que la precipitación de las partículas al fondo del tanque clarificador-sedimentador, de donde son extraídas cíclicamente por un sistema de bombeo que recircula el agua por unos separadores tipo hidrociclónico, calculado para separar los lodos estabilizados periódicamente por un sistema de auto limpieza (lodos más pesados), y sacarlos por purga automática, y recircular al inicio del proceso el licor mezclado con lodos y materia orgánica en proceso de estabilización. El tiempo de retención fue calculado adecuadamente para un efectivo tratamiento.

BOMBAS DE DOSIFICACIÓN Y EQUIPOS DE CONTROL

Estas bombas dosifican hipoclorito de sodio al 15% y cloruro férrico al 40%, estos son los precursores del ión ferrato, estas sustancias químicas llegan al sintetizador en donde se lleva a cabo la reacción que da lugar a la producción de ión ferrato y cloro gaseoso, compuestos que oxidan, coagulan y floculan las sustancias que componen la carga contaminante del vertimiento.

Figura 9. Bombas de Dosificación



Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: estas bombas de dosificación son de muy fácil manipulación, su mantenimiento debe enfocarse en las mangueras de succión, descarga y ceba, esta

última sirve para cargar la tubería de succión y para eliminar el aire presente en las mangueras, esta debe abrirse sólo en el momento de la carga de la bomba, de otro modo debe estar cerrada.

DOSIFICACIÓN DE QUÍMICOS

Para el pulimento del agua que ha pasado por el proceso de oxidación aeróbica por bioaumentación y aireación extendida (BPAE), se utiliza una reacción química en donde se produce el ión ferrato y cloro gaseoso, cuyos precursores son el cloruro férrico 40% y el hipoclorito de sodio 15%.

Estos se aplican con las bombas de dosificación automáticas según los tiempos de operación programados en el tablero de control, estas bombas se ajustan en el dial a no más de 20%, es decir a no más de 2 mL/pulso o según indicaciones.

UNIDAD DE OXIDACIÓN - COAGULACIÓN

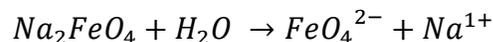
Al sintetizador llegan dos líneas de sustancias químicas, en el sentido del flujo primero entra el hipoclorito de sodio al 15% y luego entrar el cloruro férrico al 40%, allí se sintetiza el ión ferrato en las estructuras internas del aparato para ser mezclado con el agua residual, este tiene una serie de paletas que crean la turbulencia necesaria para la mezcla rápida.

Para este caso se emplea el método químico húmedo para la síntesis del ión ferrato en donde el cloruro férrico es oxidado por el hipoclorito de sodio.

Primero se sintetiza el ferrato de sodio por medio de la siguiente reacción:

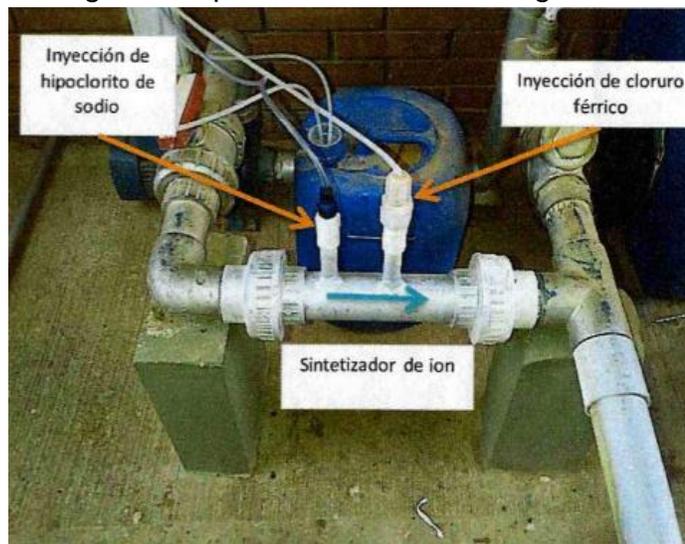


Luego al estar en contacto con el agua, ésta se ioniza y se sintetiza finalmente el ión ferrato en la reacción de a continuación⁴¹:



⁴¹ TALAIEKHOZANI, Amirreza ,et al. An overview on production and application of ferrate (VI) for chemical oxidation, coagulation and disinfection of water and wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2017, pp. 1833

Figura 10. Sintetizador del ión ferrato (FeO_4^{2-}) y cloro gaseoso para la oxidación - coagulación



Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: el sintetizador tiene uniones universales que facilitan su desmonte, en el primer segmento debe verificarse que las tuberías de inyección no estén obstruidas por el ión ferrato (sustancia gelatinosa de color rojizo), ya en el segundo segmento se debe verificar que no haya pelos ni sólidos atrapados en la estructura interna. Este procedimiento debe hacerse una vez por semana o cuando se evidencie que la calidad del agua se haya visto afectado por la falta de dosificación.

SEPARADOR HIDROCICLÓNICO DE LODOS

Esta estructura está diseñada para crear un efecto Vortex en donde los lodos son concentrados en la parte inferior y el agua menos pesada sube y sale por la tubería de descarga, la purga de estos lodos concentrados se realiza automáticamente por el brazo mecánico y conforme a la frecuencia programada en el tablero, además tiene un equipo Aquamagnet que evita incrustaciones en las tuberías.

Figura 11. Separador Hidrociclónico de Lodos



Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: para el buen funcionamiento del equipo se debe crear un diferencial de presión cerrando $\frac{1}{4}$ de giro la válvula de salida, se debe chequear la presión en el manómetro y la posición correcta de las válvulas, el equipo se puede desmontar retirando las uniones universales cada 6 meses para su mantenimiento, en este momento se deben manipular las válvulas en posición de bypass, esto garantiza el funcionamiento continuo de la planta cuando se le esté dando el mantenimiento a la unidad.

En operación normal se debe chequear que tanto la válvula de succión y de descarga de la bomba y la válvula de purga del sedimentador estén abiertas para evitar daños en el equipo, además del buen funcionamiento del actuador de la válvula de purga de los lodos presionando el botón "purga automática" en la fuente de poder.

COLECTOR DE LODOS

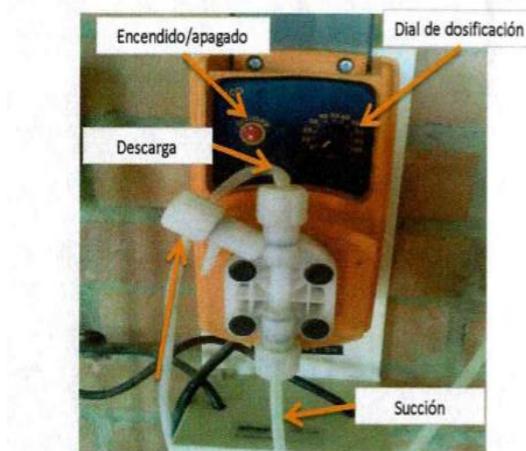
El lodo separado por purgas de los separadores sólidos (hidrociclones de tres cámaras, separan los lodos estabilizados por mayor peso), es dispuesto y distribuido en una batería de filtros bolsa de $100\ \mu\text{m}$, donde por gravedad se produce su deshidratación y secado. El percolado o líquido de escurrimiento es evacuado por medio de una tubería hacia el tanque de bombeo al inicio del proceso.

2.6.3 Tratamiento secundario. Se encuentran los siguientes equipos:

BOMBAS DE DOSIFICACIÓN DE DESINFECTANTE

Esta bomba de dosificación aplica la cantidad necesaria de hipoclorito de sodio para garantizar una concentración de cloro residual en el agua que no permita la proliferación de microorganismos indeseables en el agua, con esto se finaliza el proceso de tratamiento del vertimiento antes de ser dispuesto al cuerpo de agua o a su disposición final, esta concentración debe estar entre 0,1 y 3 ppm.

Figura 12. Bombas de dosificación de hipoclorito de sodio



Fuente: elaboración propia.

Mantenimiento: estas bombas de dosificación son de muy fácil manipulación, su mantenimiento debe enfocarse en las mangueras de succión, descarga y ceba, esta última sirve para cargar la tubería de succión y para eliminar el aire presente en las mangueras, esta debe abrirse sólo en el momento de la carga de la bomba, de otro modo debe estar cerrada.

2.7 MONITOREO FÍSICOQUÍMICO DEL VERTIMIENTO

2.7.1 Parámetros a evaluar. Al tratarse de aguas residuales domésticas, la Resolución 631 de 2015, permite conocer los parámetros que deben tenerse en cuenta para ser analizados cuando se necesita algún tipo de tratamiento.

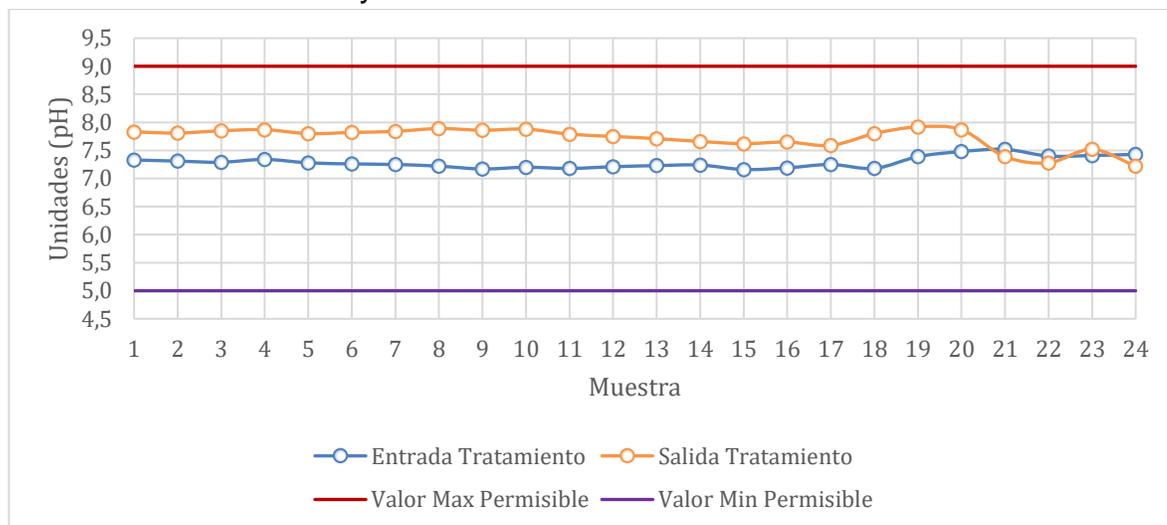
Más específicamente, en el artículo 8, es donde se establecen los parámetros fisicoquímicos con sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales domésticas (ARD) de las actividades industriales, comerciales, o de servicios, y de las aguas residuales (ARD y ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales. Teniendo en

cuenta este artículo y a la caracterización realizada por la empresa, los parámetros de interés están nombrados a continuación:

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
- pH
- Sólidos Sedimentables (SSED)
- Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- Grasas y Aceites
- Fosforo total
- Nitrógeno total
- Tensoactivos
- Coliformes termotolerantes
- Nitratos y Nitritos

2.7.2 Caracterización del agua residual doméstica. La PTAR Puerto Gaitán suministro la caracterización de las aguas más reciente la cual fue realizada por la empresa TECNO AMBIENTAL S.A.S mediante un muestreo compuesto los días 16 y 17 de noviembre del año 2018 de las aguas residuales domésticas, el muestreo se tomó a la entrada y a la salida del tratamiento por 24 horas, tomando alícuotas con una diferencia de 60 minutos entre cada una de las muestras puntuales para un total de 24 alícuotas. Para cada una de las alícuotas se le tomo el pH y el resultado fue el siguiente.

Gráfica 1. Valores de pH para entrada y salida del sistema durante 24 horas del día realizado entre el 16 y 17 de noviembre de 2018.

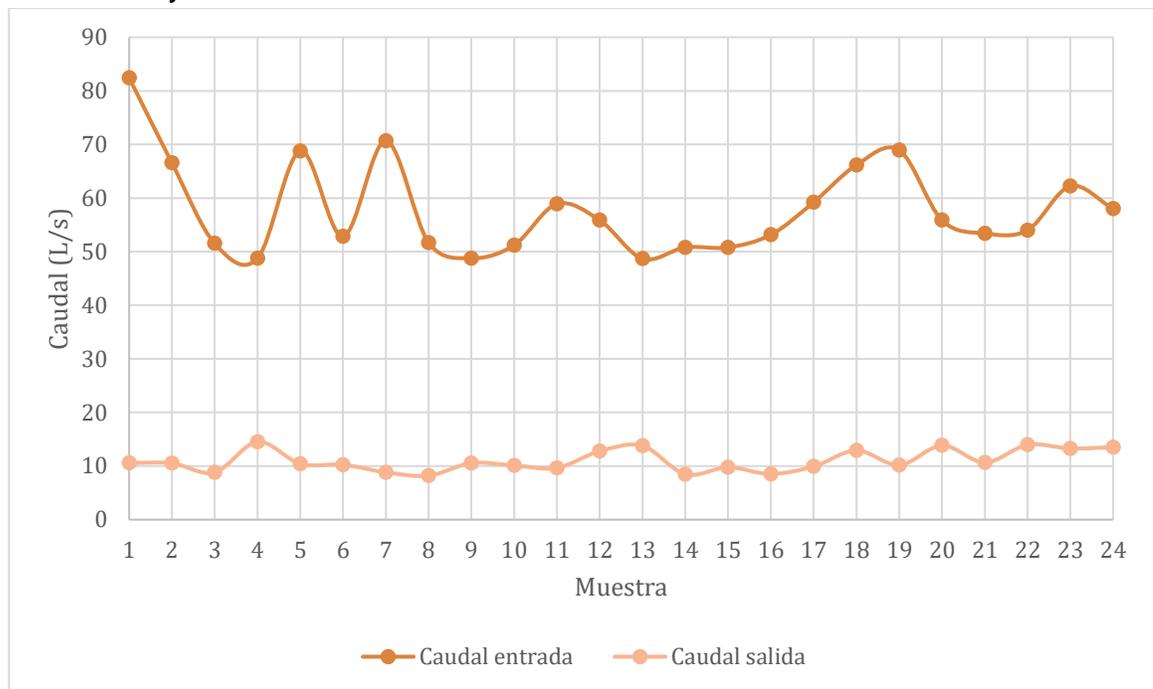


Fuente: elaboración propia

Los valores obtenidos para pH en la entrada del sistema de tratamiento presentaron una variación de 7,16 y 7,52 unidades, para el caso de la salida de tratamiento, la variación oscila entre 7,22 y 7,92 Unidades. Los rangos obtenidos para el pH en la salida del sistema se ajustan al rango estipulado por la normativa ambiental colombiana (decreto 1076 del 2015 y resolución 631/15).

Se realizó un monitoreo para el caudal de entrada a la planta de tratamiento por medio de una medición volumétrica para obtener los caudales en L/s durante el transcurso de las 24 horas del día. A continuación, en la gráfica 2 se encuentran los resultados.

Gráfico 2. Valor caudal para entrada y salida durante las 24 horas del día, realizado entre el 16 y 17 de noviembre de 2018.



Fuente: elaboración propia

Se mide de manera adecuada al realizarse medidas durante 24 horas cada 60 minutos y así se establecen los caudales medios y máximos. Se registró un caudal mínimo de entrada de 48,69 L/s y caudal máximo de 82,43 L/s. En la salida del tratamiento los caudales variaron entre 8,20-14,52 L/s. El caudal promedio de entrada y salida fue de 57,88 L/s y 11,08 L/s respectivamente.

Finalmente, a partir de la caracterización realizada para los diferentes parámetros fisicoquímicos del muestreo compuesto tomado previamente, los valores fueron los siguientes.

Tabla 1. Reporte resultados de caracterización

Parámetro	Técnica	Unidad	Entrada al tratamiento	Salida del tratamiento	Res. 631 Art .8
DBO5	Incubación-Electrodo	mg O2/L	187	11	90
DQO	Reflujo cerrado , volumétrico	mg O2/L	267	16	180
Fosforo total	Digestión Ácido Sulfúrico y Nítrico	mg P/L	6,48	1,76	Análisis y reporte
Grasas y aceites	Infrarrojo	mg/L	156,2	<1	20
HB totales	Infrarrojo	mg/L	6,8	<1	Análisis y reporte
Nitratos	Espectrofotometría UV	mg N-NO ₃ /L	<0,5	1,8	Análisis y reporte
Nitritos	Colorimétrico	mg N-NO ₂ /L	<0,02	0,33	Análisis y reporte
Nitrógeno amoniacal	Destilación-Volumétrico	mg N-NH ₃ /L	14,3	4,6	Análisis y reporte
Nitrógeno total	Digestión – Kieldhal	mg N/L	5	<5	Análisis y reporte
Sólidos sedimentables	Volumétrico , Cono Imhof	mL/L	2,5	<0,1	5
Sólidos suspendidos totales	Gravimétrica	mg/L	262	9	90
Tensoactivos	Colorimétrico	mg MBAS/L	3,7	<0,2	Análisis y reporte
Coliformes termotolerantes	Sustrato definido	NPM/100 mL	2411960	<1	-

Fuente: TECNO AMBIENTAL S.A.S

Se realizó una caracterización completa de los parámetros exigidos por el artículo 149 del RAS-2017, donde se mide DBO₅ total y soluble; sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables; DQO soluble y total; nitrógeno total Kjeldahl; fósforo (soluble y Particulado). Estas muestras integradas se emplean para poder calcular las cargas (kg/día) de los componentes contaminantes presentes en el agua.

2.7.3 Porcentaje remoción de parámetros críticos. Es necesario tener una caracterización del agua para cada etapa del proceso, así se tiene un seguimiento de la remoción para poder comparar el rendimiento típico establecido con el actual de la planta de tratamiento.

Tabla 2. Porcentajes remoción

Parámetro	Unidad	Entrada al tratamiento	Salida del tratamiento	% Remoción	% Remoción Mínima RAS-2017
DBO ₅	mg O ₂ /L	187	11	94,1	80-95
DQO	mg O ₂ /L	267	16	94,	80-95
Sólidos suspendidos totales	mg/L	262	9	96,6	80-90

Fuente: elaboración propia

Según los datos presentados en la tabla 2 se está cumpliendo con el porcentaje mínimo de remoción requerido del DBO₅, DQO y SST que están estipulados por el artículo 164 del RAS-2017.

Para relacionar el cumplimiento de las normas del artículo 2.2.3.3.9.14 del Decreto 1076 de 2015 es necesario calcular la carga contaminante de los parámetros tales como DBO₅, DQO y SST.

Con base a las concentraciones de los contaminantes y el valor del caudal promedio de entrada y salida que fue de 57,88 L/s y 11,08 L/s respectivamente se calculó la carga contaminante (kg/día) mediante la siguiente ecuación que se encuentra los lineamientos del decreto 2667 de 2012:

$$B = Q * (CV) * 0,0036 * t$$

- B : carga en el vertimiento (kg/día)
- Q : caudal Promedio de agua residual (L/s)
- CV : concentración del contaminante
- 0,0036 : factor de conversión (mg/s) a (kg/h)
- t : tiempo de vertimiento (h)

De tal forma se calcula la carga para el DBO₅, DQO y SST en la entrada y salida del tratamiento, los resultados se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Cargas contaminantes

Parámetro	Carga (kg/día)	
	Entrada al tratamiento	Salida del tratamiento
DBO ₅	935,17	10,53
DQO	1335,24	15,32
SST	1310,23	8,62

Fuente: elaboración propia

Se realizó una comparación de los valores obtenidos de la tabla.3 con la normativa del decreto 1076 de 2015 para definir si cumple con los requerimientos para verter el agua tratada al río manacacías.

Tabla 4. Comparación resultados con la normatividad para vertimientos a cuerpos de agua

Parámetro	Unidad	Entrada al tratamiento	Salida del tratamiento	Porcentaje Remoción	Decreto 1076 de 2015	Cumple
DBO ₅	kg/día	935,17	10,53	98,9	>80% Remoción	SI
SST	kg/día	1310,23	8,62	99,3	>80% Remoción	SI
pH	Unidad	7,16-7,52	7,22-7,92	N.A	5-9 Unidades	SI

Fuente: elaboración propia

En la tabla 4 se observa que, para el DBO₅, SST y el pH se está cumpliendo con el decreto 1076 de 2015 con el cual se exige un porcentaje de remoción mayor al 80% de la carga contaminante. La planta cuenta con una remoción del 98,9% para el DBO₅ de igual manera el valor del pH que esta entre 7,16-7,52 se encuentra en el rango establecido por la norma.

