

**PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE EN LA PTAP DEL MUNICIPIO DE SIBATÉ**

YILBERT JULIAN CANALES RAMIREZ

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
Ingeniero Químico**

Director del proyecto:

Msc. Ing. David Triviño Rodríguez

Ingeniero Químico

FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA

BOGOTA D.C

2021

NOTA DE ACEPTACION

Nombre: David Triviño
Firma del director

Nombre: Oscar Lombana
Firma del presidente del jurado

Nombre: Oscar Lombana
Firma del jurado

Nombre: Claudio Moreno
Firma del jurado

Bogotá D.C: Febrero de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero 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 de la Facultad

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

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 al autor.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCION	12
1. GENERALIDADES	13
1.1 Caracterización del agua	13
1.1.1 Características Físicas	13
1.1.2 Características Químicas	15
1.2 Operaciones convencionales utilizadas en el tratamiento del agua cruda.	24
1.2.1 Coagulación y floculación	24
1.2.2 Sedimentación	25
1.2.3 Filtración	25
2. MARCO TEORICO	27
2.1 Coagulación	27
2.1.1. Factores Que Influyen En La Coagulación	27
2.1.2 Coagulantes	29
2.2 Mezcla Rápida	35
2.3 Potencial Zeta	35
2.4 Floculación	36
3. MARCO LEGAL	38
3.1 Resolución Numero 2115 (22 Junio Del 2007)	38
3.2 RAS 2000. Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico.	40
4. DIAGNOSTICO DE LA PLANTA	42
4.1 Fuente Hídrica	42
4.2 Proceso De Potabilización	43
4.2.1 Inicio Del Proceso	44
4.2.2 Canaleta Parshall	45
4.2.3 Dosificación de reactivos	46
4.2.4 Floculadores	48
4.2.5 Sedimentadores	49
4.2.6 Filtración	50
4.2.7 Desinfección y estabilización	51
4.2.8 Almacenamiento y distribución	52

4.3. Características Fisicoquímicas Del Agua	52
4.4 Insumos Químicos Usados	55
4.4.1 Sulfato de aluminio	55
4.4.2 Cal	57
4.5 Diagnostico Operacional	58
4.6 Volúmenes Manejados Por La PTAP	60
4.6.1 Volúmenes facturados	60
4.6.2 Volúmenes tratados por la PTAP	61
4.6.3 Volúmenes producidos por la PTAP	62
5. CASOS DE ESTUDIO	65
5.1 Casos De Estudio Con Desarrollo Experimental	65
5.1.1 Evaluación Del Proceso De Coagulación – Floculación De Una Planta De Tratamiento De Agua Potable	65
5.1.2 Propuesta De Mejora Para La Planta De Agua Potable De La Empresa Fertilizantes Colombianos S.A	66
5.1.3 Evaluación Técnica De La Etapa Coagulación-Floculación Para El Mejoramiento En El Proceso De Potabilización De La Planta Galán De La EAAAZ	67
5.1.4 Evaluación De La Sustitución Del Agente Coagulante -Sulfato De Aluminio- En El Proceso Actual De Coagulación - Floculación De Agua Potable En La Empresa Eaf Sas Esp	68
5.1.5 Evaluación De La Viabilidad Técnico – Financiera Del Uso Del Sulfato De Aluminio Líquido O Hidroxicloruro De Aluminio (PAC) Como Reactivo Sustituto Del Sulfato De Aluminio Granular En El Subproceso De Coagulación Y Floculación De La PTAP El Dorado	69
5.1.6 Optimización De La Coagulación – Floculación En La Planta De Tratamiento De Agua Potable De La Sede Recreacional Campoalegre – Cajasan	70
5.2 Casos De Estudio Sin Desarrollo Experimental	70
5.2.1 Diagnostico Planta De Tratamiento De Agua Potable, Desde Su Punto De Captación Hasta La Red De Distribución, En El Municipio Del Castillo, Departamento Del Meta	71
5.2.2 Diagnostico De La Planta De Tratamiento De Agua Potable San Antonio – Asociación Sucuneta	71
5.2.3 Diagnostico Y Optimización De La PTAP Del Municipio De Fómeque, (Cundinamarca)	72
6. PLAN DE MEJORAMIENTO	76
6.1 Coagulantes Más Utilizados	76
6.2 Influencia De La Alcalinidad	79
6.3 Matriz De Selección	82
6.4 Plan De Acción	86

7. ANÁLISIS DE COSTOS	88
8.CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFIA	93
ANEXOS	97

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de potabilización del agua llevado a cabo en Sibaté	44
Figura 2. Tanque de distribución de agua	44
Figura 3. Canaleta Parshall	45
Figura 4. Punto de mezcla rápida	46
Figura 5. Mecanismo del dosificador volumétrico	47
Figura 6. Punto de mezcla entre agua y el coagulante	48
Figura 7. Vista de los dos floculadores	49
Figura 8. Vista de los sedimentadores tipo colmena	50
Figura 9. Vista al interior de un filtro	51
Figura 10. Clorador	52
Figura 11. Agua cruda en un día con lluvias	54
Figura 12. Volumen de agua tratada, en metros cúbicos, por la planta en metros cúbicos	62
Figura 13. Volumen de agua producida por la planta en metros cúbicos	63

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tipos de polielectrolitos	30
Tabla 2. Polímeros naturales que poseen características de coagulantes o floculantes	31
Tabla 3. Comparación de coagulantes en el tratamiento de aguas	34
Tabla 4. Características físicas del agua permitidas	38
Tabla 5. Características químicas permitidas	39
Tabla 6. Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana	39
Tabla 7. Características Químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana	40
Tabla 8. Resumen Hidrología Q. Aguas Claras	43
Tabla 9. Características fisicoquímicas del agua	53
Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas del sulfato de aluminio de sus diferentes presentaciones	56
Tabla 11. Propiedades fisicoquímicas del Sulfato de aluminio sólido	56
Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas del Sulfato de aluminio líquido	57
Tabla 13. Resumen del diagnóstico operacional	58
Tabla 14. Criterio de selección de una canaleta Parshall como mezclador rápido hidráulico	60
Tabla 15. Volúmenes de agua consumidos, en metros cúbicos, en los meses de enero a julio del año 2017	61
Tabla 16. Resumen de los casos de estudio sobre cambio de coagulantes y con desarrollo experimental	73
Tabla 17. Resumen de los casos de estudio sobre implementación de coagulante	74
Tabla 18. Coagulantes más utilizados en la actualidad para el tratamiento de aguas con sus respectivas ventajas y desventajas	78
Tabla 19. Rangos de pH óptimo de los coagulantes más utilizados.	79
Tabla 20. Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación	80
Tabla 21. Selección de coagulantes de acuerdo al cumplimiento de pH óptimo	81
Tabla 22. Puntaje y calificación para la selección de coagulantes.	82
Tabla 23. Factor ponderado tenido en cuenta para la selección de los coagulantes	83
Tabla 24. Matriz de selección de los coagulantes	85

Tabla 25. Costos de las diferentes sustancias químicas por kg	88
Tabla 26. Resultados obtenidos con el sulfato de aluminio líquido tipo B + Ultrion 8157	89
Tabla 27. Resultados obtenidos con el PAC.	90
Tabla 28. Costos aproximados entre Sulfato de aluminio + Ultrion 8157 y el PAC.	90

RESUMEN

En el siguiente trabajo de grado se desarrolló una propuesta de mejora del proceso de tratamiento de agua potable en la PTAP del municipio de Sibaté. En primer lugar, se realizó un diagnóstico a la planta, esto mediante una visita técnica e información suministrada por la empresa, de esta forma identificando las falencias de la misma.

Este diagnóstico arrojó que, en ocasiones, el agua que es suministrada a los consumidores, sobrepasa uno de los parámetros físico-químicos estipulados por la normatividad, este es la concentración de aluminio, siendo 2.0 mg/L su concentración máxima, además, se encontraron falencias en el proceso de coagulación-floculación, ya que, el agente coagulante no era vertido de la forma más eficiente.

Teniendo esto en cuenta, se procedió a realizar una revisión bibliográfica acerca del cambio del coagulante usado por la empresa, el cual es el Sulfato de Aluminio tipo B en forma granular, ya que, previamente se había encontrado información que sugería que esta sustancia tenía problemas en dejar altas cantidades de aluminio en el agua.

Una vez encontrados los coagulantes más usados en tratamientos de aguas, se realizó un primer filtrado teniendo en cuenta el pH óptimo de cada coagulante, para posteriormente, realizar un matriz de selección adaptándola a la problemática de la empresa, de forma que al final de este procedimiento se determinaron 3 posibles candidatos.

Una vez seleccionados los posibles sustitutos, se investigaron 9 casos de estudio, los cuales servirían como sustentación, para corroborar que los posibles sustitos funcionan en condiciones reales, ya que este trabajo no cuenta con un desarrollo experimental.

PALABRAS CLAVE: PTAP, Sibaté, coagulación, floculación, coagulante, sulfato de aluminio, potabilización del agua.

INTRODUCCION

La Empresa de Servicios Públicos de Sibaté, ubicada en el municipio de Sibaté del departamento de Cundinamarca, cuenta con una planta de tratamiento de aguas potable, la cual suministra agua potable a la población del casco urbano del municipio y también a algunas empresas del sector industrial del mismo municipio. Actualmente opera con un caudal promedio de 45 L/s. Este valor se ve afectado por factores como el clima o la época del año en la que se encuentre, siendo en la época de verano el caudal mínimo (45 L/s) y en la época de invierno el máximo (aproximadamente 60 L/s), debido a las lluvias.

Sin embargo, durante el tratamiento y control de estas aguas, se pueden evidenciar falencias en determinados procesos, tales como en la coagulación y la floculación, dando como resultado una concentración elevada de aluminio. Además de esto, durante la dosificación del coagulante se está haciendo una sobredosificación, lo cual podría estar afectando otros procesos, ya sea afectando parámetros fisicoquímicos o generando perturbaciones en otros procesos.

Como bien es sabido, el agua es un recurso de suma prioridad, cuyo tratamiento para el consumo humano es igualmente imprescindible, porque puede ser foco del crecimiento microbiológico, de forma que, si no se trata adecuadamente, podría producir graves problemas a la salud humana y al medio ambiente.

El objetivo general del proyecto es: desarrollar una propuesta de mejora del proceso de tratamiento de agua potable en la PTAP del municipio de Sibaté, cuyos objetivos específicos son: Diagnosticar el proceso actual de la PTAP del municipio de Sibaté, plantear alternativas de mejoramiento en las actuales operaciones de la PTAP del municipio de Sibaté, evaluar la alternativa de mejora por medio de referentes teóricos y casos de estudio y realizar el análisis de costos de la alternativa de mejora.

Este proyecto se enfoca en el mejoramiento de las operaciones realizadas por la planta, ya sea en las sustancias químicas que se usan o en la técnica que se esté empleando, además, sus resultados pueden ser aprobados o no por la empresa, su ejecución queda en total libertad y responsabilidad de la misma.

1. GENERALIDADES

1.1 Caracterización del agua

Para determinar si el agua es adecuada para el consumo humano se debe hablar de calidad de agua, puesto que el término “calidad del agua” puede tomar diferentes significados, cada uno de acuerdo al uso final de la misma, se va a hacer referencia como agua para el consumo humano, esta agua, también llamada segura, es aquella que está libre de parásitos y bacterias, no tiene color ni olor, dicho esto [2], hay una serie de características físico-químicas y microbiológicas que determinan la calidad de esta, las cuales están parametrizadas por varias normas, ya sean de origen internacional, nacional, municipal o departamental. [1]

1.1.1 Características Físicas

Las características físicas del agua son aquellas que pueden impresionar los sentidos (olor, vista, gusto, etc.), por tanto, tienen un impacto directo sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad en el agua, dentro de las más importantes se puede encontrar:[1]

- Turbiedad
- Solidos soluble e insolubles
- Color
- Olor y sabor
- pH

1.1.1.i. Turbiedad. La turbidez es uno de los parámetros de calidad del agua más importantes, ya que tiene un impacto estético negativo y además es un indicativo de una mayor probabilidad de contaminación microbiológica y por compuestos tóxicos. Es originada por las partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida, etc.), de forma que el agua pierde esa transparencia que tanto la caracteriza, las unidades en las que se mide son las Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT). Su control está relacionado con la eficiencia de los procesos de desinfección, ya sea químicos o físicos, dicho control se suele hacer mediante coagulantes, acondicionadores

de pH, ayudantes de coagulantes, entre otros, por lo cual suele ser un elemento que tiene gran importancia en cuanto los costos de tratamiento.[1]

1.1.1.ii Sólidos Y Residuos. Son las partículas que quedan luego de que se evapora una muestra de agua, estos solidos pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Disueltas: Su tamaño es hasta de 1 milimicrómetro, estas partículas no alcanzan a influir en la turbiedad, pero si en su color u olor.

- Coloidales: su tamaño va desde 1 – 1000 milimicrómetros, estas son las causantes directas de la turbiedad en el agua.

- Partículas suspendidas: su tamaño es mayor a 1000 milimicrómetros, estas partículas suelen precipitarse cuando el agua se encuentra en reposo.[1]

1.1.1.iii Color. Esta característica puede estar ligada con la turbiedad o ser independiente de esta. Suele ser un indicativo rápido de la calidad del agua y junto al olor y sabor se suele determinar si es aceptable por parte del consumidor. Hay dos tipos de color, el verdadero, producido por sustancias disueltas y es el que se toma en cuenta en la norma, y el aparente, que es el que es fruto del verdadero más el efecto de los sólidos presentes en el agua. Se suele medir en Unidades de Platino-Cobalto (UPC)

Se origina por la presencia de sustancias como taninos, lignina, ácidos húmicos, ácidos grasos, ácidos fúlvicos, etc. Estas sustancias suelen estar presentes en el agua debido a varias circunstancias:

- Extracción acuosa de origen vegetal
- Descomposición de la materia
- Materia orgánica en el suelo
- Presencia de hierro, manganeso y otros metales
- Combinación de los procesos anteriores.[1]

1.1.1.iv Olor y sabor. El olor y el sabor son el motivo principal de rechazo del agua por parte de los consumidores. Las sustancias generadoras de olor y sabor en aguas crudas pueden ser compuestos orgánicos o pueden provenir de vertimientos industriales. Los cambios en estas características pueden deberse a la variación en la calidad de la fuente hídrica o por la deficiencia en el proceso de tratamiento. En el agua se pueden considerar cuatro sabores básicos:[1]

- Acido

- Salado

- Dulce

- Amargo

1.1.1.v pH. Mide el balance de acidez de una solución, esta variable es muy importante ya que influye en los procesos químicos y biológicos.

Generalmente se debe mantener un pH cercano a 7, esto se debe a que pH bajos pueden generar incrustaciones o corrosión en la red y características del agua como la alcalinidad, la dureza, entre otros.

Para controlar esta característica se hace uso de compuestos químicos como la cal en caso de que el agua sea acida.[1]

1.1.2 Características Químicas

De manera natural el agua contiene sustancias químicas, las cuales sirven de sustento o no. En tratamiento de aguas son pocas las sustancias que tienen relevancia por su impacto en la salud humana. [1]

1.1.2.i Aceites y grasas. La presencia de estas sustancias puede alterar las características organolépticas del agua, sin embargo, no inciden de manera negativa sobre la salud del ser humano.

Su contenido se determina mediante una extracción de todo su material soluble en un solvente orgánico tal como el hexano, sus resultados se registran como mg/L de MEH (material extraíble en hexano). [1]

1.1.2.ii Agentes espumantes. Estas sustancias se caracterizan por ser agentes tensoactivos, los cuales producen espuma cuando el agua es agitada. Su principal fuente de origen son residuos de detergentes domésticos.

Su efecto sobre el agua reside en que dificulta el tratamiento sobre esta y altera características como la solubilidad del oxígeno en el agua y el DBO. [1]

1.1.2.iii Alcalinidad. La alcalinidad es la capacidad del agua de neutralizar ácidos, sin embargo, aniones de ácidos débiles, como bicarbonatos, carbonatos, sulfuros, entre otros, pueden contribuir en la alcalinidad.

Esta característica es importante dentro del tratamiento del agua ya que reaccionan agentes coagulantes hidrolizables, si el agua posee baja alcalinidad se suele adicionar un alcalinizante como el hidróxido de calcio. También es importante esta característica ya que incide sobre el carácter corrosivo del agua y en valores altos suele alterar el sabor. [1]

1.1.2.iv Aluminio. Es un componente natural del agua debido a que se encuentra en las arcillas que el agua arrastra durante su trayecto. Cuando está en concentraciones elevadas le confiere al agua un pH bajo, lo cual puede llevar a la generación de compuestos indeseables, tales como ácidos débiles.

Durante el tratamiento es posible remover esta sustancia mediante la adición de hidróxido de aluminio o mediante agentes coagulantes.[1]

1.1.2.v Amonio. Es el producto final de la reducción de las sustancias nitrogenadas y suele ser un constituyente común del agua, puede tener diversos orígenes, tales como acciones bacterianas, fijación química del aire y la reducción de nitritos.

Debido a que es un micronutriente de microorganismos, su presencia favorece la multiplicación de estos, por lo que puede ser un problema, además, influye en la desinfección con cloro de forma que se deba incrementar su dosis debido a la posibilidad de formación de cloramidas, en caso de que esté presente en concentraciones elevadas su eliminación se hace mediante la oxidación con cloro. [1]

1.1.2.vi Antimonio. Puede encontrarse en el agua a concentraciones de 0.6 mg/L. Suele estar relacionado con el aumento del colesterol en la sangre. Su origen está relacionado con la industria petrolera, cerámica, electrónica, entre otras. [1]

1.1.2.vii Arsénico. Suele estar presente en el agua de forma natural, es un elemento muy tóxico para el ser humano. Su efecto sobre la salud depende de la vía de exposición, del estado de valencia y de la forma química del compuesto. Se sospecha que tiene efectos cancerígenos y es la principal causa de intoxicación en seres humanos.

Para su eliminación se hacen uso de sustancias tales como sulfato férrico, alumbre o con cal antes del proceso de coagulación, a escala de laboratorio, su remoción es cercana al 90% con el uso de alguna de estas sustancias. [1]

1.1.2.viii Asbesto. El asbesto ha cobrado importancia recientemente, su origen se debe a ciertas características del agua y a la erosión de los sistemas de distribución que cuentan con tuberías de este material, sin embargo, una vez se encuentra el problema es posible la mitigación de este compuesto mediante el control y la reducción de la corrosividad del agua.

Su problemática reside en que puede traer problemas a la salud humana tales como el desarrollo de pólipos intestinales benignos y también problemas cancerígenos. [1]

1.1.2.ix Bario. Suele presentarse en concentraciones bajas, además, es un compuesto altamente tóxico para el ser humano, puede causar trastornos cardíacos, vasculares y nerviosos, en el peor de los casos puede causar la muerte.

Sus fuentes de origen suelen ser residuos de perforaciones, de refinerías metálicas o de la erosión de algún depósito natural.

Su remoción se hace en el proceso de coagulación o con el control adecuado de pH mediante cal. [1]

1.1.2.x Cadmio. Es un compuesto tóxico para el hombre, proveniente de la corrosión de la tubería, erosión de depósitos naturales, residuos de refinerías metálicas, mala disposición de pinturas o baterías.

Su efecto sobre la salud humana suelen ser debilitamiento en los huesos, disminución en los niveles de hierro hepático y diversos efectos acumulativos sobre el hígado y los riñones.

Su remoción se hace en el proceso de coagulación y mediante el control de pH, de forma que se elimina cerca de un 90% de este compuesto.[1]

1.1.2.xi Cianuro. Su presencia no es común en el agua, su origen puede deberse a deberse a residuos de industrias de galvanoplastia, plásticos, fertilizantes y minería.

Es una sustancia tóxica para el ser humano, aunque sus efectos dependen de la dosis, pH, temperatura, entre otros, suele perjudicar el sistema nervioso, causar problemas de tiroides y en el peor de los casos la muerte.

