

**ESTANDARIZACIÓN DEL USO DE HIDRÓXIDO DE CALCIO COMO
ALCALINIZANTE EN EL TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE LA PLANTA
EL DORADO DE LA EAAB Y EVALUACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS
ALTERNOS.**

**PAULA NICOLE CASTRO NARANJO
LAURA VALENTINA OSORIO MEZA**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA**

**DIRECTOR:
SCI. DR. YUVER ALEJANDRO BELTRAN MOLINA
DOCENTE UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C. octubre de 2024

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

Vicerrectoría Académica

Dra. María Fernanda Vega De Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectoría de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Decana de la Facultad de Ingeniería

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora del Programa de Ingeniería de Química y Ambiental

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 a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profunda gratitud a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis. En primer lugar, agradezco a mi director de tesis, Yuver Beltrán, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. También agradezco sinceramente a mi familia por su inquebrantable apoyo emocional y aliento durante todos estos años de estudio. A mi compañera de tesis, Laura Osorio, le estoy especialmente agradecido/a por su colaboración incansable, su dedicación y su valiosa contribución intelectual que ha enriquecido enormemente este trabajo. Además, quiero reconocer el invaluable aporte de mis compañeros de clase y amigos, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias, enriqueciendo aún más mi investigación. Finalmente, agradezco a la Universidad de América por brindarme los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto. Este logro no habría sido posible sin la ayuda y colaboración de todos ustedes.

- Paula Castro

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, familia y amigos quien siempre han creído en mí, a la Empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá por ser la que me abrió las puertas hacía el mundo profesional expandiendo el conocimiento y reforzando lo aprendido, en especial al Ingeniero Hernando Espitia por su disposición, profesionalismo y sabiduría.

A mis compañeros de trabajo que siempre estuvieron dispuestos a enseñarme, a los operadores Mariana, Jairo y José que me alentaron con emoción para acarrear esta investigación.

A mi compañera de tesis Paula Castro por forjar una linda amistad a raíz del proyecto, por su disposición al aprendizaje en campos desconocidos, por su compromiso en el proyecto, por las experiencias y buenos momentos que vivimos a través del desarrollo del trabajo de grado.

A la Universidad de América por ser el pilar fundamental para llegar a culminar con éxito esta etapa, en especial a nuestro director Yuver Beltrán por su paciencia, conocimiento, acompañamiento, dedicación y disposición para guiarnos en el proyecto de grado. A todos y cada uno de los profesores los cuales explotaron las capacidades que se esconden dentro de mí y me retaron a ser mejor; gracias por cultivar amor por mi carrera.

A Maria Paula Parada, Valentina, María Paula Jiménez, Yuliana y demás amigas por hacer más amena la etapa académica brindándome apoyo convirtiéndose en parte de mi vida y ocupando un lugar muy importante en mi corazón.

A mis amigos Wendy, Ana, Sebastián, Anderson que siempre se enorgullecen de mi profesión y hablan con emoción de ello, por apoyarme siempre y ser mi sostén en tiempos de caos.

A Bayron por ser mi mentor en el trabajo y enseñarme lo que sé actualmente en el ámbito laboral y a Daniela por ser una gran compañía en la planta.

- Laura Osorio

DEDICATORIA

A mis queridos padres, Yanira y Tirso, quienes con su amor incondicional y sacrificio han sido mi mayor soporte a lo largo de esta travesía académica. A mi familia, por su constante aliento y apoyo inquebrantable. A mis amigos, cuya amistad y compañía han llenado estos años de estudio de momentos inolvidables y de risas compartidas. Y a mi pareja, por su comprensión, paciencia y amor, que han sido mi refugio durante los desafíos de este proyecto. Este logro es también de ustedes, quienes han sido mi fuente de inspiración y motivación constante.

- Paula C.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a mis papás Laudith y Juan Carlos por su amor incondicional a lo largo de mi vida, por su esfuerzo para yo prosperar en la vida profesional, por los valores y principios que me inculcaron, porque gracias a ellos he llegado tan lejos, por la fortaleza, valentía y carácter que me hacen mejor ser humano con el transcurso de los días.

Quiero dedicar también este logro a mi hermano, a mi tía Darly y a mis Abuelos Rosa y Eduardo quien siempre me han recalcado mi potencial y se alegran de cada triunfo en mi vida.

A mi negrita Karen por su apoyo incansable, por no dejarme dar por vencida en la carrera, por enseñarme con amor, por presionarme siempre a dar lo mejor de mi en todas y cada una de las cosas que hago y por regalarme los mejores años universitarios con su compañía.

- Laura O.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	20
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.1. Marco teórico	21
1.1. Proceso de potabilización del agua	27
2. METODOLOGÍA	43
2.1. Estrategia de trabajo: Primer objetivo específico	43
2.2. Estrategia de trabajo: Segundo objetivo específico	44
2.3. Estrategia de trabajo: Tercer objetivo específico	45
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	47
3.1. Caracterización del agua	47
3.2. Análisis de la solubilidad de la cal en función del tiempo	48
3.2.1. <i>Remoción de la turbiedad</i>	49
3.2.2. <i>pH de la solución en función del tiempo</i>	51
3.3. Prueba de Jarras de agua cruda con hidróxido de calcio	52
3.3.1. <i>pH vs turbiedad</i>	55
3.3.2. <i>Alcalinidad</i>	56
3.4. Prueba de Jarras de agua cruda con estabilizantes alternos	57
3.4.1. <i>Remoción de partículas en suspensión</i>	59
3.4.2. <i>Alcalinidad</i>	60
3.5. Análisis de costos	61
4. CONCLUSIONES	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Formación de carbonato de calcio en tanque de agitación	17
Figura 2 Formación de carbonato de calcio por exceso de cal en tuberías	18
Figura 3 Embalse la Regadera	28
Figura 4 Cámara de entrada del agua cruda	29
Figura 5 Tanque de mezcla de hidróxido de calcio con agua	30
Figura 6 Máquina dosificadora de hidróxido de calcio	30
Figura 7 Punto de aplicación de lechada	31
Figura 8 Tanque de almacenamiento de Sulfato de Aluminio	31
Figura 9 Canaleta parshall	32
Figura 10 Floculadores	33
Figura 11 Floculación en test de jarras	34
Figura 12 Sedimentadores	35
Figura 13 Filtración con Antracita	36
Figura 14 Panel de cloración	37
Figura 15 Punto de mezcla del Cloro gaseoso	38
Figura 16 Diagrama de bloques del proceso de potabilización de agua	48
Figura 17 (a) Porcentaje de hidróxido de calcio solubilizado con dosis de 2056 mg/L de cal. (b) Porcentaje de hidróxido de calcio solubilizado para diferentes dosis de cal	49
Figura 18 (a) Turbiedad del hidróxido de calcio con dosis de 2056 mg/L de cal. (b) Turbiedad del hidróxido de calcio para diferentes dosis de cal	50
Figura 19 (a) pH de la solución de hidróxido de calcio con dosis de 2056 mg/L de cal. . (b) pH de la solución de hidróxido de calcio para diferentes dosis de cal	51
Figura 20 Medición promedio de pH al agua cruda con cal y sulfato de aluminio líquido	53
Figura 21 Medición promedio de pH al agua cruda con cal y sulfato de aluminio granular	53
Figura 22 Diagrama de flujo del de potabilización de agua en la PTAP el Dorado	74

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Solubilidad del hidróxido de calcio a diferentes temperaturas	22
Tabla 2 Condiciones óptimas del agua potable	41
Tabla 3 Resultados para las soluciones de hidróxido de calcio con sulfato de aluminio líquido a una concentración de 7.5% y dosis de 40 mg/L	55
Tabla 4 Resultados para las soluciones de hidróxido de calcio con sulfato de aluminio sólido a una concentración de 15.2% y dosis de 20 mg/L	55
Tabla 5 Resultados promedio para el HidroCalcio 17-18% en solución con sulfato de aluminio	57
Tabla 6 Resultados promedio para el HidroCalcio 20-21% en solución con sulfato de aluminio	58
Tabla 7 Costos de mantenimiento generales de 2 023 y 2 024 en el periodo enero a septiembre	62
Tabla 8 Resultados de estandarización del hidróxido de sodio con biftalato de potasio	73
Tabla 9 Resultados de estandarización del ácido clorhídrico con hidróxido de sodio	73
Tabla 10 Resultados obtenidos a partir de la titulación del hidróxido de calcio	74
Tabla 11 Resultados de pH de hidróxido de calcio en solución a 15, 30, 45 y 60 minutos	75
Tabla 12 Primer ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio líquido	76
Tabla 13 Segundo ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio líquido	76
Tabla 14 Tercer ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio líquido	77
Tabla 15 Primer ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio sólido	77
Tabla 16 Segundo ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio sólido	78
Tabla 17 Tercer ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio sólido	78
Tabla 18 Primer ensayo para el HidroCalcio 17-18% en solución con sulfato de aluminio	79
Tabla 19 Segundo ensayo para el HidroCalcio 17-18% en solución con sulfato de aluminio	79
Tabla 20 Tercer ensayo para el HidroCalcio 17-18% en solución con sulfato de aluminio	79
Tabla 21 Primer ensayo para el HidroCalcio 20-21% en solución con sulfato de aluminio	80
Tabla 22 Segundo ensayo para el HidroCalcio 20-21% en solución con sulfato de aluminio	80

Tabla 23 Tercer ensayo para el HidroCalcio 20-21% en solución con sulfato de aluminio	80
Tabla 24 Costo de mantenimiento tanques de cal año 2 023	81
Tabla 25 Costos de mantenimiento tanques de cal enero a septiembre del año 2 024	82
Tabla 26 Costos de mantenimientos preventivos máquinas dosificadoras año 2 023	82
Tabla 27 Costos de mantenimiento correctivo máquinas dosificadoras año 2 023	83
Tabla 28 Costos mantenimiento preventivo de máquinas dosificadoras de enero a septiembre 2 024	84
Tabla 29 Costos de mantenimiento correctivo enero a septiembre 2 024	85

RESUMEN

El presente trabajo de grado se enfocó en la estandarización del uso de hidróxido de calcio como agente alcalinizante en el proceso de potabilización de agua en la Planta El Dorado de la Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAAB), así como la evaluación de productos químicos alternativos para esta función. El estudio se desarrolló con el objetivo de mejorar la aplicación de la cal en el proceso de estabilización del pH en el tratamiento de potabilización del agua y encontrar alternativas efectivas.

El trabajo incluyó una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con el uso de hidróxido de calcio en el tratamiento de agua y la identificación de otros productos químicos que podrían cumplir una función similar. Asimismo, se realizó una breve investigación sobre las propiedades fisicoquímicas estudiadas en diferentes lugares de Colombia y el mundo con el fin de conocer antecedentes del estudio de la estabilización del pH en agua potable.

Se diseñaron experimentos para comparar el desempeño del hidróxido de calcio con otros productos alternativos en términos de alcalinidad, pH, turbiedad y color.

Palabras clave: Alcalinidad, pH, potabilización, solubilidad, calidad, suspensión, neutralización.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el proceso de potabilización del agua es uno de los más importantes dentro de la calidad de vida de los seres humanos. Este proceso tiene como finalidad la producción de agua con características fisicoquímicas adecuadas para el consumo humano. Para alcanzar las condiciones de calidad necesarias se realizan diferentes procesos químicos que alteran y regulan diferentes propiedades químicas y físicas que ocasionan que el agua proveniente de fuentes naturales no sea potable y por tanto contribuya a enfermedades digestivas o de otra índole.

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá es la empresa actualmente encargada de este proceso completamente para la ciudad de Bogotá y zonas aledañas. Esta empresa cuenta con seis (6) plantas de tratamiento de agua potable [1]. Cada una de estas plantas están localizadas en una zona diferente. La Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Dorado se encuentra ubicada al sur de la ciudad, en el municipio de “El Uval”. Esta planta se encarga de proveer agua a las localidades de San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Kennedy, Puente Aranda, Rafael Uribe Uribe y Ciudad Bolívar [2].

Actualmente, en la PTAP se suministra agua potable a la localidad de Usme con una capacidad máxima de tratamiento de $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ aunque al presente se trata $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Cuenta con un sistema de tratamiento convencional compuesto por un rebose de entrada, una canaleta parshall, cuatros grupos de floculadores-sedimentadores, doce filtros con lavado aire-agua, sedimentadores de alta tasa en acero inoxidable, un tanque de agua tratada de 3 000 metros cúbicos y un sistema de supervisión y control para todo el proceso de tratamiento.[3]

Parte importante de la efectividad del proceso de potabilización es garantizar que el pH del agua sea estable, por lo cual se utiliza hidróxido de calcio en dos partes del proceso: Al iniciar, antes de la sedimentación, y al finalizar, después de la desinfección. Esto se realiza con el fin de cumplir con los parámetros de las normativas de los entes de control y adicionalmente, puede eliminar ciertos contaminantes presentes en el agua y remoción de color aparente. A lo largo del tiempo, la demanda de agua a nivel mundial exige avances e ideas innovadoras en el tratamiento de aguas en donde se mantenga en prioridad el desarrollo sostenible, sustentable y la salud pública, por lo que se ha detectado un desequilibrio en la cantidad de hidróxido de calcio en el agua a través de los controles diarios, lo que ha causado obstrucciones en las tuberías y una acumulación excesiva en las superficies de los equipos.

La obstrucción de las tuberías ocurre debido a la precipitación de hidróxido de calcio que se

forma cuando la solubilidad del producto es excedida. Este problema se ve agravado por la baja solubilidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en agua, lo que puede conducir a la precipitación de sólidos insolubles que obstruyen el flujo en el sistema de distribución. La sobredosificación de cal puede agravar esta situación, al introducir cantidades excesivas de hidróxido de calcio, resultando en una acumulación significativa en las tuberías y equipos. Esta acumulación se ve de forma física en las tuberías en forma de carbonato de calcio causado por la presencia de dióxido de carbono del ambiente (figura 1 y 2) y causa que se reduzca la eficiencia del sistema de tratamiento e incrementa los costos de mantenimiento debido a la necesidad de limpieza frecuente y reparaciones en aproximadamente un 30% debido a que se reducirían potencialmente los mantenimientos preventivos de los tanques anualmente a uno mensual.

Figura 1

Formación de carbonato de calcio en tanque de agitación



Nota. *Formación de carbonato de calcio por exceso de cal en tanque de agitación*

Figura 2

Formación de carbonato de calcio por exceso de cal en tuberías



Nota. Formación de carbonato de calcio por exceso de cal en tuberías

Actualmente la dosificación de cal implementada en la PTAP El Dorado se basa en la turbiedad del agua cruda; los operarios utilizan de 4 a 5 bultos de hidróxido de calcio por turno de 8 horas dependiendo si el agua está turbia o no. Al ser este un proceso continuo se requiere de 3 turnos diarios, lo que corresponde a 15 bultos de cal aproximadamente que indica una dosificación de 18 750 mg/L dentro del tanque en el que se prepara la lechada de cal que tiene una capacidad de 20 m³ aproximado. Entendiendo que se agrega hidróxido de calcio de manera constante, se calcula que se están agregando alrededor de 11 625 kg diarios al tanque para regular el pH del agua cruda en el pre-tratamiento. Sin embargo, en el mantenimiento mensual que se realiza a los tanques de mezcla, se recolecta alrededor de 5 a 10 kg de insolubles, los cuales se quedan al fondo de este sin reaccionar.

Este problema representa un desafío en el proceso de potabilización porque afecta el pH de la fuente hídrica debido a la solubilidad y tiempos de agitación empleados en la mezcla de cal con agua filtrada. Por ende, esta investigación busco estandarizar el uso de la cal hidratada en la PTAP El Dorado y evaluar productos similares que cumplan la misma función, con el objetivo de comparar cuál es el óptimo en el tratamiento a través de la relación costo-beneficio. La

investigación pretende identificar un enfoque más eficiente que minimice la obstrucción de tuberías y la sobredosificación de cal, mejorando así el proceso de tratamiento y reduciendo los costos asociados con el mantenimiento general, aplicando una correcta dosificación para evitar costos de mantenimiento que podrían evitarse al prevenir la formación de insolubles que se sedimenten en el fondo y obstruyan el paso de la disolución al agua cruda.

OBJETIVOS

Objetivo general

Estandarizar el proceso de alcalinización mediante el análisis experimental con sustancias estabilizadoras en el tratamiento de agua potable de la PTAP El Dorado.

Objetivos específicos

1. Caracterización de agua cruda y de cada etapa del proceso por medio de propiedades fisicoquímicas.
2. Establecer el efecto de diferentes alcalinizantes en el proceso de potabilización en la PTAP El Dorado.
3. Analizar los costos del estabilizante en el proceso según condiciones de desempeño.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Marco teórico

El hidróxido de calcio actualmente desempeña un papel indispensable en diversos ámbitos debido a sus propiedades químicas. Es ampliamente utilizado en sectores como la industria metalúrgica, petroquímica, alimentaria entre otros. Además, destaca su uso común en el tratamiento y purificación de aguas.

Actualmente, se enfrenta un desafío significativo en la PTAP Dorado debido a que el exceso de dosificación de hidróxido de calcio sumado a su valor de solubilidad en agua implica problemas de precipitación de material particulado y aumento en la turbidez porque la solución se encuentra sobresaturada evitando así la reacción del mismo. Este sólido resultante se adhiere a las paredes de las tuberías y al tanque donde se encuentra en disolución, causando pérdidas de materia prima, especialmente debido a la dosificación desproporcionada. Por lo tanto, surge la necesidad de mejorar su eficiencia a través de la estandarización del procedimiento y la investigación de nuevos alcalinizantes con características adecuadas para el proceso. Esto se vuelve aún más relevante debido a eventos externos, como la guerra entre Rusia y Ucrania en 2022 porque Ucrania es uno de los países exportadores de materias primas químicas produciendo el alza en los precios de la cal de tres a cinco veces más costosa de lo habitual. La crisis resultante de la escasez de materias primas podría haber provocado un posible desabastecimiento de agua en la ciudad, incumpliendo con la normativa establecida por el Ministerio de Salud. Además, es fundamental evaluar la viabilidad económica de una transición a productos alternativos que optimicen la rentabilidad y sean más sostenibles tanto para el medio ambiente como para la salud ocupacional. Adicionalmente, los fenómenos de incrustación representan desafíos importantes en la producción de agua potable porque pueden afectar la calidad de las tuberías de distribución de agua a la comunidad y aumentar los costos de tratamiento. Las tuberías utilizadas para el suministro de hidróxido de calcio al proceso son de material PVC, por ende, las incrustaciones generadas por esta base conllevan a una acumulación de producto que a través del tiempo reduce el diámetro efectivo de la tubería y obstruye el flujo de la solución. Adicionalmente, puede aumentar la presión en el conducto provocando rupturas repentinas, reduciendo la eficiencia del proceso y deterioro en la infraestructura. Para abordar estas problemáticas, es necesario seleccionar materiales adecuados, implementar programas de monitoreo y mantenimiento, y modificar las características químicas del agua. [21]

La consideración de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) también es fundamental en este proyecto porque proporcionan un marco para el desarrollo de soluciones que contribuyan a un suministro de agua seguro, sostenible y accesible para todos. Específicamente, el objetivo 6 "Agua Limpia y Saneamiento" y el objetivo 9 "Industria, Innovación e Infraestructura" son particularmente relevantes para el tratamiento de agua potable. El objetivo 6 se centra en mejorar la calidad del agua y reducir la contaminación, mientras que el objetivo 9 aborda la necesidad de modernizar la infraestructura y promover procesos industriales sostenibles. En este contexto, el buen uso de recursos y la optimización de procesos son aspectos clave para mejorar la sostenibilidad ambiental y económica. Dentro de las propiedades importantes a tener en cuenta para realizar los diferentes estudios son la solubilidad y la constante de solubilidad k_{ps} . La solubilidad del hidróxido de calcio es una de las propiedades más particulares de esta base porque esta propiedad varía dependiendo de la temperatura como lo indican los datos de la tabla 1.