2.7.4 Análisis de resultados. Después de haber realizado el diagnóstico general de la planta de tratamiento de aguas residuales se encontró que esta tiene cumplimiento con los requisitos mínimos de diseño exigidos para los equipos por la RAS-2017 pero los equipos del pre-tratamiento presentan problemas de colmatación. Igualmente, al tratarse de un sistema de bioaumentación por aireación

extendida la remoción del DBO₅ se encuentra entre el 75-95% tal como se exige en la norma.

Basados en los resultados obtenidos de la caracterización de las aguas residuales domésticas provenientes del municipio de Puerto Gaitán cumple con la norma ambiental para vertimientos a cuerpos de agua, resolución 631 de 2015, artículo 8, donde se estipula los límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas ARD. De igual manera en cuanto al porcentaje de remoción de la carga contaminante(kg/día) se obtiene una remoción del 98,9% para el DBO₅ y 99,3% para SST cuyos valores son mayores al 80% que es el valor que exige el decreto 1076 de 2015. Por otro lado, el RAS-2017 exige un porcentaje de remoción para el DBO₅ y DQO entre 80-95% y para los SST entre 80-90%, dicho requerimiento se está cumpliendo al tener porcentajes de remoción de 94,1%;94% y 96,6% respectivamente.

De esta forma se observa que el cloruro férrico al 40% está actuando de forma correcta, pero es necesario tener una caracterización del agua para cada etapa del proceso, así se tiene un seguimiento de la eficiencia que se presenta en cada etapa de tratamiento. Los resultados obtenidos, son valores que están dentro de los rangos permisibles de la normatividad. Sin embargo, se ha venido trabajando los planes de dosificación de manera empírica y ajustándose al presupuesto que maneja la empresa para el funcionamiento de la PTAR, por esta razón, no se ha estudiado la posibilidad de reducir los costos dentro del proceso de clarificación, ya que esto podría significar una reducción de costos en insumos si se plantean nuevas alternativas de coagulantes y/o coadyudantes que requieran de menor dosificación; con esto se puede reajustar el presupuesto que se maneja en coagulantes para invertir en otras áreas dentro de la empresa, como lo son principalmente las actividades de mantenimiento.

3. REDUCCIÓN DE COSTOS EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN

Con la reducción de costos requerida por la empresa soportada en el diagnóstico del capítulo anterior, se acordó en compañía de los administradores optar por una baja en los costos de los insumos que son empleados en el proceso de coagulación-floculación.

La empresa sugirió emplear un coagulante nuevo o una reducción en la dosificación del usado actualmente en la planta de tratamiento (FeCl_3), si es el caso, utilizar un floculante para tener mayor rendimiento, pero teniendo en cuenta los costos. De este modo es pertinente encontrar la forma de llevar a cabo un proceso de coagulación-floculación eficiente y al mismo tiempo rentable.

Para la reducción de los costos se siguieron dos metodologías: una para la selección de los coagulantes más adecuados para este tipo de agua, y la otra para delimitar los rangos de dosificación dentro de los cuales se puede alcanzar porcentajes de remoción que mantengan en cumplimiento la normativa de vertimiento de la resolución 631 del 2015 y de igual forma genere menores costos, que es el objetivo principal. Estas metodologías se describen y llevan a cabo a continuación.

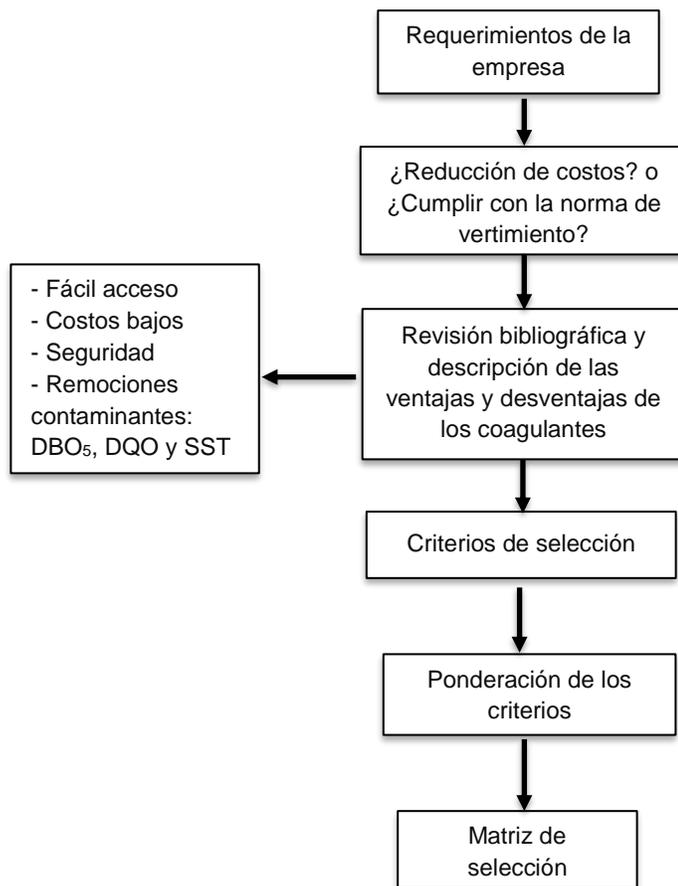
3.1 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE COAGULANTES

Para establecer una metodología para la selección de los coagulantes se consultaron diferentes trabajos publicados en SCIENCE DIRECT, SCIELO, EMERALD PUBLISHING, ELSEVIER y el repositorio de la FUA (Fundación Universidad de América) como principales fuentes de información. En la selección de esta metodología se tuvieron en cuenta los aspectos de mayor relevancia para este proyecto, primero la selección de coagulantes con buen desempeño tanto a nivel de proceso como operativo en la depuración de ARD mediante la remoción de los contaminantes principales demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y sólidos suspendidos totales (SST), y segundo que este coagulante represente una opción viable a nivel económico. Estos aspectos fueron encontrados en el trabajo realizado por CAÑÓN B, L⁴² ya que en este se dio prioridad a la identificación y selección del tratamiento adecuado empleando coagulantes para reducir los parámetros DBO_5 , DQO y SST, esto mediante la consulta de antecedentes y la investigación teórica, teniendo en cuenta la calidad del agua y la economía en el desarrollo del mismo.

⁴² CAÑÓN B, Lizeth. DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROTOTIPO RECICLADOR DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES. BOGOTÁ D.C. 2018.

En el trabajo realizado por CAÑÓN B, L⁴³ los criterios de selección de coagulantes fueron basados en los requerimientos de la empresa, teniendo en cuenta los costos bajos de estos, el fácil acceso, la seguridad industrial debido al manejo de los sustancias químicas por el personal, así como factores que afecten el proceso mismo de coagulación como el rango de pH adecuado y el tipo de agua residual a tratar. La metodología que se empleó se describe a continuación:

Figura 13. Metodología empleada para la selección de coagulantes por CAÑÓN B, L⁴⁴.



Fuente: elaboración propia, con base en CAÑÓN B, Lizeth. DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROTOTIPO RECICLADOR DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES. BOGOTÁ D.C. 2018.

⁴³ Ibíd.

⁴⁴ Ibíd.

3.1.1 Requerimientos de la empresa. La empresa PTAR Puerto Gaitán requiere de una reducción de costos en el proceso de coagulación, ya que parte de los recursos que se dirigen a esta etapa del tratamiento se emplean para las actividades de mantenimiento esto hace necesario el recorte del presupuesto para cumplir con la continuidad del proceso.

La empresa actualmente cumple con la norma de vertimiento de la resolución 631 del 2015 según la caracterización estudiada en el capítulo anterior, por lo cual el fin principal es la reducción de costos, sin embargo, la empresa hace obligatorio el cumplimiento de los parámetros de vertimiento por ende debe tomarse en cuenta la eficacia de los coagulantes en el tratamiento de este tipo de aguas residuales.

3.1.2 Revisión bibliográfica. Para que la selección de los coagulantes sea adecuada buscando mantener la calidad del efluente y disminuir costos en dosificación, se investigan diferentes antecedentes que brinden suficiente información de las condiciones de operación de los coagulantes empleados para observar qué efectos tiene en la remoción de los contaminantes en aguas residuales domésticas, y así mismo generar un criterio más amplio para una selección acertada de los parámetros fundamentales para obtener el mejor desempeño en el proceso de coagulación. En el Anexo A se describen de manera general los antecedentes consultados para la descripción de los tipos de coagulantes.

3.1.3 Coagulantes y floculantes empleados en el tratamiento de aguas residuales. Mediante una revisión bibliográfica se lleva a cabo una descripción de los coagulantes y floculantes más utilizados para el tratamiento de aguas residuales y posteriormente una comparación de las características, con sus ventajas y desventajas correspondientes, para así poder seleccionar el más adecuado para el agua residual doméstica de la PTAR de Puerto Gaitán. Se toma en cuenta el reemplazo de los coagulantes por floculantes, ya que, en muchos casos estos últimos eliminan totalmente el uso de insumos de coagulación.

Los coagulantes más comunes para la utilización en procesos de tratamientos de aguas residuales domésticas son los metálicos. Los cuales son sales de hierro y aluminio que al mismo pueden actuar como floculantes. En el momento que se adicionan al agua, se genera una serie de reacciones complejas⁴⁵, y en consecuencia los productos de la hidrólisis son más eficaces. Estas sales suelen

⁴⁵ LORENZO-ACOSTA, Yaniris. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. [En línea], [consultado el 15 de junio de 2020]. Disponible en Internet:<https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>

reaccionar con la alcalinidad del agua , que producen hidróxidos de hierro o aluminio que son insolubles y forman los precipitados.⁴⁶

Sales de hierro: Generalmente forman floculos pesados y se asientan más rápido que las sales de aluminio⁴⁷.

Cloruro férrico: El FeCl_3 se encuentra en forma de fase líquida y sólida; esta primera es la más utilizada en el tratamiento del agua⁴⁸. La forma sólida es cristalina, de color pardo y se funde fácilmente. Por otro lado, la forma líquida es utilizada con una concentración del 40%. Debido a su alto poder corrosivo es necesario seleccionar adecuadamente los recipientes de almacenamiento y preparación⁴⁹. Presenta problemas de coloración.

Sulfato férrico: El $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ se encuentra en forma de polvo blanco verdoso, muy soluble en agua. Al hidrolizarse forma ácido sulfúrico. Por su alto carácter ácido hay que prevenir los efectos de la acidez⁵⁰. Produce flóculos grandes, por lo cual su decantación es rápida, se emplea precipitaciones de aguas residuales, también se usa en tratamiento de aguas potables, pero puede producir coloración⁵¹.

Sulfato ferroso: El FeSO_4 posee un color verde en forma de polvo, es muy soluble. Generalmente se usa en aguas turbias y alcalinas.⁵²

Sales de aluminio: Forman floculos ligeramente pesados.

Sulfato de aluminio: El estado del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ puede ser sólido o líquido, genera un floculo pequeño y al ser económico es uno de los más utilizados, pero es necesario de almacenar en un lugar seco y libre de humedad. ⁵³

⁴⁶ SEDAPAL. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN [En línea], [consultado el 15 de junio de 2020]. Disponible en Internet: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154

⁴⁷ BINNIE, Chris. KIMBER, Martin. THOMAS, Hugh. Basic Water Treatment (6th Edition). London. ICE Publishing, 2018.

⁴⁸ DE VARGAS, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano: Manual I. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente,2004.176p.

⁴⁹ *Ibíd.*,176p.

⁵⁰ *Ibíd.*,177p.

⁵¹ *Ibíd.*

⁵² *Ibíd.*,177p.

⁵³ SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Unidad 3: potabilización del agua. [En línea], [consultado el 15 de junio de 2020]. Disponible en Internet: <https://es.scribd.com/doc/305534568/Guia-de-Aprendizaje-Unidad-3>

Policloruro de aluminio: Es un coagulante inorgánico, empleado comúnmente para remover color y materia coloidal en sistemas acuosos. Contribuye a la remoción de sólidos suspendidos, turbidez y partículas orgánicas⁵⁴.

Polielectrolitos o polímeros: No se consideran coagulantes sino como ayudantes en la coagulación. Posee un alto peso molecular. Su dosificación suele ser baja, lo cual es una ventaja, a pesar del alto costo. Se usan por lo general en el tratamiento de aguas potables, por la menor cantidad de lodos producida y la facilidad del tratamiento de los mismos.⁵⁵

Coadyuvantes de floculación: Son compuestos utilizados para aumentar la densidad del floculo y disminuir las interferencias entre materiales orgánicos disueltos y disminuir las interferencias debidas a materiales orgánicos, lo cual favorece el proceso de sedimentación.⁵⁶

A continuación, en el cuadro 3 se encuentran los polielectrolitos más utilizados en el tratamiento de aguas residuales.

⁵⁴ COGOLLO FLOREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados; caso del hidroxiclóruo de aluminio. En: DYNA, No 165, (Oct 2010); p.18-27

⁵⁵ RESTREPO, Alberto. Evaluación del proceso de coagulación. Floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Medellín: Universidad Nacional, 2009, p.206.

⁵⁶ SCIELO COLOMBIA. Polielectrolitos sintéticos. [En línea], [consultado el 15 de junio de 2020]. Disponible en Internet: http://books.google.com.co/books?id=l_OGMwaGkgQC&printsec=frontcover&source=gbs_r&cad=0

Cuadro 3. Clasificación polielectrolitos más utilizados.

POLIELECTROLITOS			
<p>Los más utilizados actualmente. Su objetivo es mejorar la floculación y las propiedades mecánicas de los flóculos. Se usan por lo general, después de los coagulantes, sin embargo, pueden utilizarse como coagulantes, sustituyendo a los compuestos de aluminio o hierro. Estos compuestos forman "puentes" (enlaces de partículas coaguladas, por el contacto entre estas y los polímeros). Debe usarse en pequeñas cantidades, debido a su alta toxicidad.</p>			
Polielectrolitos naturales	Aniónicos	Catiónicos	No iónico
<p>La mayoría de polímeros naturales y sus derivados, están compuestos por polisacáridos y grupos carboxilos (propiedades aniónicas). Ventaja: No tienen toxicidad.</p>	<p>Obtenidos mediante la polimerización de la acrilamina con ácido acrílico, también por hidrólisis de la poliacrilamida con álcali, (para obtener grupos carboxilo).</p>	<p>Obtenidos por la polimerización de la acrilamida con compuestos de amonio cuaternario.</p>	<p>Si se utilizan derivados de la poliacrilamida, los grupos amida convierten la solución en "no iónica".</p>

Fuente: SEDAPAL. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN. [En línea], [Consultado el 15 de junio de 2020]. Disponible en: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e359b74b9eae5556209841d9b8&groupId=10154.

Después de haber descrito los diferentes coagulantes y floculantes se realiza la comparación de estos con sus ventajas y desventajas para seleccionar los insumos más acordes al tipo de agua a tratar a través del cuadro 4.

Cuadro 4. Características de los coagulantes más empleados en el tratamiento de potabilización de agua.

COAGULANTE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SULFATO FÉRRICO	<p>Efectivos en la remoción de sustancias orgánicas y bacterias.</p> <p>Usado para la remoción de Hierro y Manganeseo.</p> <p>Funciona de forma estable en un amplio intervalo de pH.</p> <p>Producen flóculos grandes y densos que decantan rápidamente.</p> <p>Es eficiente sin un ayudante de floculación.</p> <p>Coagulante de bajo costo.</p> <p>Alta velocidad de reacción.</p> <p>No hay problemas con el Aluminio residual.</p> <p>Fácil y seguro de manejar y almacenar.</p> <p>Se puede encontrar tanto líquido como sólido.</p>	<p>Puede producir problemas de coloración.</p> <p>Pueden causar precipitación en el agua tratada.</p> <p>La dosis de Hierro es mayor a la dosis de Aluminio.</p> <p>El producto sólido necesita una muy buena mezcla en la unidad de dilución.</p> <p>Es poco corrosivo para manejar y almacenar.</p>
SULFATO FERROSO	<p>Compuesto coagulante ácido granular de color verde.</p> <p>Se utiliza en residuos altamente alcalinos.</p> <p>Es de fácil absorción.</p> <p>En presentación sólido y líquido.</p> <p>Para clarificación de aguas muy turbias.</p> <p>Se utiliza en aguas muy turbias.</p> <p>Es una fuente de hierro económica.</p>	<p>Se requiere añadir Cal o Cloro para asegurar la coagulación.</p> <p>Debe existir la oxidación del ion ferroso a férrico.</p>
CLORURO FÉRRICO	<p>Elimina fosfatos, sulfuros y metales pesados presentes en las plantas de agua potable.</p> <p>Por ser un producto líquido es de muy fácil aplicación.</p> <p>De bajo costo.</p> <p>Genera alta velocidad de reacción.</p> <p>El rango bajo de pH 3.5 – 7.0 ayuda en la remoción de sustancias orgánicas y microorganismos.</p> <p>El rango alto de pH 8.0-9.5 es usado para la remoción de Hierro y Manganeseo.</p> <p>Eficiente sin ayudante de floculación.</p>	<p>Puede presentar problemas de coloración en las aguas.</p> <p>Problemas en el proceso pueden causar precipitación en el agua tratada.</p> <p>Muy corrosivo para manejar y almacenar.</p>

Cuadro 4. (Continuación)

COAGULANTE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SULFATO POLIFÉRRICO	<p>Polímero inorgánico de gran eficiencia. Forma flóculos grandes y de rápida sedimentación. No causa contaminación por hierro. Buen efecto en la decoloración capturando microorganismos y reduciendo DBO₅, DQO y metales pesados. Baja corrosión. Eficiente para aguas crudas con alta turbidez. Se requieren bajas dosis a bajos costos de tratamiento.</p>	<p>Puede presentar problemas de coloración en las aguas. Problemas en el proceso pueden causar precipitación en el agua tratada. Muy corrosivo para manejar y almacenar. Requiere acondicionadores de pH.</p>
SALES DE HIERRO CON POLÍMEROS ORGÁNICOS	<p>Requieren pequeñas dosis Actúan como ayudantes de coagulación. Mejorando la formación de flóculos. Se obtienen mejores características en la sedimentación.</p>	<p>Puede presentar problemas de coloración en las aguas. Problemas en el proceso pueden causar precipitación en el agua tratada.</p>
SULFATO DE ALUMINIO	<p>Coagulante químico más empleado en el mercado a costos razonables. De fácil obtención por su bajo costo y facilidad de producción. Efectivo para producir coagulación de vertidos con compuestos carbonatos. Es una sal metálica, que reacciona formando flóculos de hidróxidos de aluminio al contacto con la alcalinidad de las aguas a tratar, facilitando su limpieza. Reducción de coloides orgánicos y fósforo. En presentación sólido y líquido, y en diferentes grados de pureza. Forma flóculos blancos casi invisibles.</p>	<p>El rango de trabajo de pH muy limitado Requiere control de pH. La remoción de material orgánica es limitada. Genera problemas con agua de alta turbiedad y alto contenido de Aluminio residual. Muchas veces requiere un ayudante de floculación.</p>
ALUMINATO DE SODIO	<p>Coagulante y acondicionador de pH en el tratamiento de agua. Se reduce el uso de correctores de pH como la cal, soda cáustica o carbonato de sodio. Elimina color a pH bajo. Permite un tratamiento con pH un poco más altos que el sulfato de aluminio.</p>	<p>Poco empleado en tratamiento.</p>

Cuadro 4. (Continuación)

COAGULANTE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
POLICLORURO DE ALUMINIO (Polihidroxiclóruros de aluminio)	<p>Es de fácil manejo, almacenamiento y dosificación.</p> <p>Se disminuye el uso de modificadores el pH.</p> <p>Genera un menor tiempo de residencia por la mayor rapidez en la formación de flóculos.</p> <p>Genera menor producción de lodos y un menor residual de aluminio.</p> <p>Mejora la velocidad de formación de flocs y la remoción de color y turbidez.</p> <p>Mejora la eficiencia de la filtración.</p> <p>Trabaja en un amplio rango de pH.</p> <p>No modifica el valor de pH del afluente.</p> <p>Menor costo de operación.</p> <p>Menor consumo de polímero y menor dosis de Aluminio.</p>	<p>Precio más alto por kg.</p> <p>Un pH demasiado alto para la coagulación puede bajar la remoción de sustancia orgánica.</p>
CLOR-HIDRÓXIDO DE ALUMINIO	<p>Contribuye a la remoción de sólidos suspendidos y Turbidez.</p> <p>Forma flóculos de mayor tamaño de aglomeración.</p> <p>Se utiliza principalmente para remoción de color y materia coloidal.</p> <p>Sirve como reemplazo del Sulfato de aluminio y de otras sales inorgánicas convencionales.</p>	<p>Depende de la condición de pH y del tipo de mezcla, requiriendo de su control.</p> <p>Menos empleado en tratamiento de potabilización.</p>
POLIELEC-TROLITOS NATURALES	<p>Baja toxicidad.</p> <p>Polímero de alto peso molecular conducen a la formación de flóculos más grandes.</p> <p>Reduce la cantidad de lodos.</p> <p>Disminuye costos en el tratamiento.</p> <p>Usos como ayudantes coagulación.</p> <p>Incrementa la velocidad de sedimentación de los flóculos.</p> <p>Son biodegradables.</p>	<p>Se utilizan a pH bajos</p> <p>Variación de efectividad por cambios de pH.</p> <p>Debe usarse suficiente agitación mecánica para disolverlo en agua por su alta viscosidad.</p> <p>Pueden reaccionar con otras sustancias químicas que son peligrosas para la salud.</p> <p>Los polímeros agregan carga orgánica al agua que puede no ser retirada antes de llegar al consumidor.</p>

Fuente: PÉREZ BELTRÁN, Jessica P. Evaluación de la Sustitución del Agente Coagulante Sulfato de Aluminio en el Proceso de Actual de Coagulación-Floculación de Agua Potable en la Empresa EAF SAS ESP. Bogotá D.C. 2017.