Para su eliminación se hace uso del cloro en forma gaseosa o en forma de hipoclorito, otro tratamiento efectivo es la utilización de ozono para la oxidación de este compuesto.

1.1.2.xii Cinc. El cinc es un compuesto natural que acompaña al agua, aunque también suele provenir del contacto con tuberías y accesorios metálicos. No tiene efectos adversos sobre la salud humana, por el contrario, se sabe que es esencial en procesos metabólicos, sin embargo, puede incidir en el sabor del agua.

Es un elemento difícil de remover del agua, sin embargo, se recomienda hacer uso del ablandamiento cal-soda junto con el proceso de coagulación, removiendo entre un 60% y un 90%.[1]

1.1.2.xiii Cloruros. Se presenta en cantidades bajas normalmente, sin embargo, en fuentes que provengan de terrenos salinos o con alguna influencia con corrientes marinas, puede presentar la cantidad suficiente para afectar el sabor del agua.

Puede presentar problemas como la corrosión o la erosión en la red de distribución.

Su remoción suele ser bastante difícil y costosa, por lo general se suele eliminar mediante una destilación, sin embargo, se está investigando de mecanismos que aprovechen la luz solar, muy útil en lugares donde no se tiene otra fuente de agua más que el mar. [1]

1.1.2.xiv Cobre. Se encuentra de forma natural en el agua a bajas concentraciones, al igual que el cinc, resulta beneficioso ya que interviene en procesos metabólicos, sin embargo, exposiciones a largo plazo y a altas concentraciones pueden llevar a problemas de tipo hepático o renales.

Su origen, además del natural, puede deberse a la erosión o corrosión de la red de distribución, depósitos naturales y residuos de industrias madereras.

Su remoción se hace en el proceso de coagulación con eficiencias entre 60% y 90%. [1]

1.1.2.xv Cromo. Suele estar presente de forma natural en el agua, además es esencial en los procesos metabólicos, sin embargo, este puede llegar a ser muy toxico, dependiendo de su estado de oxidación, puede llegar a ser irritante y corrosivo, además de traer consecuencias cancerígenas.

Otras formas por las que puede estar presenten pueden ser por residuos de las industrias de acero, de papel y de curtiembres.

Su remoción suele ser difícil, ya que requiere coagulantes específicos como el sulfato ferroso y además de un tratamiento con cal-soda. [1]

1.1.2.xvi Dureza. Corresponde a la suma de los cationes polivalentes expresados como la cantidad equivalente de carbonato de calcio, de los cuales los más comunes de los de calcio y los de magnesio. No se ha comprobado que tenga repercusiones negativas sobre la salud humana, sin embargo, puede ser un problema ya que se le asocia con el consumo de más jabón y detergente, cosa que resulta en la contaminación del agua y también puede llegar a erosionar tuberías u obstruirlas.

Su tratamiento se hace mediante compuestos como la cal o el ablandamiento cal-soda. [1]

1.1.2.xvii Fenoles. Se definen como los hidróxidos de los derivados de benceno y su núcleo condensado. Su presencia suele deberse a la acción bacteriana sobre materia orgánica en descomposición, desechos industriales, fungicidas y pesticidas, en gran medida por estos dos últimos.

A concentraciones altas son tóxicos para la salud humana, a bajas concentraciones alteran las características organolépticas del agua.

Su remoción suele ser muy difícil, además de que cabe la posibilidad de que aun así el agua presente cambios en sus características organolépticas. [1]

1.1.2.xviii Fluoruros. Suele estar de forma natural en el agua, en concentraciones adecuadas puede llegar a ser beneficioso debido a su característica para combatir la caries dental, sin embargo, a condiciones elevadas puede causar manchas en los dientes y también debilitamiento óseo.

Su remoción suele hacerse en el proceso de coagulación, sin embargo, no se deben usar coagulantes con aluminio ya que no es eficiente el proceso.

1.1.2.xix Fosfatos. Este compuesto está presente de forma natural en el agua, suele ser un nutriente para la vida acuática y por tanto puede llegar a ser un problema debido a la acumulación de algas, sedimentos, entre otros.

Su principal origen son procesos biológicos y también residuos de detergentes domésticos.

Dentro del proceso de tratamiento del agua, suele ser un problema ya que afecta la coagulación y en algunos casos la filtración.

1.1.2.xx Hidrocarburos. Su presencia se debe a descargas de residuos industriales y a derrames accidentales. La mayoría de estos compuestos son tóxicos para la salud humana y también perjudican los procesos llevados a cabo en el tratamiento del agua. [1]

1.1.2.xxi Hierro. No es muy común encontrar este elemento en el agua, y por lo general sus compuestos no son nocivos para la salud, sin embargo, puede llegar a obstruir la red de distribución, alteraciones en las características físicas y organolépticas del agua y el crecimiento indeseable de microorganismos en los depósitos de agua. Suele presentarse en forma de sales (ferrosas y en bicarbonato ferroso).

Su remoción se logra en el proceso de coagulación de la planta o en su defecto algún proceso que trate la turbiedad del agua. [1]

1.1.2.xxii Manganeso. No es un elemento que se encuentre de forma común en el agua, y cuando está presente suele estar relacionado con el hierro, no es nocivo para la salud en pequeñas cantidades, de hecho, es muy importante en procesos enzimáticos, sin embargo, en grandes cantidades puede causar daños en el sistema nervioso. Puede afectar las características organolépticas del agua y su remoción es difícil, lo cual se logra mediante el uso de oxidantes y un pH alto. [1]

1.1.2.xxiii Materia Orgánica. Las aguas pueden traer consigo, además de sustancias minerales y disueltas, sustancias orgánicas originadas por el lavado de suelos o el metabolismo de seres vivos, además de esto, las descargas de aguas residuales domésticas e industriales también contienen este tipo de materia. Las sustancias que provienen del lavado de suelos suelen ser ácidos húmicos, las que provienen del metabolismo de los seres vivos suele ser proteínas, vitaminas, entre otros, las descargas de residuos domésticos e industriales suelen traer sustancias variadas, estas sustancias son las principales causas de la alteración de las propiedades organolépticas del agua, por esto mismo, se hace el debido tratamiento en las plantas para su consumo humano. [1]

1.1.2.xxiv Mercurio. En el agua, el mercurio se encuentra de una forma inorgánica, que posteriormente puede pasar a ser orgánica por medio de acciones de microorganismos, a su vez, estas sustancias pueden ir escalando pasando desde plantas y algas hasta peces, aves e incluso el hombre.

Es un compuesto tóxico para la salud humana, capaz de producir la muerte.

La remoción de esta sustancia depende más que todo de variables como el pH y la turbiedad del agua en vez de la concentración que se tenga de este, se suele remover durante la coagulación junto con la filtración, usando agentes coagulantes que tengan aluminio o hierro.[1]

1.1.2.xxv Nitritos y Nitratos. Los nitritos son sales de ácido nitroso, mientras que los nitratos son sales del ácido nítrico, se suele presentar por contaminación con fertilizantes, aguas residuales domésticas, entre otros.

Puede afectar la salud de la población infantil al desarrollar metahemoglobinemia por parte de los nitritos, su presencia es común en más que todo depósitos de agua rural, presentándose en forma de nitratos y en bajas concentraciones, por lo cual no suele representar un problema para la salud pública.

Su remoción es compleja, siendo el método de resinas de intercambio iónico el más efectivo.[1]

1.1.2.xxvi Oxígeno Disuelto (OD). Proviene principalmente del aire, su presencia es esencial en el agua, niveles bajos de oxígeno pueden indicar contaminación en las aguas, condiciones sépticas de materia orgánica o alta actividad microbiológica. Su presencia depende de la temperatura, la presión, de los minerales presentes en el agua, su aeración, la presencia de plantas verdes, entre otros. Algunas veces puede influir en las propiedades corrosivas del agua.

El agua potable debe contener cierta cantidad de oxígeno disuelto, debe estar bien aireada y se debe tener control sobre la variación de esta característica, ya que este parámetro se puede tomar como un indicador de contaminación. [1]

1.1.2.xxvii Plaguicidas. Abarca a un gran número de compuestos orgánicos que se usan con diversos propósitos en el área agrícola, tales como control de plagas y maleza. Entre los más comunes se tienen los hidrocarburos clorados, los carbamatos, los organofosforados y los cloro fenoles.

Se sabe que son tóxicos pero sus efectos dependen del tipo de plaguicida, para su remoción se hace uso de agentes adsorbentes, siendo el carbón activado el más común de todos. [1]

1.1.2.xxviii Plata. La presencia de este metal no es común en las aguas, sus efectos sobre la salud suelen ser decoloraciones en diversas partes del cuerpo a concentraciones elevadas.

Su remoción se realiza por medio de agente coagulantes como el sulfato férrico y el sulfato de aluminio. [1]

1.1.2.xxix Plomo. La presencia de este metal pesado puede variar de acuerdo a la fuente hídrica y a otros factores, es muy toxico, lo cual genera una enfermedad llamada saturnismo, además, afecta a los sistemas nervioso y cardiovascular.

Su procedencia puede ser por la erosión de las tuberías y las uniones del sistema de abastecimiento.

Para remover este metal se hacen uso de coagulantes a base de aluminio o de hierro. [1]

1.1.2.xxx Sulfatos. Suelen estar en el agua de forma natural a bajas concentraciones, pueden provenir de la oxidación de sulfuros en el agua.

No tiene efectos adversos en la salud, salvo que pueden tener un efecto laxante, además, puede cambiar las propiedades organolépticas del agua, en especial su sabor, y también puede dotar al agua de propiedades corrosivas.

Su remoción suele ser costosa y difícil, sin embargo, normalmente no presenta un problema. [1]

1.2 Operaciones convencionales utilizadas en el tratamiento del agua cruda.

Debido a la presencia de sustancias químicas indeseables en el agua cruda, ya sea porque son tóxicas para el ser humano, deterioran la red de distribución o simplemente no cumplen con la normatividad, se somete a una serie de operaciones llamadas en conjunto clarificación, la clarificación tiene como objetivos: [3]

- La eliminación de los sólidos en suspensión.
- La eliminación de microorganismos patógenos
- La corrección de las características fisicoquímicas que hacen que el agua no sea apta para consumo

Las operaciones que se llevan a cabo en la clarificación son:

- Coagulación y Floculación.
- Sedimentación.
- Filtración.
- Desinfección

1.2.1 Coagulación y floculación

La coagulación se realiza por medio de agentes químicos llamados coagulantes, esto con el fin de acondicionar la materia suspendida, coloidal y disuelta para su posterior eliminación.[4]

Para ello, los coagulantes pueden tener las siguientes implicaciones:

- La desestabilización de pequeña materia coloidal y suspendida.
- La adsorción y reacción de porciones de NOM coloidal y disuelta.
- La creación de precipitados floculantes que se extienden por el agua arrastrando todo el material suspendido, coloidal y disuelto en el momento en que se asienta.

Posteriormente, se realiza el proceso de floculación, su propósito es producir partículas con un tamaño superior mediante la agregación, las cuales pueden ser eliminadas en los procesos posteriores.[8]

Hay dos tipos de floculación:

- Microfloculación También conocida como floculación pericinetica, en este tipo de floculación, la agregación de partículas se da mediante el movimiento térmico aleatorio de partículas fluidas, conocido como movimiento browniano.

- Macrofloculación: También conocida como floculación ortocinética, surge de gradientes de velocidad inducidos al agua. Dichos gradientes de velocidad pueden ser originados al conducir al líquido alrededor de deflectores, por agitación mecánica, por velocidades de asentamiento dentro de un sedimentador.

Dentro del proceso de floculación, la más importante es la macrofloculación, ya que es la que determina la tasa de floculación, a su vez, dentro de esta, los parámetros que cobran más importancia son los gradientes de velocidad y el tiempo de floculación.[3] [4] [8]

1.2.2 Sedimentación

La sedimentación es el proceso seguido de la coagulación y la floculación, se obliga al agua a estar en reposo durante un periodo de tiempo lo suficientemente largo para que las partículas del agua se asientan en el fondo del depósito por acción de la gravedad.[3]

Las partículas de origen mineral se asientan con relativa facilidad en periodos cortos de tiempo, mientras que las partículas orgánicas llegan a tardar mucho más tiempo debido a las altas densidades de estas.

1.2.3 Filtración

La filtración puede ser cualquier proceso para la eliminación de partículas suspendidas por medio del paso a través de un medio poroso. La filtración mejora la claridad del agua mediante la eliminación de las partículas, además, la filtración junto con el proceso de desinfección son claves para eliminar microorganismos patógenos del agua.[3]

Es muy importante resaltar que la filtración es un proceso de pulimiento del agua que depende de los procesos anteriores, ya que muchos operarios dicen que la filtración es la operación más importante de todas.

2. MARCO TEORICO

2.1 Coagulación

La coagulación se realiza por medio de agentes químicos llamados coagulantes, esto con el fin de acondicionar la materia suspendida, coloidal y disuelta para su posterior eliminación. [4]

Para ello, los coagulantes pueden tener las siguientes implicaciones:

- La desestabilización de pequeña materia coloidal y suspendida.
- La adsorción y reacción de porciones de NOM coloidal y disuelta.
- La creación de precipitados floculantes que se extienden por el agua arrastrando todo el material suspendido, coloidal y disuelto en el momento en que se asienta.

«Teniendo en claro que para realizar este proceso hay que desestabilizar las partículas, se indica los 4 mecanismos por los cuales este proceso se lleva a cabo:

- Compresión de la doble capa: Una dosis de coagulante logra la atracción de las cargas contrarias de la capa móvil que se comprimen sobre la capa fija del coloide. Esta siempre asociado a la adsorción y neutralización de cargas.
- Adsorción y neutralización de cargas: Las sales coagulantes se disocian iónicamente en el agua y neutralizan las cargas negativas de la superficie del coloide. Esta siempre asociado con la compresión de la doble capa.
- Adsorción y puente: Se da principalmente con la aplicación de polímeros aniónicos cuyas moléculas poseen grupos químicos que absorben las partículas coloidales: No obstante, la reacción de las sales coagulantes con los coloides también propicia la aparición de puentes de hidrogeno y otros tipos de enlaces.
- Incorporación o barrido: Un exceso de coagulante forma una nata esponjosa precipitable que arrastra consigo los coloides hasta el fondo del sedimentador. Se usa especialmente en aguas de baja turbiedad.» [3]

2.1.1. Factores Que Influyen En La Coagulación

No es de extrañar que este proceso sea el más importante en el proceso de potabilización del agua, a su vez, también es un proceso sensible a cambios en diversos factores

durante su desarrollo, como, por ejemplo, errores de dosis, de diseño, tiempos, entre otros. Lo cual puede ocasionar un entorpecimiento en las etapas posteriores del proceso y por consiguiente en una afectación en la calidad del agua y en un aumento de costos de operación.

Algunos factores que influyen en el proceso, son:

- pH del agua:
Se sabe que cada coagulante tiene un pH óptimo de actuación, además de esto, algunas propiedades, como el color y la turbiedad, se realizan mejor a cierto valor de pH, para el color, lo óptimo es operar entre un pH de 4.0 y 6.0, para la turbiedad es entre 6.5 y 8.5.[3]
Por otro lado, está relacionado con la carga, de forma que si el pH es neutro, la carga también lo será, dando como resultado un valor mínimo de potencial zeta, cosa que es importante ya que en este punto la cantidad de coagulante es mínima. [5]
- Alcalinidad del agua:
La alcalinidad está estrechamente relacionada con la velocidad de reacción del coagulante, de forma que una baja alcalinidad significaría una lenta reacción [5], esto implica el aumento en la dosis de coagulante, por el contrario, una alcalinidad alta daría como resultado una reacción instantánea. [3]
- Tipo y Dosis de coagulante:
Dosis muy bajas de coagulante pueden ser insuficientes para lograr la desestabilización de las partículas, sin embargo, una sobredosis puede ser tampoco efectiva, ya que cambiaría la carga de estas y lograría estabilizarlas nuevamente. [3]
Para determinar esta dosis, se hace la prueba de jarras, no obstante, las características del agua varían con el tiempo, en especial si ha llovido. Por otro lado, cada coagulante, dependiendo de sus características y de las mismas características del agua, actuara de forma diferente, de forma que su determinación se hace mediante pruebas de laboratorio. [6]
- Turbiedad en el agua:
La turbiedad representa la cantidad de partículas presentes en el agua, por lo cual, si la turbiedad es muy baja, esto requiere altas concentraciones del coagulante, puesto

que no hay las suficientes partículas para que se presente el choque y puedan agruparse. [3]

- Punto de aplicación del coagulante

El coagulante debe aplicarse sobre puntos donde se logre una mayor dispersión del agente, esto es en el lugar donde se produzca mayor turbulencia, esto se evidencia en diversos ensayos, donde la eficiencia del proceso aumenta al aplicarse cerca de las paletas mezcladores que sobre la superficie del agua. [3] [6]

- Energía y tiempo de mezcla

La mezcla rápida debe ser lo más corta posible ya que las reacciones se dan de forma instantánea. [3]

La intensidad de la agitación, también llamada gradiente de velocidad debe ser alta ($> 1000 \text{ s}^{-1}$), garantizando una mezcla homogénea y un tiempo corto. [3] [6]

- Temperatura:

El incremento o la reducción de la temperatura juega un papel en este proceso, puesto que, aunque sean mínimos, la densidad del agua varia y con esto su energía cinética, por lo que la coagulación puede hacerse más lenta, no obstante, una alta temperatura o el incremento de esta puede desfavorecer igualmente el proceso. [6]

2.1.2 Coagulantes

Los coagulantes se pueden clasificar en dos grupos: Los polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos

2.1.2.i Coagulantes polielectrolitos. También llamados polímeros, su mismo nombre indica que están formados en unidades individuales llamadas monómeros, los cuales se agrupan mediante enlaces covalentes. [7]

En general, estos compuestos sirven para mejorar la resistencia de los flóculos y hacerlos más grandes y pesados, también pueden ser usados como coagulantes primarios, sin embargo, no presentan ventajas sobre los coagulantes metálicos. Su principal desventaja son sus altos costos, además, se recomienda aplicarse de forma líquida, ya que en su forma solida son difíciles de disolver, obstaculizando los procesos posteriores. [3]

Robert B Taft, realizo una investigación en donde establece que:

- Los polielectrolitos usados en unión con coagulantes metálicos comunes, producen un floc que sedimenta rápidamente.
- Dependiendo las características del agua, la adición de estos agentes reduce la cantidad a dosificar de coagulante.
- Los polielectrolitos catiónicos coagulan muy bien las algas.
- La efectividad de estos agentes puede variar dependiendo las características del agua.
- Sobredosificación de polielectrolitos entorpecen el proceso en vez de mejorarlo, ya que producen dispersión.
- Como se dijo anteriormente, se recomienda añadirlos en forma líquida, ya que, además de poder presentar desventajas al proceso, en solución diluida se garantiza una mezcla completa [3]

2.1.2.ii Tipos de polielectrolitos. Existen básicamente dos grupos, naturales (almidones o compuestos algínicos) o sintéticos, que a su vez se pueden dividir según su carga, ya sea positiva, negativa o neutra. [3]

Tabla 1.

Tipos de polielectrolitos

Según su origen	Según su carga	
Polímeros Naturales	Iónicos	Catiónicos
		Aniónicos
Polímeros sintéticos	No iónicos	

Nota: La tabla muestra los tipos polielectrolitos, desde su origen y su carga Tomado

de: J. Arboleda Valencia. *Teoría y práctica de la potabilización del agua. Colombia.* 1992

Polímeros Naturales

Son aquellos que provienen de la naturaleza por reacciones bioquímicas, ya sea en animales o plantas, estos pueden ser proteínas, carbohidratos y polisacáridos. Muchos de estos se usan como coagulantes por nativos de forma empírica para clarificar el agua.

Tabla 2.

Polímeros naturales que poseen características de coagulantes o floculantes.