Tabla 1

Solubilidad del hidróxido de calcio a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Solubilidad (g/L)
0	1.89
10	1.73
20	1.73
30	1.54
40	1.39
50	1.30
60	1.16
70	1.05
80	0.92
90	0.83
100	0.77

Nota. Solubilidad del hidróxido de calcio a diferentes temperaturas Tomado de: Hidróxido de calcio (Ca(OH)₂): estructura, propiedades, obtención, usos.[7]

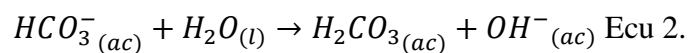
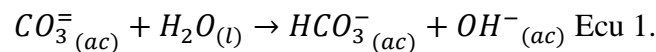
La tabla 1 expresa la solubilidad del hidróxido de calcio en diferentes temperaturas desde 0 hasta 100 °C. Esto explica que, cuando un sistema experimenta una alteración en sus condiciones (concentración, temperatura o presión), el sistema se adaptará para restituir el equilibrio y compensar esa variación.

Otras de las propiedades para tener en cuenta a lo largo de este estudio es la turbiedad, la

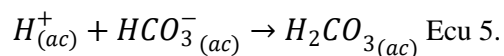
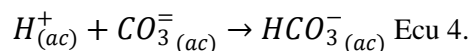
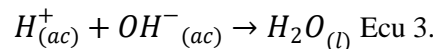
alcalinidad, el color y pH. La turbiedad, Es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión. Puede ser ocasionada por una cantidad de material en suspensión en donde varía su tamaño, desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas en las cuales se incluyen arcillas, limos provenientes de la erosión, materia orgánica e inorgánica que son el resultado de los sedimentos transportados por el agua. [9]

La alcalinidad de un agua puede definirse como la capacidad que tiene para neutralizar ácidos y a su vez evitar cambios extremos de pH. Su determinación es importante para los procesos de coagulación química, ablandamiento, control de corrosión y evaluación de la capacidad buffer de un agua. En el ablandamiento del agua por métodos de precipitación, la alcalinidad es un dato necesario para el cálculo de la cantidad de cal y carbonato de calcio necesarios para el proceso.

La alcalinidad del agua se determina por método titulométrico con ácido sulfúrico 0.02N. Los iones H^+ procedentes de la solución de H_2SO_4 neutralizan los iones OH^- libres y los disociados por concepto de la hidrólisis de carbonatos y bicarbonatos dando como resultado las siguientes reacciones: [9]



En la titulación, los iones del hidrógeno que contiene el ácido reaccionan con la alcalinidad de acuerdo con las ecuaciones dadas a continuación:



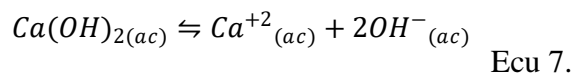
El color se define como la apreciación visual que incluye no solamente el color de las sustancias en solución y coloides sino también el color de material suspendido que existe principalmente por la presencia de hierro y manganeso disuelto, hojas, tierra y residuos industriales, siendo este el denominado color aparente. Sin embargo, existe también el color verdadero el cual es el color de una muestra que ya se le ha removido su turbidez. La unidad de esta medición es producida por un mg/L de platino, en forma de ión cloroplatinato.[9]

Finalmente, el pH, es una medida para determinar el grado de alcalinidad o acidez de una disolución que está dado por la concentración de ion hidrógeno en un cuerpo de agua. Recordando

que se tiene un valor establecido como neutro para el potencial de hidrógeno siendo dicho valor 7, se debe considerar que a valores más altos del ya mencionado el agua se denomina como ácida mientras que por otro lado si es menor es denominada alcalina. Para calcular esta variable se ejecuta la siguiente ecuación:

$$pH = -\log[H^+] \text{ Ecu 6.}$$

En el caso específico de la reacción del hidróxido de calcio se da de la forma:



En particular, el efecto de la temperatura depende de la entalpía de la reacción, es decir, a medida que la temperatura disminuye aumenta la solubilidad, por consiguiente, es importante saber que para 25°C el valor de la entalpía es de -17.58 kJ/mol . [20]

En la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Dorado, la dosificación y preparación de cal están directamente condicionadas por la calidad del agua proveniente del embalse La Regadera. Este enfoque se alinea con la perspectiva de Nordell, quien propone que los cálculos para la dosificación de cal deben considerar la composición específica del agua y la naturaleza del efluente, utilizando reacciones derivadas de la adición de hidróxido de calcio.[22]

Estas reacciones incluyen la formación de carbonato de calcio ($CaCO_3$), responsable principal de las incrustaciones en los equipos de dosificación de cal, donde el $Ca(OH)_2$ hidratado reacciona con el CO_2 atmosférico para producir $CaCO_3$. [23] Además, el estudio de grado "Caracterización de las tomas de agua del sistema Morning Glory en el embalse La Regadera" realizado por Paula Veloza y Santiago Becerra en la Universidad de América proporciona datos recientes sobre la calidad del agua durante el primer semestre de 2023, incluyendo análisis fisicoquímicos que son fundamentales para el presente proyecto.

Según el IDEAM en su texto "PSO Determinación de Alcalinidad Por Potenciometría", la alcalinidad del agua es la capacidad para neutralizar ácidos mediante la suma de las bases titulables.[24] Principalmente esta propiedad está determinada por carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos en aguas superficiales, y también puede contribuir con boratos, fosfatos, silicatos u otras bases presentes. La construcción de una curva de titulación es esencial para determinar con precisión la alcalinidad respecto a cualquier pH de interés. En titulaciones simples, el punto de inflexión de la curva proporciona el punto con mayor certeza, mientras que, en mezclas complejas, identificar puntos de inflexión precisos puede resultar difícil, optándose entonces por un punto

final de pH arbitrario por razones prácticas. Para mediciones rápidas o control rutinario, el cambio de color de un indicador se utiliza comúnmente como punto final, siendo crucial para evaluar la calidad del agua y su idoneidad para diversos usos acuáticos y humanos. Esto da una guía y razón suficiente para entender que la alcalinidad del agua potable es crítica en su potabilización debido a varios factores clave. Primero, indica la capacidad del agua para neutralizar ácidos, crucial para mantener un pH seguro y prevenir la corrosión en sistemas de distribución. Además, permite ajustar los procesos de tratamiento químico y físico para optimizar la purificación del agua. Es un indicador importante de contaminantes inorgánicos y otros constituyentes disueltos, favoreciendo la detección de posibles riesgos para la salud. Mantener niveles adecuados de alcalinidad asegura la estabilidad del agua tratada a lo largo del sistema de distribución y garantiza el cumplimiento de normativas sanitarias, asegurando que el agua sea segura para el consumo humano en todos los aspectos.[8]

Según el libro "Water Quality for Ecosystem and Human Health" [25], la gestión de la calidad del agua contribuye directamente a alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) enfocados en la sostenibilidad ambiental. Utilizando indicadores relacionados con la calidad del agua, es posible evidenciar el progreso hacia la consecución de estas metas mediante el seguimiento de tendencias temporales y geográficas. La contaminación del agua, que impide su uso seguro para consumo humano, higiene, actividades industriales y agrícolas, reduce considerablemente la disponibilidad de agua en áreas específicas. Además, la alcalinidad se define como la capacidad de amortiguación del agua frente a cambios en su pH, facilitada por compuestos alcalinos como bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, que neutralizan los iones H^+ y reducen la acidez del agua. Un factor determinante de la alcalinidad radica en los sedimentos de la cuenca, cuyas características se ven influenciadas por actividades tanto naturales, como la erosión del suelo y aquellas de procedencia antropogénicas (agricultura intensiva, silvicultura, efluentes industriales y floraciones de fitoplancton). [13]

Desde la perspectiva de Bustos y Silva [26], el tratamiento del agua representa una de las estrategias más fundamentales y antiguas para proteger la salud pública. Esto se debe a que las fuentes naturales de agua están naturalmente cargadas con diversas sustancias orgánicas e inorgánicas. La presencia y concentración de estas impurezas varían significativamente entre diferentes tipos de fuentes de agua, como ríos, embalses y acuíferos, cada uno con su propia calidad característica. Es esencial destacar que las plantas de tratamiento han sido meticulosamente

diseñadas para mejorar la calidad del agua antes de que sea distribuida a los consumidores. Durante este proceso, se lleva a cabo la remoción de impurezas que incluyen microorganismos, minerales y otras sustancias que podrían comprometer tanto la seguridad como la calidad organoléptica del agua para el consumo humano. Este enfoque no solo asegura que el agua sea segura y potable, sino que también cumple con estándares de calidad que garantizan su uso adecuado en las actividades industriales y agrícolas, promoviendo así un ambiente más saludable y sostenible para la comunidad en general.[15] Estas vías de contaminación son comunes debido a que, al ser una zona rural en donde se hace presente actividades como pastaje ganadero, cultivo de papa, cebolla, fresas, zanahoria, entre otras, se facilita la proliferación y dispersión de patógenos en la fuente de agua.

En el informe técnico de Rendón, Rivas y Linares “Sistema para ajuste de pH en precal y poscal en las Plantas de Tratamiento de la Empresa Aguas y Aguas Pereira” [10], se describe un sistema diseñado para controlar y ajustar el pH en las etapas de precal y poscal en las plantas de tratamiento de agua de la empresa “Aguas y Aguas Pereira”. El sistema implementado buscó optimizar el proceso de tratamiento del agua mediante la regulación precisa del pH en fases críticas, utilizando tecnología avanzada para garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad requeridos. El texto detalla la metodología utilizada para el ajuste del pH, así como los beneficios de implementar un sistema de control efectivo en la planta de tratamiento. Rendón, Rivas y Linares mencionan dentro de sus resultados que, la concentración óptima para la preparación inicial del hidróxido de calcio debe estar entre el 1.0% y el 3.0%. Concentraciones inferiores a este rango no proporcionan suficiente componente activo para el ajuste del pH, mientras que concentraciones superiores al 3.0% superan la solubilidad del producto y generan costos de producción adicionales. [10]

Finalmente, en su trabajo de grado titulado “Modelo para la dosificación de cal en la planta Weisner”, Felipe Noreña profundiza en los principios fundamentales de la dosificación de cal en plantas de tratamiento de agua. Noreña destaca cómo a lo largo de los años se han explorado y refinado diversos métodos en este proceso. Un aspecto central de su investigación es la comprensión detallada de las reacciones químicas intrínsecas al agua, las cuales son fundamentales para calcular con precisión la dosificación óptima de cal. El autor explora cómo estas reacciones químicas, al interactuar con los componentes del agua, facilitan el desarrollo de modelos y algoritmos que optimizan la dosificación de cal. [27] Este enfoque no solo mejora la eficiencia

del tratamiento de agua, sino que también contribuye a la gestión efectiva de recursos al reducir los desperdicios y optimizar los procesos de tratamiento. Noreña subraya la importancia de adaptar continuamente los métodos de dosificación de cal para responder a las variaciones en la composición del agua y a las necesidades específicas de cada planta de tratamiento. Su investigación representa un avance significativo en el campo, proporcionando herramientas prácticas y teóricas para mejorar la calidad del agua tratada y garantizar su adecuada distribución a los consumidores finales. [15]

1.1. Proceso de potabilización del agua

La potabilización del agua consiste en una serie de procesos físicos y químicos a los que se somete este líquido para que pueda ser consumida por el ser humano sin riesgos a la salud. Estos procesos implican el tratamiento de agua superficial de lugares como embalses, ríos, entre otras fuentes de agua natural. Este proceso completo es de suma importancia para la sociedad en general puesto que, al potabilizar el agua, se eliminan o reducen los riesgos de contraer enfermedades relacionadas con el agua, lo que contribuye a mejorar la calidad de vida y reducir la carga de enfermedades en la población, especialmente en áreas donde el acceso a agua potable segura es limitado. Esto también garantiza el acceso equitativo al agua potable para todas las personas, independientemente de su ubicación geográfica, nivel socioeconómico o situación de vida. Esto es esencial para promover la igualdad y los derechos humanos básicos. El proceso de potabilización de agua en la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Dorado es:

1.1.1. Captación

Se realiza la extracción del agua proveniente del embalse la Regadera (figura 3) y Chisacá. Esta planta cuenta con una capacidad máxima de tratamiento de $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$, en la que se tratan $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$. [3]

Figura 3

Embalse la Regadera



Nota. Embalse la Regadera, localidad de Usme Tomado de: Empresa de Acueducto de Bogotá. (Consultado el 18 de mayo de 2024). “Plantas de tratamiento.” Recuperado de: [acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/plantas-de-tratamiento](#)

Pretratamiento: Se utiliza una malla grande con el fin de atrapar todo tipo de ramas, peces y objetos contaminantes de gran tamaño (figura 4). Se utilizan habitualmente con un tamaño de apertura entre 10 y 100 mm.

Figura 4

Cámara de entrada del agua cruda



Nota. Cámara de entrada del agua cruda en la PTAP

Tratamiento: Consta de un rebose de entrada en la que entra el agua. En esta parte del proceso se aplica cal como estabilizante de pH, porque es importante para el proceso de coagulación debido a que la cal favorece la producción de flóculos. La cal que se proporciona es en forma de solución, la cual se realiza solamente con agua en un tanque como el que se observa en la figura 5. La máquina dosificadora (figura 6) es la encargada de proporcionar la cal al tanque y con ayuda de un mezclador se puede homogeneizar la mezcla. Finalmente, la figura 7 ilustra el punto de aplicación de la solución de cal previamente a la aplicación del sulfato de aluminio.

Figura 5

Tanque de mezcla de hidróxido de calcio con agua



Nota. Tanque de mezcla de hidróxido de calcio con agua para la producción de lechada

Figura 6

Máquina dosificadora de hidróxido de calcio



Nota. Máquina dosificadora de hidróxido de calcio al agua para la producción de lechada

Figura 7

Punto de aplicación de lechada



Nota. Punto de aplicación de lechada al agua cruda

1.1.2. Coagulación

Se adiciona sulfato de aluminio líquido almacenado en un tanque (figura 8) o granular el cual es un coagulante que se emplea con frecuencia en el tratamiento para la eliminación de partículas suspendidas y sustancias coloidales en el agua.

Figura 8

Tanque de almacenamiento de Sulfato de Aluminio



Nota. Tanque de almacenamiento de Sulfato de Aluminio líquido

En ocasiones se utilizan ambos o de forma separada, dependiendo de factores como la turbiedad, disponibilidad de insumos, entre otros. Este se aplica directamente al agua cruda directamente a través de una canaleta parshall con una tubería tipo flauta (figura 9).

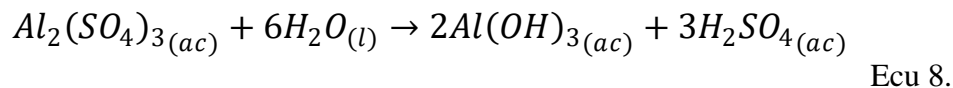
Figura 9

Canaleta parshall



Nota. Canaleta parshall con tubería tipo flauta

El sulfato de aluminio, al ser una sal derivada del ácido sulfúrico reacciona con el agua produciendo la reacción:

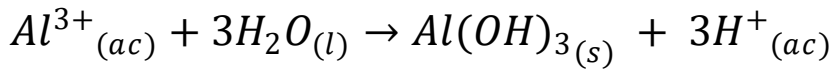


El mecanismo de acción del sulfato de aluminio en estos procesos comienza con su disociación al ser añadido al agua, generando iones de aluminio Al^{3+} y sulfato SO_4^{2-} . Los sólidos suspendidos en el agua, que incluyen materia orgánica, arcillas y microorganismos, suelen presentar cargas superficiales negativas, lo que provoca una repulsión electrostática que los mantiene en suspensión. Los iones Al^{3+} , con una fuerte carga positiva, actúan neutralizando las cargas negativas de las partículas suspendidas, reduciendo así la repulsión electrostática entre ellas.

1.1.3. Floculación

Es la continuación del proceso de coagulación, debido a que en este se realiza la agitación del agua con el sulfato de aluminio, provocando la aglomeración y agrupación de flóculos en partículas de mayor tamaño que se sedimentan. Durante estos procesos se utilizan cuatro grupos de floculadores-sedimentadores (figuras 10 y 12), en los que inicialmente se producen

iones de aluminio (Al^{3+}) que reaccionan con el agua, formando hidróxido de aluminio como se muestra en la siguiente reacción:



Ecu 9.

Figura 10

Floculadores



Nota. Floculadores empleados en la PTAP El Dorado

Por consiguiente, esos hidróxidos de aluminio generan una especie de flóculo. Estos se agrupan para formar estructuras más grandes y densas, lo que facilita su sedimentación bajo la influencia de la gravedad. Es fundamental que la agitación sea lenta para evitar la ruptura de los flóculos, como se observa en la Prueba de Jarras. (figura 11). En este punto se obtiene el agua clarificada con un porcentaje promedio de remoción del 86% [14], puede ser extraída de la parte superior de los sedimentadores y enviada a etapas posteriores de tratamiento, como filtración y desinfección; en este punto el agua de proceso está libre de la mayoría de los sólidos suspendidos.

