



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS
GENERADOS EN UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN RURAL DEL MUNICIPIO
DE PALESTINA (CALDAS)**

JUAN DAVID JARAMILLO RENDÓN

Ingeniero Civil

Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales

Facultad de ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Química

Manizales, Colombia

2024



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**DESIGN OF THE TREATMENT SYSTEM FOR BY-PRODUCTS GENERATED IN
A RURAL POTABILIZATION PLANT IN THE MUNICIPALITY OF PALESTINA
(CALDAS)**

JUAN DAVID JARAMILLO RENDÓN

Ingeniero Civil

Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales

Facultad de ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Química

Manizales, Colombia

2024

**DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS
GENERADOS EN UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN RURAL DEL MUNICIPIO
DE PALESTINA (CALDAS)**

JUAN DAVID JARAMILLO RENDÓN

Trabajo Final de Maestría para optar por el título de:
Magister en Ingeniería – Ingeniería Ambiental

Director:

Iván Fernando Macías Quiroga, Ing. Qco., Dr. Ing-Qca

Co-Director:

Diego Alejandro Patiño Rincón, Ing. Civil, Máster en Recursos Hidráulicos

Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales

Facultad de ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Química

Manizales, Colombia

2024

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios y a la vida, a mi madre por el apoyo moral y emocional que me ha brindado en estos 35 años, a mi padre que tantos valores me ha inculcado, entre ellos la perseverancia, que hoy me permite culminar este proyecto.

A mi familia y amigos, que han sido testigos de mi proceso de desarrollo profesional que hoy me permite denominarme Máster en Ingeniería.

Tomo este proyecto como un triunfo personal, uno que me costó disciplina, constancia y esfuerzo tanto emocional como mental, pero hoy en día es una realidad.

La educación es la base por la cual se construye una sociedad. Sin educación, la sociedad verá gravemente mermada sus capacidades.

Karl Heinrich Marx

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, por la oportunidad que me brindó de formarme como un profesional íntegro, no solo con bases teóricas fuertes, sino también con una moral bien establecida. Agradezco a mi director Iván Fernando y co-director Diego Alejandro, quienes no solo me acompañaron en esta etapa de mi vida, sino que han sido parte de mi crecimiento como profesional desde hace varios años.

De igual manera agradezco a mis socios y colegas, Joswall, Francisco y Valentina, ingenieros que han trabajado a mi lado, me han apoyado y brindado valiosos consejos para continuar en este proyecto.

Finalmente agradezco al equipo de profesionales de mi empresa, los cuales encaminan día a día una mejor ingeniería para nuestra región, generando soluciones especializadas en la disminución de impactos ambientales.

RESUMEN

El agua es un recurso vital para todos los seres vivos, pero las actividades humanas actuales requieren de procesos de potabilización para garantizar un uso seguro, los métodos convencionales de potabilización incluyen captación, conducción, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Estos procesos generan como subproducto una mezcla lodo/agua, resultado de la precipitación de sólidos presentes en el agua cruda. Anteriormente, era común que las plantas de tratamiento de agua desecharan los lodos en cuerpos de agua, lo cual afectaba su calidad. Sin embargo, la normativa ambiental prohíbe esta práctica y establece la necesidad de gestionar adecuadamente los lodos generados durante el proceso de potabilización. Debido a las condiciones socioambientales actuales, es necesario tomar medidas para mejorar los sistemas de tratamiento de agua potable y reducir su impacto en el entorno. Por lo tanto, este proyecto propone una metodología que ofrece opciones para el diseño de un sistema básico de tratamiento, el cual incluye información detallada sobre la naturaleza de los subproductos, su cantidad, el diseño del sistema, los costos preliminares de implementación y las posibilidades de uso o disposición final de los lodos generados durante las actividades de potabilización del agua. En el presente trabajo se describen los estudios realizados en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) San Antonio, que abastece una zona turística en Palestina, Caldas. Se cuantificaron los lodos generados en el proceso de tratamiento, donde se tienen concentraciones de 12050 mg/L de sólidos totales, 125 mL/L de sólidos sedimentables, 171.60 mg SSV/L de sólidos suspendidos volátiles y 809.00 mg SST/L de sólidos suspendidos totales, los cuales se eliminan mediante el retrolavado de los filtros, se realizaron pruebas de tratabilidad donde se obtuvieron remociones por encima del 95% implementando como agente coagulante el sulfato de aluminio Tipo A ($Al_2(SO_4)_3$ – Tipo A) con una dosis de 70 mg/L y como agente espesante F7000 y DA-Aniónico (polímeros comerciales) con una dosis de 3 mg/L y se evaluaron alternativas para el diseño del sistema de tratamiento de los lodos, considerando costos, eficiencia y mantenimiento requerido, según la normativa ambiental vigente, RESOLUCIÓN 330 DE 2017.

Palabras clave: planta de potabilización, subproductos de potabilización, remociones, homogeneización, espesamiento, deshidratación.