Nombre común	Se extrae de	Parte de donde se obtiene
Alginato de sodio	Algas pardas marinas	Toda la planta
Tuna	Opuntia ficus indica	Las hojas
Almidones	Maíz	El grano o el tubérculo
	Papa	
	Yuca	
	Trigo	
Semillas de nirmali	<i>Strychnos potatorun</i>	Las semillas
Algarrobo	Quebracho, acacia o algarrobo	Corteza de árbol
Gelatina común	Animales	Residuos animales o huesos
Carboximetil celulosa	Arboles	Corteza de árbol
Goma de guar	<i>Cyanopsis psaralioides</i>	semilla

Nota: La tabla muestra algunos polímeros naturales que poseen características de coagulantes o floculantes, además de qué parte de la planta provienen estas sustancias. Tomado de: J. Arboleda Valencia. *Teoría y práctica de la potabilización del agua. Colombia.* 1992

Los que valen la pena tenerlos en cuenta para su uso en planta son los compuestos algínicos, los derivados de la tuna o nopal y los almidones, además, su principal ventaja es que no son tóxicos, ya que muchos de ellos se emplean en alimentos.[7]

Compuestos Algínicos

Son obtenidos de las algas pardas, las cuales poseen polisacáridos que también son usadas en diversas industrias, tales como la farmacéutica, textil y alimenticia, su eficiencia es sustentada en diversas investigaciones.[7]

Derivados de la Tuna o Nopal

Son polvos blancos solubles en agua, se han implementado en diversos experimentos y han resultado ser comparables y en algunos casos, mejores que los polímeros sintéticos, sin embargo, no se producen a escala industrial. [7]

Los Almidones.

Presentan un gran número de posibilidades, no obstante, la dificultad que presentan estos es que es difícil producir compuestos solubles en agua a partir de ellos mismos. Sin embargo, hay productos comerciales que derivan de almidones. [7]

Polímeros sintéticos

Son compuestos orgánicos derivados del carbón y del petróleo. Estos constituyen la mayoría de los polímeros manufacturados por la industria y de mayor venta comercialmente. Cerca del 90% de ellos están constituidos por el monómero acrilamida.

Su agrupación, conocida como la poliacrilamida, es de naturaleza no iónica que a su vez presenta grandes variaciones en su uso. Como resultado de esto, es muy usada para la síntesis de diferentes compuestos, cada uno con propiedades distintas para diferentes aplicaciones.

Por otro lado, actualmente existen más de 100 marcas comerciales de estos compuestos, sin embargo, hay muchos que son tóxicos para la salud humana y por consiguiente no deben usarse en tratamientos de agua potable, es por esto que antes de usar alguno de estos agentes sintéticos, se debe consultar acerca de su aprobación por parte de las autoridades sanitarias del país. [7]

2.1.2.iii Coagulantes Metálicos. Generalmente estos agentes son sales, a su vez, estas sales generalmente son de aluminio o de hierro, sin embargo, también hay otros compuestos que cumplen con este papel, llamándolos, compuestos varios. [3] [7]

La razón por la cual las sales de aluminio y de hierro son muy usadas, no se debe solamente a su efectividad, sino también a su disponibilidad y a su bajo costo. La eficiencia se debe a su capacidad de formar complejos polinucleares de carga múltiple en solución con una adsorción mejorada. [8]

2.1.2.iv Sales de aluminio. Las sales de aluminio forman un floc ligeramente pesado. Entre las más conocidas se encuentran el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de polialuminio. Es el más popular debido a su bajo costo y a su facilidad de manejo [7]. Sin embargo, siempre debe usarse en forma de solución, por lo que si se trabaja en forma granular debe ser diluida durante 5 minutos. [3]

Su rango óptimo de pH esta entre 6.0 y 8.0 unidades, normalmente su dosis varía entre 10 a 150 mg/L, dependiendo de la calidad del agua. Actualmente se está popularizando su presentación en solución, ya que puede llegar a ser menos costoso y su uso es más sencillo, en este caso, se dosifica en solución al 50% sin dilución. [3]

El más popular de todos es el sulfato de aluminio, se ha utilizado desde hace siglos para el tratamiento de agua. Está fabricado a partir de la reacción de la bauxita y el ácido sulfúrico. Las soluciones con este compuesto muestran valores de pH similares al del ácido acético equimolar. [8]

2.1.2.v Sales de hierro. Las sales de hierro tienen una ventaja sobre las sales de aluminio, y es que su rango óptimo de pH es mucho más amplio, forman un floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento. Sin embargo, su uso solo se prefiere cuando se requiera aumentar la eficiencia de los sedimentadores, cuando hay problemas con el pH del agua cruda o simplemente cuando las sales de aluminio no están haciendo un buen trabajo. Las sales más conocidas son el cloruro férrico, el sulfato férrico y el sulfato ferroso. [7] [3]

A manera de comparar las sales más comunes, se tiene la siguiente figura:

Tabla 3.

Comparación de coagulantes en el tratamiento de aguas.

Coagulante	Ventaja	Desventaja
Sulfato de aluminio o alumbre	Bajo costo con \$3100 por kilo siendo el más asequible en el mercado y manejo sencillo	A veces requiere ayudante de floculación. Presenta altas concentraciones de Al residual > 0.2 mg/L
Hidroxiclóruo de aluminio (PAC)	Trabaja a diferentes turbiedades y alcalinidades: Máximo 200 UNT; 10-300 mg/L Tiene un amplio rango de pH de trabajo entre 6.5 a 9 unidades. Bajo consumo de polímeros (0.1%-0,001%) (p/v) si es necesario	Precio más elevado por kilogramo \$3180, que con el alumbre En algunas combinaciones con otros compuestos puede generar un floc liviano que tarda en sedimentar
Cloruro Férrico	No tiene problemas de concentraciones elevadas de hierro de salida aproximadamente 0.1-0.15 mg/L de hierro Es eficiente sin ayudante de floculación	Es usado en aguas acidas, de baja dureza (<100 mg/L). Es muy corrosivo por los cloruros en solución (Cl ⁻) y para su almacenamiento. Disponible solo en estado líquido
Sulfato ferroso	Tiene eficacia para aguas turbias (100-120 UNT) y de alta alcalinidad > 250 mg/L	Debe primero oxidarse a ion férrico para que sea útil. Utiliza una base generalmente cal (CaO) y cloro para llevar una coagulación eficaz

Nota: La tabla muestra una comparación entre los coagulantes más usados en el tratamiento de aguas Tomado de: J. F. Guzman Rivas. *Evaluación técnica de la etapa de coagulación-floculación para el mejoramiento en el proceso de potabilización de la planta galán de la EAAAZ*. Facultad de ingenierías. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2017

2.2 Mezcla Rápida

La mezcla rápida se implementa para la inyección de productos químicos dentro de la zona de fuerte turbulencia, una inadecuada mezcla rápida tiene como consecuencia un incremento de productos químicos. [6]

Si las reacciones fisicoquímicas se completan antes de que sean adsorbidos por las partículas coloidales, entre el agua y el coagulante, se reduce la eficiencia del proceso. [9]

Por otro lado, esta mezcla debe hacerse de una forma homogénea y además en el menor tiempo posible puesto que las reacciones se llevan a cabo casi instantáneamente. [5]

Para llevarse a cabo, se diseñan estructuras de mezclado rápido o se aprovecha un punto de alta turbulencia, es decir, esta mezcla rápida puede efectuarse por:

- Dispositivos mecánicos: Hélices, turbinas o paletas.
- Dispositivos hidráulicos: Resalto hidráulico, caídas de agua o dispersores.

Además de esto, se debe tener en cuenta que los cuartos de dosificación deben estar lo más cerca posible de la zona de mezcla rápida, debido a lo anteriormente dicho. [3]

2.3 Potencial Zeta

Es el potencial existente en el plano de deslizamiento entre la superficie cargada y la disolución de electrolito, o más concretamente, es la diferencia de potencial que existe entre la superficie de separación de las partes fija y móvil y el seno del líquido. [9]

Lozano nos puede ofrecer una definición un poco más desmenuzada y simple de lo que es la potencial zeta:

«Los coloides son partículas hidrófobas que tienen asociadas dos capas eléctricas. Una primera capa está formada por las cargas propias de la superficie del coloide (capa interna) y por iones de carga opuesta (contraiones), presentes en el agua, que son atraídos por la carga de la capa interna de la partícula y que se mantienen casi adheridos a ella por las fuerzas de atracción actuantes; a esta primera capa de iones propios y los iones atraídos, se le conoce como Capa Fija.

Al mismo tiempo, cationes de la masa de agua que rodean inmediatamente la partícula empiezan a acumularse formando una capa difusa alrededor de ella, separándola del agua en que está suspendida. A esta capa se le conoce como Capa Móvil. El espesor de esta capa móvil llega hasta donde la carga neta de la capa fija del coloide es capaz de atraer iones. El movimiento de la capa móvil sobre la capa fija, da lugar a un plano de cizallamiento en donde la fricción de los iones genera un potencial eléctrico.

La diferencia entre el potencial eléctrico del plano de cizallamiento y del extremo de la capa móvil (de la solución acuosa), es lo que se conoce como Potencial Z.» [3]

En términos prácticos, el potencial zeta mide la magnitud y la fuerza de la carga de cada partícula del coloide. Si el potencial zeta disminuye, se aumenta la posibilidad de choque, ya que indica los cambios en la fuerza repulsiva de los coloides. De esta forma proporcionando características óptimas para que la floculación se logre de la mejor manera. [5] [10]

2.4 Floculación

Posteriormente, se realiza el proceso de floculación, teniendo en cuenta que la función del coagulante es formar el floculo, este debe aumentar su volumen, su peso y especialmente su cohesión. Para ello, se hace necesaria una agitación homogénea y lenta del conjunto, todo con el fin principal de aumentar las posibilidades de que las partículas desestabilizadas se encuentren con una partícula de floculo.[8] En términos prácticos, su propósito es producir partículas con un tamaño superior mediante la agregación, las cuales pueden ser eliminadas en los procesos posteriores. [8] [9]

Hay dos tipos de floculación:

- Microfloculación También conocida como floculación pericinética, en este tipo de floculación, la agregación de partículas se da mediante el movimiento térmico aleatorio de partículas fluidas, conocido como movimiento browniano.[8]
- Macrofloculación: También conocida como floculación ortocinética, surge de gradientes de velocidad inducidos al agua. Dichos gradientes de velocidad pueden ser originados al conducir al líquido alrededor de deflectores, por

agitación mecánica, por velocidades de asentamiento dentro de un sedimentador.[8]

Dentro del proceso de floculación, la más importante es la macrofloculación, ya que es la que determina la tasa de floculación, a su vez, dentro de esta, los parámetros que cobran más importancia son los gradientes de velocidad y el tiempo de floculación. [8]

Factores que influyen en la floculación.

Hay tres principales factores que influyen en este proceso.

- Concentración y naturaleza de las partículas: La velocidad de formación de floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y al tamaño e inicial de estas.
- Tiempo de retención: La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Este tiempo se determina mediante el ensayo de jarras.
- Gradiente de velocidad: Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite de gradiente que no debe ser sobrepasado, de lo contrario, el floc de podría romper. [11]

3. MARCO LEGAL

A continuación, se enuncian las normas vigentes, leyes, decretos, resoluciones, entre otros, dentro de las cuales este proyecto está enmarcado. Cada una de ellas se presenta de forma resumida para su fácil comprensión.

3.1 Resolución Numero 2115 (22 Junio Del 2007)

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. Dicha norma dicta los valores permitidos de los índices de calidad del agua. Características físicas:

Tabla 4.

Características físicas del agua permitidas

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable ó no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Nota. La tabla muestra las características físicas permitidas en la norma. Tomado de: Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. “Resolución 2115 de 2007”. Colombia. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf

Tabla 5.
Características químicas permitidas

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN ⁻	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos Totales	THMs	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0,01

Nota. La tabla muestra las características químicas permitidas por la norma. Tomado de Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. “Resolución 2115 de 2007”. Colombia. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf

Tabla 6.
Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	COT	5,0
Nitritos	NO ₂ ⁻	0,1
Nitratos	NO ₃ ⁻	10
Fluoruros	F ⁻	1,0

Nota. La tabla muestra las características químicas que tienen afectaciones en la salud humana. Tomado de Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente

Vivienda y Desarrollo Territorial. “Resolución 2115 de 2007”. Colombia. Recuperado de

https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf

Tabla 7.

Características Químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.

Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico	Expresadas como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	CaCO ₃	200
Cloruros	Cl ⁻	250
Aluminio	Al ³⁺	0,2
Dureza Total	CaCO ₃	300
Hierro Total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0,1
Molibdeno	Mo	0,07
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO ₄ ³⁻	0,5

Nota. La tabla muestra las características químicas que tienen implicaciones económicas e indirectas sobre la salud humana. Tomado de: Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial.

“Resolución 2115 de 2007”. Colombia. Recuperado de

https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf

3.2 RAS 2000. Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico.

Tiene como objeto señalar los requisitos que deben cumplir los diseños, instalaciones y procedimientos correspondientes al sector de agua potable y saneamiento básico junto con sus actividades complementarias.

Este reglamento posee información acerca de:

- Procedimiento general para el desarrollo de proyectos de agua potable y saneamiento básico.
- Determinación del nivel de complejidad del sistema.
- Evaluación económica.
- Requisitos técnicos obligatorios.

4. DIAGNOSTICO DE LA PLANTA

El municipio de Sibaté se abastece del río Aguas Claras, el cual nace en el páramo de Sumapaz, mediante una bocatoma sumergida, el agua es direccionada hacia la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) sin la necesidad de bombas.

Como tal, la planta es de tipo convencional, consta de 2 floculadores paralelos, 2 sedimentadores y 8 filtros rápidos, cuyo caudal de diseño es de 35 L/s. No obstante, los caudales de operación suelen ser mayores y varían de acuerdo a factores, tales como el clima.

Es importante mencionar que la planta cuenta con un sistema de telemetría, de forma que varios parámetros, tales como caudal, pH, entre otros, son medidos en tiempo real en varios puntos de la planta.

4.1 Fuente Hídrica

Como se dijo anteriormente, el municipio de Sibaté se abastece del río Aguas Claras, el cual nace al oriente del páramo del Sumapaz a una altura de 3700 msnm.

A lo largo de su recorrido se identifican alrededor de 25 cauces tributarios de los cuales se destacan Hato Viejo, Hungría, Dos Quebradas y Usaba, en el sector conocido como Juntas, este río entrega sus aguas al embalse Muña en el sector denominado El Charquito. [25]

El río Muña por su parte nace a una altura de 3400 msnm en el Alto del Zarzo, haciendo un recorrido de alrededor de 16 km, en donde 16 quebradas le entregan sus aguas, para posteriormente ser captadas en las bocatomas de los acueductos de las veredas San Miguel, San Fortunato y el Perico. [25] [24]

Los afluentes principales del río Muña son las quebradas La Chorrera, El Oso, El Zarzo, San Fortunato y la Vieja, mientras que la quebrada Honda abastece las zonas Occidentales y orientales del municipio de Sibaté, específicamente las veredas Bradamonte y el Peñón llegando hasta límites territoriales con el municipio de Pasca. [25], [26]

Tabla 8.
Resumen Hidrología Q. Aguas Claras

RESUMEN HIDROLOGIA-Q. Aguas Claras 2011/2012 (promedio)												
VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación (mm)	21.5	44.4	60.5	82.4	81.2	59.2	49.9	44.7	51.5	81.6	85	44
Caudal total (L/s)	218.4	189	190.2	244.5	44.6	490	296	215	145.6	290.6	597.4	468.8
Caudal disponible (L/s)	193.5	170.1	171.2	220	402	441	266.4	194	131.1	261.6	537.7	422
Caudal ecológico total (L/s)	21.8	18.9	19	24.5	44.7	49	29.6	21.5	14.6	29.1	59.7	46.9
Demanda total (L/s)	99.3	95.8	105.7	98.8	88.2	95.8	107.9	112	93.5	87.4	95.4	109.1
Caudal remanente total (L/s)	97.2	74.2	65.5	121.3	314	345	158.5	81.4	37.6	174.1	442.2	312.9
Índice de escasez (L/s)	50.5	58.4	61.7	44.9	21.9	21.7	40.5	58	71.3	33.4	17.7	25.8

Nota. La tabla muestra un resumen de un estudio hidrológico, cuyo objetivo era determinar la oferta hídrica, los datos corresponden a los años 2011 y 2012.

Tomado de: J. D. Hernandez Jimenez Y J. S. Garcia Perez. *Diagnostico y analisis de alternativas para la optimizacion del sistema de acueducto de la vereda chacua del municipio de sibate*. Facultad de ingeniería. Universidad de La Salle. Bogotá. Colombia. 2015

Es importante recalcar los periodos en los que el caudal de la fuente abastecedora cambia por efectos climatológicos, ya que esto incide de forma directa sobre la PTAP, por ende, en periodos en donde el caudal disminuye, así mismo lo hará el caudal de operación de la planta, y en periodos donde haya lluvias, este caudal aumentará. Así pues, se puede observar que en los meses de noviembre, diciembre y junio los caudales son los más elevados, por el contrario, los meses de febrero, marzo, mayo y septiembre son los más bajos.

4.2 Proceso De Potabilización

Para la descripción del proceso de potabilización se realiza un diagrama de bloques a partir de la visita técnica hecha a la planta y también a partir de la información suministrada por la empresa.

Figura 1.

Diagrama de bloques del proceso de potabilización del agua llevado a cabo en Sibaté



Nota. Este es el proceso llevado a cabo en la PTAP del municipio de Sibaté, desde que el agua cruda llega a la planta hasta su distribución a los consumidores, realizado por el investigador.

4.2.1 Inicio Del Proceso

Inicialmente, el agua cruda llega a una cámara de distribución de caudales donde la energía es disipada, después de esto el agua cruda es conducida hacia la canaleta Parshall de 6”.

Figura 2.

Tanque de distribución de agua.



Nota. Tanque a donde llega, almacena y distribuye a la planta el agua cruda captada.

4.2.2 Canaleta Parshall

Una vez el agua cruda llega a la planta, y su energía es disipada, entra a la canaleta parshall, la cual posee una garganta de 6" de ancho, su rango de utilidad es de 1 hasta 100 L/s. Está hecha en acrílico, y además cuenta con una regla como sistema de aforo.

En este mismo punto se realiza el proceso de mezcla rápida, aprovechando la turbiedad y el resalto hidráulico generado por el cambio de sección y la caída de la canaleta.

Inmediatamente después de la canaleta, se presenta la caída anteriormente mencionada, la cual es de 0.15 m para evitar que se presente aquietamiento.

Figura 3.
Canaleta Parshall



Nota. Canaleta que cumple con la función de aforo y mezclado rápido.

Figura 4.
Punto de mezcla rápida



Nota. Inmediatamente después de la canaleta Parshall, hay una caída donde se realiza el mezclado rápido, en la imagen se puede observar también la tubería que vierte la mezcla de coagulante-agua.

4.2.3 Dosificación de reactivos

Al lado de la canaleta parshall se encuentra la habitación donde se dosifica el coagulante, este coagulante es el sulfato de aluminio tipo B en forma granular, por lo cual, se utiliza un dosificador volumétrico, el cual va depositando los granos del coagulante en un pequeño estanque donde se mezcla con agua de proceso sin ninguna ayuda en dicha agitación, posteriormente, la mezcla se evacua hacia la canaleta por medio de una tubería.

Inmediatamente, esta mezcla es vertida en la caída de la canaleta parshall, de forma que, aprovechando esta turbiedad y el resalto hidráulico, se hace la mezcla homogénea con toda el agua cruda a tratar.

La dosis de coagulante utilizado se determina mediante el ensayo de jarras, donde, en horas de la mañana y en la tarde, se recoge agua cruda a la entrada de la canaleta parshall y se procede a realizar el ensayo, de forma que se determina la cantidad de coagulante a utilizar en el resto del día, esta dosis es de 10 mg/L aproximadamente.

Figura 5.
Mecanismo del dosificador volumétrico.



Nota. Mediante el movimiento mecánico, el disco va depositando el material granulado en la cámara de mezcla del dosificador.