Figura 11

Floculación en test de jarras



Nota. Ejemplo de floculación en test de jarras empleando sulfato de aluminio a 40 ppm

1.1.4. Sedimentación

Se utilizan sedimentadores de alta tasa en acero inoxidable debido a su capacidad para acelerar el proceso de separación de sólidos y líquidos (figura 12). Estos sedimentadores están diseñados para manejar grandes volúmenes de agua con altas concentraciones de sólidos suspendidos, permitiendo que los flóculos, que son conglomerados de partículas coaguladas, se depositen rápidamente en el fondo del tanque. La elección del acero inoxidable es crucial, ya que ofrece una excelente resistencia a la corrosión y durabilidad, lo que asegura un rendimiento fiable y una larga vida útil del equipo. Además, el acero inoxidable es fácil de limpiar y mantener, lo que contribuye a la eficiencia operativa y a la reducción de los costos de mantenimiento.

En el proceso de sedimentación, el agua clara que se encuentra en la parte superior del tanque de sedimentación es cuidadosamente extraída y dirigida hacia el siguiente paso del tratamiento: la filtración. Esta agua clarificada, libre de la mayoría de los sólidos suspendidos, sigue su camino hacia los filtros. Los sedimentadores de alta tasa mejoran significativamente la eficiencia de la planta de tratamiento, puesto que permiten un mayor flujo de agua a través del sistema con una calidad de salida superior. Esto resulta en una producción de agua potable que cumple con los estándares de calidad, asegurando un suministro constante y seguro para los usuarios finales. [3]

Figura 12

Sedimentadores



Nota. Sedimentadores empleados en la PTAP El Dorado

1.1.5. Filtración

Se lleva a cabo con doce filtros convencionales en el que se remueven las partículas más pequeñas que no pudieron adherirse a los flóculos más grandes. Se utiliza un lecho filtrante de tipo grueso y alta profundidad el cual está compuesto por una capa de antracita que alcanza una profundidad de 1.1 metros como se muestra en la *Figura 13*, lo que permite una mayor capacidad de retención de contaminantes y una eficiencia mejorada en el proceso de filtración. La antracita utilizada tiene un tamaño efectivo de 1.4 mm, lo que indica el diámetro de las partículas, que permiten el paso del 10% en peso del material, y un coeficiente de uniformidad de 1.35, que mide la distribución de tamaño de las partículas y asegura una estructura uniforme y óptima para la filtración. Estos parámetros específicos de la antracita contribuyen a su capacidad para remover partículas finas y mejorar la calidad del agua tratada.

Este proceso garantiza la eliminación completa de impurezas suspendidas en el agua porque la antracita tiene un tamaño de partícula adecuado que permite la retención de partículas sólidas en suspensión y permite el paso del agua. Así mismo, la antracita tiene una alta resistencia a la descomposición química, lo que garantiza su vida útil y estabilidad en diferentes condiciones. Su capacidad para retener partículas finas hace que sea altamente eficiente en la remoción de sólidos

y contaminantes del agua. Además, su durabilidad y resistencia reducen la necesidad de reemplazo frecuente, lo que disminuye los costos de mantenimiento del sistema de filtración.[11]

Figura 13

Filtración con Antracita

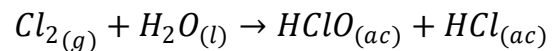


Nota. Filtración con Antracita en la PTAP El Dorado

1.1.6. Desinfección

Se inyecta cloro gaseoso a través de una cámara de contacto controlada por válvulas de medición, a una concentración de 2ppm y un flujo de 4.125 kg/h para un caudal aproximado de 570 L/s de agua a tratar. Al entrar en contacto con el agua produce ácido hipocloroso y ácido clorhídrico, causando que el ácido hipocloroso actúe como agente desinfectante para eliminación de virus, bacterias y microorganismos patógenos (figuras 14 y 15).

La reacción presente para el cloro con el agua se expresa de la forma:



Ecu 10.

Figura 14

Panel de cloración



Nota. Panel de cloración empleado para la inyección de cloro gaseoso en la PTAP El Dorado

Figura 15

Punto de mezcla del Cloro gaseoso



Nota. Punto de mezcla del Cloro gaseoso con el agua filtrada

Las bacterias, los protozoos, los virus y las algas son ejemplos de microorganismos que pueden estar presentes en el agua, los cuales pueden causar graves problemas de salud pública si no se erradican de forma óptima durante el tratamiento de potabilización. Estos microorganismos ingresan al agua a través de diversas fuentes, como lo son los ríos que alimentan el embalse La Regadera que pueden llegar a contener desechos humanos y animales, aguas residuales de las fincas limítrofes y arrastre de tierra.

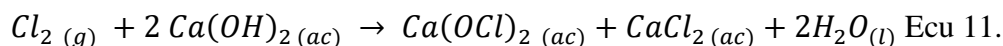
Una vez que estos microorganismos entran en contacto con el agua destinada al consumo humano, pueden causar una amplia gama de enfermedades. Las infecciones pueden variar desde enfermedades leves, como gastroenteritis, hasta afecciones graves y potencialmente fatales, como el cólera, la fiebre tifoidea y la hepatitis. Los síntomas de estas enfermedades a menudo incluyen diarrea, vómitos, fiebre y deshidratación, lo que puede ser especialmente peligroso para grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con sistemas inmunitarios debilitados.

Para evitar la propagación de esas enfermedades, es fundamental tratar y potabilizar adecuadamente el agua. Esto implica la implementación de medidas rigurosas de tratamiento de agua, que pueden incluir la filtración para eliminar partículas y microorganismos, la

desinfección con cloro u otros agentes químicos para eliminar agentes patógenos, la ozonización, y el uso de luz ultravioleta para destruir el ADN de los microorganismos. Además, es crucial mantener un monitoreo constante de la calidad del agua para detectar y eliminar cualquier contaminación de manera oportuna.

La educación de las comunidades sobre la importancia de la higiene y el saneamiento es igualmente vital. Las prácticas adecuadas de manejo de residuos, como el uso de letrinas y la correcta disposición de desechos animales, pueden reducir significativamente la carga de patógenos en el medio ambiente. Asimismo, asegurar el acceso a instalaciones sanitarias adecuadas y fomentar el lavado de manos con jabón son medidas simples pero efectivas para prevenir la transmisión de enfermedades. [15]

Es importante destacar que, en el punto de desinfección, el agua ya ha pasado aproximadamente por el 90% del proceso de potabilización en el cual como se menciona en el numeral 1.2.1, se le adiciona hidróxido de calcio que al reaccionar con el cloro gaseoso se forma hipoclorito de calcio que es el agente desinfectante activo y dicha reacción es expresa de la siguiente forma:



Los iones hipoclorito (OCl^-) son altamente efectivos para destruir una amplia variedad de patógenos presentes en el agua, incluyendo bacterias, virus y protozoos. Estos iones actúan oxidando las paredes celulares y otros componentes esenciales de los microorganismos, lo que resulta en su eliminación.

La eficiencia del hipoclorito de calcio asegura que el agua tratada sea segura para el consumo humano y reduce significativamente el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. El hipoclorito de calcio puede ser utilizado en una amplia gama de sistemas de tratamiento de agua, desde pequeñas unidades domésticas hasta grandes plantas municipales. Su aplicación flexible lo hace adecuado para diversas condiciones de agua y necesidades de tratamiento, adaptándose fácilmente a diferentes escalas y configuraciones. Esta versatilidad facilita su adopción en comunidades rurales, zonas urbanas y aplicaciones industriales, garantizando el acceso a agua potable segura en múltiples contextos.

En términos de consideraciones operativas, es esencial mantener un control riguroso del pH, porque la reacción entre el hipoclorito de calcio y el hidróxido de calcio puede provocar un incremento en el pH del agua tratada. Mantener el pH en un rango aceptable (generalmente entre 7

y 8) es crucial para asegurar el máximo rendimiento desinfectante del hipoclorito y para prevenir la incrustación de las tuberías y otros equipos. El monitoreo continuo y la adición de agentes neutralizantes, si es necesario, son prácticas recomendadas para mantener el pH adecuado y garantizar la calidad del agua.

Finalmente, la presencia de materia orgánica en el agua influye de manera significativa en el consumo de cloro durante el proceso de potabilización. La materia orgánica reacciona con el cloro, aumentando la demanda de este agente oxidante para lograr la oxidación completa de los contaminantes presentes. Cuanta más materia orgánica haya en el agua, mayor será la cantidad de cloro requerida para lograr una desinfección efectiva. cuando el cloro reacciona con la materia orgánica natural, se pueden formar subproductos de desinfección (DBPs) como trihalometanos (THMs) y ácidos haloacéticos (HAAs) que se encuentran actualmente regulados estrictamente por las normas de calidad del agua potable. La formación de DBPs obliga a un control y monitoreo más riguroso de los niveles de cloro y de los subproductos formados. Debido a estos efectos adversos, es común implementar procesos como los descritos en los numerales 1.2.1. a 1.2.5. porque ayudan a eliminar una parte significativa de esta materia orgánica. [12]

1.1.7. Estabilización

Finalmente, se lleva a cabo una estabilización del agua, un proceso crucial para asegurar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad requeridos. Durante esta etapa, se añade cal al agua, lo que permite regular el pH y ajustarlo a los niveles necesarios. La cal, al reaccionar con el agua, aumenta la alcalinidad, neutralizando ácidos presentes y evitando las incrustaciones en las tuberías de distribución. Este ajuste del pH no solo protege la infraestructura, sino que también mejora la potabilidad del agua, asegurando que sea segura y agradable para el consumo humano.

Además de la regulación del pH, la estabilización con cal asegura que el agua tratada cumpla con las normas técnicas establecidas en el marco legal vigente. Estas normas especifican los rangos aceptables de pH y otros parámetros químicos, garantizando que el agua distribuida sea segura y de alta calidad. La adición de cal también ayuda a precipitar y remover algunos contaminantes residuales, contribuyendo a una mayor claridad y pureza del agua. Este paso final en el tratamiento del agua es esencial para cumplir con los requisitos legales y asegurar la confianza de los consumidores en la seguridad del agua potable suministrada.

Después de cada etapa del proceso, se llevan a cabo análisis diarios para verificar que el agua de entrada y salida cumpla con los estándares establecidos por la normativa legal vigente que

se muestran en la tabla 2, lo que permite evaluar la efectividad de las operaciones realizadas y comparar los resultados.

Tabla 2

Condiciones óptimas del agua potable

Características físicas			
Descripción	Máximo	Mínimo	Unidad
pH	8,1	6,5	N/A
Turbiedad	2	-	UPC
Oxígeno disuelto	70%		Concentración de saturación
Conductividad	1000	-	μS/cm
Color	15	-	UNT
Características químicas			
Dureza total	300	-	mg/L
Manganeso	0,1	-	mg/L
Aluminios	0,2	-	mg/L
Cloro residual	2,0	0,3	mg/L
Nitritos	0,1	-	mg/L
Alcalinidad	200	-	mg/L
Cloruros	250	-	mg/L
Hierros	0,3	-	mg/L

Nota. Condiciones óptimas del agua potable establecidas por el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Tomado de Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial y ministerio de protección social [6]

Además de esto, se verifica el pH del agua para asegurar que se haya utilizado la cantidad adecuada de coagulante o cloro para su correcto tratamiento. Por medio de estos análisis se pueden identificar a tiempo fallos en el proceso, a través de los valores arrojados en los parámetros de control.

Una proporción incorrecta de estabilizante Ca(OH)_2 , provoca obstrucciones en las tuberías y una acumulación excesiva en las superficies de los equipos asociados que puede influir en el resultado del proceso. Este fenómeno se atribuye a la baja solubilidad del Ca(OH)_2 y a su dosificación inapropiada. Este problema representa un desafío a nivel operacional porque el pH del agua puede variar debido a varios factores, y se requiere de un estabilizador para cumplir con

los estándares de calidad de agua potable establecidos por la Resolución 2 115 de 2 007, donde se especifica que el pH aceptable oscila entre 6.5 y 9.0 [6]. Esto subraya la importancia de tomar decisiones fundamentadas sobre la cantidad adecuada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dado que esta tiene un impacto directo en la formación indirecta de CaCO_3 .

2. METODOLOGÍA

2.1. Estrategia de trabajo: Primer objetivo específico

2.1.1. Selección de ubicaciones para toma de muestras

Para elegir las ubicaciones de toma de muestras se partió de la base de que, directamente en la EAAB se cuenta con varios puntos en los que se toman regularmente datos como pH y turbiedad. La cámara de rebose es el punto más crucial ya que es desde donde se obtiene el agua cruda directamente del embalse donde se toman pH y turbiedad iniciales.

2.1.2. Establecimiento de análisis fisicoquímicos a realizar (pH, turbiedad, color, alcalinidad)

Dentro de los análisis que se requirieron para garantizar la calidad del agua están pH, turbiedad, color y alcalinidad. Esto se debe a que, en el caso del pH, si llegase a quedar el agua fuera de los estándares establecidos por el Decreto 1 575 de 2 007 del Ministerio de Protección Social: El objeto del presente decreto es establecer el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada,[5] esta sería un riesgo para la sociedad en términos de salubridad y en términos de riesgo, ya que podría verse como un agente corrosivo que afecte equipos directamente en la planta o tuberías a lo largo de la ciudad. Se utilizó un potenciómetro Hanna con rango de -2.00 a 16.00 pH, resolución de 0.01 pH y precisión ± 0.02 pH. Ligado a este parámetro se encuentra la alcalinidad o dureza del agua, ya que si esta es superior al valor establecido 8.5, puede indicar que la capacidad para neutralizar ácidos es baja y muchos de los iones hidroxilo reaccionan con calcio y magnesio presentes, generando compuestos de Calcio y Magnesio en forma de Carbonatos y Bicarbonatos. Esta se midió mediante un titulador automático Metrohm 848 titrino plus.

Referente al parámetro de turbiedad, este parámetro indica cuantas partículas suspendidas se encuentran dentro del agua. Su resultado elevado podría ser sinónimo de microorganismos o agentes contaminantes que, así como un pH elevado o muy bajo, puede ser riesgoso y causal de enfermedades o riesgos para los sistemas de distribución del agua. Se midió mediante turbidímetro portátil Hach 2 100Q para medición de turbiedad con incertidumbre ± 0.02 NTU.

Finalmente, el parámetro del color se debe medir ya que esto podría significar la presencia

de compuestos orgánicos o metálicos que pueden ser un signo de problemas en el proceso de potabilización. Este se midió mediante un espectrofotómetro Hach DR2 800.

2.2. Estrategia de trabajo: Segundo objetivo específico

2.2.1. Elección de estabilizantes a utilizar

Para la elección de los estabilizantes se consultó previamente con el proveedor HYDRO~CALCIO ya que se encargaron de ofrecer una suspensión acuosa al 17-18% y otra suspensión al 20-21%. Estas se mantuvieron en agitación constante de 100 RPM para mantenerse homogénea según recomendación de proveedor.

2.2.2. Desarrollo del diseño

Se llevó a cabo una estandarización de hidróxido de sodio 0.110 M utilizando biftalato ácido de potasio (KHP) como patrón primario. El KHP fue secado a 110°C por 24 horas y luego almacenado en un recipiente hermético para evitar su rehidratación. Se preparó una solución de hidróxido de sodio disolviendo 1.1000 g del sólido en un matraz de 250 mL. La concentración final se determinó mediante cinco titulaciones volumétricas con KHP, usando fenolftaleína como indicador, lo que permitió obtener un valor promedio preciso de la concentración de NaOH. (Ver anexo 1)

Asimismo, se realizó una estandarización de ácido clorhídrico 0.11 M, partiendo de una solución concentrada al 37% p/p. Se diluyeron 4.56 mL de esta solución en un matraz de 500 mL con agua destilada, y se extrajeron alícuotas de 15 mL para ser tituladas con el hidróxido de sodio estandarizado, usando fenolftaleína como indicador. La cantidad de base necesaria para llegar al punto final permitió calcular la concentración exacta de ácido clorhídrico en la solución original y replicarlo mediante 5 titulaciones volumétricas.

Seguido de esto y teniendo en cuenta la ficha técnica del hidróxido de calcio utilizado en la planta El Dorado de la EAAB que registra una pureza del 90%, se prepararon diferentes sistemas con concentraciones desde 0.100 g/L hasta 1.028 g/L. Las soluciones se agitaron durante un tiempo de 15, 30, 45 y 60 minutos a 100 RPM, filtrando y tomando alícuotas de 25 mL la cual se transfirió

a un matraz Erlenmeyer de 100 mL limpio. A esta alícuota se le agregó fenolftaleína y se tituló con ácido clorhídrico 0.11M hasta que se observó el viraje en la solución indicadora, lo que indicó el punto final de la titulación y permitió calcular la cantidad de hidróxido solubilizado. Este procedimiento meticuloso garantizó la estimación de la generación de hidróxido durante el tratamiento del agua.

Se dispuso la suspensión acuosa de CQ Hydro-Calcio 17-18% en una plancha de agitación magnética para evitar la precipitación y mantener una mezcla homogénea constante. Este mismo proceso se repitió para la suspensión acuosa de CQ Hydro-Calcio 20-21%, permitiendo así su aplicación en la prueba de jarras.

2.2.3. Prueba de jarras aplicada al tratamiento con hidróxido de calcio

Se realizaron pruebas de jarras para simular el procedimiento de floculación-sedimentación realizado directamente en la PTAP con el fin de ajustar las condiciones actuales de proceso con las adecuaciones que presenta esta investigación y obtener resultados lo más similar posible.

Para ello se requirió preparar una solución de sulfato de aluminio líquido al 1% de igual forma que se prepara en la PTAP (Ver anexo 2). Luego, se llenaron 6 vasos de precipitados de 1000 ml con agua proveniente directamente del embalse, también conocida como “agua cruda” la cual inicialmente se caracterizó para conocer sus datos fisicoquímicos relevantes como turbidez, color, pH y alcalinidad y se procedió a iniciar la agitación a 100 RPM durante 1 minuto para luego agregar la cal. Se realizó medición de pH y posterior se agregaron 40 mg/L de la solución de sulfato. Al pasar otro minuto de mezcla rápida se disminuyó la velocidad a 40 RPM durante 20 minutos. Pasados esos 20 minutos se apagó el equipo de jarras y se dejó 20 minutos en reposo para sedimentación. Se realizaron ensayos de turbiedad, pH, alcalinidad y color para tomar datos y registrarlos.