ABSTRACT

Water is a vital resource for all living beings, but current human activities require purification processes to guarantee safe use. Conventional purification methods include collection, conduction, flocculation, sedimentation, filtration, and disinfection. These processes generate a sludge/water mixture as a by-product, the result of the precipitation of solids present in the raw water. Previously, it was common for water treatment plants to dump sludge into bodies of water, affecting its quality. However, environmental regulations prohibit this practice and establish the need to adequately manage the sludge generated during the purification process. Due to the current socio-environmental conditions, it is necessary to take measures to improve drinking water treatment systems and reduce their impact on the environment. Therefore, this project proposes a methodology that offers options for the design of a basic treatment system, which includes detailed information on the nature of the by-products, their quantity, the design of the system, the preliminary costs of implementation and the possibilities of final use or disposal of the sludge generated during water purification activities. This paper describes the studies carried out at the San Antonio Drinking Water Treatment Plant (PTAP), which supplies a tourist area in Palestina, Caldas. The sludge generated in the treatment process was quantified, where there are concentrations of 12050 mg/L of total solids, 125 mL/L of settleable solids, 171.60 mg SSV/L of volatile suspended solids and 809.00 mg TSS/L of suspended solids. totals, which are eliminated by backwashing the filters, treatability tests were carried out where removals above 95% were obtained using aluminum sulfate Type A ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – Type A) as a coagulant agent with a dose of 70 mg/L and as thickening agent F7000 and DA-Anionic (commercial polymers) with a dose of 3 mg/L and alternatives were evaluated for the design of the sludge treatment system, considering costs, efficiency and required maintenance, according to current environmental regulations, RESOLUTION 330 OF 2017.

Keywords: purification plant, purification by-products, removals, homogenization, thickening, dehydration.

CONTENIDO

DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
CONTENIDO	8
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABLAS	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 Objetivo general	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3. MARCO TEORICO	22
3.1 Lodos residuales (tratamiento de lodos).....	22
3.2 Lodos aluminosos.....	22
3.3 Normatividad	24
3.4 Características de los lodos.....	25
3.5 Métodos para el tratamiento de lodos	26
3.6 Regulación de descargas	29
3.7 Ubicación de la PTAP.....	31
3.8 Descripción de las unidades de tratamiento	33
3.9 Registros históricos disponibles	34
3.10 Caracterización de la zona del proyecto.....	35
3.10.1 Usos del agua.....	36
4. ANTECEDENTES	40

5.	METODOLOGÍA	43
5.1	Metodología para el objetivo 1:.....	43
5.2	Metodología para el objetivo 2:.....	46
5.3	Metodología para el objetivo 3:.....	47
5.4	Metodología para el objetivo 4:.....	56
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
6.1	Caracterización física, química y microbiológica	58
6.2	Lodos de retrolavado de filtros	62
6.3	Determinación de lodos.....	68
6.4	Pruebas de tratabilidad.....	70
6.4.1	Tiempo de lavado de filtros	71
6.4.2	Seguimiento a las mejores condiciones de operación.....	75
6.5	Descripción de alternativas	80
6.5.1	Alternativa 1: Homogeneización + Espesamiento + Deshidratación (Filtro prensa) con recirculación de agua clarificada	80
6.5.2	Alternativa 2: Homogeneización + Espesamiento + Deshidratación (Filtro banda) con recirculación de agua clarificada	83
6.5.3	Alternativa 3: Homogeneización + Espesamiento + Deshidratación (lecho de secado) con recirculación de agua clarificada	84
6.6	Evaluación de alternativas.....	85
6.6.1	Evaluación socioeconómica y técnica	85
6.6.2	Evaluación preliminar de costos.....	89
6.6.3	Ventajas /desventajas por alternativa	91
6.6.4	Descripción de la alternativa de tratamiento seleccionada.....	92
6.7	Diseño del sistema de tratamiento de subproductos de la potabilización.....	94
6.7.1	Diseño del tanque de homogenización	94