Figura 6.
Punto de mezcla entre agua y el coagulante



Nota. Una vez el material granulado cae, entra en contacto con el agua de proceso, en el fondo se encuentra una tubería que conduce esta mezcla hacia el punto de mezclado rápido.

4.2.4 Floculadores

Posteriormente, el agua cruda ingresa a un sistema de dos floculadores, cada uno de ellos tiene unas dimensiones de 15 m de largo, 1.85 m de ancho y una profundidad de 1.15 m. Cada unidad maneja un caudal de 21 L/s, un tiempo de retención de 20 min y un volumen de 25.2 m³.

Estos floculadores de flujo horizontal, constan de pantallas prefabricadas en concreto de 0.05 m de espesor que van fijadas a la pared, con un espacio entre cada pantalla de 0.185 m. Esto resulta en una velocidad de 0.17 m/s, una pérdida de carga total de 0.42 m, un gradiente de 53.9 s⁻¹ y un factor de intensidad de 64.680.

Durante su paso por los floculadores, el agua cruda es obligada a realizar un movimiento de “zig zag” de arriba hacia abajo, debido a la acomodación de estas pantallas.

A manera de practica y experiencia, el floc se debe formar a una distancia de 3 m del largo del floculador, si no hay señales de que el floc, por lo menos se empiece a formar, puede significar varios factores:

- La descarga del coagulante está mal.
- La turbiedad aumentó de forma repentina.
- El caudal aumentó y no se tuvo en cuenta para la dosificación.

En cuyo caso, se debe volver a empezar todo el proceso nuevamente.

Figura 7.

Vista de los dos floculadores.



Nota. Se pueden observar los dos floculadores en paralelo y los paneles que los conforman, de forma que el agua hace un movimiento de “va y viene” de forma vertical a través del floculador

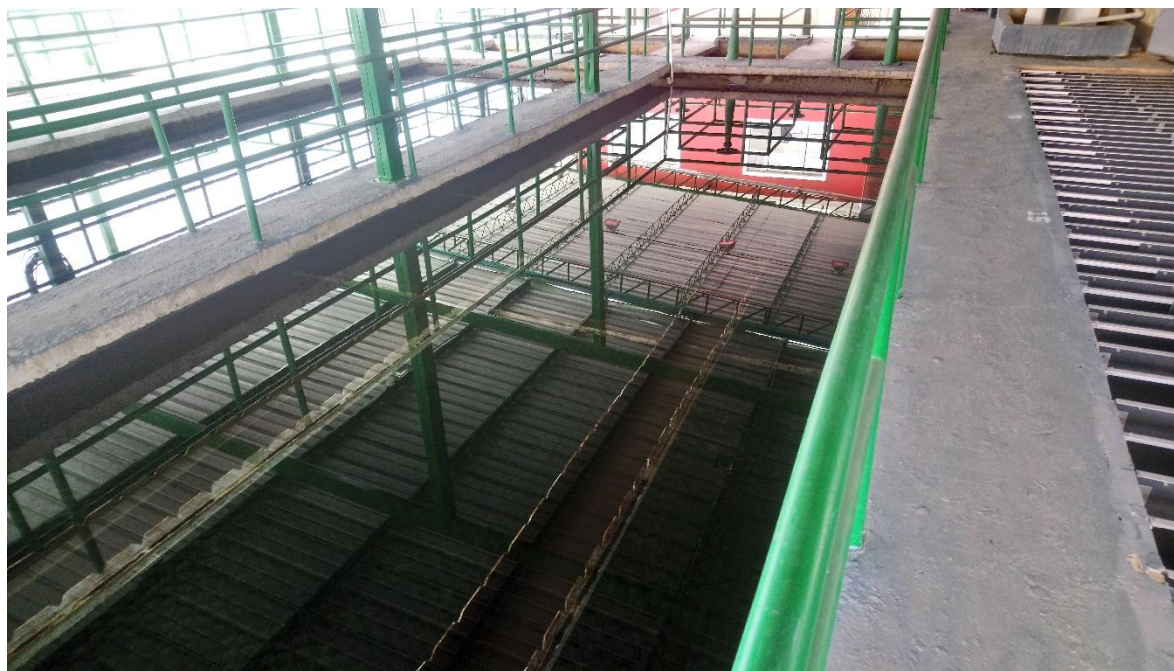
4.2.5 Sedimentadores

Una vez el floc se ha formado, el agua cruda pasa a dos sedimentadores de alta tasa tipo colmena, las cuales retrasan aún más el avance del agua hacia el proceso posterior.

El volumen útil de cada sedimentador es de 140.8 m^3 con un periodo de retención de 2 horas y 47 minutos, con una carga superficial de $18.9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$. Se tienen dos entradas por sedimentador con unas medidas de $0.4 \times 0.6 \text{ m}$.

Durante el paso del agua cruda en este proceso, se busca que el floc caiga hacia el fondo del sedimentador por acción de la gravedad, por eso es importante retener el agua. Además de esto, aquí es donde el agua se clarifica, puesto que la turbiedad fue reducida en su mayoría.

Figura 8.
Vista de los sedimentadores tipo colmena.



Nota. La fotografía muestra los dos sedimentadores que ya poseen el agua clarificada, debido a esto mismo, se puede observar en el fondo la geometría que tiene este sedimentador, el cual es tipo colmena.

4.2.6 Filtración

Una vez el agua clarificada sale del sedimentador, sufre una caída de 0.05 m hacia una canaleta común, donde es distribuida a 8 filtros rápidos, dicho canal cuenta con un ancho de 0.5 m y una profundidad de 1.71 m .

El filtro posee unas dimensiones de $1.85 \times 2.07 \times 4.10 \text{ m}$, donde el área del lecho filtrante corresponde a $1.85 \times 1.37 \text{ m}$. Dicho lecho filtrante es de tipo mixto, está conformado por

una capa de antracita de 0.45 m de espesor, una capa de arena de 0.30 m de espesor. El lecho del sostén tiene una profundidad de 0.4 m y está conformado por grava.

Con estos filtros se consigue una tasa de filtración de 240 m³/m²/día.

Figura 9.

Vista al interior de un filtro.



Nota. Puesto que están contruidos con concreto, es imposible mostrar una vista donde se pueda apreciar una de las caras del filtro, sin embargo, aquí se puede observar el interior del filtro, donde este material que se puede ver en la superficie, son impurezas que aun contiene el agua.

4.2.7 Desinfección y estabilización

Una vez el agua es filtrada, se le adiciona cloro en forma gaseosa y también Cal, debido a que durante el proceso el pH del agua cambia, de esta forma el agua vuelve a tener un pH neutro.

En caso de que no esté disponible algún componente, la empresa adiciona hipoclorito de calcio al 70%. Cabe resaltar que todo este proceso se hace mediante un clorador.

Figura 10.
Clorador.



Nota. Se puede observar el tanque que contiene el cloro gaseoso conectado a un sistema que, mediante un panel de control, se controla la cantidad de cloro que se le suministra a la red.

4.2.8 Almacenamiento y distribución

Finalmente, el agua potable es direccionada a tanques convencionales, semienterrados hechos en concreto reforzado, mediante una tubería de 8" en PVC. En total son 3 tanques, los cuales tienen un volumen de 830, 700 y 200 m³, dichos tanques distribuyen el agua al casco urbano, no obstante, el agua que sale del tanque de 700 m³, también es dirigida hacia la zona industrial del municipio.

4.3. Características Físicoquímicas Del Agua

Debido a que las características del agua cruda cambian de acuerdo al clima, la empresa brindó una muestra de datos donde se puede evidenciar las características más importantes durante el transcurso del proceso de potabilización, en un día lluvioso y en un día seco, los datos corresponden al 23 y 29 del mes de abril del año 2019.

Tabla 9.
Características fisicoquímicas del agua.

Color				Turbiedad				Alcalinidad Total			Clima del día
Cruda	Tratada			Cruda	Tratada			Cruda	Tratada		
	SF	T1	T2		SF	T1	T2		T1	T2	
59.8	6.7	7.7	7.9	36.97	1.05	1.15	1.21	4	5	5	Lluvia
20.2	2.0	2.8	1.8	5.36	0.5	0.4	0.38	5	66	6	Seco

Nota. La tabla muestra las características más relevantes durante el proceso de potabilización, donde SF significa salida de filtros, T1 y T2 significan tanque 1 y tanque 2 respectivamente, los cuales hacen referencia a los tanques de almacenamiento al final del proceso, y cruda hace referencia al agua cruda.

Como se puede observar, el color y la turbiedad cambian drásticamente por efectos climatológicos, por otro lado, también se puede observar que los factores como la alcalinidad y el pH no cambian por este efecto, por lo cual se puede concluir que el clima únicamente cambia el color y la turbiedad del agua, ya que, durante este fenómeno natural, el agua arrastra gran parte de escombros y tierra de su cauce que normalmente no lo haría. [11]

Sin embargo, no es posible un análisis más completo sobre las características fisicoquímicas del agua, se debe a políticas de la empresa, ya que, al ser una empresa pública, “al único ente que se le puede revelar toda esta información es a un organismo de vigilancia gubernamental”, a palabras de la empresa.

No obstante, como se dijo anteriormente, la empresa brindó una pequeña muestra de estos datos, los cuales fueron usados para realizar la tabla número 9, los cuales, para más información, están en el apartado de anexos en forma de fotografías.

Figura 11.
Agua cruda en un día con lluvias.



Nota. En esta fotografía, la cual está tomada en la canaleta Parshall, se puede evidenciar con gran detalle el estado con el cual el agua ingresa a la planta en un día con lluvias, si se compara, por ejemplo, con la figura 3, el cambio es muy notable, de forma que, evidentemente, el color y la turbiedad del agua son muy altos.

Por otro lado, la empresa ha manifestado que poseen un problema con una concentración de aluminio residual, el cual, al final del proceso, varias veces sobrepasa la cantidad permitida por la ley (2.0 mg/L), para demostrar ello, la empresa facilitó 3 informes en donde se detalla este hecho junto con la acción que tomo la empresa.

Según los informes, en el año 2018 se presentó un incidente donde la cantidad de aluminio residual al final del proceso fue de 0.3 mg/L, valor que sobrepasa el indicado por la norma, además, durante el transcurso del mismo año, se presentó otro un incidente donde la cantidad de aluminio residual al final del proceso fue de 0.28 mg/L, valor que también sobrepasa el indicado por la norma.

Igualmente, en el año 2017, se presentó un incidente donde la cantidad de aluminio residual al final del proceso fue de 0.24 mg/L, valor que sobrepasa el indicado por la norma.

Dichos informes se encuentran en el apartado de anexos, de forma que allí se puede observar de forma más detallada dichos eventos.

4.4 Insumos Químicos Usados

4.4.1 Sulfato de aluminio

Es una sal metálica sólida y generalmente de color blanco, se utiliza en la industria del papel y en el tratamiento de aguas como agente coagulante, como es este caso, su carácter ácido le otorga propiedades bacteriostáticas y alguicidas. Forma flóculos de hidróxidos de aluminio al contacto con la alcalinidad de las aguas, sin embargo, tiene una desventaja y es que genera lodos y puede dejar altas concentraciones de aluminio residual. [3]

Se obtiene mediante la reacción de ácido sulfúrico y algún mineral alumínico, como la bauxita, dicha reacción se realiza a temperaturas elevadas, no obstante, este proceso es simple y barato, por lo cual este compuesto es de fácil acceso y además muy económico, razón por la cual es uno de los agentes coagulantes más populares y usados.

Tabla 10.

Propiedades fisicoquímicas del sulfato de aluminio de sus diferentes presentaciones

PROPIEDADES	TIPO A	LIBRE DE HIERRO	TIPO BE	TIPO B
Apariencia estándar	Gránulos blancos o ligeramente amarillos	Gránulos blancos	Gránulos cafés/pardo	Gránulos cafés/pardo
Contenido de aluminio, % Al ₂ O ₃ mínimo	17	17	16	15.2
Contenido de hierro, % Fe ₂ O ₃ máximo	0.75	0.008	1.6	2.0
Basicidad como % de Al ₂ O ₃ libre mínimo	0.05	0,05	0.05	0.05
Insolubles en agua. % máximo	0.5	0.1	5.0	8.0
Granulometría	100% pasa malla 4, 90% pasa malla 10 y 90% retenido en malla 100	100% pasa malla 4, 90% pasa malla 10 y 90% retenido en malla 100	100% pasa malla 4, 90% pasa malla 10 y 90% retenido en malla 100	100% pasa malla 4, 90% pasa malla 10 y 90% retenido en malla 100

Nota. Se puede evidenciar que, comercialmente, existen varios tipos de sulfato de aluminio, cada uno con características diferentes, así mismo será su precio. Tomado de: Ingenieros Químicos y Asociados. Sulfato de aluminio sólido.

Tabla 11.

Propiedades fisicoquímicas del Sulfato de aluminio sólido.

SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO		
Propiedades	Estándar	Libre Fe
Al₂O₃ %	16.8 mínimo	16.8 mínimo
Apariencia	Polvo crema	Polvo blanco
Fe₂O₃ %	0.75 máximo	0.01 máximo
Insolubles %	1.0 máximo	1.0 máximo
Malla + 4 Tyler	0 máximo	0 máximo
Malla + 10 Tyler	10.0 máximo	10.0 máximo

Nota. Muestra las propiedades fisicoquímicas del sulfato de aluminio en estado sólido. Tomado de: Silicatos y Derivados S.A. de C.V. Proceso de coagulación/floculación en el tratamiento del agua. [En línea]. Disponible en: <https://aniq.org.mx/pqta/pdf/Sulfato%20de%20aluminio%20SIDESA.pdf>

Tabla 12.

Propiedades fisicoquímicas del Sulfato de aluminio líquido.

SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO		
Propiedades	Estándar	Libre Fe
Al₂O₃ %	7.4 - 7.7	7.4 - 7.7
Apariencia	Líquido ambar	líquido blanco
Basicidad %	0.34 Mín.	0.34 Mín.
Fe₂O₃ %	1.0 máximo	0.01 máximo
Densidad °Be	33.0 - 34.0	33.0 - 34.0
Densidad g/ml	1.29 - 1.32	1.29 - 1.32

Nota. Muestra las propiedades fisicoquímicas del sulfato de aluminio en estado líquido.

Tomado de: Silicatos y Derivados S.A. de C.V. Proceso de coagulación/floculación en el tratamiento del agua. [En línea]. Disponible en:

<https://anig.org.mx/pqta/pdf/Sulfato%20de%20aluminio%20SIDESA.pdf>

Como se puede evidenciar en la tabla 2, existen diversas presentaciones del sulfato de aluminio, a su vez, también existen presentaciones en forma de solución, las cuales, resultan ser más fáciles de manipular y en ocasiones más baratas [3]. En el caso de la PTAP de Sibaté se emplea el sulfato de aluminio tipo B en forma granular.

4.4.2 Cal

Este compuesto es un sólido blanco-grisáceo e inodoro, en forma de terrones o polvo granular. Se obtiene mediante un proceso de cocción con la piedra caliza a temperaturas superiores a 900°C, sin embargo, esto produce la denominada cal viva, posteriormente es apagada con agua para producir la cal hidratada.

Posee diferentes usos, tales como en las industrias agrícolas, metalúrgicas, de construcción, y también en el tratamiento de aguas, como agente estabilizador de pH, ablandamiento de aguas, entre otras cosas. [15] [16]

4.5 Diagnostico Operacional

Teniendo en cuenta la información suministrada por la empresa y, además, una breve investigación teórica, se realiza una tabla resumen acerca del diagnóstico de la PTAP.

Tabla 13.

Resumen del diagnóstico operacional.

Operación	Estado	Problema
Dosificación y mezcla de reactivos	Regular	Sobredosificación del coagulante. La mezcla no llega a ser homogénea.
Coagulación - floculación	Regular	Altas concentraciones de aluminio residual que sobrepasan lo estipulado por la norma.
Sedimentación	Bueno	
Filtración	Bueno	
Almacenamiento y Desinfección	Bueno	

Nota. Muestra un resumen del diagnóstico realizado.

Como se puede observar en la tabla Diagnostico, el problema dentro del proceso llevado a cabo por la PTAP está dentro de los procesos de dosificación, mezclado y coagulación – floculación, siendo este último, realmente causado en parte por el proceso anterior.

En cuanto al problema con el aluminio residual, se evidencia esta problemática mediante los informes anteriormente mostrados, y además se sabe que no se le ha dado una solución permanente, sin embargo, la empresa no suministró los registros de las caracterizaciones del agua debido a leyes de confidencialidad, de forma que no se puede realizar un análisis más profundo acerca de otras posibles falencias.

En general, los equipos usados por la planta se encuentran en buenas condiciones, ya que, por un lado, tanto los tanques, filtros y demás recipientes están hechos en concreto, por lo cual no sufren una corrosión u oxidación en comparación a equipos hechos de algún metal.

En cuanto al mantenimiento de los equipos, los operarios los hacen cada vez que requiera, ya que depende del caudal, turbiedad y demás características que posea el agua, por lo cual, se puede decir que es importante estar pendiente.

No obstante, es importante recalcar que es vital hacer un mantenimiento o una revisión a los sensores encargados de monitorear la planta, ya que, a palabras de los operarios, «a veces los datos mostrados por estos no son coherentes con lo que realmente pasa en la planta».

En cuanto a los problemas evidenciados, se sabe que es importante, en primera instancia, mezclar de forma homogénea los reactivos junto con agua para formar una solución, y más si se trabaja con reactivos en forma granular [3], sin embargo, esto no se hace en la planta.

Por otro lado, una vez esta solución de agua-coagulante esté preparada, inmediatamente se debe verter y mezclar de forma homogénea con el agua cruda, este proceso se lleva a cabo actualmente mediante la canaleta Parshall, no obstante, no se recomienda este equipo para crear esa mezcla rápida a caudales menores de 100 L/s, el cual es este caso.[3]

Finalmente, los problemas con el aluminio residual pueden ser debidos, en parte, a los problemas anteriormente mencionados, sin embargo, también pueden deberse al sulfato de aluminio, ya que deja altas concentraciones residuales, por lo cual, generalmente se mezcla junto con un ayudante de coagulación, precisamente para evitar estas concentraciones.[3]

Tabla 14.

Criterio de selección de una canaleta Parshall como mezclador rápido hidráulico.

Caudal mínimo (L/s)	Caudal máximo	Ancho de garganta "w" máximo (cm)
5	12	5.08
12	55	7.62
55	85	15.24
85	140	22.86
140	2500	$W_{max} = 0.35 * (Q^{0.91})$ Donde: W_{max} Ancho de garganta máximo (cm) Q Caudal de trabajo (L/s)

Nota. Según la tabla, para un caudal entre 12 y 55 L/s lo recomendable es usar una canaleta con un ancho de 3" lo cual es equivalente a 7.62 cm, sin embargo, actualmente se usa una canaleta de 15.24 cm que equivalen a 6", cuando el caudal de diseño es de 35 L/s. Tomado de. W.A. Lozano Rivas Y G. Lozano Bravo. *Potabilización del agua. Principios de diseño, control de procesos y laboratorio.* Bogota D.C: 2015. P 372. ISBN 9789588957180

4.6 Volúmenes Manejados Por La PTAP

Adicionalmente, también es importante conocer la cantidad de agua que potabiliza la empresa, por lo cual, se hizo una investigación profunda, ya que la empresa no suministró dichos datos, cabe entonces mencionar que los datos presentados a continuación son fruto de otra investigación hecha en la misma planta. [26]

4.6.1 Volúmenes facturados

A continuación, se muestra la cantidad de agua, en metros cúbicos, que la empresa facturó en el municipio de Sibaté, dicho dato se puede interpretar como la demanda de agua.

Tabla 15.