2.3. Estrategia de trabajo: Tercer objetivo específico

2.3.1. Determinación de producto con mayor impacto

Para la determinación del producto con mayor impacto, fue necesario realizar ensayos de jarras con un estabilizante en suspensión otorgado por Cq Ingeniería denominado HydroCalcio, con dos muestras las cuales tenían una concentración de 18-19% y 20-21% de hidróxido

de calcio respectivamente. Las dosificaciones elegidas para este insumo fueron de 44, 55 y 77 mg/L respectivamente con el fin de verificar cuál de ellas lograba un resultado de pH similar al trabajado en la planta El Dorado. Una vez añadidas al agua cruda, se midió el pH, se aplicó coagulante y se dejó sedimentar por un periodo de 20 minutos. Finalmente, se caracterizó el agua clarificada con los parámetros de control como lo son turbiedad, color, pH y alcalinidad para verificar que el estabilizante no solo cumpla con la función de aumentar el pH, sino que también se compruebe su efectividad y reacción con el sulfato de aluminio. Dicho esto, la concentración que cumpla con todos estos requerimientos fue elegida para continuar pruebas por triplicado para corroborar la consistencia de los datos y tener un ensayo con mayor precisión.

2.3.2. Recolección y revisión de información de costos asociados al producto y su impacto

Se recolectaron los datos de información financiera relevante en el proyecto para analizar y comparar a través del tiempo como se podría ver afectado este factor. Adicionalmente se calcularon los costos de mantenimiento de los equipos utilizados en la operación de alcalinización del proceso de potabilización. Por otro lado, se solicitaron los precios actualizados del hidróxido de calcio y del HydroCalcio con el fin de establecer el ahorro que tendría la planta El Dorado de la EAAB con la dosificación adecuada de cal hidratada y los costos en los que incurriría si se implementa el producto químico alterno.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados y análisis se presentan a continuación divididos en tres secciones: (I) Caracterización del agua, (II) Análisis de la solubilidad de la cal en función del tiempo junto con el estudio del comportamiento del pH y turbiedad para el hidróxido de calcio, y (III) Estudio de la cal y los productos alternos con los cuales cuenta la EAAB en la PTAP El Dorado.

3.1. Caracterización del agua

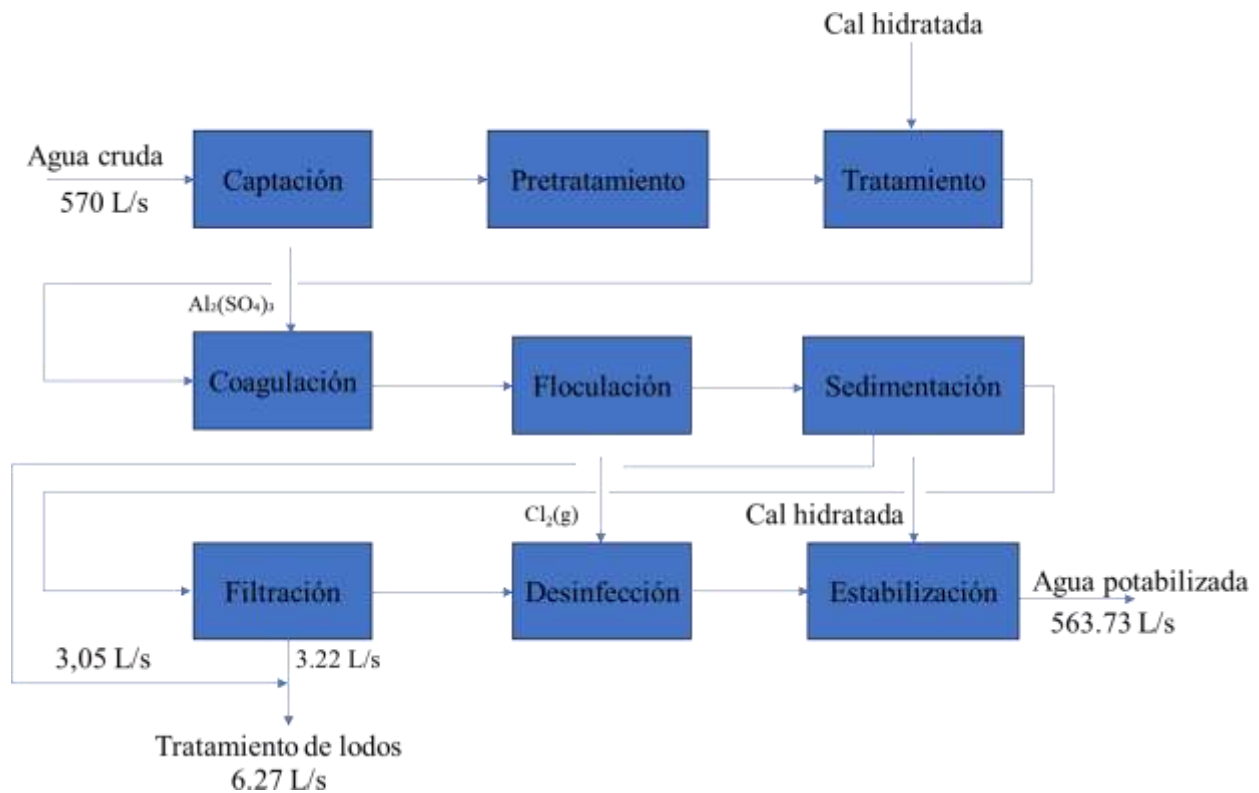
Dentro de la caracterización del agua se comienza por la captación, donde se recoge el agua del embalse La Regadera y Chisacá. Desde esta primera etapa, se transporta el agua hacia la PTAP El Dorado donde se somete a diferentes procesos para asegurar su potabilidad y que cumpla con los estándares de calidad.

Una vez captada, el agua pasa por la etapa de pretratamiento, en la que se eliminan residuos sólidos grandes, como hojas, ramas o piedras, que pueden interferir en las fases siguientes o dañar los equipos. Esto se realiza a través de una malla grande que atrapa los elementos de mayor tamaño. Después del pretratamiento, el agua llega a la fase de tratamiento, donde se ajusta de con hidróxido de calcio. La siguiente etapa es la coagulación, donde se añade sulfato de aluminio, que ayuda a neutralizar las cargas de las partículas finas suspendidas en el agua. Estas partículas se agrupan formando flóculos que son más grandes y fáciles de remover. Después, en la floculación, los flóculos formados se agrandan mediante una agitación suave del agua. El objetivo es lograr que estas partículas se unan y formen agrupaciones más grandes que puedan ser removidas de manera más eficaz en las etapas posteriores. Es importante que la agitación sea lo suficientemente suave para no romper los flóculos ya formados. Una vez que se ha logrado un tamaño adecuado de los flóculos, el agua pasa por la sedimentación, en la que los flóculos se hunden en grandes tanques debido a la gravedad. Los sólidos caen al fondo y forman un lodo que se retira y se lleva a la planta de tratamiento de lodos de la PTAP El Dorado. Mientras tanto, el agua clarificada queda en la parte superior del tanque y se extrae para seguir su tratamiento. A continuación, el agua pasa por filtración, donde pasa por antracita de 1.4 mm, que eliminan las partículas restantes que no fueron retiradas en la sedimentación. Este proceso asegura que el agua esté libre de impurezas suspendidas que podrían haber quedado.

Tras la filtración, el agua es sometida a la desinfección, donde se utiliza cloro gaseoso para destruir bacterias, virus y otros patógenos, asegurando que el agua sea segura para el consumo humano.

Figura 16

Diagrama de bloques del proceso de potabilización de agua



Nota. Diagrama de bloques del proceso de potabilización de agua en la PTAP el Dorado

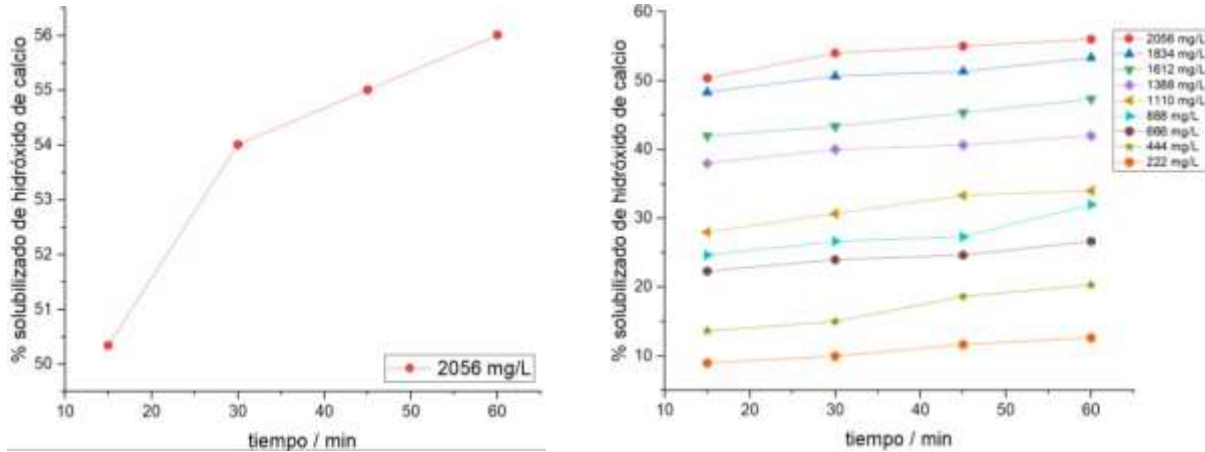
3.2. Análisis de la solubilidad de la cal en función del tiempo

3.2.1. Porcentaje de hidróxido de calcio solubilizado en función del tiempo

El proceso de solubilización de la cal para generar el hidróxido de calcio se siguió en función del tiempo, tomando diferentes alícuotas de 25.00 ml y titulándolas con ácido clorhídrico como agente titulante y fenolftaleína como indicador hasta la desaparición del color. El comportamiento de los datos se muestra la tabla 5 en el anexo 3 y se representan gráficamente en la figura 17.

Figura 17

(a) Porcentaje de hidróxido de calcio solubilizado con dosis de 2056 mg/L de cal. (b) Porcentaje de hidróxido de calcio solubilizado para diferentes dosis de cal



Nota. (a) Porcentaje de hidróxido de calcio solubilizado en función del tiempo usando una dosis de 2056 mg/L de cal. (b) Porcentaje de hidróxido de calcio solubilizado en función del tiempo para diferentes dosis de cal empleadas en este estudio.

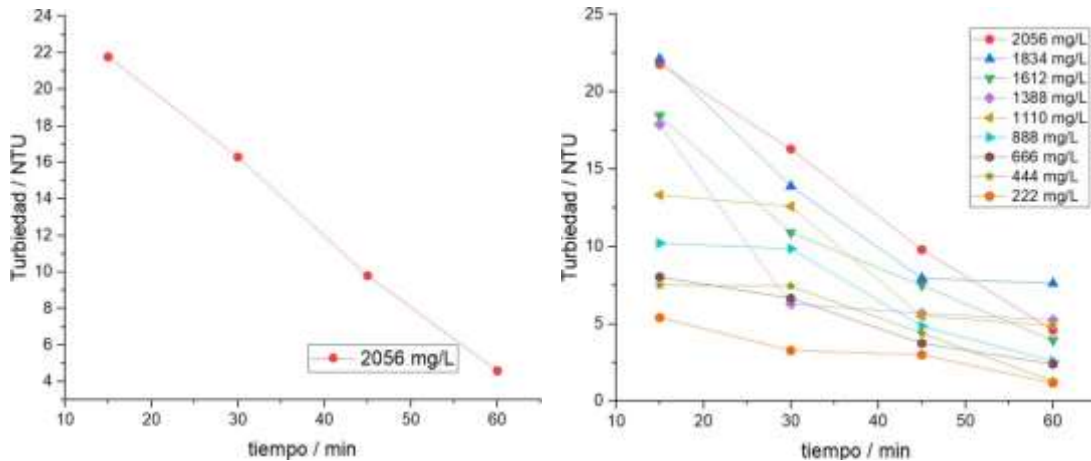
La figura 17(a) ilustra el comportamiento de 2056 mg/L de cal en función del tiempo respecto a su solubilidad, y se muestra un comportamiento semejante en la figura 17(b) la cual ilustra la relación entre el tiempo y el porcentaje de solubilización del hidróxido de calcio en función de diferentes cantidades de dosis. A medida que transcurre el tiempo, se observa un aumento progresivo en el porcentaje de solubilización para todas las dosis analizadas. Las curvas correspondientes a las mayores dosis de hidróxido de calcio como 2056 mg/L y 1834 mg/L muestran un mayor porcentaje de solubilización en comparación con las dosis menores, como 444 mg/L y 222 mg/L lo que indica que una mayor cantidad de hidróxido de calcio favorece una mayor solubilización. Sin embargo, aunque todas las curvas presentan una tendencia al alza, la tasa de incremento del porcentaje de solubilización tiende a disminuir con el tiempo, lo que sugiere que el proceso de solubilización se aproxima a un equilibrio o a una saturación.

3.2.2. Remoción de la turbiedad

La medición de la turbiedad en cada sistema se realizó al final cada intervalo de tiempo por medio de un turbidímetro demostrando el comportamiento de los datos que se muestra en la tabla 5 del anexo 3 con representación gráfica en la figura 18.

Figura 18

(a) Turbiedad del hidróxido de calcio con dosis de 2056 mg/L de cal. (b) Turbiedad del hidróxido de calcio para diferentes dosis de cal



Nota. (a) Turbiedad del hidróxido de calcio en función del tiempo usando una dosis de 2056 ppm de cal. (b) Turbiedad del hidróxido de calcio en función del tiempo para diferentes dosis de cal empleadas en este estudio.

La figura 18(a) ilustra el comportamiento de 2056 mg/L de cal en función del tiempo respecto a la turbidez, y muestra un comportamiento similar la figura 18(b) que representa cómo varía la turbiedad de una solución que contiene diferentes cantidades de hidróxido de calcio a lo largo del tiempo. Se observa que, en todos los casos, la turbiedad disminuye a medida que pasa el tiempo, lo que indica que la solución se va clarificando, lo que sugiere que la solución alcanza una mayor estabilidad con el tiempo que podría deberse a la solubilización del hidróxido de calcio en la solución.

Las muestras con mayor cantidad de hidróxido de calcio, como 2 056 mg/L y 1 834 mg/L comienzan con una turbiedad más alta, pero esta disminuye rápidamente con el tiempo. En contraste, las muestras con menores cantidades, como 444 mg/ y 222 mg/L, muestran una turbiedad inicial más baja y una disminución más gradual. Al final del período de 60 minutos, todas las muestras tienden a converger hacia niveles bajos de turbidez.

Este comportamiento de la disminución de la turbiedad también fue reportado por Aoudj et al. (2 016) [16], en el cual, la disminución fue significativa en los 20 primeros minutos. Por otro lado, Sevillano (2 017) [19], encontró la relación de la turbiedad y la cantidad de hidróxido

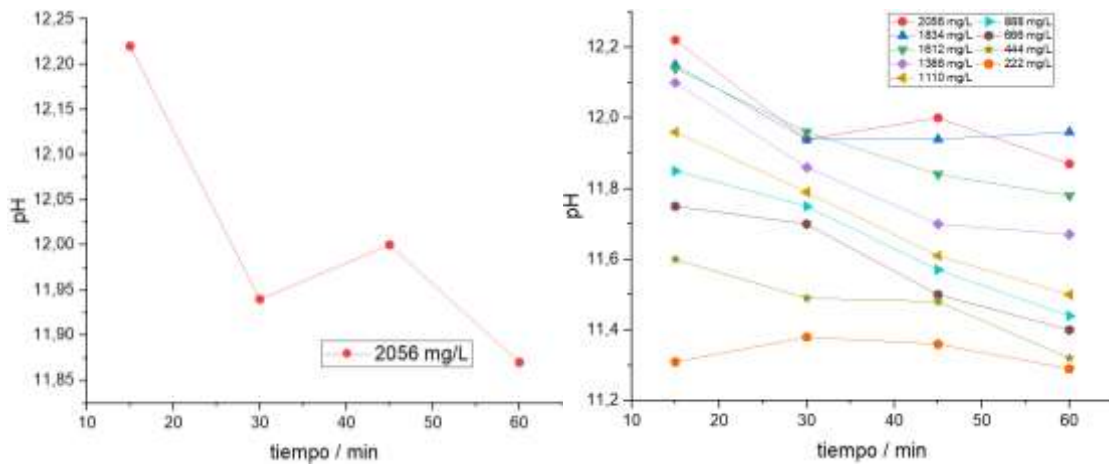
de calcio aplicado en la solución, de manera que, la dosis más alta (10 g/L) fue la que menor disminución de turbiedad presentó con un valor de 0.19 NTU, lo cual tiene concordancia con los resultados obtenidos en este estudio. [17]

3.2.3. pH de la solución en función del tiempo

La medición del pH en cada sistema se realizó al final cada intervalo de tiempo por medio de un potenciómetro demostrando los datos que se muestra en la tabla 6 del anexo 3 con representación gráfica en la figura 18.

Figura 19

(a) pH de la solución de hidróxido de calcio con dosis de 2056 mg/L de cal. . (b) pH de la solución de hidróxido de calcio para diferentes dosis de cal



Nota. (a) pH de la solución de hidróxido de calcio en función del tiempo usando una dosis de 2056 mg/L de cal. (b) pH de la solución de hidróxido de calcio en función del tiempo para diferentes dosis de cal empleadas en este estudio

La figura 19(a) ilustra el comportamiento del pH con la dosis de 2056 mg/L de cal en función del tiempo respecto al pH; y se muestra un comportamiento semejante en la figura 19(b) donde representa cómo varía el pH de una solución que contiene diferentes dosis de hidróxido de calcio a lo largo del tiempo de agitación. Se observa que, en todos los casos, el pH disminuye ligeramente a medida que pasa el tiempo, lo que indica que la solución se va neutralizando. Las muestras con mayor cantidad de hidróxido de calcio, como 2056 mg/L y 1834 mg/L, comienzan con un pH más alto, lo que refleja una mayor alcalinidad inicial. Sin embargo, este pH descende

gradualmente con el tiempo de agitación, aunque la reducción es moderada, mostrando una ligera tendencia hacia la neutralización. En contraste, las muestras con menores cantidades de hidróxido de calcio, como 444 mg/ y 222 mg/L, muestran un pH inicial más bajo. Estas soluciones experimentan una disminución más leve en su pH durante el tiempo de agitación, indicando una mayor estabilidad y una menor variación en la alcalinidad. Al final del período de 60 minutos, todas las muestras tienden a converger hacia valores de pH más cercanos, aunque aún se mantienen algunas diferencias según la cantidad inicial de hidróxido de calcio. El objetivo del experimento no era llegar a un pH específico, sino ver si el tiempo de agitación de la solución afectaba el comportamiento de esta variable. Sin buscar un valor específico como referencia, el objetivo fue evaluar cómo las condiciones de agitación influían en la evolución del pH a lo largo del tiempo.