Según los datos obtenidos en la caracterización realizada en el mes de noviembre de 2019, el pH del afluente estuvo entre 7,16 y 7,52 unidades, este parámetro es

considerado como uno de los más importantes porque permite identificar los coagulantes adecuados para este rango de pH. Considerando estos valores, en cuadro 5 se muestran los rangos adecuados para cada coagulante.

Cuadro 5. Rango óptimo de pH para cada coagulante

COAGULANTE	INTERVALO DE pH EFECTIVO
Sulfato Férrico	4.0 - 11.0
Sulfato Ferroso	> 8.5
Cloruro Férrico	3.5 - 7.0 y 8.0 - 9.5
Sulfato Poliférrico	De mayor desempeño: 6.0 - 9.0 De trabajo: 4.0 - 11.0
Sales de hierro con polímeros orgánicos	5.0 - 7.0
Sulfato de Aluminio	6.0 - 8.0
Aluminato de Sodio	3.0 - 6.0
Policloruro de Aluminio	3.0 - 12.0
Polielectrolitos Naturales	3.0 - 5.0

Fuente: PÉREZ BELTRÁN, Jessica P. Evaluación de la Sustitución del Agente Coagulante Sulfato de Aluminio en el Proceso de Actual de Coagulación-Floculación de Agua Potable en la Empresa EAF SAS ESP. Bogotá D.C. 2017.

3.1.4 Criterios de selección. La matriz de selección permite evaluar el desempeño de cada coagulante empleando distintos criterios de selección que están estrechamente ligados a los resultados del proceso de coagulación-floculación, esta herramienta se ha desarrollado en distintos trabajos de investigación para la selección adecuada de los coagulantes, evitando trabajos de experimentación para observar el rendimiento en la eliminación de material contaminante de los coagulantes en un tipo de agua residual⁵⁷.

Con base en la información presentada en los cuadros 3, 4 y 5 se realiza la matriz de selección de coagulantes para escoger las mejores alternativas de acuerdo a los siguientes criterios: factibilidad en aguas residuales domésticas, pH requerido para el vertimiento, formación de flóculos sedimentables, eficiencia, disponibilidad, estado líquido del coagulante, uso de coadyudante de floculación, corrección de pH, velocidad requerida para la formación de flóculos y factibilidad de costos.

La factibilidad de un coagulante en aguas residuales depende principal del tipo de agua y sus contaminantes específicos, sus concentraciones relativas y otros parámetros de calidad que afectan el tratamiento dependen en gran medida de las condiciones locales de la actividad humana, ya que no se cuenta con la información

⁵⁷ Ibíd.

requerida para caracterizar los contaminantes en específico del agua residual doméstica de Puerto Gaitán, se describe de manera general las fuentes que generan estas aguas residuales afluentes a la PTAR de Puerto Gaitán. Las ARD se caracterizan por proceder de los sanitarios, regaderas, lavamanos en recintos residenciales y de otras actividades de tipo doméstico, también se incluyen establecimientos comerciales y de instituciones como el hospital municipal, escuelas, entre otros⁵⁸. Las AR afluentes a la PTAR del municipio de Puerto Gaitán provienen de la mayoría de las fuentes descritas anteriormente por lo cual se clasifican como aguas residuales de origen doméstico.

A continuación, se describen los criterios de selección y su importancia para seleccionar los coagulantes que presenten mejores desempeños en la clarificación de ARD:

La facilidad de formación de flóculos permite una rápida aglomeración de partículas desestabilizadas previamente en el proceso de coagulación, y así llevar a cabo la sedimentación de los floculos formados durante la mezcla lenta en el proceso de floculación.⁵⁹

El uso de coagulantes en estado líquido es importante debido a que permite una rápida homogenización en la mezcla a dosificar⁶⁰.

No es adecuado el uso de coadyudantes debido a que estos pueden representar mayores costos de los insumos en el proceso de coagulación, y aunque estos pueden reducir la dosis de coagulante principal, su costo es normalmente mayor respecto a coagulantes de sales de hierro y aluminio⁶¹.

El pH del afluente es importante para cumplir con los parámetros de su vertimiento en el cuerpo de agua superficial, debido a que el coagulante aporta a las propiedades acidas y alcalinas del agua durante la desestabilización mediante los compuestos complejos formados en la misma⁶².

La disponibilidad, la eficiencia y el costo de los coagulantes son factores que deben tomar en cuenta debido a que representan un criterio general para escoger los más adecuados respecto al cumplimiento de las metas propuestas en los objetivos

⁵⁸ MANUAL DE CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES. ANDI. MEDELLÍN, COLOMBIA. 1997.

⁵⁹ CAÑÓN, Lizeth. DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROTOTIPO RECICLADOR DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES. Bogotá D.C. 2018

⁶⁰ *Ibíd.*

⁶¹ *Ibíd.*

⁶² *Ibíd.*

3.1.5 Ponderación de los criterios.En el cuadro 6 se especifica la calificación atribuida según el grado de influencia de los parámetros para la construcción de la matriz de selección.

Cuadro 6. Calificación en la matriz de selección.

CALIFICACIÓN	INFLUENCIA DEL FACTOR
1	Influencia negativa
3	Influencia aceptable
5	Influencia positiva

Fuente: CAÑÓN, Lizeth. DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROTOTIPO RECICLADOR DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES. Bogotá D.C. 2018

El valor de 1 es la calificación más baja, sugiere que se le atribuye un grado desfavorable al aspecto o factor evaluado, el valor de 3 indica una influencia promedio dentro de la escala, y el 5 es la calificación más alta, atribuyendo la influencia más alta respecto a otras alternativas. Al desarrollar la sumatoria de estas calificaciones los valores más altos indican las mejores alternativas.

En el cuadro 7 se muestran los factores tomados en cuenta en la selección de los coagulantes, así mismo se denota el factor de ponderación, el cual representa el porcentaje asignado a cada aspecto según el grado de importancia dentro de la construcción de la matriz de selección.

Para establecer un factor de ponderación se debe tener en cuenta aquellas características de acuerdo al peso que generan en el proceso, en la que las características como los bajos costos y la eficiencia como coagulante obtienen mayor peso para la selección con el fin de generar mayores beneficios económicos y operativos para la empresa⁶³.

Para este caso se asignó una mayor importancia a la factibilidad del uso de coagulante en aguas residuales domésticas ya que es el aspecto más relevante respecto al proceso de coagulación-floculación, con esto se garantiza la eficacia del coagulante y se filtran las mejores opciones a nivel de proceso, de igual manera el costo del coagulante tiene un factor de ponderación alto para evitar el uso coagulantes costosos que dificulten alcanzar el objetivo principal de reducción de costos en el proceso de coagulación-floculación.

⁶³ PÉREZ, Jessica. Evaluación de la Sustitución del Agente Coagulante Sulfato de Aluminio en el Proceso de Actual de Coagulación-Floculación de Agua Potable en la Empresa EAF SAS ESP. Bogotá D.C. 2017.

Cuadro 7. Tabla de ponderación

FACTOR A EVALUAR	FACTOR DE PONDERACIÓN (%)
Factibilidad en aguas residuales domesticas	8
pH requerido para el vertimiento	11
Corrosión en el sistema	8
Formación de floculos sedimentables	11
Eficiencia	11
Disponibilidad	8
Estado líquido del coagulante	8
Uso de coadyudante de floculación	8
Corrección de pH	8
Velocidad requerida para la formación de floculos	8
Factibilidad de costos	11
TOTAL	100

Fuente: CAÑÓN, Lizeth. DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROTOTIPO RECICLADOR DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES. Bogotá D.C. 2018

3.1.6 Matriz de selección. En la tabla 5 se encuentra la matriz de selección, donde se observa la calificación asignada a cada factor para cada uno de los coagulantes evaluados.

Tabla 5. Matriz de selección de los coagulantes.

COAGULANTE	Clorhidroxido de Aluminio	Policloruro de aluminio	Aluminato de Sodio	Cloruro Férrico	Sales de Hierro con Polimeros Orgánicos	Sulfato de Alúminio	Sulfato Férrico	Sulfato Ferroso	Sulfato Poliférrico	Polímeros o polielectrolitos
FACTOR A EVALUAR										
Factibilidad en aguas reiduales domésticas	1	5	1	5	1	5	3	3	3	1
pH requerido para el vertimiento	5	5	1	3	3	5	5	1	5	1
Corrosión del sistema	5	5	5	3	1	5	1	3	1	3
Formación de floculos sedimentables	5	5	3	5	3	5	5	3	3	5
Eficiencia	3	5	3	5	3	5	5	5	5	5
Disponibilidad	3	5	3	5	1	5	1	5	1	3
Estado líquido del coagulante	3	5	5	5	3	5	1	3	1	5
Uso de coadyudante de floculación	3	5	3	5	3	5	5	5	5	3
Corrección de pH	3	5	3	5	3	5	5	3	3	3
Velocidad requerida para la formación de floculos	3	5	3	5	3	5	5	5	5	1
Costo del coagulante	3	3	3	5	3	5	5	3	3	1
PUNTAJE TOTAL	3.44	4.78	2.94	4.62	2.52	5.00	3.88	3.48	3.28	2.84

Fuente: elaboración propia, con base en: CAÑÓN, Lizeth. DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROTOTIPO RECICLADOR DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES. Bogotá D.C. 2018

Los autores BULLA, Laura y TORRES, Elsa encontraron características de estos coagulantes enmarcadas en los criterios de selección en las siguientes fuentes: KEMIRA, OXIQUM S.A y BORSUA, las cuales son empresas que se dedican a la venta de productos químicos para tratamiento y potabilización de aguas, entre otros.

Uno de los coagulantes más usados con porcentajes de remoción superiores al 70% es el cloruro férrico, en pH básico su utilización favorece el cumplimiento de la

normativa de emisión, también se destaca por la complementar la acción de los polímeros aniónicos⁶⁴.

El sulfato de aluminio tipo A, es el coagulante de mayor uso en la remoción de contaminantes, debido a sus altos grados de eficiencia y la disponibilidad y costo en el mercado⁶⁵.

El PAC alcanza porcentajes de eliminación mayores al 90%, sin embargo, su disponibilidad es accesible pero su costo es más alto a diferencia de coagulantes como el cloruro férrico o sulfato de aluminio con porcentajes de remoción de igual magnitud o mayores⁶⁶.

La eficiencia del sulfato férrico se observa en la formación de flóculos grandes y densos que sedimentan de manera rápida, es altamente disponible y sus costos son bajos comparados con otros coagulantes como PAC. Sin embargo, este funciona de más estable en pH desde 4, limitando el uso de coagulantes aniónicos y el rango de pH requerido para el cumplimiento de la norma de emisión⁶⁷.

El aluminato de sodio es empleado en la industria láctea, con menos uso habitual debido a que utiliza principalmente para la eliminación de color a pH bajo. Es de baja disponibilidad y se consigue a costos altos por tal razón⁶⁸.

Los puntajes más altos que se observan en la matriz de selección, indican que los 3 coagulantes clasificados para la propuesta de experimentación, son los siguientes: el sulfato de aluminio con 5,00 puntos, el cloruro férrico con 4,62 puntos y el policloruro de aluminio con 4,78 puntos, estos coagulantes se pueden trabajar en un rango amplio de pH. Estos coagulantes son altamente eficientes en aguas residuales domésticas facilitando la formación de flóculos mediante el mecanismo de desestabilización de las partículas en suspensión, evitando el uso de coadyudantes que incrementan los costos y la cantidad de insumos necesarios en el proceso de coagulación⁶⁹.

Los coagulantes que fueron elegidos serán las alternativas para las cuales se llevó a cabo una revisión bibliográfica robusta con el objetivo de reducir los costos mediante la determinación de la dosis o rangos de dosis factibles técnica y económicamente para el tratamiento de las aguas mediante el uso coagulantes de

⁶⁴BULLA, Laura y TORRES, Elsa. Desarrollo de una Propuesta para un Sistema de Tratamiento de Agua Residual de la Empresa de Lácteos IBEL. Bogotá D.C. 2019. Pág. 74-75.

⁶⁵ Ibíd.

⁶⁶ Ibíd.

⁶⁷ Ibíd.

⁶⁸ Ibíd.

⁶⁹ BINNIE, Chris. KIMBER, Martin. THOMAS, Hugh. Basic Water Treatment (6th Edition). London. ICE Publishing, 2018.

manera teórica, soportando cada uno de los datos aquí propuestos en referentes que se consultaron en la revisión bibliográfica.

3.2 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DOSIS O RANGO DE DOSIS FACTIBLES DE COAGULANTES

La dosis o rango de dosis óptima de los coagulantes se determina mediante una revisión bibliográfica, ya que no se puede llevar a cabo un test de jarras a escala laboratorio, la cual según Romero⁷⁰ es una de las técnicas más empleadas e importantes en el control del proceso de coagulación química de aguas residuales.

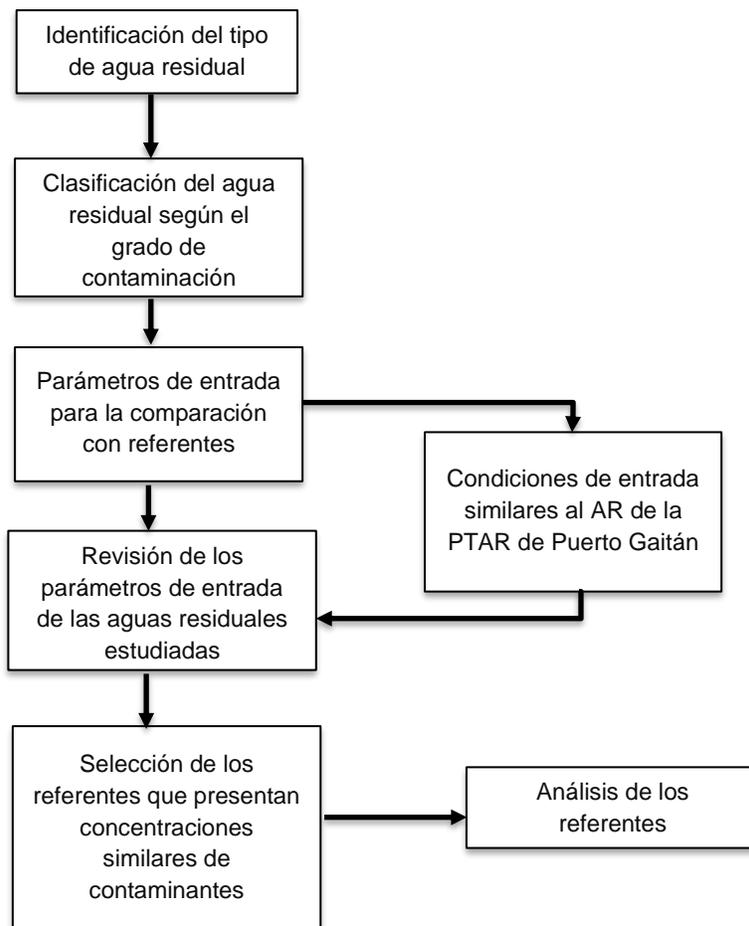
Las alternativas de coagulantes obtenidos de la matriz de selección son: cloruro férrico, policloruro de aluminio (PAC) y sulfato de aluminio (alumbre), en las fichas técnicas del anexo B se presenta la información fisicoquímica y de seguridad para los tres coagulantes. Para llevar a cabo una determinación de los rangos en los que estos coagulantes presentan las mejores eficiencias en la eliminación de contaminantes es necesario un análisis de diferentes propuestas en dosificación de estos tres coagulantes que hayan sido objeto de estudio en la clarificación de aguas residuales con características de calidad similares al ARD tratada en la PTAR de Puerto Gaitán.

En el trabajo de CAMPO, M y TOBAR, C⁷¹ realizaron una revisión del estado del arte del tratamiento primario consultando distintos trabajos y recopilaciones de datos en los cuales se llevaron a cabo pruebas de jarras para la estimación de las dosis y/o rangos de dosis óptimos, con esto buscaban delimitar los posibles rangos de dosificación de coagulante para los cuales se alcanzaban eficiencias de remoción altas en aguas residuales domésticas, para así partir de un punto de referencia evitando así una experimentación mucho más robusta. La metodología que emplearon se describe en la figura 15:

⁷⁰ ROMERO, Jairo. Purificación del agua. Editorial escuela colombiana de ingeniería. 2Ed. Bogotá D.C. 2006. 298p.

⁷¹ CAMPO, Marcela y TOBAR, Carlos. Evaluación de la dosificación de Cloruro Férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluente a la PTAR-CAÑAVERALEAJÓ. Santiago de Cali. 2011.

Figura 14. Metodología para la revisión y selección de referentes empleada por CAMPO, M y TOBAR, C⁷².



Fuente: elaboración propia, con base en CAMPO, Marcela y TOBAR, Carlos. Evaluación de la dosificación de Cloruro Férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluyente a la PTAR-CAÑAVERALEAJÓ. Santiago de Cali. 2011.