Volúmenes de agua consumidos, en metros cúbicos, en los meses de enero a julio del año 2017

Uso	Estrato	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Residencial	1-Bajo costo	2133,00	2369,00	2824,00	2435,00	2490,00	2621,00	2,761,00
	2-Bajo	27531,00	32199,00	36773,00	34453,00	33164,00	34638,00	39075,00
	3-Medio bajo	12151,00	12656,00	14639,00	13932,00	12818,00	14330,00	15686,00
	4-Medio	376,00	461,00	430,00	273,00	356,00	457,00	461,00
	5-Medio alto	42,00	42,00	49,00	48,00	41,00	49,00	59,00
	6-Alto	38,00	27,00	31,00	10,00	17,00	60,00	83,00
Comercial	Comercial	4017,00	5277,00	5899,00	5386,00	5187,00	5448,00	5924,00
Industrial	Industrial	8455,00	8654,00	13345,00	8191,00	8867,00	8240,00	12772,00
Oficial	Oficial	2523,00	2879,00	4149,00	3246,00	2867,00	3884,00	4249,00
Provisional	Provisional	999,00	1153,00	1368,00	1016,00	982,00	1063,00	1196,00
		58264,00	65717,00	79507,00	68990,00	66789,00	70790,00	82266,00

Nota. La tabla muestra la cantidad de agua que la empresa facturó durante la primera mitad del año 2017, a su vez, también muestra los consumidores finales del servicio.

Tomado de: W. Rincon Lozano Y W. A. Cordoba Mesa. *Determinacion de los factores de mayorizacion para el consumo de agua potable en el municipio de sibate con respecto a los definidos en la resolucion numero 0330 del 8 de junio del 2017.* Facultad de ingeniería. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. Colombia. 2017.

También se puede observar que la facturación fue alta en los meses de marzo, junio y julio, por otro lado, el mes con menor facturación fue el mes de enero.

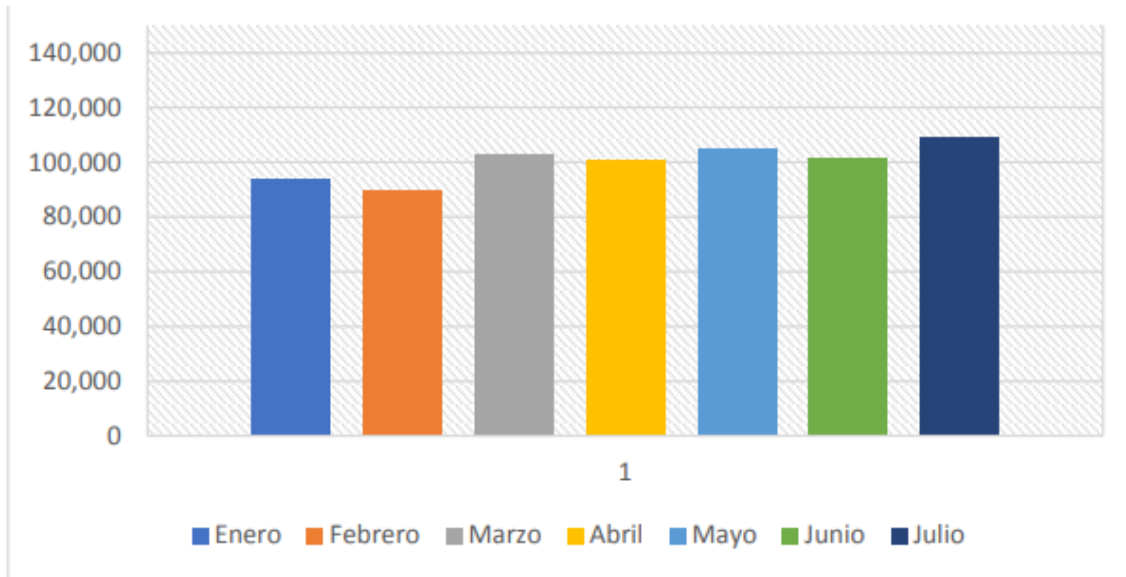
Esta información permite, además de cuantificar la cantidad de agua, cuantificar y clasificar los consumidores finales de este servicio, siendo el estrato bajo el sector que más consume o utiliza este servicio, seguido del estrato medio bajo.

4.6.2 Volúmenes tratados por la PTAP

Estos caudales fueron hallados mediante los caudales máximos horarios y también por datos tomados en planta.

Figura 12.

Volumen de agua tratada, en metros cúbicos, por la planta en metros cúbicos.



Nota. La grafica muestra la cantidad de agua que la PTAP trató durante los meses de enero hasta julio del año 2017. Tomado de: Tomado de: W. Rincón Lozano Y W. A. Cordoba Mesa. *Determinación de los factores de mayorización para el consumo de agua potable en el municipio de sibate con respecto a los definidos en la resolución número 0330 del 8 de junio del 2017.* Facultad de ingeniería. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. Colombia. 2017

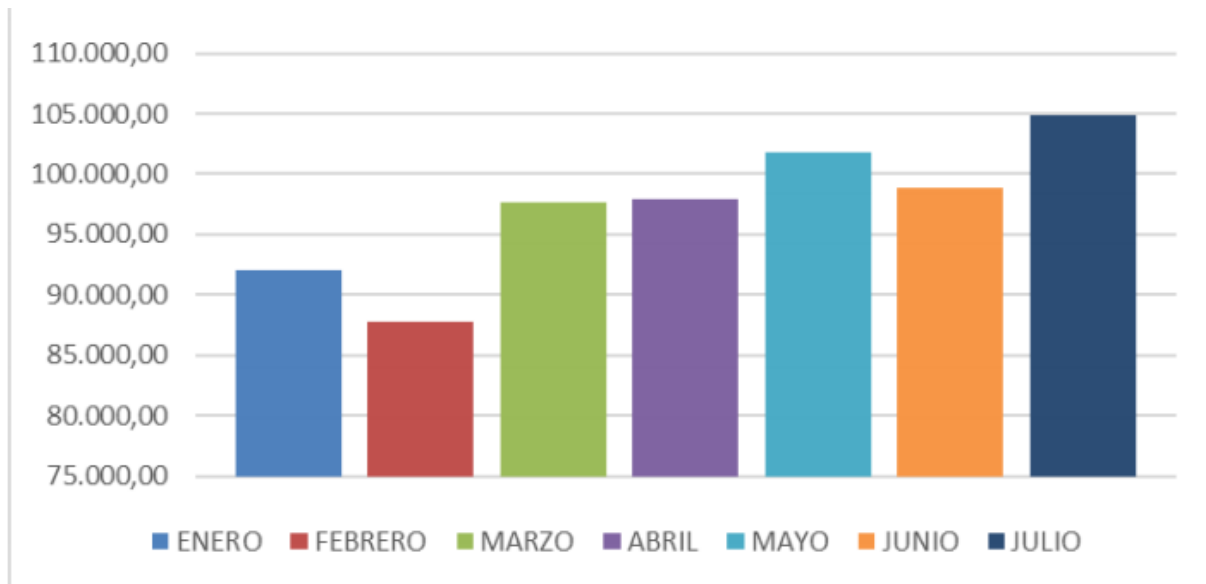
Observando la gráfica, se puede observar que la cantidad de agua que trata la PTAP, por lo menos durante los primeros 7 meses durante ese año, fue similar, de forma que la menor cantidad de agua tratada fue de aproximadamente 90,000 m³, mientras que la máxima fue de aproximadamente 110,000 m³.

4.6.3 Volúmenes producidos por la PTAP

Finalmente, también se muestran los volúmenes de agua producidos por la PTAP.

Figura 13.

Volumen de agua producida por la planta en metros cúbicos.



Nota. La grafica muestra la cantidad de agua que produjo la empresa durante los meses de enero a julio del año 2017, los cuales tienen un parecido a la cantidad consumida durante el mismo periodo de tiempo. Tomado de: Tomado de: W. Rincon Lozano Y W. A. Cordoba Mesa. *Determinacion de los factores de mayorizacion para el consumo de agua potable en el municipio de sibate con respecto a los definidos en la resolucion numero 0330 del 8 de junio del 2017.* Facultad de ingeniería. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. Colombia. 2017

Así pues, se puede observar que el volumen de agua producido y tratado por la empresa tienen valores similares, por no decir que casi los mismos, lo cual es muy importante ya que permite establecer, ya sea mediante los volúmenes producidos o los volúmenes tratados, la cantidad de material, es decir, de coagulante, que la empresa puede llegar a consumir de manera mensual, de forma que se pueden establecer los gastos mensuales que la empresa tendría en este aspecto.

Teniendo en cuenta toda esta información, se puede decir que la empresa maneja grandes volúmenes de agua, además, ratifica la importancia de esta investigación, puesto que, no solamente se pueden ver afectada la población, si no también algunas industrias, siendo la población la posiblemente más afectada si algo llegase a ocurrir,

además, la información permite establecer un valor aproximado de los costos mensuales en cuanto al tratamiento del agua cruda.

5. CASOS DE ESTUDIO

Puesto que este proyecto no cuenta con un desarrollo experimental, para sustentar la elección de coagulantes, se tomarán como referencias diferentes documentos que tengan por lo menos las siguientes características:

- El agua cruda debe pertenecer al tipo 4, es decir, debe estar dentro de las aguas más difíciles de coagular.
- Se deben usar por lo menos uno de los coagulantes propuestos.

5.1 Casos De Estudio Con Desarrollo Experimental

En primera instancia, se recopilaron documentos donde el objetivo era realizar el cambio del coagulante empleado, de forma que se puede mostrar los datos experimentales obtenidos por los autores.

5.1.1 Evaluación Del Proceso De Coagulación – Floculación De Una Planta De Tratamiento De Agua Potable

La investigación tiene lugar en la PTAP de Cervecería Unión S.A, la cual es alimentada con el agua de la quebrada Doña María, allí se utiliza una mezcla de 2 compuestos químicos para el proceso de coagulación-floculación, el sulfato de aluminio tipo B (en forma líquida), y Ultrion 8157 en una proporción de 70% y 30% respectivamente.

El Ultrion 8157 es usado como ayudante de floculación, el cual es precisamente el encargado, en este caso, de disminuir esa concentración de aluminio residual.

Como resultado se obtuvo que el sulfato de aluminio, junto con el ultrion 8157, tienen una gran eficiencia para reducir la turbiedad del agua, alcanzando un % de remoción de 95.77%. También se concluyó que, a pesar de no sobrepasar el % de remoción del sulfato de aluminio junto con su ayudante de floculación, el PASS y el PAC también presentan altos % de remoción, siendo de 94,51% y 94.87% respectivamente.

Se puede decir entonces, que una de las posibles soluciones para el problema que presenta la PTAP de Sibaté, es cambiar a un coagulante tipo líquido y primordialmente,

usar un ayudante de floculación, por no decir que sería ideal hacer pruebas con el Ultrion 8157.

En cuanto las cantidades que se deben usar, solo pueden ser determinadas mediante la prueba de jarras, pero se debe respetar esa proporción de 70% y 30% de agente coagulante y ayudante de floculación, respectivamente.

Otra alternativa que se puede implementarse es cambiar el sulfato de aluminio por el Polisulfato de Aluminio líquido (PASS), el cual no se tenía contemplado en la revisión bibliográfica, sin embargo, se recomienda en primera instancia utilizar el PAC.

5.1.2 Propuesta De Mejora Para La Planta De Agua Potable De La Empresa Fertilizantes Colombianos S.A.

La investigación tiene como objeto de estudio una PTAP ubicada en Santander, allí se realizó el diagnóstico de las operaciones llevadas a cabo, donde se identificaron falencias en casi todos los procesos de potabilización (Mezcla de reactivos, floculación, filtración y cloración), siendo la filtración la etapa que se encuentra en un estado crítico, en base a esto, se plantean 3 posibles alternativas de mejora de las cuales se seleccionará solamente una de ellas.

La primera alternativa es evaluar la implementación de un nuevo coagulante, ya que, teniendo en cuenta que la coagulación y floculación es una etapa clave en la remoción de color y turbiedad, es necesario evaluar un nuevo coagulante que permita un aumento en la eficiencia del proceso sin afectar los tiempos establecidos en la planta, teniendo como referencia una mayor velocidad de formación de los flóculos. Además, debe tenerse en cuenta que en este momento el proceso de mezcla rápida no funciona adecuadamente por lo cual la dispersión del coagulante no se está dando de la mejor manera. [11]

La segunda alternativa consiste en un estudio de la concentración del coagulante actual. Se ha considerado como situación clave del proceso que el sulfato de aluminio es adicionado de forma líquida y sin ser diluido, es decir con la concentración con la cual es adquirido la cual quizás no es la adecuada para el proceso de coagulación. Teniendo en cuenta lo anterior y partiendo de que la coagulación es uno de los procesos que permiten

la remoción de los parámetros que se encontraron por fuera de la normatividad, se sugiere continuar con la misma estructura del proceso y manteniendo el mismo coagulante usado hasta el momento, pero buscando su dosificación óptima, permitiendo así obtener como resultado el mejoramiento del proceso de potabilización. [11]

Finalmente, la tercera alternativa es el estudio de la implementación de un desarenador como nueva etapa del proceso y evaluación de un nuevo lecho filtrante, según Romero uno de los procesos que mejoran el color, la turbidez y el hierro es la filtración como parte clave del proceso, el hierro se verá removido efectivamente por este método siempre y cuando el agua pase por un proceso de aireación [11]

Para escoger la mejor alternativa, se construye una matriz de decisión que evalúa factibilidad técnica, operacional, financiera y ambiental, donde se concluye que lo mejor es la alternativa 3.

Durante la fase experimental de este proyecto, se realizó un ensayo de jarras donde se complementó con un ayudante de floculación, el cual es la Poliacrilamida (PAM), dando como resultado un mejoramiento en el % de remoción de turbiedad.

5.1.3 Evaluación Técnica De La Etapa Coagulación-Floculación Para El Mejoramiento En El Proceso De Potabilización De La Planta Galán De La EAAAZ

La investigación tiene por objeto el cambio del coagulante actual, el cual es el PAC 03, por otro coagulante debido a que necesitan una mejora en los tiempos del proceso de coagulación-floculación.

Para cumplir dicho objeto, se realiza una investigación teórica de los agentes químicos usados en este proceso, ya sean coagulantes o agentes auxiliares, de tal forma que se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, además de sus condiciones de operación óptimas.

Posteriormente se realizaron los ensayos de jarras para las alternativas seleccionadas y se determinaron los costos que estos tendrían en un horizonte de un año, dando como resultado que el PAC 03 es el mejor coagulante para dicha planta, ya que presenta una mayor eficiencia y además posee un consumo menor, por lo que sale más barato que otro coagulante.

5.1.4 Evaluación De La Sustitución Del Agente Coagulante -Sulfato De Aluminio- En El Proceso Actual De Coagulación - Floculación De Agua Potable En La Empresa Eaf Sas Esp

La planta objeto de estudio está ubicada en Facatativá y es propiedad de La Empresa Aguas de Facatativá. Dicha investigación tiene como objeto sustituir el coagulante que se utiliza usualmente en el proceso de potabilización, el cual es el sulfato de aluminio tipo B en estado líquido, la razón de esto es que se está buscando mejores eficiencias de remoción y a un menor costo de operación.

Para esto, se recopila información acerca del proceso mediante un diagnóstico general sobre las condiciones actuales, de acuerdo a la caracterización del agua cruda que ingresa a la planta de tratamiento y también a los resultados obtenidos con el Sulfato de Aluminio Tipo B, el cual se va a sustituir.

Una vez analizados los resultados obtenidos, mediante una revisión bibliográfica se determinan los posibles coagulantes que pueden llegar a sustituir al sulfato de aluminio, de forma que, se realiza una matriz de selección en la que se establecen características de gran importancia para la empresa en el proceso de clarificación. Teniendo en cuenta estas características, se determina que el cloruro férrico, el sulfato férrico y el policloruro de aluminio (PAC) son las opciones que generan mayor ventaja económica y operativa dentro del proceso.

Posteriormente, se realiza la evaluación de cada agente mediante un desarrollo experimental, tomando muestras de agua a la entrada del proceso, para determinar sus características fisicoquímicas antes y después de realizados los ensayos de jarras para cada una, de forma que se pueda establecer el grado de eficiencia del sistema de potabilización de agua al emplear cada agente.

De acuerdo a los porcentajes de remoción, se encuentra que el sulfato férrico y el cloruro férrico ofrecen mayores remociones en el agua cruda que el policloruro de aluminio, el cual no presentó eficiencias en la remoción de las partículas coloidales.

Finalmente se realiza un análisis financiero, mediante un balance de materia, la dosis empleada por cada uno de los coagulantes y su precio por Kg, determinando así su costo

en un periodo de 1 mes, de esta forma se determinó que el sulfato férrico era el más adecuado para emplear en dicha planta.

5.1.5 Evaluación De La Viabilidad Técnico – Financiera Del Uso Del Sulfato De Aluminio Líquido O Hidroxicloruro De Aluminio (PAC) Como Reactivo Sustituto Del Sulfato De Aluminio Granular En El Subproceso De Coagulación Y Floculación De La PTAP El Dorado

En la PTAP El Dorado, ubicada en al suroriente de Bogotá, se hace uso como agente coagulante el Sulfato de Aluminio en forma granular, el cual presenta problemas a la hora de su manipulación debido a su naturaleza sólida, por tanto, se debe realizar diluciones exhaustivas y también presenta el problema de las sobredosificaciones, el cual se traduce en pérdida de tiempo y de dinero para la empresa.

En este caso, los compuestos químicos que reemplazarían al Sulfato de Aluminio serían el Sulfato de Aluminio en forma líquida y el Hidrocloruro de aluminio (PAC). Para determinar cuál de ellos es el más eficiente, en cuanto remoción de turbiedad y en cuanto cantidad utilizada, se realizó en primera instancia la prueba de jarras, con el fin de observar el comportamiento de cada uno de los coagulantes en diferentes rangos de turbiedad, pH, color, alcalinidad y temperatura, y así lograr determinar las dosificaciones que deben usarse en la experimentación a nivel planta piloto. [20]

Con estas cantidades determinadas, se procede a la planta piloto de la PTAP, donde se evalúan los efectos de cada uno de los coagulantes, dando como resultado que el PAC es en este caso el más eficiente, ya que requiere una menor cantidad y además redujo en gran medida la turbiedad del agua, seguido del Sulfato de aluminio granular y finalmente el Sulfato de aluminio líquido, determinados así más que todo por la cantidad usada para su dosificación.

Como conclusión, se puede decir que, en este caso, el PAC es el agente coagulante con mayor desempeño, debido a su baja dosificación.

Llevando estos resultados a la PTAP del municipio de Sibaté, se puede identificar que una alternativa muy viable es cambiar el coagulante en vez de agregar un ayudante de floculación, esto debido a que puede representar más gastos para la empresa, además,

se tiene la ventaja de que el PAC se desempeña de igual forma casi independientemente del pH y la alcalinidad del agua.

5.1.6 Optimización De La Coagulación – Floculación En La Planta De Tratamiento De Agua Potable De La Sede Recreacional Campoalegre – Cajasan

Ubicada en Bucaramanga, la PTAP objeto de estudio se usa para suministrar un centro recreacional, en dicha investigación, mediante la implementación de una ANOVA, se analizaron los efectos que tiene la lluvia en los parámetros fisicoquímicos más importantes en el proceso de coagulación y floculación, los cuales son pH, turbiedad, color y alcalinidad, también se determinaron factores y parámetros de diseño que se tienen en cuenta a la hora de diseñar y operar esta operación. Además, hay que agregar que el agente coagulante que se usa es el Sulfato de aluminio en forma granulada.

Como resultado de este proyecto, se llegó a determinar que el factor que se ve afectado por la lluvia es la turbiedad, debido al aumento de partículas disueltas que se desprenden durante el recorrido del agua, por otro lado, el pH y la alcalinidad permanecieron estadísticamente iguales, presentando variaciones mínimas.

Debido a esto, principalmente se llegó a concluir y a recomendar que se debía cambiar el PAC por el Sulfato de Aluminio, debido a que este es de fácil ubicación, no es toxico, no produce incrustaciones en la tubería, es eficiente y no es peligroso.