6.7.2	Diseño del espesador	101
6.7.8	Diseño del equipo de deshidratación: filtro prensa.....	108
6.8	Propuesta de recirculación de agua clarificada	111
6.9	Resumen de equipos a implementar	112
7.	CONCLUSIONES	114
8.	RECOMENDACIONES	116
9.	REFERENCIAS.....	117
10.	ANEXOS.....	120
	Anexo 1: Especificaciones técnicas de soplador sugerido	120
	Anexo 2: Especificaciones técnicas del sistema de preparación y dosificación de polímero espesante.....	121
	Anexo 3: Especificaciones técnicas de sistema de agitación y dosificación de sulfato de aluminio	122
	Anexo 4: Esquema de sistema de tratamiento de lodos y componentes principales	123
	Anexo 5: Preparación de químicos.....	124
	Anexo 6: Resultados de laboratorio ARnD – Lavado de filtros	125
	Anexo 7: Resultados de laboratorio ARnD – Pruebas de tratabilidad	129
	Anexo 8: Resultados de laboratorio ARnD – Agua clarificada.....	130
	Anexo 9: Resultados de laboratorio ARnD – Lodo espesado.....	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Alternativas de tratamiento y disposición de lodos. Tomado de: Ramos, 2008 (18).....	28
Figura 2. Alternativas de diseño y tratamiento (19).....	28
Figura 3. Ubicación del proyecto, Google Earth, 2023.....	32
Figura 4. Vista superior del sistema de tratamiento de agua potable, San Antonio	32
Figura 5. Vista de los seis (6) filtros de la PTAP, San Antonio.....	34
Figura 6. Seguimiento de turbiedad media diaria a la entrada de la PTAP.....	35
Figura 7. Seguimiento de turbiedad máxima diaria a la entrada de la PTAP	35
Figura 8. 10 cuencas hidrográficas que ocupan la jurisdicción de Caldas, CORPOCALDAS (23)	36
Figura 9. Mapa de límite de acuífero en la zona de interés, POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS (23)	37
Figura 10. Mapa de zonas de recarga de acuíferos en la zona de interés, POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS, azul-alta, amarillo-baja, naranja-moderada (23)	38
Figura 11. Mapa de vulnerabilidad de contaminación en la zona de interés, POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS, rojo-alta, verde-baja, blanca-despreciable (23)	38
Figura 12. Mapa de usos del agua en la zona de interés (concesiones, captaciones y ocupaciones de cauce), POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS, fucsia-concesiones, rojo-captación, azul-ocupaciones de cauce (23).....	39
Figura 13. Mapa de usos del agua en la zona de interés (vertimientos y ocupaciones de cauce), POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS, negro-vertimientos, azul-ocupaciones de cauce (23)	39
Figura 14. Placas aireadoras del agua cruda.....	44
Figura 15. Tanques de preparación y dosificación de químicos (coagulante – cloro).....	44
Figura 16. Sistema de filtración.....	45
Figura 17. Tanque de almacenamiento de agua cruda (flecha de color naranja)	45
Figura 18. Ubicación de los puntos monitoreados, Google Earth - 2023	58
Figura 19. Aforo volumétrico, aguas arriba del vertimiento	59
Figura 20. Medición de variables in situ, aguas arriba del vertimiento	60
Figura 21. Toma de muestra de variables fisicoquímicas (izquierda - aguas arriba, derecha – aguas abajo).....	60
Figura 22. Toma de muestra de variables microbiológicas (izquierda - aguas arriba, derecha – aguas abajo).....	61

Figura 23. Aforo volumétrico del vertimiento.....	63
Figura 24. Toma de muestras fisicoquímicas, vertimiento	63
Figura 25. Toma de muestras microbiológicas, vertimiento	64
Figura 26. Nevera con muestras del vertimiento.....	64
Figura 27. Mediciones in situ del vertimiento	65
Figura 28. Cámara de aforo y medición de caudal en la cámara	70
Figura 29. Tiempo de lavado de filtro 1 vs. Turbiedad	72
Figura 30. Tiempo de lavado de filtro 6 vs. Turbiedad	72
Figura 31. Recipientes con el agua de lavado del filtro 1	73
Figura 32. Recipientes con el agua de lavado del filtro 6.....	73
Figura 33. Curva de Turbiedad vs SST.....	74
Figura 34. Muestras enviadas al laboratorio, para cuantificar SST	74
Figura 35. Montaje de muestras finales	76
Figura 36. Resultados de las pruebas finales, después de dos minutos de sedimentación.....	76
Figura 37. Resultados finales de la prueba.....	76
Figura 38. Determinación de densidad y resultado de filtración.....	77
Figura 39. Envasado de muestras microbiológicas tratadas.....	78
Figura 40. Envasado de muestras fisicoquímicas tratadas	78
Figura 41. Muestra de lodos espesada con los químicos seleccionados.....	79
Figura 42. Esquema de alternativa 1	81
Figura 43. Esquema de alternativa 2	83
Figura 44. Esquema de alternativa 3	84
Figura 45. Esquema de sistema de recirculación de agua de lavado de filtros.....	93
Figura 46. Esquemización de equipos	93
Figura 47. Cámara de recepción de lodos de retrolavado	94
Figura 48. Bomba sumergible para transporte de lodos desde homogeneizador a espesador.	95
Figura 49. Homogeneizador – vista transversal.....	97
Figura 50. Homogeneizador – vista en planta.....	97
Figura 51. Difusor de burbuja gruesa.....	99
Figura 52. Curvas de difusor.....	99
Figura 53. Esquema balance de masa del espesador.	102