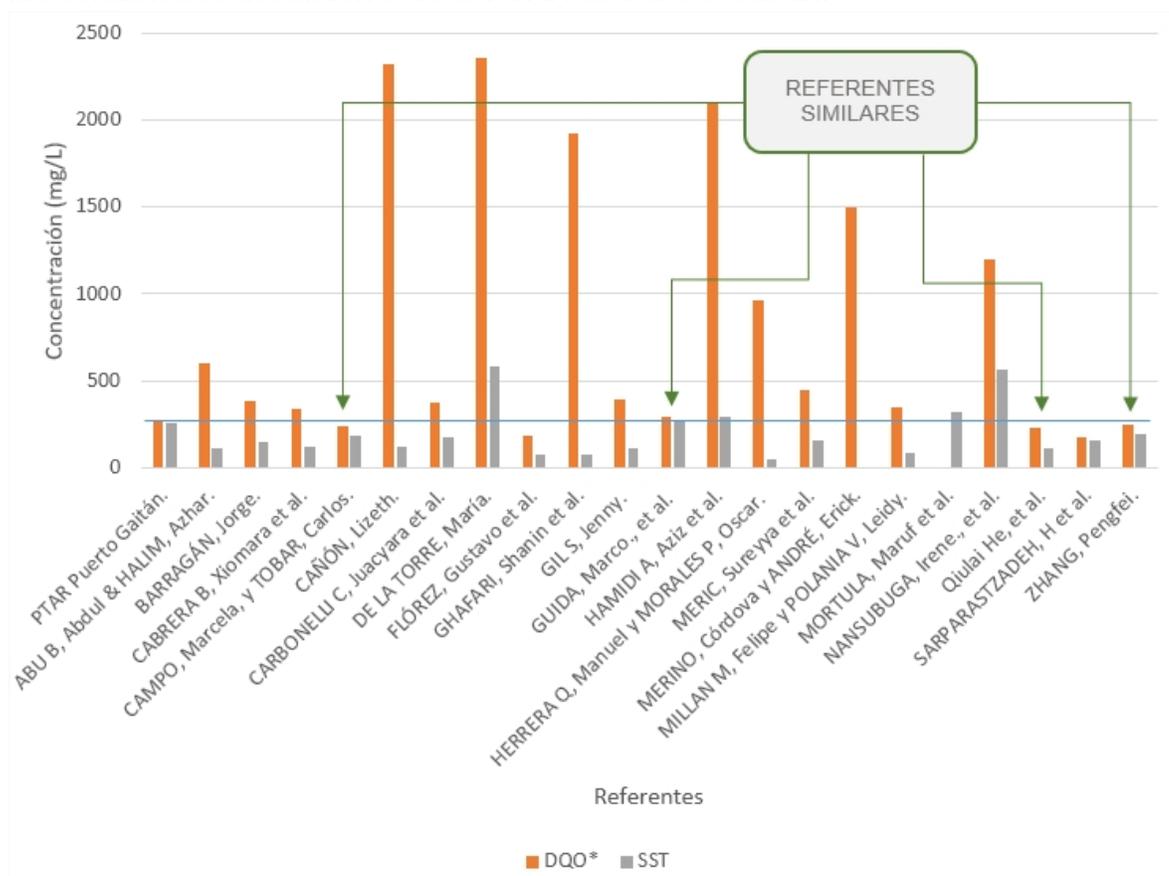
3.2.1 Tipo de agua residual y su clasificación. El agua residual que se trata en la PTAR es de origen doméstico, pero puede clasificarse según el grado de contaminación de los parámetros sólidos totales (ST), sólidos disueltos (SD), SST, DBO₅, DQO, grasas y aceites, según los autores HENZE et al; METCALF y EDDY; JORDÃO y PESSÔA los cuales identifican mediante una escala el grado de concentración de los contaminantes y la clasificación del agua residual doméstica en base a estos (ver anexo C), mediante esta comparación el agua según los resultados de la caracterización de noviembre de 2018 se encuentra entre los rangos de BAJA a MODERADA concentración de contaminantes principales SST, DBO, DQO y Grasas y aceites.

⁷² Ibíd.

3.2.2 Revisión de los parámetros de entrada de las aguas residuales estudiadas. Para llevar a cabo la determinación de la dosificación se desarrolló la revisión bibliográfica de diferentes artículos en los cuales se realice el tratamiento de aguas residuales domésticas, urbanas, municipales, etc. Para la selección de los referentes se realizó una comparación entre los datos de las aguas que fueron objeto de estudio de estos y el agua residual entrante a la PTAR de Puerto Gaitán, los datos fueron ordenados alfabéticamente y tabulados en excel (ver anexo D) para su graficación mediante un diagrama de barras que permiten observar la similitud entre los parámetros de referencia (PTAR Puerto Gaitán) con los reportados en los diferentes referentes encontrados. Los parámetros que fueron comparados fueron el DQO y SST, ya que en la mayoría de los referentes bibliográficos consultados se evaluó la eficacia en la remoción de estos con respecto a ciertas dosificaciones mediante el ensayo de tratabilidad: test de jarras.

A continuación en la gráfica 3, se muestra el diagrama de barras para la selección de los referentes bibliográficos:

Gráfica 3. Condiciones del afluente de los referentes consultados comparados con las condiciones del afluente de la PTAR de Puerto Gaitán.



Fuente: elaboración propia

3.2.3 Referentes seleccionados. En la gráfica 3 se omitieron aquellos referentes cuyos datos dificultaban la realización de la gráfica por sus altos valores, de igual forma estos datos se descartan por que difieren en gran magnitud con la referencia (PTAR Puerto Gaitán), ver anexo D.

En la tabla 6 se resume los referentes escogidos con sus respectivos valores de DQO y SST de afluente para su revisión y análisis posterior.

Tabla 6. Referentes escogidos para la selección de los rangos factibles de dosificación en la PTAR de Puerto Gaitán.

REFERENTE	DQO (mg O ₂ /L)	SST (mg/L)
PTAR Puerto Gaitán.	267	262
CAMPO, Marcela, y TOBAR, Carlos.	238	181
GUIDA, Marco., et al.	290	265
Qiulai He, et al.	234	111
ZHANG, Pengfei.	252.6	190

Fuente: elaboración propia

Para la determinación de los rangos factibles de dosificación se organizaron los 4 referentes en la tabla 7, describiendo la fuente, coagulantes empleados, condiciones del afluente y dosis óptima encontrada en los ensayos de tratabilidad de cada referente.

Tabla 7. Referentes escogidos con condiciones similares

Referente	Coagulantes empleados	Condiciones del afluente	Dosis óptima
CAMPO, Marcela y TOBAR, Carlos. Evaluación de la dosificación de Cloruro Férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluente a la PTAR-CAÑAVERALEAJÓ. Santiago de Cali. 2011.	Cloruro Férrico	DQO: 238 (mg O ₂ /L) SST: 181 (mg/L)	FeCl ₃ : 50 mg/L
GUIDA, Marco., et al. Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater. Naples, Italy. 2005.	Sulfato de Aluminio	DQO: 290 (mg O ₂ /L) SST: 265 (mg/L)	Al ₂ (SO ₄) ₃ : 150 mg/L
Qiulai He, Hongyu Wang, Congyuan Xu, Jing Zhang, Wei Zhang, Zhuocheng Zou & Kai Yang (2016) Feasibility and optimization of wastewater treatment by chemically enhanced primary treatment (CEPT): a case study of Huangshi, Chemical Speciation & Bioavailability, 28:1-4, 209-215, DOI: 10.1080/09542299.2016.1247657	PAC	DQO: 234 (mg O ₂ /L) DBO ₅ : 111 (mg O ₂ /L)	PAC: 35 mg/L
ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [en línea]. 2013. [Consultado: Nov 18,]. Disponible en: http://hdl.handle.net/10251/33704	Cloruro Férrico Sulfato de Aluminio PAC	DQO: 252.6 (mg O ₂ /L) SST: 190 (mg/L)	FeCl ₃ : 100 mg/L Al ₂ (SO ₄) ₃ : 100 mg/L PAC: 30 mg/L

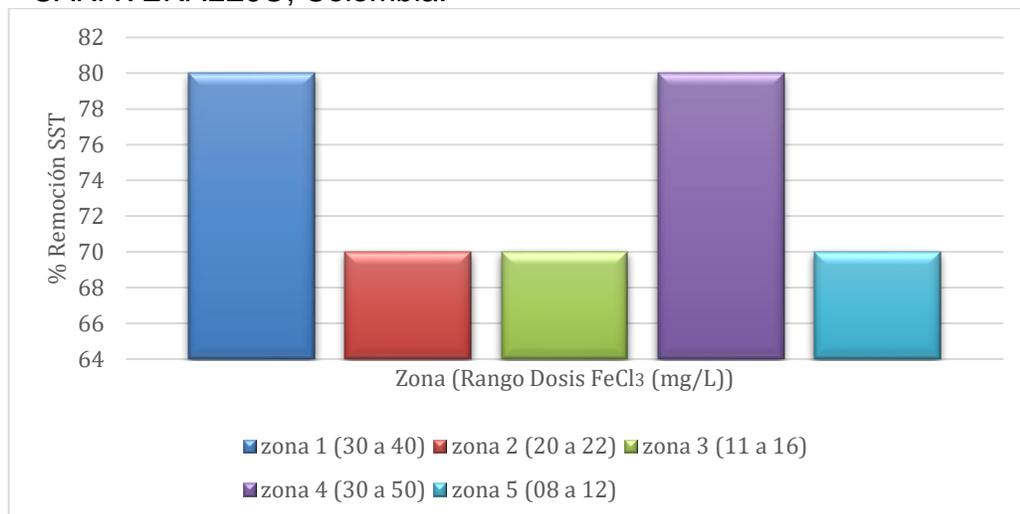
Fuente: elaboración propia

Aunque se cuente con la dosis óptima reportada en cada referente, es indispensable corroborar que los datos obtenidos por los investigadores fueron analizados y sustentados de manera adecuada. Por lo anterior, se procedió a desarrollar el análisis de manera teórica soportados en la consulta bibliográfica para la explicación del comportamiento y/o tendencia de los datos de cada referente, describiendo la influencia de condiciones de coagulación como el pH, temperatura, concentración de los contaminantes (DQO y SST), mecanismo de coagulación, entre otros.

Referente número 1. CAMPO, Marcela y TOBAR, Carlos. Evaluación de la dosificación de Cloruro Férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluente a la PTAR-CAÑAVERALEAJO. Santiago de Cali. 2011.

El cloruro férrico (FeCl_3) es uno de los coagulantes de mayor empleo en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas (ARD), debido a las características de los contaminantes propios este tipo de aguas residuales. Esta gran tendencia de uso creció principalmente debido a la mala reputación de las sales de aluminio, ya que se han venido estudiando con rigurosidad encontrando posibles relaciones entre enfermedades neurológicas como el Alzheimer y los niveles de aluminio residual en las aguas tratadas⁷³. Otras ventajas importantes frente al sulfato de aluminio es su capacidad de tolerar los cambios de pH, por este motivo es adecuado para diferentes tipos de aguas residuales sin representar costos mayores en insumos para el ajuste del pH, este coagulante puede llegar a presentar ciertas dificultades en su transporte, almacenamiento y manipulación ⁷⁴. Independientemente de esto, el FeCl_3 es constante en la remoción de material orgánico en suspensión coloidal en aguas de uso doméstico, removiendo y clarificando la mayor parte de la turbiedad que estas contienen.

Gráfica 4. Remoción de SST vs Zona (Rango de Dosis de FeCl_3) mediante el test de jarras de la muestra tomada en la PTAR de CAÑAVERALEAJO, Colombia.



Fuente: elaboración propia, con base en CAMPO, Marcela y TOBAR, Carlos. Evaluación de la dosificación de Cloruro Férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluente a la PTAR- CAÑAVERALEAJO. Santiago de Cali. 2011.

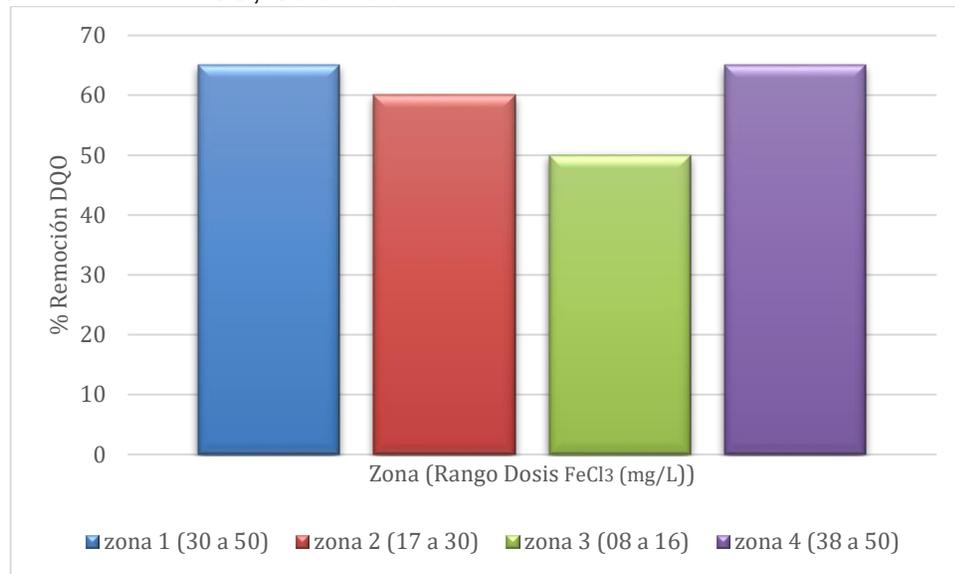
⁷³ Ibidem

⁷⁴ Ibíd

En la gráfica 4 los investigadores CAMPO, M y TOBAR, C ensayaron distintos rangos de dosificación para muestras tomadas en el mismo sitio pero a diferentes profundidades dentro del sitio de muestreo para que la muestras fueran más representativas, ya que la concentración de contaminantes puede variar con la altura del agua en el sitio de muestreo, con lo anterior en cuenta, encontraron tasas de remoción superiores a 80% en la zona 1 (30 a 40 mg/L de FeCl_3) y 4 (30 a 50 mg/L FeCl_3) con rangos de pH con tendencia ácida entre 6,10 a 6,90 para la zona 1 y valores alcalinos entre 7,90 a 8,90 para la zona 4, con esto se evidencia que el cloruro férrico puede trabajar de manera eficiente en un amplio rango de pH y la precipitación de los complejos hidratados formados (hidroxidos de hierro) durante el proceso de coagulación no se ve influenciada por los diferentes valores de pH que se emplearon durante la experimentación de manera significativa. También, es importante destacar que en la zona 1 como el rango de pH se encuentra en valores ligeramente por debajo de 7, se requiere de menor uso de modificadores de pH para llegar a este valor (pH = 7) respecto al necesario para la muestra de la zona 4, para este caso el pH final de las muestras tratadas con cloruro férrico cumplen con el valor normativo de vertimiento (pH entre 6 y 9, Resolución 631 del 2015).

En las zonas 2, 3 y 5 se obtienen porcentajes de remoción de 70% con menores dosis de cloruro férrico (8 a 22 mg/L), esto se debe a que disminuye la calidad del floculo formado y aumenta el tiempo de sedimentación necesario para el mismo, sin embargo, el pH final de las muestras tratadas vario entre 6,00 a 8,90 lo significa que el aporte de acidez que generan los productos de hidrólisis del FeCl_3 , no representa un cambio radical del pH del agua tratada, ya que permanece dentro los valores permisibles de vertimiento, con esto se observa la eficiencia del FeCl_3 en este tipo de aguas, removiendo la necesidad del uso de bases o ácidos necesarios para el ajuste del pH lo cual en caso contrario representaría mayores costos frente a la mejor sostenibilidad económica que representa esta alternativa de coagulante para la depuración de ARD.

Gráfica 5. Remoción de DQO vs Zona (Rango de Dosis de FeCl₃) mediante el test de jarras de la muestra tomada en la PTAR de CAÑAVERALEJO, Colombia.



Fuente: elaboración propia, con base en CAMPO, Marcela y TOBAR, Carlos. Evaluación de la dosificación de Cloruro Férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluyente a la PTAR- CAÑAVERALEJO. Santiago de Cali. 2011.

En la gráfica 5 de igual forma los investigadores CAMPO, M y TOBAR, C encontraron una tendencia de remoción similar a la gráfica 4 respecto a la dosis necesaria de FeCl₃, con tasas de eliminación del 65% en la zona 1 (30 a 50 mg/L de FeCl₃) y 4 (38 a 50 mg/L FeCl₃) en rangos de pH de 6,00 a 6,70 y 8,80 a 9,00 respectivamente. Esto evidencia que a una dosis de aproximadamente 30 mg/L de cloruro férrico no se logra una buena calidad de floculo dificultando la sedimentación del material orgánico en suspensión obteniéndose menores porcentajes de remoción de DQO. Este comportamiento se evidencia a simple vista en los datos y se explica mediante el mecanismo de coagulación que predomina en este tipo de coagulante; según los investigadores CAMPO, M y TOBAR, C propusieron, fue el enmallado y barrido característico de las sales metálicas, debido a que en concentraciones diluidas de contaminantes es necesario el aumento de la dosis para favorecer el contacto entre las partículas orgánicas en suspensión y los hidróxidos de hierro formados en la coagulación⁷⁵.

La precipitación de estos complejos hidratos en forma de floculos se ve influenciada de igual manera que en la remoción de SST por el pH, ya que la carga (negativa o

⁷⁵ CHAPEÑA, Marcela C. y TOBAR, Carlos J. Evaluación de la Dosificación de Cloruro Férrico para el Tratamiento Primario Avanzado del Agua Residual Doméstica Afluyente a la PTAR-CAÑAVERALEJO. Santiago de Cali. 2011.

positiva) puede afectar la precipitación de los floculos de barrido (encargado de barrer los floculos pequeños formados durante la mezcla lenta). El FeCl_3 es un coagulante que puede trabajarse en un rango más amplio de pH, con un rango viable entre 7 a 10 y variando de manera leve si los valores de ensayo son menores o mayores, a diferencia del alumbre (sulfato de aluminio) que funciona en un intervalo más limitado con tolerancia mucho menor a los cambios de pH⁷⁶.

Referente número 2. GUIDA, Marco., et al. Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater. Naples, Italy. 2005.

En la planta S. Giovanni evaluada en este segundo referente los parámetros del agua entrante variaron en sus concentraciones, pero se mantuvieron en los valores promedios de 290 mg/L para el DQO y 265 mg/L para los SST estas condiciones del afluente son representativas respecto a las características del ARD de la PTAR de Puerto Gaitán y nos permiten observar cómo afecta la calidad del agua entrante a la dosis necesaria para alcanzar una remoción eficiente de DQO y SST.

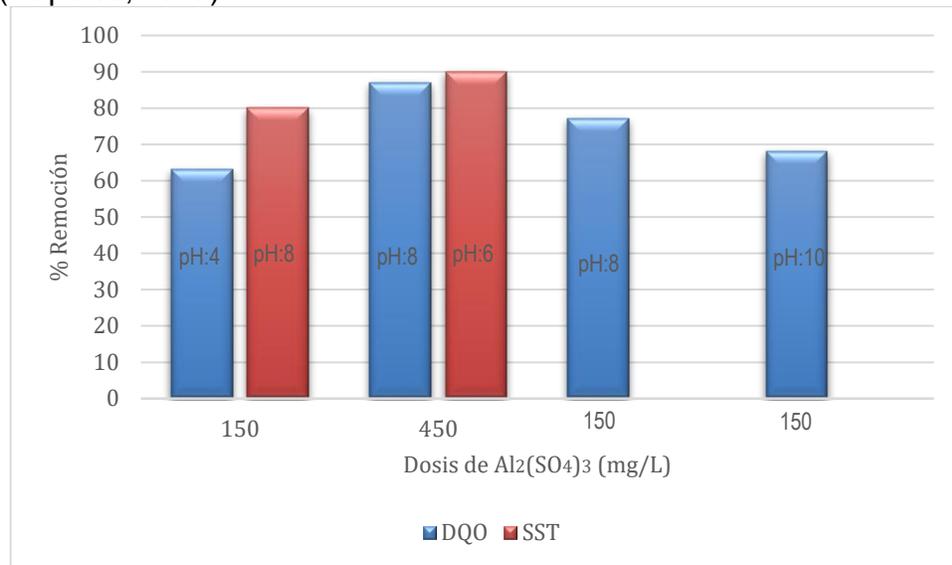
En este trabajo también se destaca la influencia del pH en el proceso de coagulación-floculación debido a que de este también depende la remoción de material suspendido mediante los compuestos que precipitan en forma de floculos, arrastrando los contaminantes del agua residual. En este caso para el $\text{Al}_2(\text{SO}_3)_4$ estos compuestos que precipitan generalmente hidróxidos de aluminio y otros complejos monos y polinucleares⁷⁷ son producto del hidrólisis de la sal de aluminio que se adsorben en la superficie de las partículas coloidales, neutralizando la carga (mayormente negativa) y arrastrando las partículas hacia el fondo en dos etapas: enmallado y precipitación donde se atrapan otras partículas en suspensión por el floculo inicialmente formado al igual que los productos de hidrólisis del cloruro férrico.⁷⁸

⁷⁶ BINNIE, Chris. KIMBER, Martin. THOMAS, Hugh. Basic Water Treatment (6th Edition). London. ICE Publishing, 2018.

⁷⁷ CRITTENDEN, John C. TRUSSELL, R. Rhodes HAND, David W. HOWE, Kerry J. TCHOBANOGLOUS, George. MWH's Water Treatment - Principles and Design (3rd Edition). Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, 2010.

⁷⁸ *Ibíd*

Gráfica 6. Remoción de DQO y SST vs Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ mediante el test de jarras de la muestra tomada en la PTAR San Giovanni (Nápoles, Italia).



Fuente: elaboración propia, con base en GUIDA, Marco., et al. Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater. Naples, Italy. 2005.