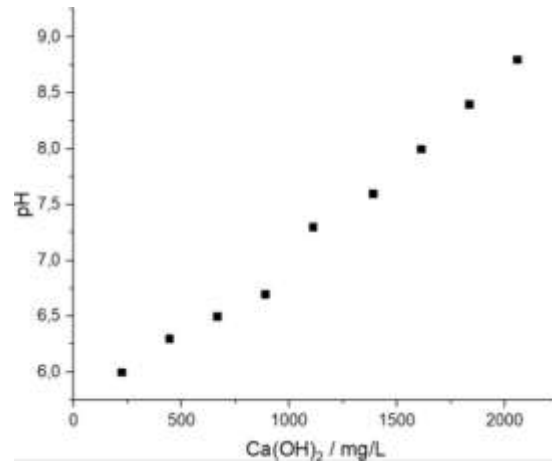
3.3. Prueba de Jarras de agua cruda con hidróxido de calcio

3.3.1. pH

Para las pruebas de jarras al agua cruda directamente del Embalse, se realizó una medición de pH inicial, siendo este de 6.45. En base a este parámetro inicial se realizaron pruebas como diferentes dosis de hidróxido de calcio, conservando el tiempo de 60 minutos. Al pasar el primer minuto de mezcla rápida y agregar la cal, se hizo la medición de pH utilizando todas las diferentes dosis representando los datos que se muestra en las tablas 10 y 14 del numeral 3.3.2. con representación gráfica en las figuras 20 y 21.

Figura 20

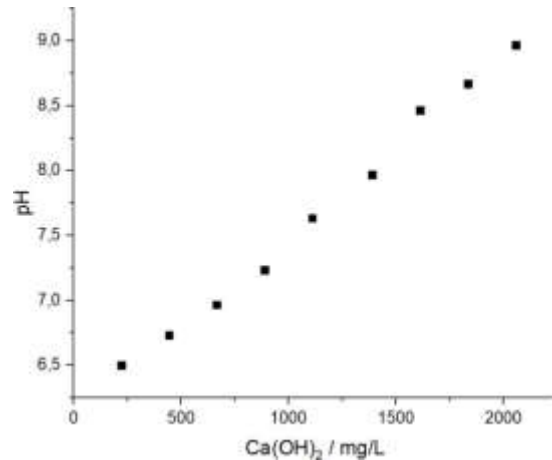
Medición promedio de pH al agua cruda con cal



Nota. Medición promedio de pH al agua cruda con cal previo a la adición de sulfato de aluminio líquido 7.5% a una dosis de 40 mg/L

Figura 21

Medición promedio de pH al agua cruda con cal y sulfato de aluminio granular



Nota. Medición promedio de pH al agua cruda con cal previo a la adición de sulfato de aluminio granular 15.2% a una dosis de 20 mg/L

Las figuras 20 y 21 muestran una relación clara entre la dosis de hidróxido de calcio y el pH de la solución. A medida que se disminuye la dosis de hidróxido de calcio, el pH de la solución también disminuye. Con una dosis de 2 056 mg/L de hidróxido de calcio, el pH de la solución es 8.8 y 9.0. Cuando la dosis se reduce a 1 834 mg/L, el pH baja a 8.4 y 8.7. A medida

que la dosis sigue disminuyendo, el pH también disminuye de manera continua, bajando gradualmente a 6.0 y 6.5 respectivamente con 222 mg/L.

Este patrón refleja la capacidad del hidróxido de calcio para elevar el pH de la solución: a mayor cantidad de hidróxido de calcio, mayor es el pH de la solución, lo que indica que el hidróxido de calcio es un basificante. La relación entre la dosis de hidróxido de calcio y el pH muestra una disminución relativamente constante en el pH a medida que se reduce la dosis del hidróxido de calcio. Esto sugiere que el efecto del hidróxido de calcio en la alcalinidad de la solución es proporcional a la cantidad añadida.

El comportamiento especifica que, conforme se aumenta la cantidad de hidróxido de calcio añadido al agua, el pH de la solución aumenta también. Esto se debe a que Ca(OH)_2 es una base fuerte que, al disolverse en agua, se disocia por completo en iones calcio (Ca^{2+}) e hidroxilos (OH^-). Sin embargo, es importante traer a colación que el hidróxido de calcio tiene una solubilidad limitada en agua lo que significa que, una vez alcanzada la saturación de la solución, el pH no aumentará a pesar de la adición de soluto, por lo tanto, cualquier cantidad adicional de hidróxido de calcio no se disolverá, sino que permanecerá como sólido precipitado.

Se determinó adicionalmente la dosis óptima de cal para maximizar la eficiencia del sulfato de aluminio líquido 7.5%. Se realizó un trabajo colaborativo para establecer un proceso de coagulación eficaz, dado que este reactivo presenta un intervalo específico de pH entre 6.0 y 8.0, mientras que el sulfato de aluminio granular 15.2% opera en un rango de pH entre 5.5 y 7.5. En este contexto, se observó que una dosis de entre 200 y 1 200 mg/L mantenía el pH dentro del rango operativo. Sin embargo, el pH objetivo, similar al utilizado en la planta El Dorado, se alcanzó al adicionar 1 200 mg/L de la solución, obteniendo un valor de pH de 7.6. Es importante destacar que esta dosificación se aplicó exclusivamente en muestras con turbiedades entre 9.0 y 14.0 NTU.

3.3.2. pH vs turbiedad

Tabla 3

Resultados para las soluciones de hidróxido de calcio con sulfato de aluminio líquido a una concentración de 7.5% y dosis de 40 mg/L

Hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio líquido 7.5% promedio					
Dosis Ca(OH) ₂ mg/L	pH precal	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH clarificada	Alcalinidad (mg/L CaCo3)
2056	8,8	0,9	7,9	4,9	2,8
1834	8,4	0,9	8,4	5,2	3,0
1612	8,0	0,8	8,2	5,5	3,0
1388	7,6	0,7	8,7	5,8	3,4
1110	7,3	0,7	9,4	5,7	3,5
888	6,7	0,7	9,5	5,7	3,5
666	6,5	0,6	10,0	5,6	3,3
444	6,3	0,5	10,3	5,4	3,4
222	6,0	0,5	10,5	5,4	3,7

Nota. Datos de hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio líquido 7.5%

Tabla 4

Resultados para las soluciones de hidróxido de calcio con sulfato de aluminio sólido a una concentración de 15.2% y dosis de 20 mg/L

Hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio sólido 15.2% promedio					
Dosis Ca(OH) ₂ mg/L	pH precal	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH clarificada	Alcalinidad (mg/L CaCo3)
2056	9,0	0,7	7,7	5,0	2,8
1834	8,7	0,6	7,6	5,3	3,0
1612	8,5	0,6	7,8	5,4	3,2
1388	8,0	0,5	7,8	5,5	3,4
1110	7,6	0,5	8,1	5,6	3,5
888	7,2	0,5	8,5	5,6	3,7
666	7,0	0,5	8,8	5,6	3,4
444	6,7	0,4	9,1	5,7	3,7
222	6,5	0,4	9,4	5,7	3,8

Nota. Datos de hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio sólido 15.2%

Los resultados que se muestra en las tablas 10 y 14 son el promedio de los datos de tres resultados independientes de las tablas 7, 8 y 9 para el sulfato líquido y 11, 12 y 13 para el sulfato sólido en el anexo 4. Estas evidencian que la turbiedad disminuye a medida que aumenta el pH. Si bien, cuando el pH es similar, la turbiedad varía ligeramente para diversas dosis de

hidróxido de calcio. Esto demuestra que la eficiencia del proceso también depende de la dosis del coagulante. Cuando el pH es más bajo, las dosis más grandes de hidróxido de calcio suelen estar relacionadas con una mayor turbiedad. Es decir, en un pH de alrededor de 4.8, la dosis de 2056 mg/L muestra una turbiedad cercana a 0.9 NTU. Esto indica que, en un ambiente ácido, una cantidad excesiva de hidróxido de calcio puede ser ineficiente e incluso aumentar la turbiedad. Adicionalmente, la gráfica indica que existe un rango ideal tanto de dosis de hidróxido de calcio como de pH, lo cual se ve reflejado en la disminución de la turbidez. Las turbiedades más bajas se encuentran en un pH de 5.6 – 5.8 con dosis más bajas de hidróxido de calcio para este conjunto de datos lo que se traduce en una menor dosis y mejor solubilidad del producto mencionado. Esto se debe a la dispersión de las partículas o a la formación de flóculos inestables que, al añadir demasiado coagulante, especialmente a pH bajos, resulte contraproducente y aumente la turbiedad puesto que el agua cruda, al tener un pH básico el aluminio puede precipitarse como hidróxido de aluminio afectando su solubilidad. [13]

3.3.3. Alcalinidad

Los datos de la tabla 3 indican que una dosis 222 mg/L de hidróxido de calcio es suficiente para alcanzar la máxima alcalinidad, comparable con la obtenida en las demás dosis añadidas. Esto sugiere que una pequeña cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es suficiente para lograr la máxima alcalinidad en el sistema.

La alcalinidad tiene una tendencia descendente cuando se incrementa gradualmente entre 444 mg/L y 1 612 mg/L; esto respalda la idea que la adición de más dosis provoca una mayor precipitación de CaCO_3 o una saturación del sistema. Posteriormente, a 1 834 y 2 056 mg/L se observa la alcalinidad más baja siendo alrededor de 2.8 mg/L de CaCO_3 , apuntando que, a mayores dosis de hidróxido de calcio, la eficiencia para aumentar la alcalinidad disminuye significativamente, probablemente debido a la formación de CaCO_3 sólido. El uso de dosis más pequeñas de hidróxido de calcio es más efectivo para maximizar la alcalinidad sin provocar precipitación. Esto es importante en procedimientos que tienen como objetivo regular la alcalinidad sin exceder ciertos límites que provocan precipitación.

Los datos que se muestran en la tabla 4, exponen un comportamiento inverso en donde la alcalinidad aumenta a medida que disminuye la dosis de hidróxido de calcio. Como resultado de la mayor cantidad de iones OH^- liberados, normalmente se podría esperar que la alcalinidad de la solución aumente debido a una mayor dosis de hidróxido de calcio. Si se analiza por intervalos,

de 2 056 mg/L a 1 110 mg/L, aquí la alcalinidad aumenta de 2.8 mg/L a 3.5 mg/L de CaCO₃ con una tendencia ascendente. La alcalinidad presenta un comportamiento típico de aumento con una cantidad moderada de hidróxido de calcio disuelto. Luego, en el intervalo de 1 110 mg/L a 888 mg/L el comportamiento de la alcalinidad aumenta significativamente entre estas dosis, pasando de 3.5 mg/L a 3.7 mg/L de carbonato de calcio, lo que podría suponer que la alcalinidad permanece constante sin variaciones en la solución antes de volver a fluctuar. Continuando con el tercer intervalo de 666 mg/L a 444 mg/L la alcalinidad disminuye ligeramente a 3.4 mg/L en vez de seguir aumentando. Para el cuarto intervalo de 444 mg/L a 222 mg/L se expone que, con una dosis mínima de hidróxido de calcio, la alcalinidad vuelve a aumentar a 3.8 mg/L. robusteciendo la idea que la solución puede estar llegando a un punto de saturación donde la presencia de hidróxido de calcio adicional ya no es significativa para aumentar la alcalinidad.

3.4. Prueba de Jarras de agua cruda con estabilizantes alternos

3.4.1. pH

Para las pruebas de jarras con los estabilizantes alternos, se adquirió una solución en suspensión de hidróxido de calcio formulada por un proveedor llamada HidroCalcio la cual tiene una composición del 17-18% e HidroCalcio 20-21% se sometió la suspensión a agitación en una plancha de calentamiento con agitación magnética a una velocidad de aproximadamente 100 RPM hasta conseguir una consistencia homogénea. Los datos se proporcionan en mg/L debido a que el proveedor directamente lo sugiere para un mejor manejo y se pueden observar en la tabla 15.

Tabla 5

Resultados promedio para el HidroCalcio 17-18% en solución con sulfato de aluminio

<i>Hidróxido de Calcio en Suspensión 17-18% promedio</i>				
Dosis mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
77	0,99	11,30	6,16	6,28
55	1,11	10,77	6,12	4,97
44	0,99	7,43	6,17	5,21

Nota. HidroCalcio 17-18% en solución con sulfato de aluminio

Los resultados que se muestra en la tabla 15 del promedio de los datos por triplicado que se

muestran en el anexo 5, muestra una relación entre la dosis de hidróxido de calcio y el pH, por ende, a medida que aumenta la dosis, se entiende que el valor del pH también aumenta; esto podría indicar que la solución se acerca a su límite de capacidad de disolución de hidróxido de calcio. Esto implica que no aumentará el pH proporcionalmente agregando más hidróxido de calcio después de un determinado punto.

En una dosis de 44 mg/L el pH observado es alrededor de 6.17, indicando que este comportamiento en esta dosis, las concentraciones de iones hidroxilo (OH^-) generadas por el hidróxido de calcio son suficientes para llegar a un pH dentro del rango operativo de trabajo del sulfato de aluminio. El pH aumenta proporcionalmente al aumentar la dosis a 55 mg/L, esto indica que la disociación aumenta el pH al producir más iones OH^- con una mayor cantidad de hidróxido de calcio. En comparación con la dosis de 40 mg/L, la solución comienza a acercarse más a un pH neutro o ligeramente alcalino, lo que indica una mayor capacidad de neutralización de la acidez con un pH resultante aproximado de 6.2, siendo esta dosis la elegida para continuar con los experimentos porque su valor se encuentra en el rango de trabajo del coagulante sulfato de aluminio líquido.

Por otro lado, al incrementar la dosis a 55 mg/L como era de esperarse se observa un incremento en el pH, indicando un aumento en la alcalinidad de la solución. Esto sugiere que con una mayor cantidad de hidróxido de calcio y la solución empieza a acercarse más a un pH neutro o ligeramente alcalino, lo que refleja una mayor capacidad de neutralización de la acidez en comparación con la dosis de 44 mg/L sin embargo, no se tomó esa dosis para continuar con el ensayo por triplicado debido a que se aumenta la cantidad de suspensión que se debía añadir y los resultados no eran significativamente distintos siendo el pH de este punto de 5.76.

Tabla 6

Resultados promedio para el HidroCalcio 20-21% en solución con sulfato de aluminio

<i>Hidróxido de Calcio en Suspensión 20-21% promedio</i>				
Dosis mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg/L CaCO_3)
77	1,44	7,73	6,13	4,52
55	1,35	7,73	5,76	4,10
44	1,32	7,87	5,72	4,67

Nota. HidroCalcio 20-21% en solución con sulfato de aluminio

La relación entre el pH y la dosis de suspensión de hidróxido de calcio en microlitros también se muestra en la tabla 15, existiendo similitud a la tabla 16 mostrada anteriormente, pero con resultados ligeramente distintos debido a que este experimento constó de una concentración del 20% de hidróxido de calcio con promedio por triplicado de datos registrados en el anexo 5.

Comparando ambas tablas, los incrementos en el pH son más moderados para la suspensión 2 en comparación con la suspensión 1. Esto puede indicar que la suspensión 2 es menos efectiva en aumentar el pH a bajas dosis, posiblemente debido a una formulación diferente presentada por el proveedor y/o la agitación suministrada a la muestra de estabilizante no logró una fase homogénea que garantizara la misma concentración en todo el producto presentándose este fenómeno. Sin embargo, se esperaba que esta solución al tener una mayor concentración funcionara mejor con respecto a la del 17% de hidróxido de calcio. Este comportamiento puede ser relevante porque se necesita ajustar el pH de manera precisa, por lo tanto, que revela que la suspensión 2 puede requerir dosis más altas para lograr el mismo efecto que la suspensión 1 a menores volúmenes.

3.4.2. Remoción de partículas en suspensión.

La relación entre la turbiedad y la dosis de suspensión de hidróxido de calcio en microlitros también se muestra en la tabla 15, que reúne el promedio de los datos del anexo 5. En este caso, la turbiedad disminuye significativamente tanto con una dosis de 77 mg/L como con una de 44 mg/L, alcanzando un valor de 0.99 NTU en ambos casos. Sin embargo, al aplicar una dosis intermedia de 55 mg/L, la turbiedad aumenta a 1.11 NTU. Comparando estos resultados, se puede inferir que la dosis de 55 mg/L es menos efectiva en reducir la turbiedad en comparación con las dosis de 77 mg/L y 44 mg/L. Esto sugiere que la respuesta del sistema al tratamiento no es completamente proporcional y que factores como la homogeneidad de la mezcla o la precisión en la dosificación podrían estar influyendo en los resultados. Este comportamiento es relevante porque indica que, para optimizar la reducción de turbiedad, es necesario ajustar la dosis de manera precisa, considerando que dosis aparentemente intermedias no siempre producen efectos proporcionales.

La relación entre el pH y la dosis de suspensión de hidróxido de calcio en microlitros también se muestra en la tabla 16 que reúne el promedio de los datos del anexo 5. Se observa que existe una tendencia más uniforme donde la turbiedad disminuye gradualmente al reducir la dosis, pasando de 1.44 NTU con 77 mg/L a 1.32 NTU con 44 mg/L. Este

comportamiento sugiere que, la disminución de la turbiedad es más consistente y predecible, con la dosis más baja de 44 mg/L siendo la más efectiva.

Comparando las figuras 27 y 28, se puede inferir que la respuesta del sistema al tratamiento varía dependiendo de las condiciones específicas de cada experimento. Este comportamiento es relevante porque indica que, para optimizar la reducción de turbiedad, es necesario considerar no solo la dosis aplicada, sino también las condiciones experimentales que podrían influir en la eficacia del tratamiento.

3.4.3. Alcalinidad

La relación entre la alcalinidad y la dosis de suspensión de hidróxido de calcio en microlitros se muestra en la tabla 15, revelando un comportamiento que no sigue una respuesta proporcional como se observa en el anexo 5. Con la dosis más alta de 77 mg/L, se alcanza la mayor alcalinidad, con un valor de 6.28 mg/L de CaCO_3 , lo que indica una efectividad significativa del tratamiento a este nivel. Sin embargo, al reducir la dosis a 55 mg/L, la alcalinidad disminuye notablemente a 4.97 mg/L de CaCO_3 , lo que sugiere una menor efectividad en comparación con la dosis de 77 mg/L.

Al disminuir aún más la dosis a 44 mg/L, la alcalinidad aumenta ligeramente a 5.21 mg/L de CaCO_3 , superando el valor obtenido con 55 mg/L que, aunque sigue siendo inferior al de 77 mg/L, sugiere que la relación entre la dosis y la alcalinidad no es completamente lineal, y que otros factores, como la homogeneidad de la mezcla o variaciones en la calidad del reactivo, podrían estar influyendo en los resultados.