Figura 54. Tolva de lodos espesados	106
Figura 55. Características de compresor para difusión de aire en las tolvas de lodo espesado	106
Figura 56. Vista de perfil de sistema de espesamiento.....	107
Figura 57. Vista en planta de plano de sistema de espesamiento	107
Figura 58. Esquema balance de masa en filtro prensa de placas. Fuente: (33)	109
Figura 59. Características de bomba de paso de lodos de espesador a filtro prensa.....	109
Figura 60. Plano caseta de filtro de prensa.....	110
Figura 61. Vista en planta de zodme para almacenamiento y secado de lodos deshidratados por filtro prensa.....	110
Figura 62. Esquema de sistema de tratamiento de lodos y componentes principales.....	111
Figura 63.Plano en planta de sistema de recirculación de agua clarificada.....	112

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Categorización de lodos. Tomado de: Ramírez. 2020 (5).....	17
Tabla 2. Límites de contaminantes. Tomado de: EPA,1994 (6).....	17
Tabla 3. Tipos de contaminantes y sus impactos. Tomado de: Lizarazo, 2013 (7).....	18
Tabla 4. Ventajas y desventajas de cada sistema de tratamiento. Tomado de: Granados, 2021 (17)	27
Tabla 5. Componentes y sus respectivos pesos. Tomado de: RAS, 2000 (30)	48
Tabla 6. Factores considerados por componentes y su respectivo peso. Adaptado de: RAS, 2000 (30)	49
Tabla 7. Factores, criterios y parámetros de decisión. Adaptado de: RAS, 2000 (30).....	49
Tabla 8. Procesos de tratamiento y disposición de lodos. Tomado de: Ramos 2018 (18).....	54
Tabla 9. Coordenadas de puntos monitoreados	58
Tabla 10. Resultados de variables in situ, quebrada Sin Nombre.....	59
Tabla 11. Resultados de caracterización fisicoquímica y microbiológica	61
Tabla 12. Resultados de variables in situ, vertimiento	62
Tabla 13. Resultados de caracterización fisicoquímica del vertimiento y comparación con la normativa (Art. 15 – Res. 631 de 2015).....	65
Tabla 14. Resultados del aforo de lodos livianos.....	68
Tabla 15. Tiempo de lavado de filtros	71
Tabla 16. Resultados de cuantificación de SST del vertimiento	75
Tabla 17. Montaje de pruebas y resultados obtenidos.....	75
Tabla 18. Resultados de velocidad de filtración en las pruebas finales	77
Tabla 19. Resultados de cuantificaciones finales en laboratorio.....	79
Tabla 20. Evaluación de alternativas, componente socioeconómico y técnico	85
Tabla 21. Características de las alternativas para tratamiento de los lodos	90
Tabla 22. Análisis de ventajas y desventajas de alternativas	91
Tabla 23. Parámetros del tanque de homogenización	96
Tabla 24. Cantidad de aire requerido o demandado para el sistema de tratamiento	101
Tabla 25. Valores a la entrada y salida del espesador	101
Tabla 26. Valores a la entrada y salida del filtro prensa	108
Tabla 27. Equipos presentes en el sistema de tratamiento.....	113

1. INTRODUCCIÓN

El agua ha sido históricamente considerada como un recurso vital para la subsistencia de todos los seres vivos, sin embargo, las actividades humanas actuales han convertido el proceso de potabilización en algo fundamental para garantizar un uso seguro y adecuado de este recurso. Los métodos convencionales utilizados para la potabilización del agua se pueden resumir en etapas de captación, conducción, sedimentación, filtración y desinfección, durante estos procesos, se generan lodos como subproducto, los cuales son el resultado de la precipitación de los sólidos presentes en el agua cruda, ya sea mediante el paso lento del agua a través de tanques sedimentadores o mediante la adición de productos químicos coagulantes. Actualmente, algunas empresas de abastecimiento de agua disponen de los lodos producidos en rellenos sanitarios, pero en su mayoría, los lodos son descargados directamente en cuerpos de agua. Esta práctica representa un problema significativo debido a los altos contenidos de material sólido, materia orgánica y, en algunos casos la presencia residual de aditivos químicos utilizados durante el proceso de purificación del agua (1).

La normativa ambiental nacional establece que las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) tienen prohibido desechar los lodos generados durante los diversos procesos de tratamiento en los cuerpos de agua de los que obtienen el suministro. Esto se debe a que anteriormente era una práctica común en las plantas de potabilización verter los residuos resultantes de los procesos de lavado y purga directamente en los ríos, lo cual afectaba la calidad y los niveles de estos, generando un impacto negativo. El tratamiento de lodos en una planta potabilizadora de agua es un proceso fundamental para el manejo adecuado de los residuos sólidos generados durante el proceso de potabilización del agua. Aunque el objetivo principal de una PTAP es producir agua potable, segura y de alta calidad, es inevitable que se generen lodos como subproducto durante este proceso. Estos lodos se conforman por sólidos suspendidos, partículas y coágulos que se acumulan durante las etapas de coagulación, floculación, sedimentación y filtración (1).