La gráfica 6 muestra el comportamiento del porcentaje de remoción a dos concentraciones de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y valores de pH diferentes para la planta San Giovanni. Los investigadores GUIDA, Marco., et al encontraron que para la muestra de esta planta a una dosis de 150 mg/L de alumbre, hubo un aumento en la eficiencia de remoción en el DQO de 63% (a un pH de 4) a un 77% (a un pH de 8), luego a pH superiores a 8, se obtienen porcentajes de remoción más bajos, es el caso del 68% (a un pH de 10). Nuevamente, esto se debe principalmente a que los hidróxidos de aluminio precipitan en un rango de pH más limitado respecto a otras sales metálicas y en este caso la solubilidad mínima se alcanza en valores cercanos a 7, presentando un aumento más significativo a pH inferiores y menos a pH superiores⁷⁹.

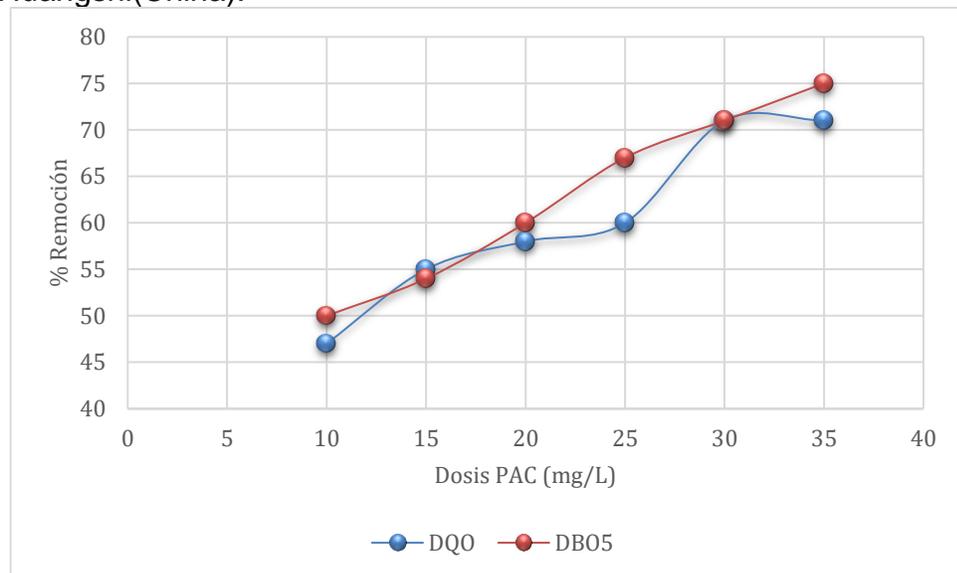
Respecto a la remoción de SST, esta se mantiene estable con valores cercanos a 80% (a valores de pH de 4, 6 y 8), de igual forma que la remoción de DQO la eficiencia baja al aumentar el pH en un valor superior a 8, como se evidencia en la gráfica 6.

⁷⁹ BINNIE, Chris. KIMBER, Martin. THOMAS, Hugh. Basic Water Treatment (6th Edition). London. ICE Publishing, 2018.

Referente número 3: Qiulai He, Hongyu Wang, Congyuan Xu, Jing Zhang, Wei Zhang, Zhuocheng Zou & Kai Yang (2016) Feasibility and optimization of wastewater treatment by chemically enhanced primary treatment (CEPT): a case study of Huangshi, *Chemical Speciation & Bioavailability*, 28:1-4, 209-215, DOI: 10.1080/09542299.2016.1247657

El PAC como coagulante primario tiene un comportamiento diferente a los coagulantes convencionales debido a sus características de especiación química. Su rendimiento no se ve afectado considerablemente por la temperatura ni el pH debido a la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.

Gráfica 7. Remoción de DBO5 Y DQO vs Dosis de PAC para la PTAR mediante el test de jarras de la muestra tomada en la PTAR de Huangshi(China).



Fuente: elaboración propia, con base en HE, Qiulai, *et al.* Feasibility and optimization of wastewater treatment by chemically enhanced primary treatment (CEPT): a case study of Huangshi. *Chemical Speciation & Bioavailability*. 2016, vol. 28, nro. 1-4. pp. 210

En la gráfica 7 la tendencia en la remoción para ambos parámetros (DQO y DBO₅), es favorable tendiendo altas tasas de eliminación de contaminantes a dosis bajas de PAC, ya que a una dosis inicial de 10 mg/L se obtiene una remoción del 47% y 50% para el DQO y DBO₅ respectivamente. Luego los datos permiten observar el aumento significativo en la remoción mediante aumentos pequeños de coagulante (5 mg/L), hasta obtener una eliminación próxima al 80% para ambos parámetros a una dosis de 35 mg/L, que en comparación con las dosis necesarias para alcanzar estos niveles de remoción encontradas en los referentes anteriores para el cloruro férrico y el sulfato de aluminio es significativamente menor. Este comportamiento es

se explica debido a la mejora en las propiedades de coagulación que presenta el PAC, ya que este tiende a formar floculos de gran superficie los cuales adsorben de manera eficiente las partículas coloidales presentes en el agua⁸⁰.

El pH tampoco supone un problema en el proceso de desestabilización y aglomeración de las partículas, principalmente por su estructura polimérica envolvente, reaccionando con la carga superficial de las partículas de manera rápida, consiguiendo una cadena polimérica de mayor tamaño, debido a los enlaces formados entre moléculas de PAC que hacen parte de los floculos durante la reacción de coagulación⁸¹.

Por otra parte, el precio de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (su principal ventaja) es similar al del PAC líquido (no siendo excesivamente alto respecto al del PAC cristalizado), mientras que la calidad del efluente tratado es mejor al utilizar PAC⁸².

El PAC al hacer parte de una nueva generación de coagulantes inorgánicos prepolimerizados, presentan distintas fases sólidas en las reacciones hidrolíticas en comparación a los coagulantes convencionales. Así mismo los floculos tienden a ser grupos de pequeñas esferas con un tamaño menor a 25 μm , en cambio los floculos del sulfato de aluminio son estructuras porosas y esponjosas con un tamaño de 15 a 100 μm . Por esta razón es que el PAC va a generar menor turbiedad en suspensión comparado al sulfato de aluminio⁸³.

Referente número 4: ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [En línea]. 2013. [Consultado: Nov 18]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/33704>

El investigador Zhang⁸⁴, realizó un test de jarras para las aguas residuales domesticas de la ciudad de Zhongyuan para encontrar la dosis optima y así las dosificaciones más favorables para eliminar la mayor cantidad de contaminantes presentes en el agua.

⁸⁰ ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [en línea]. 2013. [Consultado: Nov 18,]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/33704>

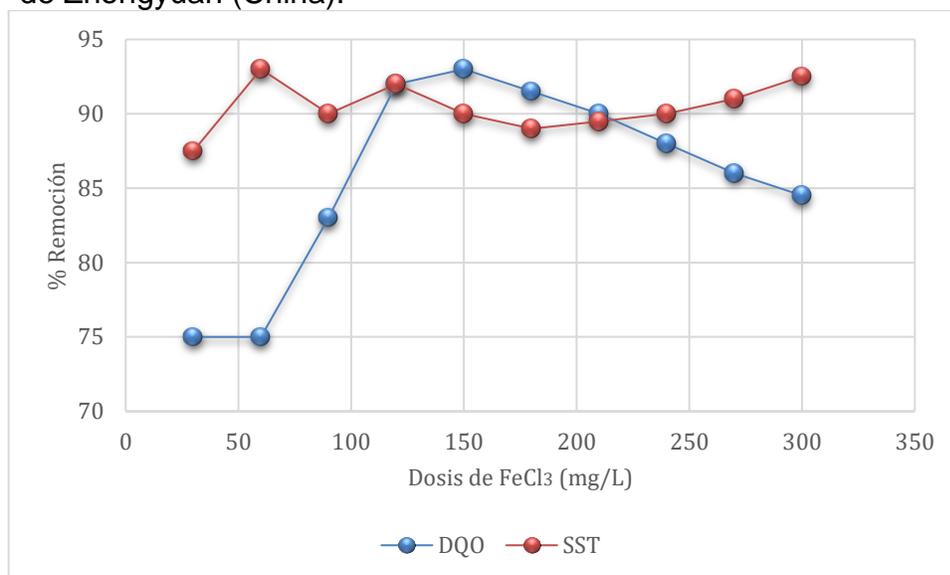
⁸¹ CRITTENDEN, John C. TRUSSELL, R. Rhodes HAND, David W. HOWE, Kerry J. TCHOBANOGLOUS, George. *MWH's Water Treatment - Principles and Design (3rd Edition)*. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, 2010.

⁸² ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [en línea]. 2013. [Consultado: Nov 18,]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/33704>

⁸³ VAN BENSCHOTEN, J.E. et al. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts: Hydrolytic reaction of alum and polyaluminum chloride. *Water Research*, 1519-1526, 1990.

⁸⁴ ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [en línea]. 2013. [Consultado: Nov 18,]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/33704>

Gráfica 8. Remoción de SST Y DQO vs Dosis de FeCl_3 para la PTAR mediante el test de jarras de la muestra tomada en la EDAR de Zhongyuan (China).



Fuente: elaboración propia, con base en ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [En línea]. 2013. [Consultado: Nov 18,]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/33704>

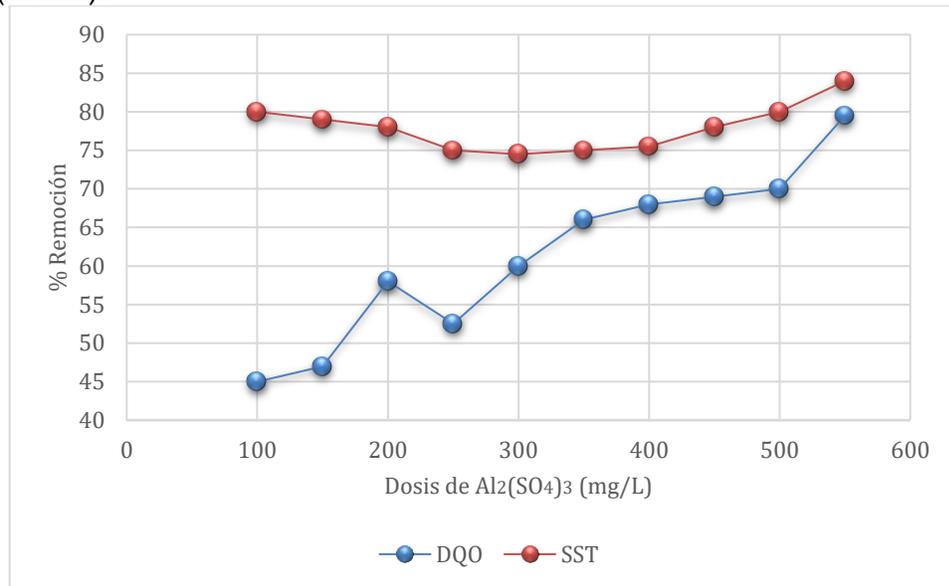
En la gráfica 8 se observa una tendencia similar en la remoción de la DQO respecto a los resultados obtenidos en la gráfica 4, aunque las ARD que fueron objeto de estudio en estas dos gráficas (4 y 8) son diferentes, permite diferenciar el comportamiento del coagulante y los mecanismos de coagulación, ya que para el ARD analizada en la gráfica 4 los contaminantes se encontraban en concentraciones ligeramente más diluidas lo que justifica el uso de dosis más altas empleadas por ZHANG, Pengfei para lograr eficiencias de remoción mayor (debido a que se hace necesario el aumento de coagulante para que los compuestos encargados de la neutralización de las partículas tengan mayor probabilidad de hacer contacto con estas), y en la gráfica 8 se muestra un comportamiento nuevo y diferente que las otras gráficas analizadas, ya que al sobrepasar la dosis de 120 mg/L de FeCl_3 disminuye de manera leve la remoción de SST hasta un 89% a los 180 mg/L de FeCl_3 , esto puede deberse principalmente al fenómeno de resuspensión del material coloidal por una inversión en la carga, causada por el exceso de coagulante provocando una restabilización de las partículas contaminantes del agua residual⁸⁵.

Para la remoción de SST las concentraciones de dosificación evaluadas presentan eficiencias similares manteniendo valores cercanos al 90% o superior, con esto se concluye que tanto a bajas como altas dosis se obtienen altas tasas de remoción

⁸⁵ Ibíd.

favoreciendo la economía al optar por el uso de este coagulante en dosificaciones bajas para el ARD con la cual se desarrolló el estudio.

Gráfica 9. Remoción de DQO y SST vs Dosis de $Al_2(SO_4)_3$ mediante el test de jarras de la muestra tomada en la EDAR de Zhongyuan (China).



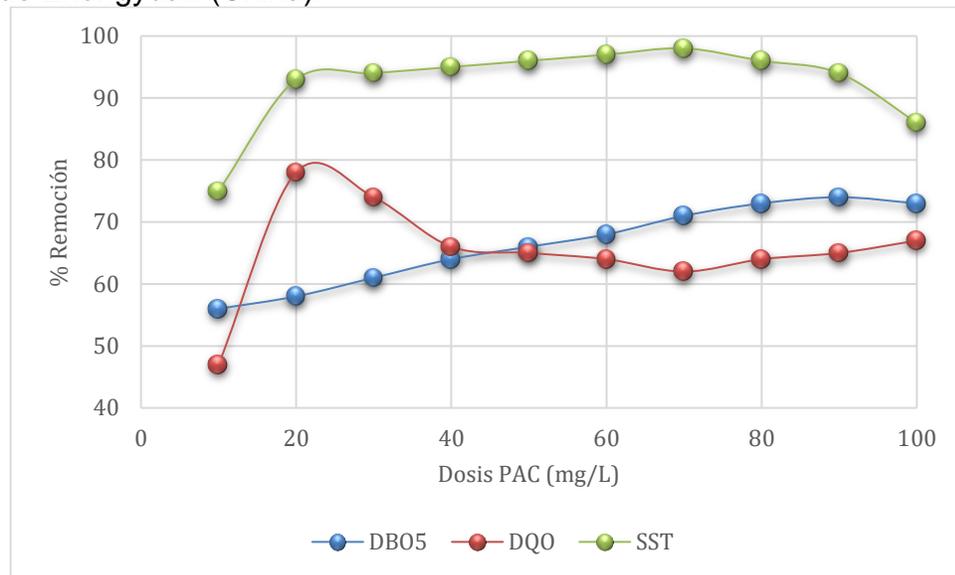
Fuente: elaboración propia, con base en ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [En línea]. 2013. [Consultado: Nov 18,]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/33704>

En la gráfica 9 el investigador ZHANG, Pengfei determinó que la eficiencia en la remoción del parámetro DQO es favorable a dosis altas, alcanzando un 80% de eliminación de sustancias químicamente degradables a una dosis de 550 mg/L y una remoción mínima de 45% a una dosis de 100 mg/L de sulfato de aluminio. En la práctica estas dosis altas son costosas para mantener una operación sostenible económicamente en una PTAR, por lo cual es imprescindible buscar una dosis óptima para evitar sobre costos en coagulantes. De igual forma, el investigador ZHANG, Pengfei encontró que cumplía con el objetivo de vertimiento (90 mg/L para la región específica analizada) a una dosis de 100 mg/L en la mayoría de los ensayos de jarras que replicaron en el laboratorio, esto evidencia que tomar dosis de ensayos muy altas no representa una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes del agua, sino que dificulta la delimitación de la dosis óptima obteniendo valores de remoción similares sobrepasado un valor tan alto como 500 mg/L de sulfato de aluminio.

Para la eliminación de SST el comportamiento observado es inestable teniendo tasas de remoción altas (80%) a dosis bajas de $Al_2(SO_4)_3$, luego sobrepasando los 500 mg/L de coagulante se observa un pequeño aumento en la remoción de SST,

sin embargo, de nuevamente esto es desfavorable en la práctica real por la cuantiosa economía necesaria para cumplir con estas tasas de dosificación teniendo resultados similares a dosis muchas más bajas de coagulante, ya que a una dosis de 100 mg/L de $Al_2(SO_3)_4$ se alcanza un 80% de remoción de SST la cual es suficiente y cumple con el objetivo de vertimiento según la normativa de la región específica estudiada.

Gráfica 10. Remoción de DBO₅, SST Y DQO vs Dosis de PAC para la PTAR mediante el test de jarras de la muestra tomada en la EDAR de Zhongyuan (China).



Fuente: elaboración propia, con base en ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [En línea]. 2013. [Consultado: Nov 18]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/33704>

En los resultados mostrados en la gráfica 10 se permite observar que para la eliminación del DBO₅ esta no se ve afectada por la sobredosificación, porque para reducir este parámetro dependerá principalmente de los procesos de adsorción y barrido de las partículas orgánicas, debido a que como se había mencionado, al aumentar el coagulante, se incrementará la superficie total de contacto entre los polímero y las partículas contaminantes traduciéndose en una mayor calidad del floculo con mayor peso y por ende mayor velocidad de precipitación, para este caso se obtiene un 74% de remoción de DBO₅ con 90 mg/L de PAC.

Por otro lado, el comportamiento del DQO es distinto, ya que si hay una influencia de la sobredosificación que genera una inestabilidad de la eliminación del contaminante debida a la reinversión de carga por el exceso de coagulante como se había observado anteriormente, por lo cual el floculo empieza a permanecer estable y no puede eliminarse. La tendencia llega a un pico de remoción con la dosis

de 20 mg/L a un valor de 78% y a partir de este valor hay una restabilización y porcentajes de remoción inferiores, ya que a un valor de dosificación 80 mg/L se alcanza un 65% de remoción de DQO y es una dosis muy superior a lo necesario para alcanzar una remoción mayor sin pasar por una restabilización del coagulante como en el caso de los 20 mg/L.

En la remoción de SST hay un comportamiento similar a la remoción de DQO pero no de gran significancia ya que hay una pequeña restabilización de las partículas contaminantes después de llegar a una concentración de 20 mg/L cuyo porcentaje de remoción alcanza un 95% esto se traduce en un límite de remoción de SST alcanzado cierta dosificación en este caso 20 mg/L aproximadamente, de igual forma se muestra que hay una remoción eficiente de SST a dosis bajas y con buenas características de sedimentación de material orgánico en suspensión coloidal.

3.2.8 Selección de coagulante y su rango de dosis factible. En las gráficas previamente mostradas se logro comparar la capacidad de distintos coagulantes para la eliminación de contaminantes característicos de aguas residuales domésticas. Mediante el análisis de los datos encontrados para distintas plantas de tratamiento alrededor del mundo, se pudo observar la tendencia de distintos parámetros (DBO₅, DQO y SST), y como la eliminación de estos se ve influenciada por ciertos niveles de dosificación de sulfato de aluminio, cloruro férrico y PAC.

A partir de estos datos se ha seleccionado la dosis óptima de cada coagulante para la eliminación de cada contaminante. Estas dosis se muestran a continuación en la tabla 8.

Tabla 8. Comparación de las dosis óptimas de coagulantes y la remoción correspondiente de DQO y SST para cada referente.

REFERENTE	Coagulantes empleados	Dosis óptima (mg/L)	Remoción de DQO (%)	Remoción de SST (%)
1	Cloruro Férrico	50	65	80
2	Sulfato de Aluminio	150	75	80
3	PAC	35	70	90
4	Cloruro Férrico	100	89	94
	Sulfato de Aluminio	100	57	79
	PAC	30	78	94

Fuente: elaboración propia, con base en CAMPO, Marcela y TOBAR, Carlos; GUIDA, Marco., et al; Qiulai He, et al y ZHANG, Pengfei.

Los variables que fueron considerados de mayor importancia para seleccionar el coagulante fueron el DQO y SST, debido a que en la mayoría de las experimentaciones estos parámetros se tomaron como variables respuesta para

evaluar la eficiencia de los coagulantes en la eliminación de material contaminante. Sin embargo, la tabla 8 nos muestra una estabilidad en la remoción de SST para los tres coagulantes, observando en general una alta eliminación de material en suspensión con dosis bajas para los tres coagulantes, consiguiendo un máximo del 94% a una dosis de 30 mg/L en el caso del PAC. Esto muestra que la selección del coagulante no es problema en cuanto a la remoción de SST, ya que los tres son eficientes, llevándonos a evaluar el ahorro económico que podría significar el uso de un coagulante respecto de otro mediante las dosis óptimas que se muestran en la tabla 8.