5.2 Casos De Estudio Sin Desarrollo Experimental

Los siguientes documentos no son investigaciones realizadas con el fin de cambiar el coagulante o mejorar el proceso de coagulación, por lo cual no tienen en si un desarrollo experimental, sin embargo, debido a que cumplen con los requisitos, sirven como caso de estudio o ejemplo para sustentar la implementación de los agentes coagulantes propuestos por esta investigación.

5.2.1 Diagnostico Planta De Tratamiento De Agua Potable, Desde Su Punto De Captación Hasta La Red De Distribución, En El Municipio Del Castillo, Departamento Del Meta

Esta planta está ubicada en el municipio Castillo del departamento del Meta, la investigación tiene como objetivo realizar un diagnóstico a esta planta de tratamiento de agua potable para garantizar el correcto funcionamiento de esta, desde la captación del agua, hasta su distribución al consumidor final, de forma que se puedan evitar daños al ecosistema y también a la salud humana.

Las características del agua cruda que ingresa a esta planta son parecidas al agua que ingresa a la PTAP de Sibaté, de forma que el agua en dicha zona también se puede clasificar dentro de las que son las más difíciles de coagular, posee una turbiedad de 1.95 NTU, pH de 7.34 y una alcalinidad de 26 mg/L.

Teniendo en cuenta estas características, un laboratorio se encargó de realizar el ensayo de jarras para el proceso de clarificación del agua, donde utilizaron sulfato de aluminio tipo B y Cal hidratada como agentes químicos, de forma que el agua cumplió con los estándares estipulados por la norma, saliendo con una turbiedad de 0.34 NTU, un pH de 7.86 y una alcalinidad 26 mg/L.

5.2.2 Diagnostico De La Planta De Tratamiento De Agua Potable San Antonio – Asociación Sucuneta.

Ubicada en el municipio de Tausa, Cundinamarca, se realiza un diagnóstico de los equipos y procesos de la planta para una posible reestructuración de la misma. Dicho esto, lo importante es que el agua cruda que llega a la planta posee características parecidas al agua cruda que ingresa a la planta del municipio de Sibaté, las cuales son una turbiedad de 4.52 NTU, un pH de 6.86 y una alcalinidad 10 mg/L

El coagulante usado en dicha planta es el policloruro de aluminio (PAC), el cual no presenta problema alguno, tanto a la hora de manipularlo o en el proceso, implicando el hecho de que es perfecto su uso en dicha planta, como resultado del proceso, el agua con una turbiedad inicial de 4.52 NTU pasa a ser 1.60 NTU.

5.2.3 Diagnostico Y Optimización De La PTAP Del Municipio De Fόμεque, (Cundinamarca)

La investigación tiene como objeto analizar y describir la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Fόμεque del departamento de Cundinamarca.

En promedio, el agua que ingresa a la planta posee una turbiedad de 7.84, un pH de 5.81 y una alcalinidad de 47. El coagulante que se utiliza es el sulfato de aluminio tipo A granulado.

Posteriormente se realiza el ensayo de jarras para determinar la dosis de coagulante que se debe utilizar, obteniendo valores de turbiedad final de 1.49 UNT.

A continuación, se presentan dos tablas resumen acerca de esta revisión de casos de estudio con los respectivos datos numéricos realizados por cada uno de los autores.

Tabla 16.

Resumen de los casos de estudio sobre cambio de coagulantes y con desarrollo experimental.

Autores	Sustancias químicas iniciales		Sustancias químicas del experimento		Características del agua Experimento			Resultados del experimento			
	Coagulante	Floculante	Coagulante	Floculante	Turbiedad	pH	Alcalinidad	% Remoción máximo	pH	Alcalinidad	
H. A RESTREPO OSORNO	Sulfato de aluminio tipo B liquido	Ultron 8157	Sulfato de aluminio tipo B liquido	Ultron 8157	87.00	7.37	16.20	95.77	6.17	6.00	
			Polisulfato de Aluminio	//				16.20	94.51	7.06	16.10
			Policloruro de Aluminio (PAC)	//				16.20	94.87	7.17	16.19
			Sulfato de aluminio + PAC	//				16.20	93.50	6.99	12.18
P. C SANCHEZ PULIDO y J. L. ALONSO RIOS	Sulfato de aluminio	//	Sulfato de aluminio	//	93.12	6.70	10.0 - 14.0	67.28	4.70	//	
			Sulfato de aluminio	Poliacrilamida (PAM)	51.03	5.02	10.0 - 14.0	75.60	4.28	//	
J. F. GUZMAN RIVAS	PAC 03	POLIFLOC 2111	PAC PRO	//	4.01	7.19	8.00	78.55	7.25	9.25	
			PAC PRO	Polifloc 2111	4.32	7.35	8.00	87.27	7.01	8.00	
			PAC 03	POLIFLOC 2111	6.96	7.23	9.00	82.46	7.31	8.00	
J. P. PEREZ BELTRAN	Sulfato de aluminio tipo B liquido	//	Sulfato Férrico	//	3.54	6.74	20.76	88.70	6.71	//	
			PAC	Ultrafloc 110	2.33	4.55	11.94	61.80	3.21	//	
			Cloruro Férrico	//	3.24	6.85	18.35	73.77	6.51	//	
L. T. CATAÑO RIVERA y M. A. ORTIZ ENCISO	Sulfato de aluminio tipo B granular	//	Sulfato de aluminio granular	//	4.89	7.49	8.70	73.82	4.90	2.00	
					25.00	6.74	7.10	93.40	6.21	4.90	
			Sulfato de aluminio liquido	//	16.50	6.50	8.70	89.45	5.44	4.10	
					29.50	6.31	8.00	94.27	5.44	3.50	
			PAC	//	4.90	7.02	9.30	83.55	6.97	7.80	
				20.10	7.35	7.40	93.88	5.58	3.50		

Nota. Muestra el resumen de los casos de estudio con desarrollo experimental.

Tabla 17.

Resumen de los casos de estudio sobre implementación de coagulante.

Autores	Coagulante	Floculante	Condiciones iniciales			Condiciones finales		
			Turbiedad	pH	Alcalinidad	% Remoción máxima	pH	Alcalinidad
M. F. DOMINGUEZ AMOROCHO	Sulfato de aluminio	//	30	7	75	//	//	//
A. E. LIGARDO MORENO	Sulfato de aluminio tipo B	Cal Hidratada	1.95	7.34	26	82.5641026	7.86	26
A. C. LOPEZ NUÑEZ y B. F. JIMENEZ SABOGAL	Policloruro de aluminio	//	4.52	6.86	10	64.6017699	//	//
C. Y. JIMENEZ JIMENEZ y M. A. SABOGAL JIMENEZ	Sulfato de aluminio Tipo A	//	7.84	5.81	47	80.994898	//	//

Nota. Muestra el resumen de los casos de estudio sin desarrollo experimental.

De acuerdo a los resultados de los diferentes casos de estudio, se puede llegar a concluir que los agentes seleccionados mediante la matriz para implementarse en la PTAP del municipio de Sibaté pueden usarse sin ningún problema, ya que presentan muy buenos resultados en aguas que poseen una turbiedad y una alcalinidad baja, además de un pH parecido, así mismo, también es importante resaltar que en algunos casos no solo se utiliza el agente coagulante, por lo que esto debe tomarse en cuenta a la hora de realizar una experimentación para determinar cuál es el más adecuado de todos, puesto que, la única forma de determinar la dosis, porcentaje remoción y otros factores es mediante este método.

No obstante, se recomienda usar el PAC ya que, a pesar de tener un mejor puntaje en la matriz de selección, es el más usado aparte del sulfato de aluminio, además de poseer mejores características que este último, que lo convierten en el candidato perfecto.

6. PLAN DE MEJORAMIENTO

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica y las necesidades y problemas con que cuenta la planta actualmente arrojadas por el diagnóstico, se tiene como tal 3 etapas que se pueden mejorar, estas son:

1. Mejoramiento del sistema de mezcla rápida.
2. Mejoramiento del sistema de dosificación y mezclado de reactivos.
3. Mejoramiento o sustitución del coagulante.

Puesto que el problema más urgente de solucionar es aquel que corresponde a la alta cantidad de aluminio residual en el agua, ya que actualmente infringe la normatividad, y, además, se sabe por la revisión bibliográfica que el culpable directo es el sulfato de aluminio, se determinó que esta etapa es la más prioritaria en estos momentos, no obstante, la realización de las mejoras 1 y 2 también se deben tener en cuenta.

La etapa de mezclado rápido, ejecutada por la canaleta parshall, a pesar de que esta unidad no es la ideal para dicha labor, según los parámetros literarios, no necesita ser rediseñada, ya que su labor principal es la de instrumento de aforo, y desde este punto de vista la cumple perfectamente debido precisamente a su tamaño, al diseñarse para operar a caudales mucho más grandes que su caudal de diseño (35 L/seg), además de esto, el agua que distribuye la planta no posee algún otro problema normativo y tampoco genera un problema operacional perceptible, por lo que, como se dijo anteriormente, no se necesita rediseñar esta unidad.

En cuanto al sistema de dosificación, este está directamente relacionado con la presentación del coagulante, dependerá de los resultados de la sustitución del coagulante.

6.1 Coagulantes Más Utilizados

En primera instancia, puesto que el problema radica en el coagulante usado, se realiza una revisión bibliográfica acerca de los coagulantes más utilizados actualmente en tratamiento de aguas, posteriormente, se realiza un análisis de cada uno de ellos, haciendo énfasis en sus ventajas y desventajas para el proceso, tales como generación

de lodos y/o sustancias tóxicas o de difícil tratamiento, precio, flexibilidad en diferentes tipos de aguas, presentaciones, entre otros.

Tabla 18.

Coagulantes más utilizados en la actualidad para el tratamiento de aguas con sus respectivas ventajas y desventajas.

Nombre	Ventajas	Desventajas
Sulfato de aluminio	Alta Disponibilidad Bajo Costo Flexibilidad de uso en diferentes tipos de aguas Posee varias presentaciones, en sólido y líquido, en diferentes grados de purezas	Generación de Lodos Altas concentraciones de aluminio residual Generalmente requiere un ayudante de floculación Requiere un control sobre el pH
Policloruro de aluminio (PAC)	Gran flexibilidad en su desempeño a diferentes turbiedades y también a diferentes valores de pH No altera el pH del agua Genera una baja cantidad de lodos. Fácil de manipular Rentable, ya que sus dosis son bajas Altamente eficiente para la remoción de sólidos suspendidos Posee una cinética más rápida, por lo cual genera el floc más rápido. Genera una baja cantidad de aluminio residual	Precio elevado por kg En algunas ocasiones donde se combina con otros compuestos, puede generar un floc más liviano que tarda más tiempo en sedimentar En rangos demasiado altos de pH puede perder eficiencia de remoción
Aluminato de sodio	Posee las presentaciones de líquido y sólido, a diferentes grados de purezas Resulta útil para el ablandamiento de aguas duras y para el tratamiento de aguas coloreadas blandas Cuando se usa en asociación con el alumbre, reduce la dosis de este. Reduce el uso de correctores de pH	Aunque puede ser usado como coagulante primario o ayudante de floculación, no es muy usado en tratamientos de aguas.
Sulfato Férrico	Muy efectivo en aguas acidas Su rango de pH óptimo es muy amplio Posee un bajo costo Cinética alta No hay problemas de aluminio residual Generalmente no requiere agente de floculación Posee presentaciones en líquido y sólido, a su vez, es su manipulación y almacenamiento es fácil y segura	Requiere una muy buena mezcla para formar una dilución Requiere un diseño más seguro en comparación al alumbre o al PAC Problemas en el proceso pueden ocasionar color y precipitación en el agua. Altamente corrosivo, pero menor que el cloruro férrico Puede presentar problemas con el hierro residual
Cloruro Férrico	No posee problemas con el hierro residual No necesita ayudante de floculación Muy efectivo en aguas acidas y blandas, fuertemente coloreadas Se puede encontrar en forma líquida o sólida Bajo costo Cinética alta Su rango de pH óptimo es muy amplio	Forma lodos altamente corrosivos capaces de manchar superficies y corrientes de agua Muy difícil de manipular Es muy corrosivo Se usa más en tratamiento de aguas residuales que en aguas potables
Sulfato Ferroso	Bajo costo Posee un amplio rango de pH óptimo, aunque se prefiere su uso en aguas alcalinas con pH superior a 8.5 Eficiente para aguas turbias	Debe usarse en combinación con cal No debe usarse en aguas blandas o con altos niveles de color

Nota. La tabla muestra los coagulantes más usados junto con sus ventajas y desventajas tanto para el proceso, como para la empresa en sí misma.[3] [7] [8] [12] [17] [18]

Una de las características más importantes a la hora de escoger un coagulante para el tratamiento de determinada agua, es el pH óptimo que este agente posee, de forma que, si el pH del agua a tratar no está dentro del rango del pH óptimo del agente coagulante, no será eficiente, ya que el pH y la dosis del coagulante están estrechamente relacionadas debido a las cargas eléctricas de las partículas y el potencial Z.

Tabla 19.

Rangos de pH óptimo de los coagulantes más utilizados.

Nombre	Rango de pH
Sulfato de aluminio	6.0 – 8.0
PAC	6.0 – 9.0
Aluminato de Sodio	3.0 – 6.0
Sulfato Férrico	3.5 – 11.0
Cloruro Férrico	3.5 – 6.5 y > 8.5
Sulfato Ferroso	4.0 – 11.0 Preferible > 8.5

Nota. La tabla muestra los rangos donde los coagulantes trabajan de forma eficiente, como se puede observar, algunos de ellos poseen más de un rango y otros trabajan mejor por encima de ciertos valores. La tabla fue armada mediante una revisión bibliográfica. [3] [7] [8] [12] [17] [18]

6.2 Influencia De La Alcalinidad

Otro aspecto importante a la hora de escoger un coagulante es la alcalinidad y la turbiedad presentes en el agua, ya que, dependiendo de estas características, el coagulante puede llegar a ser efectivo o no, por ejemplo, se sabe que en aguas altamente turbias, el coagulante actúa de una forma más eficiente ya que el agua posee altas concentraciones de partículas, en el caso de la alcalinidad, esta está relacionada con la cinética del proceso, por lo cual, si la alcalinidad es alta, de igual forma será la reacción.

Tabla 20.

Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación

Tipo de Agua	Tipo de coagulación	Requerimiento	Sales de aluminio	Sales de Hierro
Alta Turbiedad (>100 UNT) Alta alcalinidad (>250 mg CaCO ₃ /L) Son las aguas más fáciles de coagular	Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos (pH>7)	La dosis de coagulante es directamente proporcional a la concentración de las partículas.	Efectivo para pH de 5-7 No es necesario agregar un alcalinizante o ayudante de coagulación.	Efectivo para pH de 6-7 No es necesario agregar un alcalinizante o ayudante de coagulación.
Alta Turbiedad (>100 UNT) Alta alcalinidad (>250 mg CaCO ₃ /L)	Adsorción de polímeros metálicos (pH de 4-7)	La dosis de coagulante es directamente proporcional a la concentración de las partículas. Además de esto, es necesario adicionar un alcalinizante.	Efectivo para pH de 5-7 Puede ser necesaria la implementación de un alcalinizante si el pH disminuye durante el proceso.	
Baja Turbiedad (<10 UNT) Alta alcalinidad (>250 mg CaCO ₃ /L)	Formación de precipitado. Floculación por barrido.	La dosis del coagulante aumenta con la baja concentración de partículas. Se deben adicionar partículas.	Efectivos en dosis altas. Puede ser necesaria la implementación de ayudantes de coagulación.	Efectivos en dosis altas. Es necesaria la implementación de ayudantes de coagulación.
Baja Turbiedad (<10 UNT) Baja alcalinidad (<50 mg CaCO ₃ /L) Son las más difíciles de coagular.	Formación de precipitado. Floculación por barrido.	La dosis del coagulante aumenta con la baja concentración de partículas. Se deben adicionar partículas. Es necesario adicionar un alcalinizante	Efectivo gracias al mecanismo de barrido. Es necesaria la implementación de un alcalinizante o alguna arcilla	

Nota. La tabla constituye los 4 tipos de aguas crudas que se pueden encontrar en cualquier fuente hídrica, así mismo, la tabla muestra el comportamiento y las acciones a realizar si se trabajan con sales de aluminio o de hierro. La tabla fue armada mediante una revisión bibliográfica. [3] [7] [8] [12] [18]

La tabla nos ayuda a clasificar el agua cruda que llega a la planta y además de eso, nos presenta de manera superficial el comportamiento que tienen los coagulantes a base de hierro y aluminio en cada tipo de agua. Es importante resaltar que, cuando se menciona en la tabla que es necesaria la implementación de sustancias químicas, se hace con el fin de incrementar la alcalinidad o la turbiedad, de forma que todas las aguas se deban caracterizar por poseer una turbiedad alta al igual que la alcalinidad, ya que estas son las más fáciles de coagular, así mismo, se puede llegar a concluir por qué las aguas que se caracterizan por poseer una alcalinidad y turbiedad baja son las más difíciles de coagular.

Por lo cual se puede clasificar el agua cruda que trata la empresa como la más difícil de coagular, puesto que, aunque la turbiedad aumente en las temporadas de lluvias, aun se considera una turbiedad baja puesto que no alcanza los 100 UNT, recordemos que la turbiedad en un día seco posee un valor de 5.12 UNT y en un día lluvioso posee un valor de 36.97 UNT, así mismo, la alcalinidad que presenta esta agua es baja, ya que generalmente posee un valor de 4 mg CaCO₃/L.

Teniendo en cuenta esto, se procede a determinar cuáles coagulantes podrían reemplazar al sulfato de aluminio.

Tabla 21.
Selección de coagulantes de acuerdo al cumplimiento de pH óptimo.

Coagulante	Intervalo de pH óptimo	Intervalo de pH del agua cruda de la planta	Cumplimiento
Sulfato de aluminio	6.0 – 8.0	6.8 – 7.0	Si
PAC	6.0 – 9.0		Si
Aluminato de Sodio	3.0 – 6.0		No
Sulfato Férrico	3.5 – 11.0		Si
Cloruro Férrico	3.5 – 6.5 y > 8.5		No
Sulfato Ferroso	4.0 – 11.0 Preferible > 8.5		Si

Nota. La tabla muestra cuales coagulantes pueden usarse en el proceso de coagulación-floculación de la PTAP del municipio de Sibaté.

Como se puede observar, los coagulantes cuyo intervalo óptimo de pH abarca el intervalo de pH del agua cruda que ingresa a la planta, son el PAC, Sulfato Férrico y el Sulfato Ferroso, además de esto, gracias a la información de la tabla (TAL), que nos indica la

clasificación del agua cruda de la planta, se puede decir que tanto las sales de hierro y aluminio son adecuadas para el tratamiento de estas aguas, reaccionando de forma similar.

Una vez seleccionados los candidatos a sustitutos del sulfato de aluminio, se realiza una matriz de selección, donde se tienen en cuenta diversas características, esto con el fin de identificar cual o cuales coagulantes son más, menos o igualmente de beneficiosos para el proceso, ya sea porque es más eficiente en este tipo de aguas, es un agente de fácil manipulación y almacenaje, posee diversas presentaciones, entre otros aspectos.

En cuanto a la matriz, está ya está construida, puesto que, durante la investigación bibliográfica de referentes y teoría, se encontró un documento donde realizan la misma evaluación para la sustitución de un coagulante, precisamente del sulfato de aluminio, de forma que dicho instrumento es perfecto para seleccionar, en nuestro caso, el coagulante más adecuado. [18]

6.3 Matriz De Selección

La matriz de selección funciona de la siguiente forma; en primera instancia, se tienen en cuenta una serie de características específicas que deberían poseer los coagulantes, dichas características poseen un valor de ponderación, donde el total de estos valores constituye un 100%.

Así mismo, para calificar cada una de estas características, se tienen tres valores que indican el grado de cumplimiento de estas características, de forma que el instrumento queda constituido de la siguiente manera:

Tabla 22.

Puntaje y calificación para la selección de coagulantes.