La disposición de lodos en lugares inapropiados tiene implicaciones adicionales con relación al cambio climático, ya que contribuye al problema del calentamiento global. Es importante destacar que la disposición de estos en rellenos sanitarios conlleva a una significativa generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), debido a las condiciones anaeróbicas presentes en dichos depósitos, que

favorecen la producción de metano (CH₄). Esto resalta la importancia de minimizar las emisiones de GEI mediante un adecuado sistema de disposición (2).

El tratamiento de lodos se realiza principalmente con el propósito de lograr reducir la presencia de patógenos, se busca disminuir y eliminar los microorganismos presentes en los lodos. Esto es esencial para garantizar la seguridad sanitaria y prevenir la propagación de enfermedades. También, para eliminar los olores desagradables, se aplican técnicas para reducir los compuestos volátiles y los agentes responsables de los olores desagradables; mejorando la aceptabilidad del lodo tratado. Finalmente, para reducir o eliminar el potencial de putrefacción, esto evita la liberación de compuestos indeseables y contribuye a la mitigación del impacto ambiental (3).

Los lodos se clasifican principalmente en base a la cantidad de metales pesados que contienen y a su calidad microbiológica, existen dos categorías principales: lodo peligroso y lodo no peligroso. El lodo peligroso se caracteriza por la presencia de contaminantes tóxicos, tal como lo establece la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). Por otro lado, el lodo no peligroso presenta concentraciones de componentes inferiores a los límites establecidos por la EPA, dentro de esta categoría, los lodos no peligrosos pueden clasificarse adicionalmente en dos subcategorías, basándose en criterios más estrictos definidos por la EPA en la normativa denominada "Concentración del componente para una calidad excepcional". Estas subcategorías son conocidas como lodo no peligroso de Buena Calidad y lodo no peligroso de Mala Calidad, dependiendo de su contenido de metales pesados (4).

La clasificación de los lodos dependerá de los métodos de estabilización a los que hayan sido sometidos y de las diferentes opciones en las que se planea utilizarlos. De acuerdo con lo anterior, la categorización se realiza según lo que muestra la siguiente tabla (5).

Tabla 1. Categorización de lodos. Tomado de: Ramírez. 2020 (5)

Categoría	Usos
A	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas de amplias extensiones naturales como parques, lotes abandonados, cementerios, entre otros. - Zonas de esparcimiento, contacto con el público como jardines o arborización. - Recreación.
B	<ul style="list-style-type: none"> - Posibles usos urbanos que no tengan contacto directo con el público. - Usos agrícolas y ganaderos. - Productos fertilizantes y tratamiento de suelos contaminados. - Aditivos en materiales y obras de construcción. - Estabilización de taludes. - Insumo para ciertos rellenos sanitarios.
C	<ul style="list-style-type: none"> - Mejoramiento de suelos agrícolas. - Usos forestales. - Casos de estudio para la valoración energética.

Cada aplicación de biosólidos en el suelo debe cumplir con las concentraciones máximas establecidas para los contaminantes según la EPA. Estas concentraciones límite representan los valores máximos permitidos para 10 metales pesados como se evidencia en la siguiente tabla (6).

Tabla 2. Límites de contaminantes. Tomado de: EPA, 1994 (6)

Elemento	Valor límite (mg/kg mat. seca)	Tasa de carga acumulativa (kg/Ha)	Concentración del componente para una calidad excepcional (mg/kg)	Tasa de carga anual (kg/Ha año)
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	3000	1200	3000	150
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	-	-	-
Níquel	420	420	420	21

Elemento	Valor límite (mg/kg mat. seca)	Tasa de carga acumulativa (kg/Ha)	Concentración del componente para una calidad excepcional (mg/kg)	Tasa de carga anual (kg/Ha año)
Selenio	100	36	100	5.0
Zinc	7500	2800	2800	140

Es necesario establecer un sistema de gestión organizado, documentado y controlado para el manejo de este tipo de residuos. Esto implica la implementación de regulaciones que abarquen diversos aspectos, como la clasificación del lodo, los límites de contaminantes tóxicos y lixiviados, los procedimientos de caracterización de lodos, el transporte, el almacenamiento, el tratamiento y la disposición final, entre otros. Estas regulaciones tienen como objetivo garantizar un manejo adecuado y seguro desde una perspectiva ambiental, evitando impactos negativos en la salud de la población y el medio ambiente (4).

La implementación de estas regulaciones permitirá regular y controlar la totalidad de las actividades relacionadas con el manejo de los lodos, abarcando todas las etapas, desde la generación hasta la disposición final. El objetivo final es lograr un manejo ambientalmente adecuado de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento (4).