La eliminación de DQO requiere de mayores concentraciones de los coagulantes sulfato de aluminio y cloruro férrico, en específico se observa una mayor demanda de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. De igual manera, el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ tiene menos eficacia en la remoción de DQO al comparar los tres coagulantes, mostrando valores bajos e inestables. Esto se evidencia en los datos de la tabla 8, ya que para alcanzar una remoción del 75% es necesario dosificar con una concentración de 150 mg/L. Esto nos deja con dos opciones el FeCl_3 y el PAC, la ventaja que presenta el FeCl_3 es su gran eficiencia en el tratamiento de ARD, ya que maneja una alta tasa de formación de flóculos y una sedimentación rápida de estos, haciéndolo un coagulante eficaz para el proceso de coagulación y de buena rentabilidad por los precios manejados en el mercado.

El PAC fue seleccionado como el coagulante de mayor conveniencia para la PTAR Puerto Gaitán, tanto en el proceso mismo de coagulación-floculación, como la sostenibilidad financiera que pueda representar por sus dosis bajas manejadas en el tratamiento de aguas residuales. El PAC muestra una ventaja de mayor peso a nivel del proceso de coagulación, debido a que muestra tasas de remoción estables y de mayor valor, alcanzando porcentajes de eliminación de DQO del 78% con una dosis baja de 30 mg/L. Sin embargo, el precio del PAC puede suponer un problema, debido a que su naturaleza polimérica, por la cual se caracteriza siendo una mejor opción en muchos casos para la formación de flóculos y adsorción de material contaminante, es de dificultosa obtención, ya que su síntesis representa un alto coste gracias a la economía necesaria de producción y comercialización, por esta razón, es necesario evaluar mediante un análisis financiero la rentabilidad en el uso de estos coagulantes.

4. ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA PLANTA

Para llevar a cabo un estimado del rendimiento de los coagulantes estudiados y seleccionados como mejor opción para la planta de tratamiento de aguas residuales de Puerto Gaitán de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada para el sulfato de aluminio, cloruro férrico y PAC, hay que tener en cuenta las diferentes condiciones de operación para tener una buena remoción de los contaminantes del agua cruda a partir del proceso de clarificación.

4.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

En la búsqueda de un mayor rendimiento y eficiencia en el proceso de clarificación y así poder verter al río Manacacías agua de alta calidad, es necesario reflejar las condiciones de operación y coagulantes que se llevarán a cabo en la planta de tratamiento. Para ello se realiza una comparación entre los 3 diferentes coagulantes evaluados para verificar cual cumple en mayor medida con un rendimiento y eficiencia alta.

4.2 FLUJO DE COAGULANTE

Los flujos de los coagulantes dependerán principalmente de la dosificación óptima calculada a partir del test de jarras. Los coagulantes pueden ser adicionados en forma pura o diluida, aunque es recomendable añadirlos puros porque de lo contrario puede afectar la estabilidad y su capacidad reactiva. En caso de que sea necesario agregar un acondicionador de pH para tener un manejo más sencillo se recomienda uno de naturaleza líquida, como la soda cáustica.

Para este caso la dosis óptima seleccionadas son las siguientes:

- Sulfato de Aluminio: 100 - 150mg/L
- Cloruro Férrico: 50 - 100 mg/L
- PAC: 30 – 35 mg/L

4.3 SST, DQO Y DBO₅

Estas 3 variables son determinantes a la hora de estimar el grado de eficiencia en el proceso de clarificación. Al ser estudiadas y analizadas las propiedades fisicoquímicas del agua residual domestica del municipio de Puerto Gaitán se tienen altas remociones del SST, DQO y DBO₅ después de emplear los coagulantes en el proceso clarificación y así generar menores concentraciones en comparación del coagulante empleado actualmente en la planta de tratamiento.

4.4 COSTOS DEL TRATAMIENTO

Para la selección de un coagulante los costos del tratamiento son el factor más importante. Su cálculo se realiza mediante las cantidades de coagulante empleado por volumen de agua clarificada (m³), teniendo en cuenta los balances de materia.

4.5 BALANCE DE MATERIA

Por medio de los diferentes coagulantes seleccionados y de su dosis óptima estimada y con base en el caudal promedio de 60 L/s que es la capacidad actual de la planta, se calcula la cantidad de dosis para el mejor y peor escenario para cada coagulante analizado que se va a emplear a escala real.

- Agua cruda

$$Q = 60 \frac{L}{s} * \frac{3600s}{1h} * \frac{24h}{1día} = 5\,184\,000 \frac{L}{Día}$$

Sulfato de Aluminio

$$Al_2(SO_4)_3 = 100 \frac{mg}{L} * 5\,184\,000 \frac{L}{día} * \frac{1kg}{1 * 10^6 mg} = 518,4 \frac{kg Al_2(SO_4)_3}{día}$$

$$V Al_2(SO_4)_3 = \frac{m}{\rho} = \frac{518,4 \frac{kg}{día}}{1,34 \frac{kg}{L}} = 386,9 \frac{L}{día} * \frac{1 día}{24h} = 16,1 \frac{L}{h}$$

$$Al_2(SO_4)_3 = 150 \frac{mg}{L} * 5\,184\,000 \frac{L}{día} * \frac{1kg}{1 * 10^6 mg} = 777,6 \frac{kg Al_2(SO_4)_3}{día}$$

$$V Al_2(SO_4)_3 = \frac{m}{\rho} = \frac{777,6 \frac{kg}{día}}{1,34 \frac{kg}{L}} = 580,3 \frac{L}{día} * \frac{1 día}{24h} = 24,2 \frac{L}{h}$$

Cloruro Férrico

$$FeCl_3 = 50 \frac{mg}{L} * 5\,184\,000 \frac{L}{día} * \frac{1kg}{1 * 10^6 mg} = 259,2 \frac{kg FeCl_3}{día}$$

$$V FeCl_3 = \frac{m}{\rho} = \frac{259,2 \frac{kg}{día}}{1,48 \frac{kg}{L}} = 175,1 \frac{L}{día} * \frac{1 día}{24h} = 7,29 \frac{L}{h}$$

$$FeCl_3 = 100 \frac{mg}{L} * 5\,184\,000 \frac{L}{día} * \frac{1kg}{1 * 10^6 mg} = 518,4 \frac{kg FeCl_3}{día}$$

$$V FeCl_3 = \frac{m}{\rho} = \frac{518,4 \frac{kg}{día}}{1,48 \frac{kg}{L}} = 350,3 \frac{L}{día} * \frac{1 día}{24h} = 14,6 \frac{L}{h}$$

PAC

$$PAC = 30 \frac{mg}{L} * 5\,184\,000 \frac{L}{día} * \frac{1kg}{1 * 10^6 mg} = 155,5 \frac{kg PAC}{día}$$

$$V PAC = \frac{m}{\rho} = \frac{155,5 \frac{kg}{día}}{1,23 \frac{kg}{L}} = 126,4 \frac{L}{día} * \frac{1 día}{24h} = 5,3 \frac{L}{h}$$

$$PAC = 35 \frac{mg}{L} * 5\,184\,000 \frac{L}{día} * \frac{1kg}{1 * 10^6 mg} = 181,4 \frac{kg PAC}{día}$$

$$V PAC = \frac{m}{\rho} = \frac{181,4 \frac{kg}{día}}{1,23 \frac{kg}{L}} = 147,5 \frac{L}{día} * \frac{1 día}{24h} = 6,1 \frac{L}{h}$$

Los valores obtenidos a partir del balance de materia se encuentran en la tabla 9 con las cantidades operacionales para cada coagulante respectivamente, teniendo en cuenta que estos valores pueden llegar a fluctuar en función del caudal de entrada y condiciones las iniciales del proceso de clarificación.

Tabla 9. Valores calculados a partir del balance de materia

PARÁMETRO	UNIDADES	SULFATO ALUMINIO	CLORURO FÉRRICO	PAC
Densidad	kg/m ³	1340	1480	1230
Dosis óptima	mg/L	100 - 150	50 - 100	30 – 35
Dosis óptima	kg/m ³	0,1 – 0,15	0,05 – 0,1	0,03 – 0,035
Caudal	m ³ /día	5.184	5.184	5.184
Caudal	L/día	5 184 000	5 184 000	5 184 000
Consumo día	kg/día	518,4 – 777,6	259,2 – 518,4	155,5-181,4
Consumo mes	kg/mes	15 552 – 23 328	7 776 – 15 552	4 665 – 5 442
Consumo año	kg/año	186 624 – 279 936	93 312 - 186 672	55 980 – 65 304

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el consumo actual diario de 207,4 kg de cloruro férrico al 40% en la planta de tratamiento de Puerto Gaitán, la alternativa de sulfato de aluminio supera hasta más del doble al consumo vigente, no se descarta esta alternativa hasta realizar el cálculo del costo total del insumo porque lo que se busca es tener costos operativos menores.

Por otro lado, se observa que la cantidad necesaria para tener una eficiente remoción de contaminantes, se necesita menor cantidad de PAC en comparación al cloruro férrico empleado actualmente y el calculado en este proyecto, por este motivo se realiza una comparación de los costos de ambas alternativas.

Se realizó la cotización con la empresa ACUAMBIENTE Ltda. la cual comercializa los coagulantes empleados en el estudio.

Tabla 10. Precios alternativas

COAGULANTE	PRECIO (\$/kg)
Sulfato de Aluminio (Estado)	1 000+IVA
Cloruro Férrico (Estado)	1 750+IVA
PAC (Estado)	1 850+IVA

Fuente: ACUAMBIENTE. Ltda.

Para facilidad del estudio, por medio de la tabla 10 se relaciona con la tabla 11 donde se calcula el costo del insumo por la cantidad diaria a emplear en el proceso.

Tabla 11. Parámetros de coagulantes en PTAR

PARÁMETRO	UNIDADES	SULFATO DE ALUMINIO	CLORURO FÉRRICO	PAC
Densidad	kg/m ³	1 340	1 480	1 230
Dosis óptima	mg/L	100-150	50-100	30-35
Dosis óptima	kg/m ³	0,1-0,15	0,05-0,1	0,03-0,035
Caudal	m ³ /día	5 184	5 184	5 184
Consumo día	kg/día	518,4 -777,6	259,2 – 518,4	155,5 – 181,4
Valor kilogramo	\$/kg	1 190	2 100	2 200
Valor total diario	\$/día	616 896 - 924 600	544 300 – 1 088 650	342 100 – 399 000

Fuente: elaboración propia

En la tabla 11 se observa que a pesar de que la alternativa del sulfato de aluminio tiene un mayor consumo diario, el costo total diario va a ser menor al de cloruro férrico debido a su menor costo por kilogramo en el mercado.

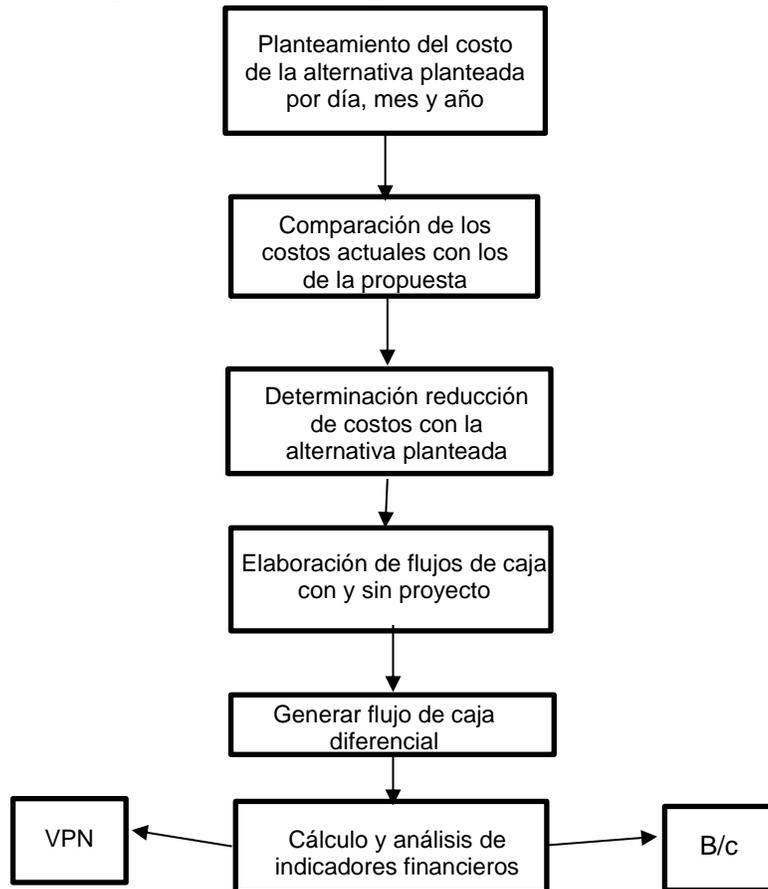
Para llevar a cabo un día de operación en la planta de tratamiento, la alternativa que requiere menor cantidad es el PAC con una carga entre 155,5 – 181,4 kg por día y a su vez tiene un menor costo, incurriendo a un gasto entre \$ 342 100 - \$ 399 000 diariamente. De acuerdo con lo mencionado anteriormente el PAC es la mejor alternativa a la hora de tener menores costos y cantidad de insumos.

Los coagulantes seleccionados a partir de la revisión bibliográfica y sus respectivos resultados indican el cumplimiento de la normativa vigente, por esto hay una ventaja tanto económica como operativa en el proceso de clarificación.

5. ANÁLISIS FINANCIERO

Para llevar de manera adecuada este objetivo se establece si la alternativa planteada es viable económicamente a pesar de que solo se analizan los costos de operación actuales generados por el coagulante en la planta como los planteados por la alternativa. No se generan modificaciones en los costos de mantenimiento, nómina del personal o inversión en nuevos equipos.

Figura 15. Metodología Análisis Financiero



Fuente: elaboración propia, con base en PÉREZ, Jessica. Evaluación de la Sustitución del Agente Coagulante Sulfato de Aluminio en el Proceso de Actual de Coagulación-Floculación de Agua Potable en la Empresa EAF SAS ESP. Bogotá D.C. 2017; GUZMÁN R. Jheyson. Evaluación Técnica De La Etapa Coagulación-Floculación Para El Mejoramiento En El Proceso De Potabilización De La Planta Galán De La EAAAZ. Bogotá D.C. 2017

A partir de los valores monetarios calculados en la tabla 11 para el PAC, al ser la opción más económica, se realiza una comparación con los costos actuales de

operación en el proceso de coagulación-floculación en la planta de tratamiento de Puerto Gaitán.

Por medio de los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica donde se calculó la dosificación óptima por medio de un test de jarras con el agua cruda que ingresa a la planta de tratamientos, se determinó que la mejor dosis de PAC se encuentra entre 30 – 35 mg/L.

5.1 COMPARACIÓN DE COSTOS ACTUALES CON LOS DE LA PROPUESTA

En el momento de comparar los costos operativos actuales en el proceso de coagulación-floculación y los costos de la alternativa calculada, hay que tener en cuenta tanto los costos de mantenimiento como los costos de operación asociados al proceso de clarificación. Estos costos son de un factor de suma importancia en la operación ya que siempre se busca reducirlos sin afectar la calidad del agua tratada.

De acuerdo con los costos de los insumos empleados en la PTAR, se tienen en cuenta las dosis óptimas de los coagulantes, en este caso no se utiliza ningún regulador de pH. A continuación, en la tabla 12 se encuentran los precios por unidad de tiempo para ambas alternativas.

Tabla 12. Precio de insumos a partir de la dosis óptima

PARAMETRO	UNIDADES	CLORURO FÉRRICO (Uso actual)	PAC
Mejor dosis	mg/L	40	30 – 35
Mejor dosis	kg/m ³	0,04	0,03 – 0,035
Consumo día	kg/día	207,4	155,5 – 181,4
Valor kilogramo	\$/kg	2 100	2 200
Valor total diario	\$/día	435 540	342 100 – 399 000
Valor total mensual	\$/mes	13 066 000	10 263 000 – 11 970 000
Valor total anual	\$/año	156 794 000	123 156 000 -143 640 000
Valor/m ³	\$/m ³	84	66 – 77

Fuente: elaboración propia

Por medio de los precios suministrados por la empresa ACUAMBIENTE Ltda. se determina los costos para el PAC y así poder realizar una comparación con los datos

suministrados por la empresa que corresponden al consumo actual con cloruro férrico al 40% como coagulante.

En la tabla 13, se establecen los costos que generan un cambio en el proceso de clarificación.

Para calcular el costo de operación por día se emplea la siguiente formula.

$$\text{Costo día} \left(\frac{\$}{\text{día}} \right) = \text{Caudal} \frac{L}{s} * \text{Dosis coagulante} \frac{mg}{L} * \text{Costo coagulante} \frac{\$}{kg} * \frac{864000s}{1\text{día}} * \frac{1kg}{1 * 10^6 mg}$$

Tabla 13. Resumen costos proyecto

PARÁMETRO	UNIDADES	CLORURO FÉRRICO (Uso actual)	PAC
Insumo coagulante	\$/mes	13 066 000	10 263 000 – 11 970 000
Total	\$/mes	13 066 000	10 263 000 – 11 970 000
Valor/m ³	\$/m ³	84	66 – 77

Fuente: elaboración propia

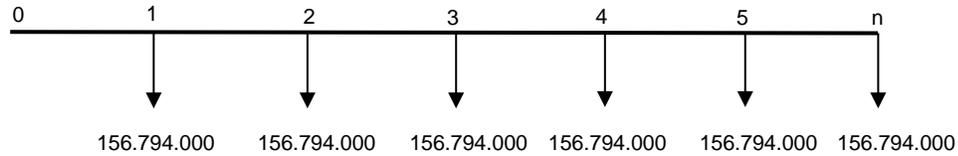
Según los resultados a partir del estudio realizado y el caudal de entrada a la planta, el costo del tratamiento de coagulación-floculación empleando el PAC con una dosis entre 30-35mg/L el costo total operacional oscila entre \$ 10 263 000 - \$ 11 970 000 al mes, mientras que el costo actual del tratamiento empleando cloruro férrico con una dosis de 40 mg/L es de \$ 13 066 000 al mes (en ambos costos se incluye el IVA).

Se observa con claridad que el costo mensual con el PAC como alternativa es menor que al consumo que se tiene actualmente en la planta, por este motivo no es viable económicamente seguir operando a estas condiciones. Al tener en cuenta que todos los equipos y los tanques de almacenamiento ya se encuentran instalados y en funcionamiento, el consumo energético y costos por mano de obra no se verán afectados.

5.2 FLUJOS DE CAJA E INDICADORES FINANCIEROS

La viabilidad del proyecto se evalúa por medio de un flujo de caja sin proyecto y otro con el proyecto planteado para un periodo de 15 años⁸⁶ ya que las proyecciones para este tipo de proyectos se estiman para este periodo de tiempo. Por medio de estos flujos de caja se obtiene un flujo de caja diferencial que permite calcular y analizar los indicadores financieros.

5.2.1 Flujo de caja sin proyecto. El costo mensual del cloruro férrico que incurre la empresa actualmente es de \$13 066 000 (\$156 794 000 anual) empleando mensualmente 6 222 kilogramos del coagulante (84 \$/m³).



Valor Presente Neto (VPN)

$$VPN = -C * \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n}$$

Fuente: BACA C, Guillermo.
Ingeniería Económica.8va
edición. Bogotá D.C. p.197

Donde:

C : costo mensual del coagulante (\$COP)

I : tasa de interés

n : tiempo en meses

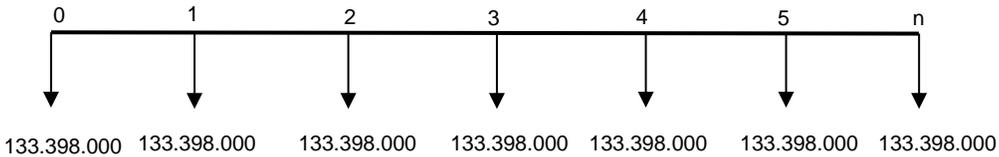
$$VPN = -13\,066\,000 * \frac{(1 + 0,03)^{180} - 1}{0,03(1 + 0,03)^{180}}$$

$$VPN = -433\,403\,000 \text{ COP}$$

⁸⁶ CAÑÓN, Lizeth. Desarrollo de una propuesta de mejora para el prototipo reciclador de aguas residuales domésticas de la Fundación Universitaria los Libertadores. Bogotá, D.C. 2018.