La relación entre la alcalinidad y la dosis de suspensión de hidróxido de calcio en microlitros se muestra en la tabla 16 como se observa en el anexo 5, revelando un comportamiento particular. Con una dosis de 77 mg/L, se alcanza una alcalinidad de 4.52 mg/L de CaCO_3 , que está en un rango intermedio en comparación con otras dosis. Al reducir la dosis a 55 mg/L, la alcalinidad disminuye a 4.1 mg/L de CaCO_3 , el valor más bajo observado, lo que indica una menor efectividad del tratamiento a este nivel.

Al reducir aún más la dosis a 44 mg/L, la alcalinidad aumenta a 4.67 mg/L de CaCO_3 , superando incluso la obtenida con la dosis más alta de 77 mg/L. Este resultado sugiere que la relación entre la dosis y la alcalinidad no es lineal. La mayor alcalinidad obtenida con la menor dosis de 44 mg/L podría indicar que, a dosis más bajas, el tratamiento es más efectivo, quizás debido a una mejor distribución del reactivo o a dinámicas del sistema que favorecen la reacción.

3.5. Análisis de costos.

Actualmente, en la PTAP El Dorado para llevar a cabo el proceso de estabilización de pH en el tratamiento y producción de agua potable, demandan estructuras para almacenamiento y preparación de la solución como tanques y máquinas encargadas de dosificar hidróxido de calcio. Dichos equipos demandan mantenimientos preventivos y correctivos según su tiempo de uso y eficiencia en su funcionamiento los cuales incurren en gastos de mano de obra y materiales utilizados para la actividad.

Es de suma importancia traer a colación los costos que inciden en el proceso puesto que es uno de los parámetros a comparar con los estabilizantes alternos de CQ Hydro-Calcio es que vienen en dos presentaciones diferentes, 17-18% y 20-21%. En la Tabla 1 del Anexo 6 se muestran los costos totales de mantenimiento preventivo del periodo enero a diciembre del año 2023 con un total de **\$6.952.380 COP**. Por otro lado, en la Tabla 2 del Anexo 6 se expone el comparativo de lo que lleva el año 2024 en términos de mantenimiento preventivo de los tanques de preparación de hidróxido de calcio que hasta el momento se registra un valor de **\$ \$ 6.694.686,00 COP**. Ambos costos se encuentran relacionados únicamente con los costos de revisión, inspección y limpieza de los tanques de homogeneización de cal 1 y 2.

En cuanto a los costos representados en mantenimientos preventivos y correctivos del año 2023 para los dosificadores de cal 1 y 2, se observa un total de **\$18.487.698 COP** y **\$2.945.556 COP** respectivamente. Estos valores se encuentran más detallados en las tablas 3 y 4 del anexo 6. En relación con el año 2024, hasta el momento se han realizado mantenimientos preventivos y correctivos de los dosificadores de cal 1 y 2 hasta septiembre con un total de **\$ \$ 13.532.316,00 COP** y **\$ \$ 5.717.880,00 COP** respectivamente.

Las máquinas constan de un sistema de dosificación compuesto por un tornillo de sin fin, un motor que permite su movimiento y una tolva para su depósito. Es evidente que los gastos presentados en este instrumento duplican a los tanques de almacenamiento, adicionalmente, en el primer trimestre del año 2024 se evidencia que el costo relacionado a los mantenimientos correctivos alcanzó un 74.19% comparado con el año 2023 en los primeros tres meses. Sin embargo, cabe resaltar que se debe tener en cuenta los trimestres restantes en donde se podrían tener más fallas que requieran de mano de obra y de materiales que incrementen el costo. Se debe considerar que estos podrían ser eliminados en su totalidad con la solución de hidróxido de calcio coloidal puesto que el producto no requiere dosificación mediante máquinas.

En el anexo 7 se exponen los costos teóricos en toneladas proyectados a un año en donde el CQ Hydro-Calcio tiene un costo anual significativamente menor siendo este **\$1.543.862 COP** por tonelada mientras que, para la cal hidratada utilizada actualmente se tiene un costo estimado de **\$131.933.813 COP/ton**. Esto sugiere que, si ambos productos al lograr un efecto similar, el primer producto tiene un costo anual significativamente menor en comparación con el segundo producto; pero antes de tomar una decisión final basada únicamente en el costo, es necesario considerar otros factores, como la disponibilidad, la eficiencia y la compatibilidad con el proceso a escala piloto.

El anexo 2 muestra los cálculos realizados para la preparación de las soluciones de cal utilizadas en los experimentos. Sin embargo, cabe resaltar que este es el cálculo de pureza inversa usado para ajustar y estandarizar la dosificación de reactivos o compuestos químicos, especialmente cuando el material disponible no es 100% puro. En la planta al tener únicamente en cuenta la solubilidad, se estaría dosificando en aproximadamente 300% según el anexo 7, conllevando a que se generen los problemas de sobredosificación, por consiguiente, el ahorro monetario que se podría generar a partir de la correcta dosificación sería aproximadamente de 40 millones anuales, reduciendo de **\$131.933.813 COP** a **\$91.087.431 COP**.

Tabla 7

Costos de mantenimiento generales de 2 023 y 2 024 en el periodo enero a septiembre

COSTOS GENERALES ENE-SEP		
	2023	2024
Mantenimiento tanques de cal	\$ 5.327.992,00	\$ 6.694.686,00
Mantenimientos preventivos máquinas dosificadoras	\$ 13.601.538,00	\$ 13.532.316,00
Mantenimiento correctivo máquinas dosificadoras	\$ 2.035.899,00	\$ 5.717.880,00
TOTAL	\$ 20.965.429,00	\$ 25.944.882,00

Nota. Costos de mantenimiento generales de 2 023 y 2 024

4. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo una caracterización de cada muestra de agua cruda con el objetivo de determinar sus parámetros fisicoquímicos, incluyendo turbiedad, pH, alcalinidad y color. Este análisis detallado permitió evaluar la calidad inicial del agua y proporcionar una base sólida para el diseño y la selección de los métodos de tratamiento experimentales adecuados. Este enfoque no solo optimiza el tratamiento, sino que también garantiza una solución para la mejora de la calidad del agua.

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas de jarras con diferentes concentraciones de soluciones de hidróxido de calcio revelaron que la mejor solución en términos de parámetros fisicoquímicos fue la de 1.110 mg/L. Esta concentración produjo una turbidez en el agua clarificada de entre 0.5 y 0.7 NTU, un color de 9.4 y 8.1 UPC, y un pH de 5.7 y 5.6 cuando se utilizó sulfato de aluminio en forma líquida y granular, respectivamente. Es importante destacar que todas las pruebas se realizaron por triplicado y se calcularon promedios para asegurar la precisión de los resultados. Estos hallazgos indican que la solución de 1.110 mg/L de hidróxido de calcio es la más efectiva para mejorar la calidad del agua en las condiciones evaluadas. Según los resultados de este estudio, se sugiere que el hidróxido de calcio debe ser agitado durante al menos 60 minutos a una velocidad de 100 RPM para lograr los mejores resultados en lo que respecta a la turbiedad, pH y porcentaje solubilizado del mismo.

Para el tratamiento de agua, el sulfato de aluminio granular suele ser más efectivo que el líquido debido a su liberación controlada y gradual del principio activo. Los gránulos permiten una dosificación más precisa y proporcionan una disolución más controlada, mejorando la coagulación y floculación en el tratamiento. Además, su mayor concentración y facilidad de manejo y almacenamiento hacen que sean una opción preferible para aplicaciones que requieren una liberación constante del compuesto en el agua.

Al establecer el efecto de diferentes alcalinizantes en el proceso de potabilización en la PTAP El Dorado, se observa que la elección del alcalinizante impacta significativamente la eficacia del tratamiento. Los diferentes alcalinizantes afectan el ajuste del pH y la optimización de los procesos de coagulación y floculación. El análisis comparativo revela que algunos alcalinizantes mantienen

el pH en niveles óptimos de manera más efectiva, lo que mejora la eficiencia del proceso de potabilización. Así, la selección adecuada del alcalinizante es crucial para maximizar la eficacia del tratamiento de agua en la PTAP El Dorado.

El uso del alcalinizante alternativo CQ-HidroCalcio 17-18% permitiría eliminar los costos asociados al mantenimiento preventivo de las máquinas dosificadoras de cal, resultando en un ahorro anual estimado de \$17.534.832 COP. Además, al considerar los costos de los mantenimientos correctivos, el ahorro total se elevaría aproximadamente a \$5.524.000 COP. Aunque los costos correctivos son más difíciles de estimar debido a la imprevisibilidad de las fallas, es posible hacer estimaciones razonables basadas en los datos históricos de la planta.

RECOMENDACIONES

Se aconseja la automatización del proceso de dosificación y control de alcalinización, lo que mejoraría la precisión del tratamiento y reduciría el margen de error humano. La adopción de tecnologías automatizadas podría optimizar el proceso y asegurar una mayor consistencia en los resultados.

Se recomienda realizar un estudio sistemático de la solubilidad del hidróxido de calcio a diferentes temperaturas, dado que la solubilidad de este compuesto en agua puede variar significativamente con la temperatura.

Explorar cómo el hidróxido de calcio interactúa con otros productos químicos comúnmente utilizados en el tratamiento de agua y su correcta estandarización.

Realizar estudios sobre el impacto del hidróxido de calcio en la microbiología del agua tratada.

Investigar la posibilidad de desarrollar formulaciones de hidróxido de calcio con mayor solubilidad o reactividad mejorada. Estas formulaciones podrían incluir aditivos que faciliten la disolución o la distribución uniforme en el sistema de tratamiento, mejorando la eficiencia y reduciendo el consumo de material.

Investigar alternativas ecológicas al hidróxido de calcio que ofrezcan beneficios similares en términos de alcalinización, pero con un menor impacto ambiental.

Se recomienda realizar ensayos piloto en la planta para ajustar la dosificación de cal hidratada y de CQ-HydroCalcio, puesto que, al escalar desde el laboratorio a la planta de tratamiento, pueden surgir nuevas variables que afecten la eficiencia y los costos operativos. Estos ensayos permiten adaptar la dosificación a las condiciones reales, optimizar el uso de reactivos, evaluar la capacidad de los equipos y establecer sistemas de control precisos. Finalmente, es crucial reevaluar los costos basados en los datos obtenidos para garantizar un proceso eficiente y económicamente sostenible.

Durante el desarrollo del proyecto, los parámetros fisicoquímicos del agua cruda (color, turbidez, pH y alcalinidad) se mantuvieron estables, sin mostrar incrementos significativos que pudieran afectar el objetivo principal. Por lo tanto, se recomienda llevar a cabo pruebas bajo condiciones de agua que superen los límites establecidos en este trabajo de grado. Esto permitirá obtener un

conocimiento más amplio sobre la dosificación en diversas condiciones de agua cruda y mejorar la comprensión del impacto de diferentes parámetros en el proceso de tratamiento.

REFERENCIAS

- [1] Empresa de Acueducto de Bogotá. (Consultado el 18 de mayo de 2024). “Recursos hídricos: Embalses.” Recuperado de: <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/recurso-hidrico/embalses>
- [2] Empresa de Acueducto de Bogotá. (Consultado el 18 de mayo de 2024). “Zonas de cobertura.” Recuperado de: <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/la-empresa/zonas/zonas>
- [3] Empresa de Acueducto de Bogotá. (Consultado el 18 de mayo de 2024). “Plantas de tratamiento.” Recuperado de: <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/plantas-de-tratamiento>
- [4] Supelco, “Ficha de datos de seguridad,” [Ficha técnica], Versión 8.5, 24 de septiembre de 2024.
- [5] Oab. (s. f.). Decreto 1575 de 2007» Observatorio Ambiental de Bogotá. Observatorio Ambiental de Bogotá. https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3774
- [6] Resolución 2115 de 2007 Diario Oficial No. 46.679 de 4 de julio. Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Colombia – Bogotá: El Ministerio; Septiembre 26 2023.
- [7] Anónimo (2019) Hidróxido de calcio (Ca(OH)₂): estructura, propiedades, obtención, usos, Hidróxido de Calcio (ca(oh)₂): Estructura, propiedades, obtención, Usos. Available at: <https://definicion.edu.lat/academia/09D7AC83331CD72C42D442BDFF7EE855.html>
- [8] Bojaca, R. (2005) PSO DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD POR POTENCIOMETRIA, Determinación de Alcalinidad Por Potenciometria. Available at: <https://es.scribd.com/document/234793683/Tp0211-Determinacion-de-Alcalinidad-Por-Potenciometria> (Accessed: July 2024).
- [9] Romero, J. (2005). Calidad del agua. 2 Ed. www.academia.edu. https://www.academia.edu/38972813/Calidad_del_Agua_ROMERO_ROJAS

- [10] Rendón, W., Rivas, R. and Linares, B. (2023) Sistema para ajuste de ph en precal y poscal en las plantas de tratamiento de la empresa aguas y aguas Pereira. Rep. Pereira: grupo de optimización66 aguas y aguas de Pereira, pp. 1–1.
- [11] Medios de filtro de antracita – Filtración de agua y tratamiento de aguas residuales. (Consultado el 1 de Agosto de 2024) *African Pegmatite*: <https://mineralmilling.com/es/medios-de-filtro-de-antracita-filtracion-de-agua-y-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- [12] G. Prieto, M. Silva, E. Chumaceiro, J. Barrios, y L. Núñez, (Consultado el 9 de Agosto de 2024) “Modelo bioeconómico para el manejo de la pesquería artesanal de camarón en el noroeste de Venezuela,” *Rev. Cient. UDO Agríc.*, vol. 7, no. 11, pp. 35-46, 2007. [En línea]. Disponible en: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007001100007..
- [13] Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., Howe, K., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH’s Water Treatment Principles And Desing* (3a ed.). MWH. https://www.academia.edu/39789094/MWHs_Water_Treatment Pg. 541
- [14] Vásquez Nuñez, R. S. (2018). Optimización del coagulante Sulfato de Aluminio en el Tratamiento de Potabilización del Agua de la Planta de Chota-Cajamarca. [Trabajo de grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio institucional. [https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/3347#:~:text=Concluyendo%20que:%201\) el%20coagulante,diferentes%20casos%20de%20turbiedad%20evaluados.](https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/3347#:~:text=Concluyendo%20que:%201) el%20coagulante,diferentes%20casos%20de%20turbiedad%20evaluados.)
- [15] Organización Mundial de la Salud. (2018). Manual de tratamiento de agua potable (4ª ed.). <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950> (Obra original publicada en 2011) Pg.139
- [16] S. Aoudj, A. Khelifa, N. Drouiche, and M. Hecini, “Removal of fluoride and turbidity from semiconductor industry wastewater by combined coagulation and electroflotation,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, no. 39, pp. 18398-18405, 2016.
- [17] C. Cruz-Barreras, F. Lares-Villa, R. Casillas-Hernández, and J. C. Ibarra-Gómez, “Efectos de la cal sobre la calidad de agua en un cultivo de camarón blanco *Penaeus vannamei* y sobre bacterias que le causan enfermedades,” *ECUACAMARÓN*, vol. 1, no. 2, pp. 22-26, 2001.
- [18] R. Fernández-Rubio, *Abandono de minas impacto hidrológico*. IGME, 1986.
- [19] R. L. Sevillano, “Eficiencia del hidróxido de calcio en el tratamiento de las aguas ácidas de

una relavera de Pasco, a nivel laboratorio–2017,” 2017.

[20] D. S. Levine, *Fisicoquímica*, 7.^a ed. México: McGraw-Hill, 2018.

[21] C. De Sousa, A. Correia, y M. C. Colmenares, "Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control," *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, vol. 50, no. 2, pp. 187-196, 2010. [En línea]. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482010000200003. [Consultado: 16-oct-2024].

[22] Nordell, E. (1963). Tratamiento de Agua para la industria y otros usos. Editorial Continental, México.

[23] Cruz R., Y., & López, M. N. (2015). *Evaluación de alcalinizantes en el proceso de ajuste del pH para el agua tratada del río cauca*. [Tesis pregrado]. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Cauca

[24] Procedimientos Normalizados de Operación, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Colombia, 2003.

[25] Water Quality for Ecosystem and Human Health, 2nd ed., United Nations Environment Programme Global Environment Monitoring System (UNEP GEMS), Burlington, Canada, 2008.

[26] Bustos, L., & Silva, Y. (2016). Propuesta de mejoramiento de la línea de insumos del proceso de tratamiento de agua potable en la planta regional de la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Zipaquirá. [Tesis pregrado]. Universidad de América, Bogotá, Colombia.

[27] Noreña, F. (2002). Modelo para la dosificación de cal en la planta Wiesner. [Tesis pregrado]. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/15740>

ANEXOS

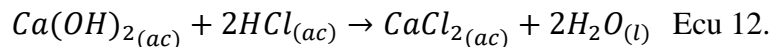
ANEXO 1

ESTANDARIZACIÓN DE SOLUCIONES

Para realizar mediciones específicas de molaridad y cantidades medibles en gramos o mililitros, se debe entender la reacción de producción de hidróxido de calcio. Basado en la ecuación 1 y teniendo en cuenta la solubilidad del hidróxido de calcio de 1,73 g/L a 20°C [7], se asume teóricamente que se trabajará a saturación y se procede a calcular los moles:

$$25 \text{ ml } Ca(OH)_2 * \frac{1 \text{ L } Ca(OH)_2}{1000 \text{ ml } Ca(OH)_2} * \frac{3.299 \times 10^{-2} \text{ mol } Ca(OH)_2}{1 \text{ L } Ca(OH)_2} \\ = 8.248 \times 10^{-4} \text{ mol } Ca(OH)_2$$

Ahora bien, la reacción de neutralización del hidróxido de calcio con ácido clorhídrico es:



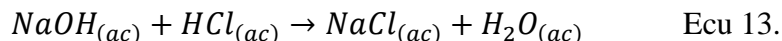
Como se entiende que la cantidad de moles del hidróxido de calcio es 8.248×10^{-4} mol, y este tiene una proporción de 1:2, se procede a calcular los moles de ácido clorhídrico:

$$8.248 \times 10^{-4} \text{ mol } Ca(OH)_2 * \frac{2 \text{ mol } HCl}{1 \text{ mol } Ca(OH)_2} = 1.649 \times 10^{-3} \text{ moles } HCl$$

Con esta cantidad, se procede a hacer el cálculo de la molaridad del ácido clorhídrico teniendo como volumen 15 ml siendo este un dato tomado por decisión propia:

$$M_{NaOH} = \frac{1.649 \times 10^{-3} \text{ moles } HCl}{0.015 \text{ L}} = 0.110 \text{ M}$$

Para calcular la cantidad de hidróxido de sodio con el ácido clorhídrico debe tenerse presente la ecuación 8.