Puntaje	Comportamiento
1	No cumple
3	Cumplimiento Parcial
5	Cumple Totalmente

Nota. Los puntajes mostrados en la tabla muestran el valor numérico que se le debe dar a una característica, de acuerdo al cumplimiento de esta misma por cada coagulante. Tomada de: J. P. Perez Beltran. *Evaluación de la sustitución del agente coagulante -sulfato de aluminio- en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP.* Facultad de ingenierías.

Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2017

Tabla 23.

Factor ponderado tenido en cuenta para la selección de los coagulantes.

Característica	Factor de ponderación (%)
Amplio uso en clarificación de aguas de baja turbiedad	5
Funcionamiento estable en un amplio rango de pH	5
Baja/nula generación de corrosión en tuberías	6
Producción de flóculos grandes y densos de fácil decantación	8
Efectivo en la desestabilización de partículas suspendidas	12
Bajos costos de materia prima respecto al Sulfato de Aluminio	9
Disponibilidad de obtención en el mercado regional/nacional	5
Generación baja de coloración después del proceso de clarificación	6
Presentación en forma líquida para su fácil aplicación	5
Eliminación de agentes adversos a la salud humana	9
Generación baja/nula de aluminio y hierro residual	12
No requiere ayudante de floculación y/o floculación	5
No requiere uso de correctores de pH	5
Mayor velocidad de sedimentación por la formación de floccs de mayor peso	8
Total	100

Nota. Las características poseen un valor ponderado, que, sumados todos dan el 100% o la unidad, de forma que la sumatoria de este factor ponderado multiplicado por el puntaje mencionado en la tabla 5, daría un resultado numérico que debe ser comparado con un punto de referencia, en este caso el puntaje del sulfato de aluminio. Esta tabla fue realizada en base a [18], sin embargo, algunos valores fueron modificados para esta investigación.

Los valores de ponderación se establecen teniendo en cuenta el peso que suponen para el proceso, en este aspecto, se realizó una modificación en dos características, la primera es aquella que relaciona los costos del coagulante evaluado con el sulfato de aluminio, pasando de un valor ponderado de 12 hasta 9, y la segunda es aquella que tiene que ver con la generación baja/nula de aluminio y hierro residual, pasando de 9 a 12, esto se

hace con el fin de darle prioridad a la solución de la problemática central que es la alta concentración de aluminios residuales en el agua actualmente presente en la planta.

Otro factor que se modificó, fue aquel que tiene que ver con su funcionamiento estable en un amplio rango de pH, pasando de un valor de 7 hasta 5, ya que los cambios en el pH del agua son casi nulos, por otro lado, también se modificó aquel factor que tiene que ver con su presentación en forma líquida, pasando de 3 a 5, esto debido a que si se empleara de esta forma, no se tendría que implementar una etapa exclusiva para la preparación de la mezcla de coagulante-agua, la cual, recordando, es un aspecto a mejorar en la planta, debido a que la sustancia química usada está en forma granular.

Una vez teniendo esto en cuenta, se procede a la implementación de la matriz de selección con los 3 coagulantes, teniendo en cuenta también al sulfato de aluminio, ya que es nuestro referente para determinar si las alternativas presentan más ventajas o, por el contrario, suponen alguna problemática.

Tabla 24.

Matriz de selección de los coagulantes

Coagulante	Sulfato de Aluminio	PAC	Sulfato Férrico	Sulfato Ferroso
Característica				
Amplio uso en clarificación de aguas de baja turbiedad	5	5	5	3
Funcionamiento estable en un amplio rango de pH	1	5	5	3
Baja/nula generación de corrosión en tuberías	5	5	1	1
Producción de flóculos grandes y densos de fácil decantación	5	5	5	3
Efectivo en la desestabilización de partículas suspendidas	5	5	5	5
Bajos costos	5	1	5	5
Disponibilidad de obtención en el mercado regional/nacional	5	5	5	5
Generación baja de coloración después del proceso de clarificación	5	5	3	3
Presentación en forma líquida para su fácil aplicación	5	5	5	1
Eliminación de agentes adversos a la salud humana	5	5	5	5
Generación baja/nula de aluminio y hierro residual	1	5	3	1
No requiere ayudante de coagulación y/o floculación	1	3	3	3
No requiere uso de correctores de pH	3	3	3	3
Mayor velocidad de sedimentación por la formación de flocs de mayor peso	5	5	5	5
Total	4.02	4.44	4.2	3.4

Nota. Muestra el desarrollo de la matriz.

Teniendo en cuenta los resultados de la matriz de selección, los coagulantes que pueden reemplazar de forma beneficiosa al sulfato de aluminio son el PAC y el Sulfato Férrico, puesto que estos dos presentan un valor mayor que el Sulfato de Aluminio, por otro lado, el sulfato ferroso cumple con los requerimientos teóricos para su uso como sustituto, pero su implementación no presenta un beneficio para el proceso teniendo en cuenta las características de la matriz, esto se debe a que flaquea en varias de las características con mayor peso, por ejemplo, en la que se evalúa si se tiene una presentación en forma líquida, por lo todo anteriormente dicho no será tenido en cuenta su uso.

A pesar de todo, el Sulfato de Aluminio sigue siendo un excelente coagulante en este proceso, puesto que presenta valores cercanos al PAC y al Sulfato Férrico, y además la teoría lo recomienda, por lo cual será tomada en cuenta su implementación, sin embargo, su forma de uso deberá ser en forma líquida y junto a un ayudante de floculación, puesto que la empresa actualmente no lo implementa en forma líquida ni tampoco usa alguna otra sustancia para acondicionar el agua o ayudar al coagulante.

6.4 Plan De Acción

Teniendo en cuenta los casos de estudio y también los resultados de la investigación plasmados en la matriz de selección, para solucionar el problema de los altos niveles de aluminio residual en el agua potable, se recomienda utilizar el coagulante PAC en forma líquida, esto debido a que presenta altas ventajas para el proceso y además tiene una alta confianza, como se pudo ver en los diversos casos de estudio.

Para esto, se es necesario adaptar o adquirir un dosificador que opere con coagulantes en estado líquido, de forma que, el coagulante no presentará problemas con este elemento en particular y también, su estado garantizara una homogenización más eficiente y más sencilla.

No obstante, si no es posible la adquisición de esta sustancia, también es recomendable trabajar con el sulfato férrico, puesto que también presenta ventajas para el proceso, sin embargo, no genera confiabilidad al no encontrarse muchos datos experimentales.

En última instancia, el uso del sulfato de aluminio es una buena opción, sin embargo, deberá hacerse uso de un ayudante de coagulación para garantizar que no haya inconvenientes con el aluminio residual.

Por otro lado, si no es posible adquirir las sustancias en estado líquido, es recomendable la creación de una etapa que consista únicamente en la preparación de la mezcla coagulante-agua para su posterior vertimiento al agua cruda, esto si se sigue trabajando con el sulfato de aluminio, si se trabaja ya sea con el PAC o con el sulfato férrico, no es necesaria la implementación de esta nueva etapa, ya que no hay indicios de que estas sustancias presenten algún problema relacionado con altas concentraciones residuales.

7. ANÁLISIS DE COSTOS

Para determinar la cantidad de dinero que se deberá invertir en la implementación del proyecto se debe tener en cuenta la cantidad de reactivos, es decir, coagulante y ayudante, que se vaya a suministrar.

Para esto, es necesario realizar una prueba de jarras, la cual tiene como objetivo fundamental determinar la dosis óptima, sin embargo, este proyecto al no tener datos experimentales propios, no es posible determinar estas dosis, así mismo, no es posible usar las dosis usadas en cada caso de estudio, ya que esta depende de, fundamentalmente, del pH, y también, en menor medida, de otros factores, tales como tiempos de retención, mezclado, turbiedad del agua, alcalinidad y otros más.

No obstante, se presenta los costos de los 3 coagulantes (Sulfato de aluminio tipo B líquido, PAC, Sulfato Férrico).

Tabla 25.

Costos de las diferentes sustancias químicas por kg.

Sustancia	Cantidad	Precio (COP)
Sulfato de Aluminio tipo B	25	35 481
PAC	25	52 624
Sulfato Férrico	25	18 320
Poliacrilamida (PAM)	25	430 000
Polifloc 2111	1	17 000
Cal	10	12 723

Nota. Muestra los diferentes precios de las sustancias químicas.

Entre los 3 agentes, el más barato es el sulfato Férrico, sin embargo, se debe tener en cuenta que el precio mostrado es cuando se compran grandes cantidades (toneladas), para efectos de realizar este análisis se determinó el precio mediante cálculos matemáticos a partir de una tonelada de la siguiente forma:

$$\text{Precio}_{\left(\frac{\text{COP}}{\text{Kg}}\right)} = \frac{220 \text{ USD}}{1 \text{ Tonelada}} * \frac{3,331 \text{ COP}}{1 \text{ USD}} * \frac{1 \text{ Tonelada}}{1000 \text{ Kg}}$$

$$\text{Precio}_{\left(\frac{\text{COP}}{\text{Kg}}\right)} = 732.82$$

De forma que 25 kg de Sulfato Férrico tienen un valor de:

$$18\,320\text{ COP} = 732.82 * 25$$

Los precios de las diferentes sustancias fueron investigados en páginas distribuidoras de internet, tales como Paiti, Alquera, entre otros.[30] [31] [32] [33] [34]

Por otro lado, a pesar de que el PAC es el agente más caro, puede llegar a ser igual o más rentable que los demás, así mismo, aunque el Sulfato Férrico sea el más barato de todos, puede llegar a ser el igual o menos rentable, ya que, como se dijo anteriormente, todo depende la dosis y la cantidad que se gaste, y además, teniendo en cuenta que, por ejemplo, el PAC requiere dosis pequeñas debido a su efectividad, puede llegar a ser más beneficioso, económicamente hablando, que los demás.

Por ejemplo, de uno de los desarrollos experimentales mencionados en este trabajo [19], se puede encontrar que el PAC se utiliza en menor cantidad que el sulfato de aluminio, obteniendo porcentajes de remoción altos, cabe mencionar que las condiciones de experimentación son las mismas mostradas en la tabla 10:

Tabla 26.

Resultados obtenidos con el sulfato de aluminio líquido tipo B + Ultrion 8157

	Dosis de coagulante (mg/L)					
	40	42	44	46	48	50
% de remoción	90.64	91.76	93.06	94.62	95.36	95.77
Alcalinidad	9.9	8.17	8.16	6.90	6.75	6.00
pH	6.29	6.21	6.21	6.19	6.18	6.17

Nota. Muestra los resultados obtenidos con el sulfato de aluminio tipo B + Ultrion 8157. Tomado de: H. A. Restrepo Osorno. *Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable*. Facultad de minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2009

Tabla 27.

Resultados obtenidos con el PAC.

	Dosis de coagulante (mg/L)			
	20	25	30	35
% de remoción	86.41	90.99	93.85	94.87
Alcalinidad	16.20	16.20	16.19	16.19
pH	7.27	7.19	7.17	7.17

Nota. Muestra los resultados obtenidos con el PAC. Tomado de: H. A. Restrepo Osorno.

Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Facultad de minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2009

Observando los resultados de este experimento [19], se puede observar que el PAC consume menor material para realizar su trabajo que el sulfato de aluminio, además, se debe mencionar que además del sulfato de aluminio, también se está haciendo uso de otro agente, por lo que los costos aumentan más, teniendo esto en cuenta, se puede realizar un aproximado a los costos de la planta de Sibaté:

Tabla 28.

Costos aproximados entre Sulfato de aluminio + Ultrion 8157 y el PAC.

	Sulfato de aluminio	Ultrion 8157	PAC
Unidades	Kg	Kg	Kg
Costo (\$/kg)	1419.24	17000.00	2104.96
Cantidad mensual mínima	4350	1864,28	3045
Cantidad mensual máxima	5250	2250	3675
Costo mínimo y máximo (\$/mes)	6´173,694 – 7´451,010	31´692,760 – 38´250,000	6´409,603 – 7´735,728
Costo Total mínimo y máximo (\$/mes)	37´866,454 – 45´701,010		6´409,603 – 7´735,728

Nota. Muestra los costos aproximados mensuales.

Para realizar estos cálculos, en primera instancia se calculó la cantidad de sustancia química utilizada en un periodo de un mes, para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$Cant. mensual = Caudal de agua mensual * Dosis optima de agente$$

El caudal de agua mensual de la PTAP de Sibaté se tomó, para el caso de la cantidad mensual mínima, como 87000 m³ al mes, y para la cantidad mensual máxima, como 105000 m³, este valor salió de los volúmenes producidos por la PTAP, encontrados en la sección 2.6.3 de este mismo documento, entre los diferentes meses, y la dosis optima se escogió como la que mayor porcentaje de remoción presentó, quedando de la siguiente forma:

$$87000 \frac{m^3}{mes} * 1000 \frac{L}{m^3} * 50 \frac{mg \text{ de sulfato}}{L} = 4.35 * 10^9 \frac{mg \text{ de sulfato}}{mes}$$

$$4.35 * 10^9 \frac{mg \text{ de sulfato}}{mes} * \frac{1 \text{ kg de sulfato}}{1000000 \text{ mg de sulfato}} = 4350 \frac{kg \text{ de sulfato}}{mes}$$

Así mismo se determinaron las cantidades de cada uno de los agentes, cabe resaltar que para el caso del Ultrion, se asumió un precio de \$17000 por kg, debido a que tanto la poliacrilamida y el polifloc también tienen dichos precios por kg, además, según el autor de la investigación [19], el 70% de la solución de agente coagulante es el sulfato de aluminio y el 30% corresponde al Ultrion.

Posteriormente se multiplicaron estas cantidades por su respectivo precio, y puesto que el sulfato y el Ultrion deben ir juntos, su costo de implementación sería la sumatoria de los costos mensuales de estos dos agentes.

Mediante este ejemplo, se puede observar que a pesar de que el PAC es más caro que el sulfato de aluminio, a la larga sale mucho más rentable, además, si solamente se tiene en cuenta el costo entre estos dos agentes, no es mucha la diferencia entre los costos mensuales.

8.CONCLUSIONES

Se encontró que la planta posee problemas en ciertos procesos y también distribuye agua potable con una alta concentración de aluminio, sobrepasando la normatividad.

Se tomó la decisión de cambiar el coagulante actual, debido a que en la literatura se manifestaba que esta sustancia posee problemas con dejar altas concentraciones de aluminio en el agua.

Teniendo en cuenta la matriz de selección, el mejor candidato a sustituir el agente coagulante es el sulfato ferroso, a su vez, también se tiene en cuenta el uso del Sulfato de Aluminio bajo ciertas condiciones, sin embargo, debido a que es más usado el PAC y genera también altos rendimientos, este se convertiría en el sustituto ideal.

El empleo de PAC resulta ser más económico que el uso del Sulfato de Aluminio, ya que no requiere ayudante de floculación.

La mejor forma de mejorar los procesos actuales de la planta, es mediante el uso del Policloruro de Aluminio (PAC), como agente coagulante, además, se debe emplear en una presentación líquida, esto para no tener que invertir en la construcción de una nueva etapa de mezclado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. De Vargas. Tratamiento de agua para consumo humano. *Plantas de filtración rápida. Original*. Lima. Perú. (2004). Manual I: Teoría Tomo I
- [2] Organización de naciones unidas para la alimentación y la agricultura. “Cartilla de uso y manejo de agua segura para consumo y producción en huertos familiares”. 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-ar649s.pdf>.
- [3] W.A. Lozano Rivas Y G. Lozano Bravo. *Potabilización del agua. Principios de diseño, control de procesos y laboratorio*. Bogota D.C: 2015. P 372. ISBN 9789588957180
- [4] J. C. Crittenden, et al. *MWH’s Water Treatment. Principles and Design*. 3 ed. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, Inc, 2012. P 1869. ISBN 978-0-470-40539-0
- [5] M. F. Dominguez Amoricho. *Optimizacion de la coagulacion – floculacion en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional campoalegre – cajasan*. Facultad de ingeniería ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, 2010.
- [6] N. A. Gomez Puentes. *Remocion de materia organica por coagulacion – floculacion*. Facultad de ingeniería y arquitectura, Universidad nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2005.
- [7] J. Arboleda Valencia. *Teoria y practica de la potabilizacion del agua*. Colombia. 1992
- [8] J. BRATBY. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. 3 ed. United Kingdom. IWA Publishing Alliance House 12 Caxton Street London SW1H 0QS, UK, 2016. P 515. ISBN: 97817804
- [9] Y. Lorenzo Acosta. “*Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulacion – floculacion*”. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la caña de Azúcar. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>
- [10] L. Ravina Y N. Moramarco. *Everything you want to know about coagulation & flocculation*. [En línea]. Disponible en: <http://www.zeta-meter.com/coag.pdf>
- [11] P. C. Sanchez Pulido Y J. L. Alonso Rios. *Propuesta de mejora para la planta de agua potable de la empresa fertilizantes colombianos S.A*. Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2017.
- [12] J. F. Guzman Rivas. *Evaluacion tecnica de la etapa de coagulacion-floculacion para el mejoramiento en el proceso de potabilizacion de la planta galan de la*

EAAAZ. Facultad de ingenierías. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. 2017

- [13] Ingenieros Químicos y Asociados. Sulfato de aluminio sólido.
- [14] Silicatos y Derivados S.A. de C.V. Proceso de coagulación/floculación en el tratamiento del agua. [En línea]. Disponible en: <https://aniq.org.mx/pqta/pdf/Sulfato%20de%20aluminio%20SIDESA.pdf>
- [15] R. Stulz y K. Mukerji. *Materiales de construcción apropiados*. Primera edición. [En línea]. Disponible en: <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms00.htm#Contents>
- [16] Minerales Industriales Calcinor. Las funciones que realiza la cal en el tratamiento de aguas. [En línea]. Disponible en: <https://www.calcinor.com/es/actualidad/2017-03-16/cal-tratamiento-de-aguas/>
- [17] C. F. Rodriguez Salcedo. *Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable*. Facultad de ingeniería. Universidad de Sucre, Colombia, 2008.
- [18] J. P. Perez Beltran. *Evaluación de la sustitución del agente coagulante -sulfato de aluminio- en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP*. Facultad de ingenierías. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2017
- [19] H. A. Restrepo Osorno. *Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable*. Facultad de minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2009
- [20] L. T. Cataño Rivera Y M. A. Ortiz Enciso. *Evaluación de la viabilidad técnico – financiera del uso del sulfato de aluminio líquido o hidroxiclورو de aluminio (pac) como reactivo sustituto del sulfato de aluminio granular en el subproceso de coagulación y floculación de la pta del dorado*. Facultad de ingenierías. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018.
- [21] A. E. Ligardo Moreno. *Diagnóstico planta de tratamiento de agua potable, desde su punto de captación hasta la red de distribución, en el municipio del castillo, departamento del meta*. Facultad de ingenierías. Universidad Cooperativa de Colombia. Villavicencio. Colombia. 2019.
- [22] A. C. Lopez Nuñez Y B. F. Jimenez Sabogal. *Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua potable san antonio – asociación sucuneta*. Facultad de medio ambiente y recursos naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Colombia. 2016