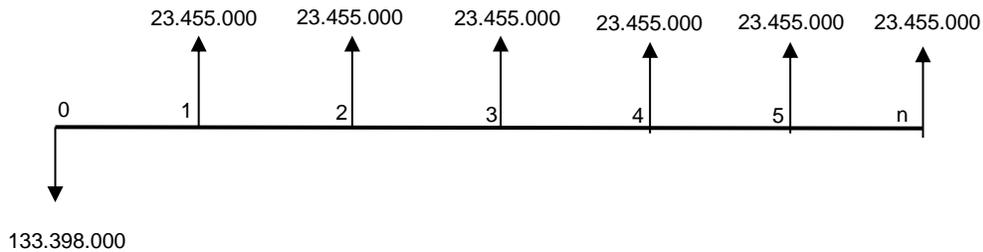
Al obtenerse un valor negativo del VPN demuestra que con la operación actual de la planta de tratamientos no existe ningún ingreso, solamente hay egresos.

5.2.2 Flujo de caja con proyecto. Al emplear la dosis óptima calculada en la propuesta planteada, el cual es el PAC con un consumo mensual promedio de 5 054 kilogramos ($72\$/m^3$) que equivale a \$11 111 000 (\$133 339 000 anual). Solo se tiene en cuenta la modificación del consumo de coagulante en la planta por lo tanto no hay modificación en los costos de mantenimiento, de nómina ni de inversión de equipos.



5.2.3 Flujo de caja diferencial. El ingreso para el flujo de caja con proyecto se calcula mediante la diferencia entre los anteriores flujos de caja.

El ahorro anual que genera la alternativa planteada se considera un ingreso, que en este caso es de \$23 455 000.



En tabla 14 se encuentran los valores finales para cada flujo calculado para el periodo de 15 años.

Tabla 14. Flujo de caja diferencial

AÑO	0	1	2	3	4	5
Sin proyecto		156.794.000	156.794.000	156.794.000	156.794.000	156.794.000
Con proyecto	133.398.000	133.398.000	133.398.000	133.398.000	133.398.000	133.398.000
Diferencial	-133.398.000	23.396.000	23.396.000	23.396.000	23.396.000	23.396.000
AÑO	0	6	7	8	9	10
Sin proyecto		156.794.000	156.794.000	156.794.000	156.794.000	156.794.000
Con proyecto	133.398.000	133.398.000	133.398.000	133.398.000	133.398.000	133.398.000
Diferencial	-133.398.000	23.396.000	23.396.000	23.396.000	23.396.000	23.396.000
AÑO	0	11	12	13	14	15
Sin proyecto		156.794.000	156.794.000	156.794.000	156.794.000	156.794.000
Con proyecto	133.398.000	133.398.000	133.398.000	133.398.000	133.398.000	133.398.000
Diferencial	-133.398.000	23.396.000	23.396.000	23.396.000	23.396.000	23.396.000

Fuente: elaboración propia

A partir de los datos obtenidos en el flujo de caja diferencial se calcula el VPN.

Valor Presente Neto(VPN)

$$VPN = -I_0 + B * \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n}$$

Fuente: BACA C, Guillermo.
Ingeniería Económica.8va
edición. Bogotá D.C. p.197

Donde:

- I₀ : inversión del proyecto
 B : ingreso generado por ahorro mensual
 i : tasa de interés
 N : tiempo en meses

$$VPN = -11\,000\,000 + 1.949.000 * \frac{(1 + 0,03)^{180} - 1}{0,03(1 + 0,03)^{180}}$$

$$VPN = 53.648.000 \text{ COP}$$

Al obtener el valor presente neto positivo, indica que es viable realizar la propuesta planteada.

Relación Beneficio/Costo (B/c):

$$\frac{B}{c} = \frac{VPN \text{ Ingresos mensual}}{VPN \text{ egresos mensual}}$$

Fuente: BACA C, Guillermo.
Ingeniería Económica. 8va edición.
Bogotá D.C. p.197

Reemplazando en la ecuación:

$$\frac{B}{c} = \frac{53.648.000}{11.111.000}$$

$$\frac{B}{c} = 4,82$$

El resultado de la relación costo beneficio es mayor a uno, lo cual indica que el proyecto es económicamente viable al generar mayores ingresos con la alternativa planteada en comparación de la inversión realizada con la compra del coagulante a necesitar. Los ingresos son 4,82 veces más que los costos producidos.

6. CONCLUSIONES

- Con el desarrollo del diagnóstico de la PTAR Puerto Gaitán, se logró identificar cada aspecto del proceso, describiendo el estado actual de los equipos los cuales cumplen con los requerimientos mínimos de diseños establecidos por la RAS-2017 y las operaciones que se desarrollan para el tratamiento del ARD. De igual forma, con la única información suministrada que fue la caracterización del agua residual, se determinó que los parámetros fisicoquímicos cumplen con la Resolución 631 de 2015 a partir de la caracterización realizada por la empresa, también en cuanto al porcentaje de remoción de la carga contaminante(kg/día) se obtiene una remoción del 98,9% para el DBO₅ y 99,3% para SST cuyos valores son mayores al 80% que es el valor que exige el decreto 1076 de 2015 y finalmente se observó que las operaciones en el proceso de clarificación primaria presenta demoras, debido a la colmatación de los equipos del pre-tratamiento, por lo cual, la continuidad del proceso se ve afectada.
- Mediante la consulta de distintas bases de datos, principalmente SCIEDIRECT, SCIELO, EMERALD PUBLISHING y ELSEVIER, se desarrolló una revisión bibliográfica de referentes en donde se evaluaba el tratamiento de aguas residuales domesticas (ARD) con diferentes coagulantes, los referentes encontrados fueron filtrados mediante la comparación de las condiciones de entrada de las aguas analizadas en la experimentación de estos con respecto a la PTAR de Puerto Gaitán, con estos referentes seleccionados se analizó la factibilidad en el tratamiento de las aguas residuales de Puerto Gaitán empleando los coagulantes que mostraron mejores cualidades tanto químicas, como económicas, los cuales fueron las sales metálicas sulfato de aluminio, cloruro férrico y el polímero PAC (es importante aclarar que los datos obtenidos fueron objeto de estudio netamente teórico por lo cual se debe realizar una experimentación previa para corroborar las dosificaciones aquí planteadas mediante ensayos de jarras), entre ellos, se describió la capacidad de remoción de dos parámetros DQO y SST, observando altas de eliminación de SST para los tres coagulantes en general, sin embargo en los referentes donde se empleo el PAC se alcanzaron porcentajes de remoción altos a dosis muy bajas de hasta el 94% y 78% de remoción de SST y DQO respectivamente, debido a que el PAC no es afectado en gran medida por las condiciones de coagulación-floculación fue seleccionado como el coagulante principal de mayor estabilidad en la remoción de ambos parámetros a dosis muy bajas en los referentes donde se empleo, encontrando que el rango de dosificación factible se encuentra entre 30 mg/L a 35 mg/L.
- En cuanto a la reducción de los costos con la implementación de la alternativa del PAC como coagulante principal se obtiene una mejoría al requerir una

menor cantidad en comparación al cloruro férrico empleado actualmente en la planta de tratamiento. El policloruro de aluminio representa una ventaja económica para la empresa porque los costos mensuales de operación rondarían entre \$10 263 000 - 11 970 000 gastando así 66-77 \$/m³, en cambio actualmente los costos operativos mensuales son de \$13 066 000 consumiendo así 84 \$/m³ de cloruro férrico. Al ser la relación flujo y consumo de coagulante directamente proporcional, en caso de que el flujo o capacidad de la planta se incrementara el consumo del coagulante tendrá el mismo comportamiento y por ende tendrá un mayor costo operativo. De esta forma se logra disminuir costos sin tener que realizar inversiones en equipos sino llevando a cabo pruebas frecuentemente con la dosis recomendada pero debido a que el estudio fue únicamente teórico es necesario realizar una experimentación previa para confirmar que la dosis óptima se encuentra en el rango establecido y así cumplir con los costos calculados. En caso de que se incremente la capacidad de la planta. Por medio de los flujos de caja con y sin proyecto se calculó el flujo de caja diferencial el cual permitió evaluar los indicadores financieros, con los que se determinó que la propuesta planteada en el proyecto es económicamente viable porque el valor presente neto es positivo y la relación costo beneficio es mayor a uno.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar la experimentación con las condiciones planteadas en este trabajo para encontrar valores de dosificación que cumplan la normativa y permitan mejorar la reducción de costos respecto a esta propuesta.
- Desarrollar una caracterización en la misma época del histórico mostrado en este trabajo para verificar la continuidad de las condiciones del agua y del tratamiento en la PTAR.
- Evaluar el efecto que tiene el uso del PAC en el cuerpo de agua superficial y en los lodos producidos debido a que no se tiene un estimado del aluminio residual presente en cada etapa por falta de experimentación.
- Evaluar mediante un diseño factorial el efecto de la velocidad de mezcla rápida, velocidad de mezcla lenta, pH y tiempo de sedimentación, en la búsqueda de la dosis óptima con el objetivo de reducir costos de insumos en el proceso de coagulación-floculación.
- Realizar mantenimiento constante al dispositivo dosificador de coagulante utilizado para así prevenir la presencia de impurezas y no tener problemas operativos en el equipo a la hora de aplicar la dosis correspondiente.
- Realizar caracterización del agua después de cada etapa del proceso para determinar el rendimiento de cada operación en la planta.

BIBLIOGRAFÍA

BACA C, Guillermo. Ingeniería Económica. 8va edición. Bogotá D.C. p.197

BINNIE, Chris. KIMBER, Martin. THOMAS, Hugh. Basic Water Treatment (6th Edition). London. ICE Publishing, 2018.

CABEZAS, David. Diagnóstico del estado actual de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) del aeropuerto el Edén de Armenia. Santiago de Cali, Colombia. 2013

CABIDO, María de pilar y ESCOLÁSTICO, consuelo. Reciclado y tratamiento de residuos. Universidad Nacional de educación a distancia. 89p. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioamericasp/detail.action?docID=319939>

CAMPO, Marcela., y TOBAR, Carlos. Evaluación de la dosificación de Cloruro Férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluyente a la PTAR-CAÑAVERALEAJÓ. Santiago de Cali. 2011.

CARDENAS, Yolanda. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Tratamiento De Agua: Coagulación Y Floculación. Lima: 2000.

CAÑÓN, Lizeth. Desarrollo de una propuesta de mejora para el prototipo reciclador de aguas residuales domésticas de la Fundación Universitaria los Libertadores. Bogotá, D.C. 2018.

CHAPEÑA, Marcela C. y TOBAR, Carlos J. Evaluación de la Dosificación de Cloruro Férrico para el Tratamiento Primario Avanzado del Agua Residual Doméstica Afluyente a la PTAR-CAÑAVERALEAJÓ. Santiago de Cali. 2011.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO (CRA). Proyecto de Resolución "Por la cual se modifica y adiciona parcialmente la Resolución CRA 351 de 2005 y se modifican parcialmente las Resoluciones CRA 352 de 2005 y CRA 482 de 2009". 2017. p. 10.

COGOLLO FLOREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados; caso del hidroxiclóruo de aluminio. En: DYNA, No 165, (Oct 2010); p.18-27

CRITTENDEN, John C. TRUSSELL, R. Rhodes HAND, David W. HOWE, Kerry J. TCHOBANOGLOUS, George. MWH's Water Treatment - Principles and Design (3rd Edition). Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, 2010.

DE VARGAS, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano: Manual I. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004. 176p

FUENTES, Manuel. Identificación de sistemas terciarios para el tratamiento de aguas residuales. Instituto mexicano de tecnología del agua. p.15

GUIDA, Marco., et al. Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater. Naples, Italy. 2005.

HE, Qiulai, et al. Feasibility and optimization of wastewater treatment by chemically enhanced primary treatment (CEPT): a case study of Huangshi. Chemical Speciation & Bioavailability. 2016, vol. 28, nro. 1-4. pp. 210

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

_____. Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras. Bogotá: ICONTEC, 2010. 2 p. (NTC 3903

_____. Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras. Bogotá: ICONTEC, 2004. 2 p. (NTC-ISO 5667-3)

_____. Gestión ambiental. Calidad del agua. Muestreo. Directrices para el diseño de programas de muestreo. Bogotá: ICONTEC, 1995. 2 p. (NTC-ISO 5667-1)

_____. Gestión ambiental. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas generales de muestreo. Bogotá: ICONTEC, 1995. 2 p. (NTCISO 5667-2)

MARÍN GALVÍN, Rafael. Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2003. 189p

METCALF y EDDY, INC. Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evaluación y reutilización de aguas residuales. Editorial labor, S.A. 2 ed. Barcelona 1994. 219p

NANSUBUGA, Irene, et al. Effect of polyaluminium chloride water treatment sludge on effluent quality of domestic wastewater treatment.2013, vol 7, nro. 4. pp 148

PEDROLLO MC 30/50 CARACTERÍSTICAS (en línea). Bicanal-Pedrollo (Consultado: 6 mayo de 2020). Disponible en www.pedrollo.com/public/allegati/MC%2050-70_ES_60Hz.pdf

PÉREZ, Jessica. Evaluación de la Sustitución del Agente Coagulante Sulfato de Aluminio en el Proceso de Actual de Coagulación-Floculación de Agua Potable en la Empresa EAF SAS ESP. Bogotá D.C. 2017.

RAMALHO, Rubens Sette, et al. Tratamiento De Aguas Residuales. Barcelona: Editorial Reverté, 1996. p.91.

RESTREPO, Hernán. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.2009. 10p. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239_2009.pdf.

ROMERO, Jairo. Purificación del agua. Editorial escuela colombiana de ingeniera. 2Ed. Bogotá D.C .2006. 298p.

SCIELO COLOMBIA. Polielectrolitos sintéticos. [En línea], [consultado el 15 de junio de 2020]. Disponible en Internet: http://books.google.com.co/books?id=l_OGMwaGkgQC&printsec=frontcover&source=gbs_r&cad=0

SEDAPAL. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN [En línea], [consultado el 15 de junio de 2020]. Disponible en Internet: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Unidad 3: potabilización del agua. [En línea], [consultado el 15 de junio de 2020]. Disponible en Internet: <https://es.scribd.com/doc/305534568/Guia-de-Aprendizaje-Unidad-3>

TALAIKHOZANI, Amirreza ,et al. An overview on production and application of ferrate (VI) for chemical oxidation, coagulation and disinfection of water and wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering.2017,pp.1833

VAN BENSCHOTEN, J.E. et al. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts: Hydrolytic reaction of alum and polyaluminum chloride. *Water Research*, 1519-1526, 1990

VARGAS, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Lima. 2004. p.350.

XXII CONGRESO DE CENTROAMERICA Y PANAMA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL "SUPERACION SANITARIA Y AMBIENTAL: EL RETO". Potabilización con diferentes coagulantes de aluminio y hierro [en línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia18.pdf>, p.4-5 [Citado el 15 de junio de 2020]

ZARAMA, José R. Reseña histórica. Pasto: Impr. del Departamento, 1942. 1 p.

ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [en línea]. 2013. [Consultado: Nov 18,]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/33704>

ANEXOS

ANEXO A
DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS REFERENTES EMPLEADOS PARA LA DETERMINAR LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS COAGULANTES:

<u>REFERENCIA</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>
DELGADO, S., DIAZ, Fernando., GARCÍA, David., & OTERO, Natalia. Behaviour of Inorganic Coagulants in Secondary Effluents from a Conventional Wastewater Treatment Plant. Tenerife, Spain. 2003.	Estudio experimental a escala laboratorio en el cual se compara la efectividad de tres coagulantes inorgánicos (sulfato de aluminio, cloruro férrico y PAC) en la reducción de la turbiedad de un efluente del tratamiento secundario del agua residual doméstica en un planta de tratamiento convencional.
ZOUBOULIS, Anstasios., & TRASKAS, Georgios. Comparable evaluation of various commercially available aluminium-based coagulants for the treatment of Surface water and for the post-treatment of urban wastewater. Greece. 2005.	Estudio de la eficiencia de varios coagulantes comercialmente disponibles, a partir del aluminio y cloruros de polialuminio (PACs), en el tratamiento de aguas superficiales, o para el post-tratamiento biológico de aguas residuales domésticas. Se compararon los coagulantes mediante su evaluación en la eliminación de SS, NOM, y el aluminio residual (AR).
YANZA, Jeffrey., RIVERA, Robert., GOMEZ, Luisa., & ZAFRA, Carlos. Evaluación de FeCl ₃ y PAC para la potabilización de agua con alto contenido de color y baja turbiedad. Colombia. 2019.	El propósito de este trabo fue la evaluación de FeCl ₃ como coagulante primario y PAC como auxiliar a escala de laboratorio para la potabilización de agua cruda con elevado color y baja turbiedad.
DE LA TORRE, María. Evaluación de la implementación de un sistema de clarificación de aguas residuales previo al tratamiento secundario en la PTAR de ALBATEQ S.A. Bogotá. 2017.	La empresa Albateq S.A procesadora de vísceras, menudencias, plumas y sangre, procedentes una central de sacrificio avícola, la cual es materia prima para la elaboración de harina, donde el proceso genera agua residual. En este trabajo la empresa realizo un diagnóstico de las principales fuente agua residual y mediante un ensayo de jarras con coagulante

	(PAC) y floculante L1538, se realizó la evaluación en la remoción de turbidez, SST y DQO.
MILLAN, Carlos., POLANIA, Leidy. Propuesta de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa SOMOS K S.A. Bogotá. 2018.	En este trabajo de grado se desarrolla una propuesta de mejora para el sistema de tratamiento de agua residual de la empresa SOMOS K S.A. en la PTAR , mediante tres alternativas de mejora que permitirían reducir contaminantes que no cumplían la normatividad, mediante una matriz de selección se escogió la mejor alternativa.
RESTREPO, Hernán. Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Medellín. 2009.	En este trabajo se realizó una evaluación de los coagulantes: sulfato de aluminio tipo B, Ultrión 8157, polisulfato de aluminio, policloruro de aluminio e hidroxiclورو de aluminio, para determinar cuál de ellos presenta mejores resultados en el proceso de coagulación-floculación dentro de la PTAP.
GHAFFARI, Shahin., ABDUL Hamidi., HASNAIN, Mohamed., & AKBAR, Ali. Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation-flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. Malaysia. 2008.	En este trabajo fue estudiada la capacidad del PAC en el tratamiento de lixiviados estabilizados de la empresa Pulau Burung Landfill Site (PBLs), Penang, Malaysia. La eficiencia en la remoción de DQO, turbidez, color y SST usando PAC fueron comparadas con las eficiencias obtenidas aplicando alumbre convencional.
PABÓN, María., SARRIA, Erika., & CHAVEZ, Álvaro. Plan de mejoramiento del sistema de tratamiento de aguas residuales de laboratorios coaspharma, Bogotá D.C. 2016.	En este estudio, los laboratorios COASPHARMA SAS, realizaron un proceso de investigación con el objeto de buscar el mejoramiento continuo en los procesos de la Cooperativa, en el año 2011 se evaluó el impacto negativo que generaban las aguas residuales provenientes de la fabricación de productos farmacéuticos, veterinario y cosméticos de cada planta, con el fin de garantizar los procesos de producción y cumplir los parámetros de calidad.