Como la relación del hidróxido de sodio con el ácido clorhídrico es 1:1 debido a su reacción, se entiende que la cantidad de moles es la misma, por ende, la molaridad es la misma de 0.110 M. Ahora bien, la misma situación ocurre con el Hidróxido de Sodio que reacciona con biftalato ácido de potasio, ya que tienen la misma proporción 1:1 debido a su estequiometría:



Teniendo presente ahora que la molaridad del ácido clorhídrico, el hidróxido de sodio y el biftalato ácido de potasio son la misma de 0,110 M, se procede a calcular la cantidad de biftalato requerido en peso para estandarizar 15 ml que fueron tomados de igual forma por decisión propia:

$$masa_{KHC_8H_4O_4} = 0.110 \frac{mol}{L} * 0.015 L * 204.22 \frac{g}{mol}$$

$$masa_{KHC_8H_4O_4} = 0.3370 g$$

Luego de esto, se realiza el mismo cálculo para saber cuánto ácido clorhídrico al 37% se debe diluir para llegar a la concentración indicada previamente. Conociendo la densidad de dicho Ácido (1.19g/cm³) [4], se calcula la molaridad inicial y posteriormente se realiza el cálculo para producir 500 ml:

$$37\% HCl = 0.37$$

$$0.37 * \frac{1 mol}{36.46 g} * \frac{1.19 g}{1 ml} * \frac{1000 ml}{1 L} = 12.07 M$$

$$V_{HCl 37\%} = \frac{V_{HCl diluido} * M_{HCl diluido}}{M_{HCl 37\%}}$$

$$V_{HCl 37\%} = \frac{(500 ml)(0.110 M)}{(12.07 M)}$$

$$V_{HCl 37\%} = 4.56 ml HCl diluido$$

Finalmente, se calculó la dosis requerida de hidróxido de Sodio para poder estandarizar

igualmente teniendo presente la densidad. En este caso se realiza el cálculo para producir 250 ml de solución con la concentración deseada.

$$0.110 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * \frac{40 \text{ g}}{1 \text{ mol}} * 0.25 \text{ L} = 1.1 \text{ g}$$

Los resultados de la estandarización del hidróxido de sodio con biftalato de potasio con réplica son:

Tabla 8

Resultados de estandarización del hidróxido de sodio con biftalato de potasio

	KHP (g)	moles de KHP	moles de NaOH	Concentración de NaOH (M)
Prueba 1	0,3370	0,0017	0,0017	0,1100
Prueba 2	0,3370	0,0017	0,0017	0,1100
Prueba 3	0,3370	0,0017	0,0017	0,1100
Prueba 4	0,3370	0,0017	0,0017	0,1100
Prueba 5	0,3370	0,0017	0,0017	0,1100

Nota. Estandarización del hidróxido de sodio con biftalato de potasio

Los resultados de la estandarización del ácido clorhídrico con hidróxido de sodio con réplica son:

Tabla 9

Resultados de estandarización del ácido clorhídrico con hidróxido de sodio

	NaOH (g)	moles de NaOH	moles de HCl	Concentración de HCl (M)
Prueba 1	1,1000	0,0275	0,0275	0,0081
Prueba 2	1,1000	0,0275	0,0275	0,0081
Prueba 3	1,1000	0,0275	0,0275	0,0081
Prueba 4	1,1000	0,0275	0,0275	0,0081
Prueba 5	1,1000	0,0275	0,0275	0,0081

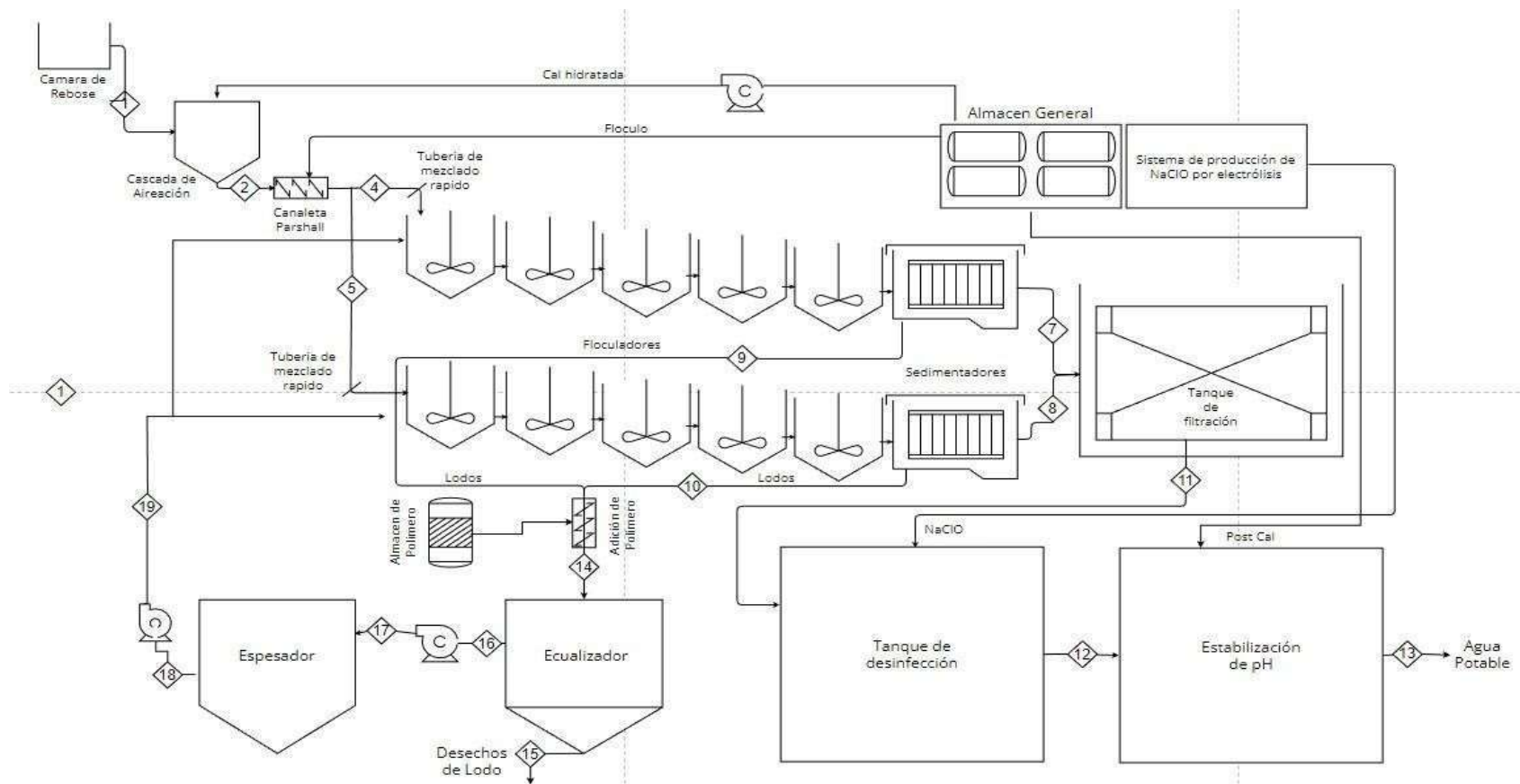
Nota. Estandarización del ácido clorhídrico con hidróxido de sodio

ANEXO 2

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PTAP EL DORADO Y PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE HIDRÓXIDO DE CALCIO CON DIFERENTES DOSIS Y SULFATO DE ALUMINIO AL 1%

Figura 22

Diagrama de flujo del de potabilización de agua en la PTAP el Dorado



Nota. Potabilización de agua en la PTAP el Dorado

Para realizar estas disoluciones se calculó la cantidad de masa necesaria para llegar a la concentración esperada de 1.85 g/L a 0.2 g/L en intervalos de 0.2 g/L recordando que el reactivo tiene pureza de 90%. Utilizando el cálculo inverso de la pureza se obtiene que:

- Para 1.85 g/L:

$$\frac{1.85 \text{ g/L}}{0.9} * 0.500 \text{ L} = 1.028 \text{ g}$$

- Para 1.65 g/L:

$$\frac{1.65 \text{ g/L}}{0.9} * 0.500 \text{ L} = 0.917 \text{ g}$$

- Para 1.45 g/L:

$$\frac{1.45 \text{ g/L}}{0.9} * 0.500 \text{ L} = 0.806 \text{ g}$$

- Para 1.25 g/L:

$$\frac{1.25 \text{ g/L}}{0.9} * 0.500 \text{ L} = 0.694 \text{ g}$$

- Para 1.00 g/L:

$$\frac{1.00 \text{ g/L}}{0.9} * 0.500 \text{ L} = 0.555 \text{ g}$$

- Para 0.80 g/L:

$$\frac{0.800 \text{ g/L}}{0.9} * 0.500 \text{ L} = 0.444 \text{ g}$$

- Para 0.60 g/L:

$$\frac{0.600 \text{ g/L}}{0.9} * 0.500 \text{ L} = 0.333 \text{ g}$$

- Para 0.40 g/L:

$$\frac{0.400 \text{ g/L}}{0.9} * 0.500 \text{ L} = 0.222 \text{ g}$$

- Para 0.20 g/L:

$$\frac{0.200 \text{ g/L}}{0.9} * 0.500 \text{ L} = 0.111 \text{ g}$$

Para realizar esta disolución se calculó el volumen necesario de sulfato de aluminio con densidad 1.304 g/ml para obtener una solución de 10 gr/L.

$$V_{Al_2(SO_4)_3(l)} \frac{1000 \text{ ml} * 0.01 \text{ g/ml}}{1.32 \text{ g/ml}} = 7.576 \text{ ml}$$

Este valor se agregó en aproximadamente 500 ml de agua destilada y completó a 1 000 ml en un balón volumétrico.

ANEXO 3

RESULTADOS OBTENIDOS DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO A DIFERENTES TIEMPOS DE AGITACIÓN

Tabla 10

Resultados obtenidos a partir de la titulación del hidróxido de calcio

Tiempo (min)	ml HCl	moles HCl	moles Ca(OH) ₂	Dosis Ca(OH) ₂ (mg/L)	Concentración Ca(OH) ₂ , t* (mol/L)	Concentración Ca(OH) ₂ , e* (mol/L)	% producido Ca(OH) ₂	Turbiedad (NTU)
15	7,55	8,31E-04	4,15E-04	2056	0,033	0,0166	50,35%	21,78
	7,25	7,98E-04	3,99E-04	1834	0,033	0,0160	48,35%	22,15
	6,30	6,93E-04	3,47E-04	1612	0,033	0,0139	42,01%	18,45
	5,70	6,27E-04	3,14E-04	1388	0,033	0,0125	38,01%	17,90
	4,20	4,62E-04	2,31E-04	1110	0,033	0,0092	28,01%	13,33
	3,70	4,07E-04	2,04E-04	888	0,033	0,0081	24,67%	10,21
	3,35	3,69E-04	1,84E-04	666	0,033	0,0074	22,34%	8,03
	2,05	2,26E-04	1,13E-04	444	0,033	0,0045	13,67%	7,50
1,35	1,49E-04	7,43E-05	222	0,033	0,0030	9,00%	5,40	
30	8,10	8,91E-04	4,46E-04	2056	0,033	0,0178	54,01%	16,30
	7,60	8,36E-04	4,18E-04	1834	0,033	0,0167	50,68%	13,90
	6,50	7,15E-04	3,58E-04	1612	0,033	0,0143	43,34%	10,90
	6,00	6,60E-04	3,30E-04	1388	0,033	0,0132	40,01%	6,29
	4,60	5,06E-04	2,53E-04	1110	0,033	0,0101	30,67%	12,59
	4,00	4,40E-04	2,20E-04	888	0,033	0,0088	26,67%	9,86
	3,60	3,96E-04	1,98E-04	666	0,033	0,0079	24,01%	6,66
	2,25	2,48E-04	1,24E-04	444	0,033	0,0050	15,00%	7,44
1,50	1,65E-04	8,25E-05	222	0,033	0,0033	10,00%	3,28	
45	8,25	9,08E-04	4,54E-04	2056	0,033	0,0182	55,01%	9,80
	7,70	8,47E-04	4,24E-04	1834	0,033	0,0169	51,35%	7,95
	6,80	7,48E-04	3,74E-04	1612	0,033	0,0150	45,34%	7,49
	6,10	6,71E-04	3,36E-04	1388	0,033	0,0134	40,68%	5,68
	5,00	5,50E-04	2,75E-04	1110	0,033	0,0110	33,34%	5,50
	4,10	4,51E-04	2,26E-04	888	0,033	0,0090	27,34%	4,85
	3,70	4,07E-04	2,04E-04	666	0,033	0,0081	24,67%	3,75
	2,80	3,08E-04	1,54E-04	444	0,033	0,0062	18,67%	4,39
1,75	1,93E-04	9,63E-05	222	0,033	0,0039	11,67%	3,01	
60	8,40	9,24E-04	4,62E-04	2056	0,033	0,0185	56,01%	4,59
	8,00	8,80E-04	4,40E-04	1834	0,033	0,0176	53,35%	7,62
	7,10	7,81E-04	3,91E-04	1612	0,033	0,0156	47,34%	3,93
	6,30	6,93E-04	3,47E-04	1388	0,033	0,0139	42,01%	5,25
	5,10	5,61E-04	2,81E-04	1110	0,033	0,0112	34,01%	4,91
	4,80	5,28E-04	2,64E-04	888	0,033	0,0106	32,01%	2,58
	4,00	4,40E-04	2,20E-04	666	0,033	0,0088	26,67%	2,40
	3,05	3,36E-04	1,68E-04	444	0,033	0,0067	20,34%	1,31
1,90	2,09E-04	1,05E-04	222	0,033	0,0042	12,67%	1,17	

Nota. Resultados obtenidos a partir de la titulación del hidróxido de calcio con t* como valores teóricos y e* como valores experimentales

Tabla 11

Resultados de pH de hidróxido de calcio en solución a 15, 30, 45 y 60 minutos

<i>pH de la solución respecto al tiempo de agitación y masa del hidróxido de calcio</i>				
Dosis (mg/L)	15 minutos	30 minutos	45 minutos	60 minutos
2056	12.22	11.94	12	11,87
1834	12.15	11.94	11.94	11.96
1612	12.14	11.96	11.84	11.78
1388	12.10	11.86	11.70	11.67
1110	11.96	11.79	11.61	11.50
888	11.85	11.75	11.57	11.44
666	11.75	11.70	11.50	11.40
444	11.60	11.49	11.48	11.32
222	11.31	11.38	11.36	11.29

Nota. Hidróxido de calcio en solución a 15, 30, 45 y 60 minutos

ANEXO 4

DATOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE JARRAS CON AGUA CRUDA CON HIDRÓXIDO DE CALCIO Y SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO 7.5% Y SÓLIDO 15.2%

Tabla 12

Primer ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio líquido

Hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio líquido 7.5% prueba 1					
Dosis Ca(OH) ₂ mg/L	pH precal	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH clarificada	Alcalinidad (mg/L CaCo ₃)
2056	8,9	0,86	7,90	4,98	2,80
1834	8,5	0,76	8,50	5,51	2,40
1612	8,1	0,78	8,30	5,55	2,48
1388	7,7	0,67	9,00	5,67	3,40
1110	7,4	0,70	9,34	5,5	3,50
888	6,7	0,67	9,50	5,44	3,30
666	6,5	0,56	10,20	5,39	3,10
444	6,3	0,53	10,60	5,39	3,30
222	6	0,51	10,80	5,28	3,50

Nota. Primer ensayo

Tabla 13

Segundo ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio líquido

Hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio líquido 7.5% duplicado					
Dosis Ca(OH) ₂ mg/L	pH precal	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH clarificada	Alcalinidad (mg/L CaCo ₃)
2056	8,80	0,91	8,10	4,70	2,70
1834	8,40	0,89	8,80	5,06	3,10
1612	8,00	0,79	8,10	5,43	3,20
1388	7,60	0,67	8,70	5,76	3,30
1110	7,30	0,72	9,40	5,70	3,30
888	6,60	0,65	9,50	5,67	3,50
666	6,40	0,58	9,80	5,52	3,30
444	6,20	0,51	10,20	5,43	3,40
222	5,90	0,50	10,50	5,29	4,02

Nota. Segundo ensayo

Tabla 14*Tercer ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio líquido*

Hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio líquido 7.5% triplicado					
Dosis Ca(OH) ₂ mg/L	pH precal	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH clarificada	Alcalinidad (mg/L CaCo ₃)
2056	8,7	0,93	7,8	4,87	3
1834	8,3	0,87	7,94	4,99	3,4
1612	7,9	0,81	8,2	5,38	3,3
1388	7,5	0,67	8,5	5,85	3,6
1110	7,2	0,69	9,4	5,9	3,8
888	6,8	0,66	9,5	5,93	3,69
666	6,6	0,57	10	5,96	3,5
444	6,4	0,57	10,1	5,5	3,57
222	6,1	0,51	10,1	5,7	3,7

*Nota. Tercer ensayo***Tabla 15***Primer ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio sólido*

Hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio sólido 15.2% prueba 1					
Dosis Ca(OH) ₂ mg/L	pH precal	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH clarificada	Alcalinidad (mg/L CaCo ₃)
2056	9,1	0,66	7,6	5,51	3,06
1834	8,8	0,63	7,6	5,64	3,24
1612	8,5	0,58	7,81	5,71	3,32
1388	8,2	0,56	7,98	5,46	3,44
1110	7,9	0,51	8,03	5,69	3,61
888	7,2	0,49	8,54	5,79	3,98
666	7	0,45	8,9	5,55	3,2
444	6,8	0,44	9,4	5,87	3,5
222	6,5	0,41	9,6	5,73	3,58

Nota. Primer ensayo

Tabla 16*Segundo ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio sólido*

<i>Hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio sólido 15.2% duplicado</i>					
Dosis Ca(OH) ₂ mg/L	pH precal	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH clarificada	Alcalinidad (mg/L CaCo ₃)
2056	9	0,86	7,94	4,6	2,45
1834	8,7	0,76	7,6	5,21	2,71
1612	8,5	0,78	7,7	5,36	2,88
1388	8,2	0,67	7,41	5,64	3,29
1110	8	0,7	7,93	5,49	3,41
888	7,7	0,67	8,39	5,22	3,56
666	7,3	0,56	8,61	5,36	3,48
444	7	0,53	8,9	5,45	3,76
222	6,5	0,51	9,46	5,68	3,89

Nota. Segundo ensayo**Tabla 17***Tercer ensayo para el hidróxido de calcio en solución con sulfato de aluminio sólido*