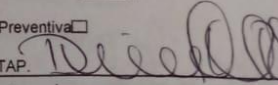
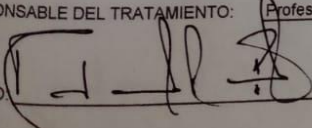
- [23] C. Y. Jimenez Jimenez Y M. A. Sabogal Jimenez. *Diagnostico y optimizacion de la ptap del municipio de fomeque, (cundinamarca)*. Facultad de ingeniería. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. Colombia. 2017
- [24] A. J. Torre Garavito. *Propuesta de diseño para la expansion de la planta de potabilizacion de agua del municipio de sibate, (CUNDINAMARCA)*. Facultad de ingeniería. Universidad Libre. Bogotá. Colombia. 2015
- [25] J. D. Hernandez Jimenez Y J. S. Garcia Perez. *Diagnostico y analisis de alternativas para la optimizacion del sistema de acueducto de la vereda chacua del municipio de sibate*. Facultad de ingeniería. Universidad de La Salle. Bogotá. Colombia. 2015
- [26] W. Rincon Lozano Y W. A. Cordoba Mesa. *Determinacion de los factores de mayorizacion para el consumo de agua potable en el municipio de sibate con respecto a los definidos en la resolucion numero 0330 del 8 de junio del 2017*. Facultad de ingeniería. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. Colombia. 2017.
- [27] Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. “Resolución 2115 de 2007”. Colombia. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf
- [28] Ministerio De Desarrollo Economico Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico. “Resolución No. 1096 del 17 de noviembre de 2000.REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS – 2000”. Recuperado de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_a_.pdf
- [29] J. A. Romero Rojas. *Calidad del agua*. Bogota D.C.2009. P 484. ISBN 9789588060835
- [30] Hidroxicloruro de aluminio. Aquaintegral. En línea: <https://aquaintegral.co/producto/hidroxocloruro-de-alumino-x-25-kg/>. Consultado el 16 de noviembre del 2020
- [31] Sulfato Ferrico. Alibaba. En línea: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/poly-ferric-sulphate-pfs-21-5-waste-water-treatment-chemicals-coagulant-60667547570.html?spm=a2700.8699010.normalList.11.3db5647c0s7SRD>. Consultado el 16 de noviembre del 2020
- [32] Sulfato de Aluminio tipo B. Marclor. En línea <https://marclor.com/producto/sulfato-de-aluminio-tipo-a-saco-25kg/>. Consultado el 16 de noviembre del 2020

[33] Poliacrilamida. Alquera. En línea <https://www.alquera.com/poliacrilamida/>. Consultado el 16 de noviembre del 2020

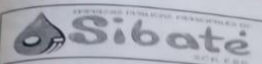

[34] Cal. Paii. En línea <https://paii.com.co/construcci%C3%B3n/1182-bulto-de-cal-viva-x-25-kg.html>. Consultado el 16 de noviembre del 2020

ANEXOS


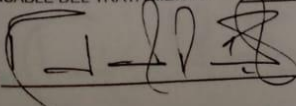
ANEXO 1. INFORME #1

	SALIDA NO CONFORME	R02-03-01 LJC C
Reportado por: <u>Profesional Universitario PTAP</u>	Proceso y procedimiento: <u>P03-02: Tratamiento de Agua Cruda</u>	Fecha: <u>5 de abril de 2018</u>
NO CONFORMIDAD <input type="checkbox"/>		SALIDA NO CONFORME <input checked="" type="checkbox"/>
DESCRIPCIÓN DE LA SALIDA NO CONFORME		
<p><u>El día 2 de abril de 2018 se presentó en muestra de red de distribución y contramuestra tomada con saneamiento ambiental valores de aluminio residual por encima del valor máximo permitido (0,3 mg/L). Las muestras están clasificadas como Agua Potable, aptas para consumo humano con un puntaje de riesgo IRCA 3,4 por muestra.</u></p>		
IDENTIFICACIÓN DEL ORIGEN DE LA SALIDA NO CONFORME		
<p><u>Una vez evaluadas todas las condiciones de operación de la PTAP, se detectó que dadas las condiciones de invierno del 1, 2 de abril sobre la fuente de abastecimiento, se produjo un aumento de la turbiedad del agua cruda, haciendo difícil estabilizar el tratamiento de agua cruda. En el momento de las tomas de muestras se estaba realizando los ajustes necesarios al proceso ya que se presenta una variación constante de color y turbiedad del agua cruda, llevando a un aumento del Aluminio Residual.</u></p>		
TRATAMIENTO DE LA SALIDA NO CONFORME		
Reclasificación <input type="checkbox"/> <small>(Variación requisitos)</small>	Concesión <input type="checkbox"/> <small>(Autorización)</small>	Permiso de desviación <input type="checkbox"/> <small>(Autorización a apartarse)</small>
Liberación <input type="checkbox"/> <small>(Autorización proseguir)</small>	Reproceso <input type="checkbox"/> <small>(Hacer de inmediato)</small>	Reparación <input checked="" type="checkbox"/> <small>(Hacer después)</small>
Desecho <input type="checkbox"/> <small>(Impedir su uso)</small>		
<p><u>Se ajustó la PTAP a las condiciones del agua cruda, estabilizando el proceso a una descarga de sulfato de Aluminio la cual se encontraba en una descarga de 82,44 g/min el 1 de abril y ajustándola a 54,54 g/min el 2 de abril. Se realizó una verificación posterior, arrojando valores de Aluminio Residual, dentro del valor permitido (< 0,20 mg/L).</u></p>		
RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN DESPUÉS DEL TRATAMIENTO		
SALIDA CONFORME <input checked="" type="checkbox"/>		SALIDA NO CONFORME <input type="checkbox"/>
REQUIERE DE ACCIÓN: SI <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>		
Cuál? Correctiva <input type="checkbox"/> Preventiva <input type="checkbox"/>		
RESPONSABLE DEL TRATAMIENTO: <u>Profesional Universitario y Operador PTAP.</u> 		
REVISOR: 	FECHA: <u>4/11/18</u>	

**ANEXO 2.
INFORME #2**

		SALIDA NO CONFORME	R02-03-01 LIC C
Reportado por:	Profesional Universitario PTAP		Fecha: 15 de noviembre de 2017
Proceso y procedimiento:	P03-02: Tratamiento de Agua Cruda		
NO CONFORMIDAD	<input type="checkbox"/>	SALIDA NO CONFORME	<input checked="" type="checkbox"/>
DESCRIPCIÓN DE LA SALIDA NO CONFORME			
<p>El día 10 de noviembre 2017 se presentó en aumento de aluminio residual en muestra de agua de red de distribución con un valor de 0,24 mg/L. La muestra está clasificada como agua potable apta para consumo humano con un puntaje de riesgo de 3,41%.</p>			
IDENTIFICACIÓN DEL ORIGEN DE LA SALIDA NO CONFORME			
<p>Una vez evaluadas todas las condiciones de operación de la PTAP, se detectó que dadas las condiciones de invierno del 9 de noviembre y 10 de noviembre sobre la fuente de abastecimiento, se produjo un aumento de la turbiedad en el agua cruda, lo que dificultó el tratamiento de agua cruda y estabilización del proceso, especialmente cuando empezó a bajar la turbiedad. Cuando se ajustó la descarga óptima que garantizara la remoción efectiva de turbiedad del agua cruda ocasionó un aumento del Aluminio Residual. Se evidencia la necesidad de ajustar una dosificación más precisa.</p>			
TRATAMIENTO DE LA SALIDA NO CONFORME			
Reclasificación <small>(Variación requisitos)</small>	<input type="checkbox"/>	Concesión <small>(Autorización)</small>	<input type="checkbox"/>
Permisión de desviación <small>(Autorización a apartarse)</small>	<input type="checkbox"/>	Reparación <small>(Hacer después)</small>	<input checked="" type="checkbox"/>
Libерación <small>(Autorización proseguir)</small>	<input type="checkbox"/>	Reproceso <small>(Hacer de inmediato)</small>	<input type="checkbox"/>
Desecho <small>(Impedir su uso)</small>	<input type="checkbox"/>	<p>Se ajustó la descarga de sulfato de aluminio a las condiciones del agua cruda, bajando la descarga del proceso de 67 g/min a 61 g/min. Luego del ajuste final se realizó una verificación posterior, arrojando valores de Aluminio Residual, dentro del valor permitido.</p>	
RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN DESPUÉS DEL TRATAMIENTO			
SALIDA CONFORME	<input checked="" type="checkbox"/>	SALIDA NO CONFORME	<input type="checkbox"/>
REQUIERE DE ACCIÓN: Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Cuál?	Correctiva <input type="checkbox"/>	Preventiva <input type="checkbox"/>
RESPONSABLE DEL TRATAMIENTO:	Profesional Universitario		
REVISOR:		FECHA:	Nov 16/17.

ANEXO 3. INFORME #3

	SALIDA NO CONFORME	R02-03-01 L/C C
Reportado por: <u>Profesional Universitario PTAP</u>	Fecha: <u>23 de agosto de 2018</u>	
Proceso y procedimiento: <u>P03-02. Tratamiento de Agua Cruda</u>		
NO CONFORMIDAD <input type="checkbox"/>	SALIDA NO CONFORME <input checked="" type="checkbox"/>	
DESCRIPCIÓN DE LA SALIDA NO CONFORME		
<p>El día 23 de agosto de 2018 se presentó en muestra de red de distribución y contramuestra tomada con saneamiento ambiental valores de aluminio residual por encima del valor máximo permitido (0,28 mg/L). Las muestras están clasificadas como Agua Potable, aptas para consumo humano con un puntaje de riesgo IRCA 3,4 por muestra.</p>		
IDENTIFICACIÓN DEL ORIGEN DE LA SALIDA NO CONFORME		
<p>Una vez evaluadas todas las condiciones de operación de la PTAP, se detectó que dadas las condiciones de invierno del 22 de agosto en la noche y madrugada sobre la fuente de abastecimiento, se produjo un aumento de la turbiedad del agua cruda, haciendo difícil estabilizar el tratamiento de agua cruda. Las características del agua sumado a la variación repentina y progresiva de los parámetros de color y turbiedad llevan al aumento de aluminio residual.</p>		
TRATAMIENTO DE LA SALIDA NO CONFORME		
Reclasificación <input type="checkbox"/> <small>(Variación requisitos)</small>	Concesión <input type="checkbox"/> <small>(Autorización)</small>	Permiso de desviación <input type="checkbox"/> <small>(Autorización a apartarse)</small>
Liberación <input type="checkbox"/> <small>(Autorización proseguir)</small>	Reproceso <input type="checkbox"/> <small>(Hacer de inmediato)</small>	Reparación <input checked="" type="checkbox"/> <small>(Hacer después)</small>
		Desecho <input type="checkbox"/> <small>(Impedir su uso)</small>
<p>Se ajustó la PTAP a las condiciones del agua cruda, estabilizando el proceso a una descarga de sulfato de Aluminio la cual se encontraba en una descarga de 68,59 g/min el 22 de agosto y ajustándola a 48,06 g/min el 23 de agosto. Se realizó una verificación posterior, arrojando valores de Aluminio Residual, dentro del valor permitido (< 0,20 mg/L).</p>		
RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN DESPUÉS DEL TRATAMIENTO		
SALIDA CONFORME <input checked="" type="checkbox"/>	SALIDA NO CONFORME <input type="checkbox"/>	
REQUIERE DE ACCIÓN: SI <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Cuál? Correctiva <input type="checkbox"/> Preventiva <input type="checkbox"/>	
RESPONSABLE DEL TRATAMIENTO: <u>Profesional Universitario y Operador PTAP.</u>		
REVISO: 	FECHA: <u>23/08/18.</u>	

**ANEXO 4.
PLANILLA DE REGISTRO Y CONTROL DEL AGUA DE LA PTAP DE SIBATÉ.**

FECHA		CAUDAL (L/SEG)	COLOR			TURBIDEZ			PH			ALCALINIDAD TOTAL		CLORO RESIDUAL LIBRE		REACTIVO	OBSERVACIONES					
DIA	HORA		CRUDA	SF	T2	CRUDA	SF	T2	CRUDA	SF	T2	CRUDA	T2	SF	T2	CRUDA						
997	23	19:20	57	42.2	5.0	5.0	6.0	19.2	0.97	0.97	1.00	6.37	7.24	7.19	7.01	4	5	5	1.17	1.02	1.02	17.7
998	23	19:55	52.6	35.7	4.5	5.9	5.6	15.23	0.84	0.99	1.02	6.67	8.15	7.62	7.45	4	5	5	1.56	1.32	1.22	21.7
999	24	08:00	28.8	7.8	4.6	5.6	5.5	12.17	0.68	0.87	0.80	6.68	7.63	7.12	7.09	4	5	5	1.57	1.27	1.19	22.7
1000	24	12:00	46.7	31.6	5.6	5.3	5.1	20.99	0.71	0.70	0.65	6.71	7.46	7.37	7.24	4	5	5	1.57	1.52	1.50	25.7
1001	24	20:00	50.1	28.6	4.4	5.9	5.0	9.06	0.54	0.76	0.69	6.94	7.30	7.44	7.24	4	5	5	1.85	1.54	1.50	24.2
1002	25	08:00	50.1	22.7	5.4	5.8	5.4	9.12	0.55	0.71	0.60	6.91	7.41	7.37	7.25	4	5	5	1.60	1.31	1.37	25.9
1003	25	17:30	42	74.6	7.9	3.4	7.6	6.93	0.47	0.10	0.34	6.26	7.42	7.00	6.99	4	5	5	1.76	1.39	1.40	24.2
1004	25	19:20	52.7	25.1	5.2	5.5	5.0	6.70	0.50	0.55	0.58	6.25	7.40	7.10	7.03	4	5	5	1.47	1.37	1.37	24.5
1005	26	08:00	22.6	24.0	2.7	3.2	3.7	6.81	0.48	0.33	0.66	6.95	7.77	7.05	7.29	4	5	5	1.75	1.47	1.34	24.4
1006	26	17:30	51.7	23.6	3.7	2.6	2.8	6.48	0.31	0.39	0.54	6.77	7.07	7.13	7.19	5	6	6	1.57	1.35	1.41	27.9
1007	26	11:00	51.4	23.7	2.0	4.0	3.2	6.66	0.40	0.37	0.56	6.57	7.07	7.45	7.40	5	6	6	1.48	1.41	1.30	24.2
1008	26	05:00	26.6	22.7	2.9	3.2	2.9	6.74	0.47	0.49	0.40	6.91	7.80	7.20	7.28	5	6	6	1.79	1.53	1.34	25.2
1009	27	08:00	44	22.6	2.1	3.0	2.9	6.12	0.53	0.50	0.48	6.91	7.57	7.20	7.27	5	6	6	1.76	1.59	1.51	27.6
1010	27	20:30	50.0	21.1	3.1	3.0	2.6	5.76	0.68	0.52	0.57	6.97	7.07	7.27	7.22	5	6	6	1.62	1.37	1.47	25.2
1011	28	05:00	24.4	21.7	1.9	2.4	2.6	6.80	0.32	0.29	0.30	6.92	7.45	7.01	7.15	5	6	6	1.53	1.47	1.57	25.5
1012	28	13:00	41.4	19.0	2.9	2.8	2.7	5.82	0.47	0.38	0.40	6.02	7.46	7.23	7.30	5	6	6	1.63	1.44	1.49	24.1
1013	28	20:30	47.1	19.6	2.7	1.8	1.9	5.78	0.48	0.48	0.46	6.95	7.37	7.35	7.24	5	6	6	1.65	1.33	1.26	24.9
1014	29	05:00	40.6	19.7	1.4	1.1	1.2	5.19	0.30	0.23	0.28	6.97	7.20	7.24	7.41	5	6	6	1.92	1.43	1.60	25.6
1015	29	13:00	30.4	20.2	2.0	1.8	1.8	5.26	0.50	0.40	0.38	6.94	7.50	7.31	7.33	5	6	6	1.65	1.62	1.50	25.2
1016	29	20:30	52.8	19.3	2.0	2.1	2.0	5.47	0.40	0.54	0.52	6.97	7.07	7.10	7.18	5	6	6	1.57	1.30	1.28	25.5
1017	30	05:00	23	20.3	1.7	2.0	1.8	5.50	0.32	0.40	0.38	6.94	7.14	7.10	7.28	5	6	6	1.84	1.30	1.35	25.0

**ANEXO 5.
PLANILLA DE REGISTRO Y CONTROL DEL AGUA DE LA PTAP DE SIBATÉ**

FECHA		CAUDAL (L/SEG)	COLOR			TURBIDEZ			PH			ALCALINIDAD TOTAL		CLORO RESIDUAL LIBRE		REACTIVO	OBSERVACIONES					
DIA	HORA		CRUDA	SF	T2	CRUDA	SF	T2	CRUDA	SF	T2	CRUDA	T2	SF	T2	CRUDA						
1260	13	08:00	35.8	20.1	2.1	2.2	2.1	5.12	0.30	0.40	0.40	6.83	7.92	7.14	7.14	4	5	5	1.56	1.11	1.56	25.0
1261	23	17:30	47.1	19.7	2.1	2.1	2.1	5.03	0.37	0.26	0.26	6.97	7.37	7.37	7.37	4	5	5	1.57	1.11	1.57	25.0
1262	23	18:20	56.0	22.9	2.5	2.5	2.5	5.81	0.22	0.40	0.40	6.71	7.45	7.45	7.45	4	5	5	1.57	1.11	1.57	25.0
1263	24	05:00	33.8	11.3	2.0	2.0	2.0	4.87	0.46	0.47	0.47	6.61	7.69	7.69	7.69	4	5	5	1.57	1.11	1.57	25.0
1264	24	11:30	51.4	23.7	2.0	2.0	2.0	6.77	0.40	0.37	0.37	6.57	7.07	7.07	7.07	4	5	5	1.57	1.11	1.57	25.0
1265	24	17:30	51.4	23.7	2.0	2.0	2.0	6.77	0.40	0.37	0.37	6.57	7.07	7.07	7.07	4	5	5	1.57	1.11	1.57	25.0
1266	24	05:00	33.8	11.3	2.0	2.0	2.0	4.87	0.46	0.47	0.47	6.61	7.69	7.69	7.69	4	5	5	1.57	1.11	1.57	25.0
1267	25	05:00	33.8	11.3	2.0	2.0	2.0	4.87	0.46	0.47	0.47	6.61	7.69	7.69	7.69	4	5	5	1.57	1.11	1.57	25.0
1268	25	17:30	51.4	23.7	2.0	2.0	2.0	6.77	0.40	0.37	0.37	6.57	7.07	7.07	7.07	4	5	5	1.57	1.11	1.57	25.0
1269	25	20:30	52.7	25.1	5.2	5.2	5.2	6.70	0.50	0.55	0.58	6.25	7.40	7.10	7.03	4	5	5	1.47	1.37	1.37	24.5
1270	26	05:00	22.6	24.0	2.7	3.2	3.7	6.81	0.48	0.33	0.66	6.95	7.77	7.05	7.29	4	5	5	1.75	1.47	1.34	24.4
1271	26	15:00	51.7	23.6	3.7	2.6	2.8	6.48	0.31	0.39	0.54	6.77	7.07	7.13	7.19	5	6	6	1.57	1.35	1.41	27.9
1272	27	08:00	26.6	22.7	2.9	3.2	2.9	6.74	0.47	0.49	0.40	6.91	7.80	7.20	7.28	5	6	6	1.79	1.53	1.34	25.2
1273	27	17:30	44	22.6	2.1	3.0	2.9	6.12	0.53	0.50	0.48	6.91	7.57	7.20	7.27	5	6	6	1.76	1.59	1.51	27.6
1274	28	05:00	24.4	21.7	1.9	2.4	2.6	6.80	0.32	0.29	0.30	6.92	7.45	7.01	7.15	5	6	6	1.53	1.47	1.57	25.5
1275	28	13:00	41.4	19.0	2.9	2.8	2.7	5.82	0.47	0.38	0.40	6.02	7.46	7.23	7.30	5	6	6	1.63	1.44	1.49	24.1
1276	28	20:30	47.1	19.6	2.7	1.8	1.9	5.78	0.48	0.48	0.46	6.95	7.37	7.35	7.24	5	6	6	1.65	1.33	1.26	24.9
1277	29	05:00	40.6	19.7	1.4	1.1	1.2	5.19	0.30	0.23	0.28	6.97	7.20	7.24	7.41	5	6	6	1.92	1.43	1.60	25.6
1278	29	13:00	30.4	20.2	2.0	1.8	1.8	5.26	0.50	0.40	0.38	6.94	7.50	7.31	7.33	5	6	6	1.65	1.62	1.50	25.2
1279	29	20:30	52.8	19.3	2.0	2.1	2.0	5.47	0.40	0.54	0.52	6.97	7.07	7.10	7.18	5	6	6	1.57	1.30	1.28	25.5
1280	30	05:00	23	20.3	1.7	2.0	1.8	5.50	0.32	0.40	0.38	6.94	7.14	7.10	7.28	5	6	6	1.84	1.30	1.35	25.0