El tratamiento de agua puede generar diferentes tipos de contaminantes, como los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3. Tipos de contaminantes y sus impactos. Tomado de: Lizarazo, 2013 (7)

Tipo de contaminante	Impacto ambiental, sanitario y/o social
Compuestos orgánicos biodegradables	Causa degradación biológica, que incrementa la demanda de oxígeno en los cuerpos receptores y ocasiona condiciones indeseables.
Compuestos orgánicos refractarios	Pueden causar problemas de sabor y olor. También, pueden ser tóxicos y carcinogénicos.
Metales pesados	Son tóxicos, pueden interferir con el tratamiento y reúso del efluente.
Microorganismos patógenos	Causan enfermedades transmisibles.

Tipo de contaminante	Impacto ambiental, sanitario y/o social
Nutrientes	Pueden causar eutrofización.
Sólidos inorgánicos disueltos	Pueden interferir en el reúso del efluente.
Sólidos suspendidos	Causa depósitos de lodo y condiciones anaerobias en ecosistemas acuáticos.

El manejo de lodos en una planta de tratamiento de agua potable tiene como objetivo principal reducir la cantidad de sólidos generados, estabilizarlos y garantizar su disposición o reutilización de manera segura y sostenible. Este proceso implica varias etapas claves para lograr estos objetivos, la primera etapa del tratamiento de lodos es la homogeneización que consiste en mezclar los lodos generados en diferentes puntos de una planta de tratamiento; este proceso tiene como objetivo principal obtener una consistencia uniforme en los lodos, lo que facilitará su posterior tratamiento. La homogeneización puede lograrse mediante el uso de tanques o mezcladores que agitan los lodos para garantizar una distribución homogénea de los sólidos suspendidos y los componentes líquidos. Después de la homogeneización, los lodos pasan a la etapa de espesamiento; durante esta etapa los lodos aumentan su concentración de sólidos y reducen la cantidad de agua presente en ellos, esto se logra utilizando equipos como espesadores gravitacionales, centrífugas, así como también, con la aplicación de agentes químicos que favorezcan dicha separación. El espesamiento ayuda a disminuir el volumen de los lodos, lo que facilita su manejo y transporte posterior. La siguiente etapa es la deshidratación; durante este proceso, se reduce aún más el contenido de agua de los lodos, lo que resulta en una disminución adicional del volumen. La deshidratación se puede lograr mediante tecnologías como lagunas, filtros de banda, filtros prensa o sistemas de secado térmico. La deshidratación es esencial para facilitar el manejo, el transporte y la disposición final de los lodos.

Una vez que los lodos han sido homogenizados, espesados y deshidratados, se pueden considerar diferentes opciones de disposición o reutilización, esta puede incluir su envío a instalaciones especializadas, como rellenos sanitarios, donde se les dará un tratamiento adecuado para minimizar los impactos ambientales. La reutilización de los lodos puede implicar su aplicación en proyectos agrícolas como restauración del suelo, donde pueden aportar nutrientes y mejorar la fertilidad. También es posible utilizar los lodos deshidratados como fuente de combustible o energía en instalaciones industriales o como material para la construcción. Es importante destacar que el tratamiento de lodos en una planta de tratamiento de agua potable debe cumplir con las regulaciones,

normativas ambientales y de salud aplicables, garantizando una gestión segura y responsable de los residuos sólidos.

En el presente documento se describen los estudios realizados en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) San Antonio, la cual se encarga de abastecer una zona rural, perteneciente al municipio de Palestina, Caldas. Este trabajo se enfoca en la cuantificación de lodos generados en el proceso de tratamiento, los cuales son retenidos en las unidades de filtración que componen el sistema de tratamiento y son eliminados al realizar retrolavado sobre estos. Realizando campañas de muestreo, se realizó seguimiento al lavado de filtros, a partir de dichas muestras se llevaron a cabo las pruebas de tratabilidad, las cuales a su vez fueron insumo para la evaluación de alternativas y realización del diseño del sistema de tratamiento de los lodos, planteando diferentes alternativas y justificando la elección del sistema a partir de la evaluación preliminar de costos, remociones teóricas obtenidas y mantenimiento requerido, según lo establecido en la normativa ambiental vigente, decreto 1076 de 2015, resolución 0631 de 2015, resolución 0330 de 2017 y su modificatoria resolución 0799 de 2021.

Con el propósito de DISEÑAR UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS GENERADOS EN UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN RURAL DEL MUNICIPIO DE PALESTINA (CALDAS), se plantearon los siguientes objetivos, teniendo como objetivo general diseñar el tren de tratamiento de los subproductos (lodo/agua) generados en el retrolavado de filtros de la planta de potabilización “San Antonio” ubicada en la zona rural del municipio de Palestina (Caldas). Y como objetivos específicos, primero caracterizar física y químicamente los subproductos (lodo/agua) generados en la planta de potabilización “San Antonio”, segundo, realizar pruebas de tratabilidad a los subproductos para establecer, cantidad de lodos generados y parámetros de diseño, tercero, evaluar diferentes alternativas de tratamiento para la selección del tren de tratamiento más adecuado de un diseño conceptual y finalmente, plantear el diseño detallado del sistema de tratamiento.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar el tren de tratamiento de los subproductos (lodo/agua) generados en el retrolavado de filtros de la planta de potabilización “San Antonio” ubicada en la zona rural del municipio de Palestina (Caldas)