<p>UKIWE, Luke., & ALINNOR, Jude. Assessment of polyacrylamide and aluminum sulphate coagulants in turbidity removal in wastewater. Nigeria. 2011.</p>	<p>En este trabajo se investigó la aplicación de polímeros (poliacrilamida no iónica) y sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación para evaluar la calidad del tratamiento en aguas residuales domésticas. Mediante un test de jarras se evaluó la remoción de turbidez mostrando la capacidad de remoción de este parámetro para ambos coagulantes.</p>
<p>MERINO, Córdova., & ANDRÉ, Erick. Aplicación de sulfato de aluminio y tuna (Opuntia ficus-inidica) para la remoción de materia orgánica y turbidez de las aguas residuales del camal municipal Tumán 2018. Perú.</p>	<p>En este trabajo se planteó como objetivo demostrar que a partir de la aplicación de sulfato de aluminio y tuna se reduciría el nivel de contaminación de las aguas residuales. La investigación se desarrolló aplicando tratamientos en el laboratorio de la Universidad César Vallejo-Chiclayo, buscando reducir los niveles de materia orgánica y aumentar la remoción de turbidez del agua residual.</p>
<p>LÓPEZ, Daniel. Evaluación del proceso de coagulación-floculación y dosificación de coagulante en la planta de tratamiento de aguas grises de la empresa PQA. Colombia. 2019.</p>	<p>Este trabajo describe un estudio de tratabilidad que se realizó a la planta de tratamiento de agua residual de la empresa PQA (Productos Químicos Andinos). Se desarrollaron pruebas de tratabilidad que consistieron en encontrar la relación Turbiedad Vs Dosis óptima a escala de laboratorio de coagulantes sulfato de aluminio, coagulante natural a base de bore y PAC.</p>
<p>CABEZAS, David. Diagnóstico del estado actual de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) del aeropuerto el Edén de Armenia. Santiago de Cali, Colombia. 2013</p>	<p>En este trabajo se realizó el diagnóstico de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) del aeropuerto El Edén de Armenia, se construyó un registro histórico de los resultados de vertimiento a partir de los distintos informes de análisis de aguas residuales previos y se identificaron los parámetros en los cuales la planta presenta deficiencia operativa, para plantear un cambios en la planta y la instalación de nuevos equipos.</p>
<p>CANON, Lizeth. Desarrollo de una propuesta de mejora para el prototipo reciclador de aguas residuales domésticas</p>	<p>Este proyecto de grado consistió del desarrollo de una propuesta de mejora para el prototipo reciclador de aguas residuales domésticas de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Inicio</p>

<p>de la Fundación Universitaria los Libertadores. Bogotá, D.C. 2018.</p>	<p>con un diagnóstico del estado actual del agua residual recolectada y del prototipo, donde identificaron los parámetros a evaluar, de acuerdo a esto seleccionaron las alternativas que se ajustan a la operatividad del prototipo.</p>
<p>FONSECA, Angie. Propuesta para el mejoramiento de la planta de tratamiento de agua potable de la Escuela de Logística del Ejército Nacional. Bogotá. 2018.</p>	<p>Este proyecto planteo el mejoramiento de la planta de tratamiento de agua potable – PTAP de la Escuela de Logística del Ejército Nacional, a partir del análisis de la información obtenida de inspecciones técnicas y operativas a la PTAP. A partir de esto se propuso un diseño de alternativas de mejoramiento de las operaciones y procesos unitarios.</p>
<p>TORRES, Ivan. Propuesta de mejoramiento de las operaciones en la planta de tratamiento de agua residual en el municipio de la Calera (Cundinamarca). Bogotá. 2016.</p>	<p>En este estudio se desarrolló una propuesta para cumplir con el tratamiento de las aguas residuales, debido al crecimiento del caudal que ingresa a la planta. Realizaron un diagnóstico técnico y operativo de cada una de las unidades de tratamiento que componen la PTAR, con esto se buscó implementar una estructura que reduzca la cantidad de grasas ingresada a los reactores SBR, así como garantizar un tratamiento que garantice la mitigación de la carga orgánica.</p>
<p>COGOLLO, Juan. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxocloruro de aluminio. Medellín.2010</p>	<p>En este artículo se realizó un estudio en el proceso de clarificación en los tratamientos de aguas a implementando un coagulante inorgánico polimerizado (PAC). Se señalan las ventajas y desventajas que tiene este coagulante al ser parte de una nueva generación de estos y finalmente se especifica a que aspectos técnicos y operativos debe tenerse en cuenta a la hora de utilizar el policloruro de aluminio.</p>
<p>PÉREZ B, Jessica. Evaluación De La Sustitución Del Agente Coagulante - Sulfato De Aluminio- En El Proceso Actual De Coagulación- Floculación De Agua Potable En La</p>	<p>En este proyecto de grado se buscó la forma de aumentar la efectividad en el proceso de clarificación, así reduciendo los costos operativos en la planta de tratamiento de la empresa del acueducto de Facatativá EAF S.A.S ESP. De esta forma se buscó la forma de</p>

<p>Empresa Eaf Sas Esp. Bogotá D.C.2017</p>	<p>minimizar el uso del sulfato de aluminio tipo B u otra alternativa que diera mejor resultados que este.</p>
<p>SINHA, Shahnawaz, et al. Determinación de la efectividad de los convencionales y coagulantes alternativos mediante esquemas de caracterización efectivos. Chemosphere. 2004</p>	<p>En este artículo se realizó un estudio integral para caracterizar los coagulantes metálicos y evaluarlos comparativamente en una fuente de agua bien caracterizada. El objetivo de este estudio fue proporcionar un esquema para los servicios públicos que podría emplearse como un proceso de selección y un método para seleccionar un coagulante apropiado en función de las características del agua cruda. Los resultados muestran que, a través del esquema de caracterización, se puede elegir un coagulante antes de emprender una escala piloto que requiere mucho tiempo evaluación.</p>
<p>GUZMÁN R. Jheyson. Evaluación Técnica De La Etapa Coagulación-Floculación Para El Mejoramiento En El Proceso De Potabilización De La Planta Galán De La EAAAZ.Bogotá D.C. 2017</p>	<p>En este proyecto de grado se realizó una evaluación del funcionamiento a la planta de tratamiento Galán de la EAAAZ para observar el funcionamiento de las etapas de coagulación-floculación. Se comparó el comportamiento y eficiencia de una nueva sal de aluminio como el PAC PRO y la del coagulante empleado por la empresa que en este caso es PAC 03. A partir de los resultados obtenidos de los dos casos se escogió el que mejor calidad de agua entrega y menor costo le representa a la empresa</p>

ANEXOS B FICHAS TÉCNICAS DE LOS COAGULANTES



Certificado N° 152-1

Cloruro Férrico 42% Ficha Técnica del Producto

Propiedades Químicas (NTC 3976)

Formula Quimica	FeCl ₃
Contenido de Cloruro Férrico (FeCl ₃) (% p/p)	40 – 45
Cloruro Ferroso (FeCl ₂) (% p/p)	< 0.92
Acidez (HCl) (% p/p)	<1.0
Insolubles (% p/p)	<0.2
Densidad (20 °C) (g/mL)	1.418 – 1.485

Vida útil posterior a su fabricación: 6 – 12 meses

Indicaciones o generalidades

Es una Solución acuosa que se presenta en forma de líquido viscoso de color rojizo oscuro. La producción industrial de cloruro férrico (FeCl₃) en solución, se obtiene por la reacción de óxidos de hierro con ácido clorhídrico (HCl).

Aplicaciones

Posee un alto poder de formación de flóculos, característica que es utilizada para diversas aplicaciones, como coagulante en el tratamiento de aguas residuales, industriales y potables. Además, el Cloruro Férrico ha sido utilizado por muchos años como un acondicionador de lodos, etapa previa a la filtración.

La utilización del Cloruro Férrico se va extendiendo al presentar ventajas técnicas y económicas con relación a otros productos utilizados en la coagulación de muchas aguas, especialmente en aquellas que poseen un elevado pH de floculación.

Presentación

Se presenta en condiciones líquidas en canecas de 25 y 70kg, tambor de 250kg, IBC de 1300kg y granel.

Condiciones de manejo

El producto es altamente corrosivo, por lo tanto, se debe evitar el contacto con objetos elaborados de aluminio, acero al carbón,

acero inoxidable y cobre, evite también el contacto con nylon. Los derrames en pisos de concreto pueden generar coloración y desgaste en los mismos.

Es deseable que el Cloruro Férrico sea dosificado como se entrega; su uso diluido puede ser consultado con el personal técnico de Sulfoquímica S.A.

Precauciones y seguridad

Producto considerado corrosivo, irritante y tóxico. Evite el contacto con metales que puedan sufrir corrosión tales como aluminio, acero al carbón, acero inoxidable y cobre, evite también el contacto con nylon. Se recomienda el uso de guantes y gafas protectoras.

En los ojos y mucosas causa irritación; en caso de contacto debe enjuagarse con agua abundante. Reacciona con metales, cloruro de alilo, sodio, potasio, álcalis. Puede formar vapores tóxicos u corrosivos.



Oficina Principal y Producción

Medellín: Calle 55 No 46-85 Itagüí, Antioquia; Tel: (574)370 1170; Fax: (574)277 5676; Coordenadas: 6° 10' 14.68 N 79° 36' 13.23 O info@sulfoquimica.com

Producción

Malambo Atlántico: Km 3 Vía Malambo - Sabanagrande; Parque Industrial PIMSA; Cel 3104044980 Coordenadas: 10° 50' 01.4" N 74° 46' 01.3" W; Tel (575)347 8350; Fax: (575)3478353; sqbaranquilla@sulfoquimica.com

Caloto: km. 7 Vía Caloto - Cauca. Cel 3217010527, 3157216417; Coordenadas: 3° 03' 13.0" N 76° 25' 55.9" W sqcaloto@sulfoquimica.com

Barbosa: km. 4 Vía Girardota - El Hatillo (Vereda Platanillo), Barbosa, Antioquia. Tel. (574)289 2480, Fax. (574)289 1234;

Cel 3116740919 Coordenadas: 6°24'07.7" N 75°25'10.4" W sqbarbosa@sulfoquimica.com

**Policloruro de Aluminio PAC
Ficha Técnica del Producto****Propiedades Químicas (Adaptación de Sulfoquímica S.A la norma NTC 4760 2ªda revisión)**

Fórmula química	$[Al(OH)_m Cl_{3-m}]_n$
Densidad a 25 °C (g/mL)	1.23 ± 0.03
Contenido de Alúmina % Al_2O_3	10.5 ± 0.5
Relación de Basicidad	70% min

Vida útil posterior a su fabricación: 3 meses

Indicaciones o generalidades

El Policloruro de Aluminio (PAC) es una sal de alta basicidad con base en anión cloruro. Se diferencia del Hidrocloruro de Aluminio (ACH) debido a que presenta especies polinucleares del metal convirtiéndolo en un coagulante de alto desempeño, con excelentes propiedades para el tratamiento de aguas con dificultades especiales y generando bajo volumen de lodos, pues trabaja bien con poco suministro de alúmina.

Aplicaciones

El Policloruro de aluminio es usado como coagulante para clarificar aguas potables y residuales.

Presentación

Se presenta en condiciones líquidas en canecas de 25 y 70kg, tambor de 250kg, IBC de 1300kg y granel.

Condiciones de manejo

El producto debe ser almacenado en tanques de fibra de vidrio, polietileno o acero recubierto en caucho y conducido empleando fibra de vidrio, PVC o cualquier otro material termoplástico. También es compatible con caucho natural y vitón. El producto no debe estar en contacto con

hierro, acero al carbón, acero inoxidable y bronce.

Es deseable que el Policloruro de Aluminio Líquido sea dosificado tal como se recibe del proveedor y no ser contaminados con agua u otra impureza durante el almacenamiento.

Para la dosificación exacta y uniforme, debe ser usada una bomba de desplazamiento positivo, diafragma o peristáltica. El producto no se deteriora con el tiempo mientras sea manejado bajo las condiciones explicadas.

Precauciones y seguridad

El producto no presenta alto riesgo en su manejo pero, por ser una sal ácida debe tratarse con cuidado. Evite el contacto con metales que puedan sufrir corrosión tales como hierro, cobre, bronce, aluminio y acero inoxidable. Se recomienda el uso de guantes y gafas protectoras.

Causa irritación en los ojos y mucosas, en caso de contacto debe enjuagarse con agua abundante.

El producto no emite gases y por lo tanto no causa efectos nocivos al ser inhalado.



Sulfato de Aluminio Tipo B Líquido
Hoja de Seguridad del Material (MSDS)

Preparado por Sulfoquímica S.A. según Norma Técnica Colombiana NTC4435 de 1998 – Abril de 2003
FS DES 7.5.5 – 03 / Versión 3 / 17/11/11

Qué es y qué hay que saber en caso de emergencia.

1. Identificación del Producto y de la Compañía

Sulfato de Aluminio Tipo B Líquido.

CAS 10043 – 01 - 3

No ONU: 3264

No NTC-1692: NA

Producido por Sulfoquímica s.a.

Oficina Principal.

Calle 55 #46-85 Itagüí, Antioquia (Colombia)

Teléfono: 57 (4) 370 1170

Fax: 57 (4) 277 5676

Producción

Barbosa: Vía Girardota - El Hatillo km. 4 (Vereda Platanito), Barbosa, Antioquia.

Tel. (574)289 2480, Fax. (574)289 1234.

Barranquilla:

Vía Malambo - Sabanagrande, km. 3; Parque Industrial PIMSA; Malambo, Atlántico.

Tel (575)347 8350; Fax: (575)3478353.

Caloto:

Vía Caloto - Santander de Quilichao, km. 7, Caloto, Cauca.

Tel (572)550 4344; Fax: (572)550 4343.

2. Composición

El producto es una mezcla de Sulfato de Aluminio y Sulfato Férrico disueltos en agua.

Contenido de Aluminio: 3.9%

Contenido de Hierro: 0.8%

Contenido de Sulfatos: 22.8%

3. Identificación del Riesgo

En los ojos y mucosas causa irritación.

Qué hay que saber si se presenta una situación peligrosa.

4. Primeros Auxilios

En caso de contacto con los ojos, enjuagar con abundante agua aproximadamente más de 15 minutos, levantando los párpados ocasionalmente.

En caso de ingestión, consultar al médico.

5. Extinción de Incendios

El producto no es combustible.

En caso de incendio utilice equipo autónomo y evite inhalar los vapores desprendidos.

6. Cómo Minimizar los Efectos Adversos en el Caso de una Fuga

Se debe rociar cal sobre los residuos que quedan después de recoger el material derramado, para evitar acidificación del suelo cuando haya corrientes de agua.

Cómo evitar que se presenten situaciones adversas.

7. Manejo y Almacenamiento

Almacenar en recipientes de acero inoxidable, fibra de vidrio, PVC, Polietileno o cualquier otro material termoplástico. También es compatible con EPDM, Caucho Natural y Vitón.

El producto no debe ponerse en contacto con fundición de hierro, acero al carbón, bronce o poliuretano.

8. Control de Exposición y Protección Personal

Emplear guantes y gafas protectoras.

9. Propiedades Físicas y Químicas

Fórmula: $Al_2(SO_4)_3$ (ac)

Aspecto: líquido.

Viscosidad (a 25°C): 12cP

Densidad: 1.310 – 1.340g/cm³

PH: 0.90 – 1.60

Color: café oscuro.

Olor: ninguno.

Punto de fusión (1bar): -16°C

Punto de ebullición (1bar): 101°C

Temperatura de ignición: ND

El material es moderadamente corrosivo.

10. Estabilidad y Reactividad

El producto es estable en condiciones normales de almacenamiento.

Reacciona con agentes quelantes.

Libera gases tóxicos en caso de incendio.

ANEXO C
CRITERIOS PARA CLASIFICAR EL ARD SEGÚN SU COMPOSICIÓN:

Parámetro	Concentración		
	Baja	Moderada	Alta
Sólidos totales (ST) (mg/L)	370 - 730	730 - 1160	> 1160
Sólidos disueltos totales (SD) (mg/L)	250 - 500	500 - 800	> 800
Sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L)	120 - 230	230 - 360	> 360
Demanda biológica de oxígeno (DBO) (mg/L)	110 - 200	200 - 400	> 400
Demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L)	200 - 400	400 - 800	> 800
Grasa y aceites (mg/L)	50 - 100	100 - 150	> 150
Relación	Valor		
	Bajo	Medio	Alto
DBO/DQO	0.3 – 0.4	0.4 – 0.5	>0.5

Fuente: HENZE et al; METCALF y EDDY; JORDÃO y PESSÔA.

ANEXO D

REFERENTES CONSULTADOS PARA DETERMINAR LOS RANGOS DE DOSIFICACIÓN FACTIBLES:

REFERENTE	DOO (mg O ₂ /L)	SST (mg/L)
PTAR Puerto Gaitán.	267	262
ABU BAKAR, Abdul., & HALIM, Azhar. Treatment of Automotive Wastewater by Coagulation Flocculation Using Poly-aluminum Chloride (PAC), Ferric Chloride (FeCl ₃) and Aluminium Sulfate (alum). Malaysia, Selatngor. 20	600	110
BARRAGAN, Jorge. DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA EL GAD MUNICIPAL DEL CANTÓN CHILLANES-PARROQUJA URBANA DE CHILLANES, PROVINCIA DE BOLIÁVAR, Ecuador, Riobamba. 2018.	383	150
CABRERA B, Xiomara et al. ESTUDIO DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA TEXTIL DE DESEMBARCO DEL GRANMA A ESCALA LABORATORIO. Cuba. 2009.	338	126
CAMPO, Marcela., y TOBAR, Carlos. Evaluación de la dosificación de Cloruro Férrico para el tratamiento primario avanzado del agua residual doméstica afluente a la PTAR-CANAVERALEJO, Santiago de Cali. 2011.	238	181
CANÓN, Lizeth. DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROTOTIPO RECICLADOR DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES.	2326	122
CARBONELLI, Juacyara et al. Evaluation of coagulation-flocculation process in the landfill leachate treatment at the Municipal Wastewater Treatment Plant, Brasil, Rio de Janeiro. 2013.	379.5	178
DE LA TORRE, María. EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PREVIO AL TRATAMIENTO SECUNDARIO EN LA PTAR DE ALBATEQU S.A	2360	582
FLOREZ, Gustavo., LOPEZ, Marlín., & MANNASBACH, María. Remoción de materia orgánica total en aguas residuales municipales a partir de procesos de coagulación-floculación. Colombia, Valledupar. 2016.	189.3	78
GHAFFARI, Shatin et al. Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. Malaysia. 2008.	1925	80
GIL S, Jenny. PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA E.S.E HOSPITAL DEPARTAMENTAL UNIVERSITARIO DEL QUINDÍO SAN JUAN DE DIOS. Bogotá D.C. 2018	390	115
GUIDA, Marco., et al. Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater. Naples, Italy. 2005.	290	265
HAMIDI A, Aziz et al. The use of alum, ferric chloride and ferrous sulphate as coagulants in removing suspended solids, colour and COD from semi-aerobic landfill leachate at controlled pH. Malaysia. 2008.	2098	297
HERRELA Q, Manuel y MORALES P, Oscar. PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE EN LA EMPRESA PRODUCTOS EL TOMATICO S.A.S EN LA ZONA DOS DE LA EMPRESA DE ALCANTARILLADO Y ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. 2018.	966	51
MERIC, Sureyya et al. Microbial and COD removal in a municipal wastewater treatment plant coagulation flocculation process. Italy, Naples. 2002.	450	155
MERINO, Córdova y ANDRÉ, Erick. Aplicación de sulfato de aluminio y tina para la remoción de materia orgánica y turbidez de las aguas residuales del camal municipal Tumbán 2018. Perú, Chiclayo.	1500	-
MILLAN M, Felipe y POLANIA V, Leidy. PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA SOMOS K S.A. Bogotá D.C. 2018.	347	87
MORTULA, Maruf., ALI, Tarig., & ELAKSHER, Ahmed. Municipal wastewater treatment using different coagulants. United Arab Emirates. 2019.	-	325
NANSUBUGA, Irene., et al. Effect of polyaluminium chloride water treatment sludge on effluent quality of domestic wastewater treatment. Uganda. 2013.	1197	563
Qiulai He, Hongyu Wang, Congyuan Xu, Jing Zhang, Wei Zhang, Zhuocheng Zou & Kai Yang (2016) Feasibility and optimization of wastewater treatment by chemically enhanced primary treatment (CEPT).	234	111
ROMERO, Castro y STEFANI, María. DISMINUCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA DEL EFLENTE DEL CAMAL MUNICIPAL EL PORVENIR MEDIANTE EL TRATAMIENTO CON SULFATO DE ALUMINIO AL 1%. Perú, Trujillo. 2017.	12121	-
SARPARASTZADEH, H., SAEEDI, M., NAEIMPOOR, F., & AMINZADEH, B. Pretreatment of Municipal Wastewater by Enhanced Chemical Coagulation. Tehran, Iran. 2006.	173.4	155
SMO CZYNSKI, Lech et al. DESTABILIZATION OF MODEL WASTEWATER IN THE CHEMICAL COAGULATION PROCESS. ECOL CHEM ENG S. 2014. DOI 10.2478	14500	70
ZHANG, Pengfei. Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). [en línea]. 2013. [Consultado Nov 18,]. Disponible en http://hdl.handle.net/10251/33704	252.6	190

Fuente: Elaboración propia