<i>Hidróxido de calcio en solución y sulfato de aluminio sólido 15.2% triplicado</i>					
Dosis Ca(OH) ₂ mg/L	pH precal	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH clarificada	Alcalinidad (mg/L CaCo ₃)
2056	8,8	0,57	7,41	4,92	2,75
1834	8,5	0,54	7,59	4,99	2,97
1612	8,4	0,49	7,89	5,27	3,35
1388	7,5	0,4	8,07	5,4	3,41
1110	7	0,42	8,21	5,61	3,46
888	6,8	0,39	8,48	5,69	3,52
666	6,6	0,36	8,97	5,74	3,51
444	6,4	0,32	9,04	5,76	3,71
222	6,5	0,31	9,2	5,6	3,89

Nota. Tercer ensayo

ANEXO 5

DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE JARRAS CON AGUA CRUDA CON SUSPENSIÓN ACUOSA DE HIDRÓXIDO DE CALCIO 17-18% Y 20-21%

Tabla 18

Primer ensayo para el HidroCalcio 17-18% en solución con sulfato de aluminio

Hidróxido de Calcio en Suspensión 17-18% Primera prueba				
Dosis mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
77	0,983	12	6,37	7
55	1,05	10,5	6,17	4,1
44	0,77	6,3	6,1	5,06

Nota. Primer ensayo

Tabla 19

Segundo ensayo para el HidroCalcio 17-18% en solución con sulfato de aluminio

Hidróxido de Calcio en Suspensión 17-18% Duplicado				
Dosis mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
77	1,1	11,9	5,9	5
55	1,3	11	6,2	5,2
44	1,01	7	6,1	4,8

Nota. Segundo ensayo

Tabla 20

Tercer ensayo para el HidroCalcio 17-18% en solución con sulfato de aluminio

Hidróxido de Calcio en Suspensión 17-18% Triplicado				
Dosis mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
77	0,9	10	6,2	6,84
55	0,98	10,8	6	5,6
44	1,2	9	6,3	5,78

Nota. Tercer ensayo

Tabla 21*Primer ensayo para el HidroCalcio 20-21% en solución con sulfato de aluminio*

<i>Hidróxido de Calcio en Suspensión 20-21% Primera prueba</i>				
Dosis mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
77	1,14	6,5	6,1	2,9
55	1,25	6,8	5,4	2,9
44	1,14	6,8	5,2	4

Nota. Primer ensayo**Tabla 22***Segundo ensayo para el HidroCalcio 20-21% en solución con sulfato de aluminio*

<i>Hidróxido de Calcio en Suspensión 20-21% Duplicado</i>				
Dosis mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
77	1,22	7,2	5,6	4,62
55	1,27	8,8	5,29	3,76
44	1,19	9	5,33	4,6

Nota. Segundo ensayo**Tabla 23***Tercer ensayo para el HidroCalcio 20-21% en solución con sulfato de aluminio*

<i>Hidróxido de Calcio en Suspensión 20-21% Triplicado</i>				
Dosis mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
77	1,95	9,5	6,7	6,03
55	1,54	7,6	6,6	5,64
44	1,64	7,8	6,63	5,42

Nota. Tercer ensayo

ANEXO 6

TABLAS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO DE LA PTAP EL DORADO DEL AÑO 2 023 Y 2 024

Tabla 24

Costo de mantenimiento tanques de cal año 2 023

Mantenimiento preventivo Año 2023			
No. Orden Sap	Actividad	Costo total	Mes
81796	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 389.853,00	Enero
82442	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 259.903,00	Febrero
83186	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 346.536,00	Marzo
83187	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 346.536,00	Marzo
84036	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 1.039.608,00	Abril
84745	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 346.536,00	Mayo
84746	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 519.804,00	Mayo
85339	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 173.268,00	Junio
85340	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 346.536,00	Junio
86204	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 346.536,00	Julio
86932	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 519.804,00	Agosto
87834	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 346.536,00	Septiembre
87835	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 346.536,00	Septiembre
88558	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 108.293,00	Octubre
89324	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 389.853,00	Noviembre
89325	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 389.853,00	Noviembre
90228	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 389.853,00	Diciembre
90229	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 346.536,00	Diciembre
Total		\$ 6.952.380,00	

Nota. Costo de mantenimiento tanques 2 023

Tabla 25*Costos de mantenimiento tanques de cal enero a septiembre del año 2 024*

Mantenimiento preventivo año 2 024			
No. Orden SAP	Actividad	Costo total	Mes
91130	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 190.596,00	Enero
91131	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 714.735,00	Enero
91863	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 285.894,00	Febrero
91864	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 571.788,00	Febrero
92829	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 428.841,00	Marzo
92830	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 428.841,00	Marzo
93602	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 357.369,00	Abril
94479	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 381.192,00	Mayo
94480	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 285.894,00	Mayo
95582	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 285.894,00	Junio
95583	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 762.384,00	Junio
96518	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 762.384,00	Julio
97641	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 571.788,00	Agosto
98371	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 1	\$ 381.192,00	Septiembre
98372	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA TANQUE HOMOGENIZACIÓN DE CAL 2	\$ 285.894,00	Septiembre
TOTAL		\$ 6.694.686,00	

Nota. Costos de mantenimiento tanques 2 024**Tabla 26***Costos de mantenimientos preventivos máquinas dosificadoras año 2 023*

Mantenimiento preventivo Año 2023			
No. Orden Sap	Actividad	Costo total	Mes
81696	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (01 Ene)	\$ 346.536,00	Enero
81697	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (08 Ene)	\$ 346.536,00	Enero
81706	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 2] - (15 Ene)	\$ 346.536,00	Enero
81713	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 3] - (22 Ene)	\$ 346.536,00	Enero
81722	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 4] - (29 Ene)	\$ 346.536,00	Enero
82318	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (05 Feb)	\$ 346.536,00	Febrero
82324	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 2] - (12 Feb)	\$ 346.536,00	Febrero
82349	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 3] - (19 Feb)	\$ 346.536,00	Febrero
82356	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 4] - (26 Feb)	\$ 346.536,00	Febrero
83086	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (05 Mar)	\$ 346.536,00	Marzo
83092	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 2] - (12 Mar)	\$ 346.536,00	Marzo
83099	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 3] - (19 Mar)	\$ 346.536,00	Marzo
83108	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 4] - (26 Mar)	\$ 346.536,00	Marzo
83930	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (02 Abr)	\$ 346.536,00	Abril
83932	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 2] - (09 Abr)	\$ 346.536,00	Abril
83940	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 3] - (16 Abr)	\$ 346.536,00	Abril
83950	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 4] - (23 Abr)	\$ 346.536,00	Abril
83958	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 5] - (30 Abr)	\$ 346.536,00	Abril

84633	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (07 Mayo)	\$ 346.536,00	Mayo
84640	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (14 Mayo)	\$ 346.536,00	Mayo
84649	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (21 Mayo)	\$ 346.536,00	Mayo
84656	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (28 Mayo)	\$ 346.536,00	Mayo
85187	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (04 Jun)	\$ 346.536,00	Junio
85190	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (11 Jun)	\$ 346.536,00	Junio
85226	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (18 Jun)	\$ 346.536,00	Junio
85235	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (25 Jun)	\$ 346.536,00	Junio
86095	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (02 Julio)	\$ 346.536,00	Julio
86097	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 2] - (09 Julio)	\$ 346.536,00	Julio
86104	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 3] - (16 Julio)	\$ 346.536,00	Julio
86113	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 4] - (23 Julio)	\$ 346.536,00	Julio
86120	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 5] - (30 Julio)	\$ 346.536,00	Julio
86798	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (06 agosto)	\$ 346.536,00	Agosto
86805	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (13 agosto)	\$ 346.536,00	Agosto
86814	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (20 agosto)	\$ 346.536,00	Agosto
86823	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (27 agosto)	\$ 346.536,00	Agosto
87511	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (03 sept)	\$ 433.170,00	Septiembre
87514	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (10 sept)	\$ 346.536,00	Septiembre
87523	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (17 sept)	\$ 346.536,00	Septiembre
87534	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (24 sept)	\$ 346.536,00	Septiembre
88358	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (01 oct)	\$ 346.536,00	Octubre
88359	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (08 oct)	\$ 346.536,00	Octubre
88373	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 2] - (15 oct)	\$ 346.536,00	Octubre
88386	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 3] - (22 oct)	\$ 346.536,00	Octubre
88444	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 4] - (29 oct)	\$ 346.536,00	Octubre
89119	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (05 Nov)	\$ 346.536,00	Noviembre
89125	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 2] - (12 Nov)	\$ 346.536,00	Noviembre
89134	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 3] - (19 Nov)	\$ 346.536,00	Noviembre
89166	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 4] - (26 Nov)	\$ 346.536,00	Noviembre
89988	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (03 Dic)	\$ 346.536,00	Diciembre
89991	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 2] - (10 Dic)	\$ 346.536,00	Diciembre
90000	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 3] - (17 Dic)	\$ 346.536,00	Diciembre
90009	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 4] - (24 Dic)	\$ 346.536,00	Diciembre
90018	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 5] - (31 Dic)	\$ 381.192,00	Diciembre
Total		\$ 18.487.698,00	

Nota. Costos preventivos máquinas dosificadoras 2 023

Tabla 27

Costos de mantenimiento correctivo máquinas dosificadoras año 2 023

Mantenimiento correctivo Año 2023			
No. Orden Sap	Actividad	Costo total	Mes
82748	MANTENIMIENTO CORRECTIVO DOSIFICADOR DE CAL 2	\$ 1.169.559	Febrero
82912	FALLA DOSIFICADOR DE CAL 2	\$ 259.902	Febrero
82914	REPARACION MAQUINA DOSIFICADORA DE CAL 2	\$ 433.170	Febrero
86751	FALLA DOSIFICADOR DE CAL 1	\$ 173.268	Julio
90503	FALLA MAQUINA DE CAL 1	\$ 519.804	Diciembre
90582	MANTENIMIENTO GENERAL MAQUINA DE CAL 2	\$ 129.951	Diciembre
90619	REVISION DOSIFICADORA DE CAL	\$ 259.902	Diciembre
Total		\$ 2.945.556	

Nota. Costos correctivos máquinas dosificadoras 2 023

Tabla 28

Costos mantenimiento preventivo de máquinas dosificadoras de enero a septiembre 2 024

Mantenimiento preventivo año 2 024			
No. Orden SAP	Actividad	Costo total	Mes
90997	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (07 Ene)	\$ 381.192,00	Enero
91006	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (14 Ene)	\$ 381.192,00	Enero
91017	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (21 Ene)	\$ 381.192,00	Enero
91026	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (28 Ene)	\$ 381.192,00	Enero
91736	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (04 Feb)	\$ 381.192,00	Febrero
91740	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (11 Feb)	\$ 190.596,00	Febrero
91750	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (18 Feb)	\$ 381.192,00	Febrero
91759	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (25 Feb)	\$ 381.192,00	Febrero
92581	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (03 Mar)	\$ 381.192,00	Marzo
92584	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 2] - (10 Mar)	\$ 381.192,00	Marzo
92593	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 3] - (17 Mar)	\$ 381.192,00	Marzo
92602	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 4] - (24 Mar)	\$ 381.192,00	Marzo
93478	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (14 Abr)	\$ 381.192,00	Abril
93487	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (21 Abr)	\$ 381.192,00	Abril
93496	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (28 Abr)	\$ 285.894,00	Abril
94346	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (05 May)	\$ 381.192,00	Mayo
94352	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (12 May)	\$ 381.192,00	Mayo
94361	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (19 May)	\$ 381.192,00	Mayo
94370	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (26 May)	\$ 381.192,00	Mayo
95338	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (02 Jun)	\$ 381.192,00	Junio
95340	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (09 Jun)	\$ 381.192,00	Junio
95349	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (16 Jun)	\$ 381.192,00	Junio
95455	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (23 Jun)	\$ 381.192,00	Junio
95587	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 5] - (30 Jun)	\$ 381.192,00	Junio
96385	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (07 Jul)	\$ 381.192,00	Julio
96395	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (14 Jul)	\$ 381.192,00	Julio
96405	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (21 Jul)	\$ 381.192,00	Julio
96415	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (28 Jul)	\$ 381.192,00	Julio
97484	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (04 Ago)	\$ 381.192,00	Agosto
97488	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (11 Ago)	\$ 285.894,00	Agosto
97644	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (18 Ago)	\$ 381.192,00	Agosto
97653	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (25 Ago)	\$ 381.192,00	Agosto
98204	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 1] - (01 Sep)	\$ 190.596,00	Septiembre
98205	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 1] - (08 Sep)	\$ 381.192,00	Septiembre
98215	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 2] - (15 Sep)	\$ 381.192,00	Septiembre
98224	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 3] - (22 Sep)	\$ 381.192,00	Septiembre
98238	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 2 [SEMANA 4] - (29 Sep)	\$ 381.192,00	Septiembre
TOTAL		\$ 13.532.316,00	

Nota. Costos preventivos máquinas dosificadoras enero a septiembre 2 024

Tabla 29*Costos de mantenimiento correctivo enero a septiembre 2 024*

Mantenimiento preventivo año 2 024			
No. Orden SAP	Actividad	Costo total	Mes
91497	REPARACION CADENA DE TRANSMISION MAQUINA CAL 1	\$ 142.947,00	Febrero
92247	REVISION CONTROL DE MAQUINA PRUEBA CAL	\$ 190.596,00	Febrero
92341	CORRECTIVO DOSIFICADORA DE CAL 1	\$ 285.894,00	Marzo
92935	REVISION MAQUINA DOSIFICADORA DE CAL 1	\$ 190.596,00	Marzo
92936	FALLA MAQUINA DOSIFICADORA DE CAL 2	\$ 190.596,00	Marzo
92937	CAMBIO CORREA MAQUINA DE CAL PRUEBA	\$ 95.298,00	Marzo
93029	REVISION MAQUINA DOSIFICADORA DE CAL 1	\$ 285.894,00	Marzo
93526	REVISION INSPECCION Y LIMPIEZA MOTORREDUCTOR AGITADOR CAL 1	\$ 142.947,00	Abril
93527	REVISION INSPECCION Y LIMPIEZA MOTORREDUCTOR AGITADOR CAL 2	\$ 142.947,00	Abril
94403	REVISION INSPECCION Y LIMPIEZA MOTORREDUCTOR AGITADOR CAL 1	\$ 142.947,00	Mayo
94404	REVISION INSPECCION Y LIMPIEZA MOTORREDUCTOR AGITADOR CAL 2	\$ 285.894,00	Mayo
95488	MANTENIMIENTO GENERAL, ENGRASE Y VERIFICACION DE RUIDOS MOTORREDUCTOR AGITADOR CAL 1	\$ 285.894,00	Junio
95489	REVISION INSPECCION Y LIMPIEZA MOTORREDUCTOR AGITADOR CAL 2	\$ 285.894,00	Junio
95587	REVISIÓN, INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DOSIFICADOR DE CAL N° 1 [SEMANA 5] - (30 Jun)	\$ 381.192,00	Junio
95983	MANTENIMIENTO GENERAL MAQUINA DOSIFICADORA DE CAL #1	\$ 571.788,00	Junio
96448	REVISIÓN, INSPECCIÓN LIMPIEZA MOTORREDUCTOR AGITADOR CAL N° 1	\$ 142.947,00	Julio
96449	MANTENIMIENTO GENERAL, ENGRASE Y VERIFICACION DE RUIDOS MOTORREDUCTOR AGITADOR CAL N° 2	\$ 142.947,00	Julio
98024	CORRECTIVO DOSIFICADORA DE CAL 1	\$ 762.384,00	Agosto
98573	REINSTALACION TABLERO Y ACOMETIDA DOSIFICADORA DE CAL	\$ 1.048.278,00	Septiembre
		TOTAL	\$ 5.717.880,00

Nota. Costos correctivos enero a septiembre 2 024

ANEXO 7

CÁLCULOS ASOCIADOS A LOS COSTOS

Para el CQ-HydroCalcio 17-18%:

$$\frac{40\mu l * 570 L}{1L} = 22\ 800 \mu l$$
$$22\ 800 \mu l * \frac{1 L}{1\ 000\ 000 \mu l} = 0.028 L$$

Se asume que es la cantidad de suspensión acuosa a utilizar por segundo ya que tiene caudal constante. Se realiza el cálculo para la cantidad de suspensión a utilizar por día:

$$0.028 \frac{L}{s} * \frac{1000 ml}{1 L} * \frac{86400 s}{1 día} = 1\ 969\ 920 \frac{ml}{día}$$
$$1\ 969\ 920 \frac{ml}{día} * \frac{1 L}{1000 ml} = 1\ 969.92 \frac{L}{día}$$

La densidad provista por la ficha de seguridad del proveedor es de 1.110 g/L, lo que significa que:

$$1\ 969.92 \frac{L}{día} * 1.110 \frac{g}{L} = 2\ 186.61 \frac{g}{día}$$

El costo asociado a una tonelada de CQ-HydroCalcio dado por el proveedor CQ ingeniería y evolución es de \$1'933 000, lo que significa que:

$$\frac{1\ 000 Kg * \frac{1000 g}{1 Kg}}{2\ 186.61 \frac{g}{día}} \cong 457 días \cong 1 año con 3 meses$$
$$365 días * \frac{\$1'933\ 000/Ton}{457 días} \cong \$1'543862/Ton$$

Para el hidróxido de calcio:

En la PTAP se está dosificando de la forma:

$$\frac{1.085 \frac{g}{L} Ca(OH)_2}{0.500 L} * 0.9 = 3.33 g Ca(OH)_2$$

Lo que significa que es una dosificación de aproximadamente 300%.

Según información obtenida directamente de la PTAP, diariamente se utilizan alrededor de 15 bultos de hidróxido de calcio, lo que significa que:

$$15 \frac{bultos}{día} * \frac{25 kg}{1 bulto} = 375 \frac{kg}{día}$$

$$375 \frac{kg}{día} * \frac{1000 g}{1kg} = 375000 \frac{g}{día}$$

$$\frac{375000 \frac{g}{día}}{20000 L} = 18.75 g/L \cdot día$$

$$18.75 \frac{g}{L \cdot día} * \frac{1000 mg}{1 g} = 18750 \frac{mg}{L \cdot día}$$

El costo asociado a una tonelada de hidróxido de calcio según información dada por el proveedor Riocal es de \$963 900 entonces para realizar los cálculos de proyección a un año:

$$375 \frac{kg}{día} * \frac{365 días}{1 año} = 136.875 \frac{kg}{año} \cong 137 \frac{kg}{año}$$

$$137 \frac{ton}{año} * \frac{\$963.900}{ton} = \$131.933.813 COP/año$$