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar física y químicamente los subproductos (lodo/agua) generados en la planta de potabilización “San Antonio”.
- Realizar pruebas de tratabilidad a los subproductos para establecer, cantidad de lodos generados y parámetros de diseño.
- Evaluar diferentes alternativas de tratamiento para la selección del tren de tratamiento más adecuado de un diseño conceptual.
- Plantear el diseño detallado del sistema de tratamiento

3. MARCO TEORICO

3.1 Lodos residuales (tratamiento de lodos)

La potabilización de agua es un procedimiento de gran importancia para los seres humanos, en Colombia se encuentra reglamentada mediante la Resolución 2115 de 2007 (8). Durante este proceso, se generan residuos debido a la sedimentación de partículas suspendidas en el agua, que a menudo están acompañadas de residuos químicos formados por la coagulación de sólidos presentes en el agua natural. Estos sólidos no se sedimentan de manera natural y pueden ocasionar problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y eliminados mediante métodos físicos o químicos (1).

El propósito principal del tratamiento de los lodos residuales derivados de las plantas de potabilización es generar un lodo con una concentración de sólidos que permita su disposición segura, tanto para el medio ambiente como para la salud pública, utilizando diferentes técnicas de tratamiento y gestión. Es fundamental disminuir el volumen total de los lodos producidos en la planta de potabilización para facilitar el diseño, puesta en marcha y operación de un sistema de tratamiento enfocado en esta problemática (9).

A pesar de que en Colombia existen regulaciones para el manejo y disposición de los vertimientos resultantes del tratamiento del agua tanto doméstica como no doméstica, las cuales establecen límites para sus descargas, las autoridades ambientales no ejercen un control efectivo sobre los subproductos generados en las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP). La evaluación de alternativas, la caracterización de los subproductos y las propuestas del reúso y/o descargas de estos son factores esenciales tanto en su dimensionamiento como en su operatividad (9).

3.2 Lodos aluminosos

El manejo de los lodos en las plantas de tratamiento es crucial y requiere especial atención. Estos lodos, que provienen de la sedimentación y filtración, pueden ser generados por la coagulación con sulfato de aluminio o compuestos férricos para tratar el color o la turbidez (10). Los lodos aluminosos resultantes representan un riesgo ambiental grave, ya que su descarga en cuerpos de agua afecta bacterias acuáticas, algas y organismos bentónicos debido a la toxicidad del aluminio. Esto amenaza,

por su acumulación, a los ecosistemas fluviales, como arroyos, pantanos y lagos. Además, los lodos aluminosos pueden tener impactos perjudiciales en la salud humana, especialmente en las células renales, lo que puede afectar el funcionamiento de otras células, como las del corazón y el cerebro (1).

Aunque los procesos químicos pueden tener efectos adversos en el medio ambiente, en el tratamiento de agua potable se presta especial atención al aluminio aportado a través de la coagulación. Los lodos aluminosos se caracterizan por atrapar partículas sólidas en suspensión o disolución presentes en el agua, las cuales son eliminadas durante el proceso de sedimentación. Estos lodos reciben su nombre debido a que los coagulantes utilizados durante el proceso dejan residuos de aluminio, que posteriormente son vertidos en los ríos, convirtiéndose en una problemática ambiental y de salud pública (11).

Es fundamental promover la recuperación de los lodos aluminosos para evitar los impactos ambientales derivados de su vertimiento directo, desarrollando propuestas de reducción y reúso. Para lograrlo, es necesario llevar a cabo una caracterización exhaustiva de los lodos, incluyendo la cuantificación de su cantidad, así como el análisis de su composición microbiológica, física y química. Esta información permitirá determinar las posibles alternativas de tratamiento, uso y aprovechamiento de estos. Estableciendo medidas de control y aprovechamiento, que a su vez mitigarían los impactos ambientales y sociales generando efectos positivos en la región (12).

El vertimiento no tratado de los lodos descargados por las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en las fuentes hídricas cercanas tiene diversos impactos, los cuales incluyen el aislamiento de la fauna bentónica en los ríos, la disminución del oxígeno disuelto y la introducción de microorganismos patógenos altamente concentrados. Además, la presencia de metales como el aluminio, presente en los lodos debido a su dosificación en el tratamiento y el hierro aportado por las fuentes abastecedoras de la PTAP, representan un riesgo ambiental que pueden afectar el bienestar de los consumidores (12).

3.3 Normatividad

La Resolución 330 de 2017 y su modificatoria, la Resolución 799 de 2021, establecen diversas actividades para el manejo de lodos en plantas de tratamiento, estas actividades abarcan la caracterización de los lodos, la evacuación de las unidades de tratamiento de agua potable, el tratamiento de los lodos evacuados y la disposición final de los lodos tratados (artículos 123 a 126). Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario implementar técnicas efectivas para reducir su volumen y eliminar contaminantes, garantizando su adecuada disposición. También, el artículo 100 resalta la importancia de seleccionar un terreno con suficiente espacio para facilitar el manejo eficiente de los lodos (13) (14).

Según el Parágrafo 20 del Artículo 125 de la Resolución 330 de 2017, después de llevar a cabo la caracterización de los lodos y determinar su composición, es importante evaluar la necesidad de utilizar productos químicos para su acondicionamiento. Estos productos químicos pueden incluir coagulantes, floculantes, coadyuvantes, alcalinizantes y acidificantes, dependiendo de las características de los lodos y los objetivos del tratamiento (13).

Mediante la ejecución de pruebas de tratabilidad se determina la necesidad del uso de productos químicos, teniendo en cuenta que esta se debe ejecutar como insumo para el diseño del sistema de tratamiento de agua residual no doméstica, teniendo en cuenta que en la primera unidad diseñada corresponde al homogeneizador el cual tiene como función la mezcla completa de la descarga y seguidamente la unidad de espesamiento la cual funciona mediante lotes, donde ingresa el efluente del homogeneizador y el químico dosificado. Los productos químicos utilizados cumplirán diferentes funciones, como la aglomeración de partículas, la mejora de la sedimentación, la separación de sólidos/líquidos, el ajuste de pH, entre otros (13).

Es fundamental llevar a cabo este acondicionamiento químico adecuadamente, siguiendo las dosis y pautas establecidas, para lograr los resultados deseados en términos de clarificación y estabilización de los lodos, teniendo en cuenta los resultados de las pruebas de tratabilidad. Asimismo, se debe prestar especial atención a la gestión adecuada de los residuos químicos generados durante este proceso, siguiendo las normativas y regulaciones ambientales vigentes (13).

La Resolución 2115 de 2007 establece los requisitos sanitarios del agua potable y los parámetros de calidad que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano. Su objetivo es definir las características físicas, químicas y microbiológicas del agua potable, así como los criterios y métodos de control y vigilancia de su calidad. Estos parámetros abarcan aspectos como turbidez, color, olor, pH, conductividad, cloro residual y presencia de sustancias tóxicas. La resolución también define los métodos de análisis a utilizar para su respectiva cuantificación. Además, establece criterios, frecuencias de muestreo, análisis y metodologías de cuantificación, así como las responsabilidades de las entidades encargadas de la vigilancia y las acciones a tomar en caso de incumplimiento en estos parámetros (8).

3.4 Características de los lodos

El lodo generado en las plantas de tratamiento de agua tiene características especiales, ya que está compuesto por una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas. Estas sustancias incluyen sólidos presentes en el agua cruda, como arcillas que causan turbidez, y compuestos no minerales introducidos por hojas, plancton y desechos industriales o domésticos. También se agregan sólidos durante el proceso de tratamiento, como hidróxidos de aluminio y/o hierro, hidróxidos de calcio, polielectrolitos, carbón activado en polvo y otros productos químicos utilizados en la purificación (10). Es importante tener en cuenta que las características físicas y químicas, así como los volúmenes de los lodos, varían en cada caso. En los sedimentadores, los lodos representan alrededor del 60-70% de los sólidos totales, mientras que en los filtros esta cifra varía entre el 30% y el 40%. Sin embargo, en las plantas que eliminan hierro y manganeso, la mayoría de los lodos se retienen en los filtros, con un porcentaje de retención que va del 50% al 90% (10).

Los subproductos generados en las plantas de tratamiento de aguas se componen de una mezcla de lodo/aguas, las características y cantidades producidos de esta mezcla varían y pueden expresarse en términos de masa (base seca) o volumen (base húmeda), dependiendo de varios factores. Estos factores incluyen el tipo y caudal de agua tratada, las condiciones climáticas, el diseño de la instalación y, sobre todo, el tipo de proceso utilizado para el tratamiento (15).

Es importante destacar que cada fuente de agua tiene sus propias características, y no es posible predecir con certeza el volumen y peso de los sedimentos esperados a partir de un solo análisis.

Mientras algunas aguas con alto color y turbidez pueden tener altos porcentajes de sólidos decantados, otras con las mismas condiciones pueden tener valores más bajos. Por esta razón, antes de diseñar el tratamiento de lodos, es crucial llevar a cabo una serie de estudios de laboratorio utilizando pruebas como jarras de sedimentación, conos Imhoff o cilindros graduados, las cuales permiten determinar el volumen de lodos sedimentables, evaluar la capacidad de compactación de los lodos en los concentradores utilizando agentes químicos y obtener el peso de los lodos secos removidos (10).

Estos ensayos deben repetirse varias veces utilizando diferentes calidades de agua de la fuente a tratar, hasta obtener un conjunto confiable de datos, los cuales proporcionarán información crucial para el diseño adecuado del tratamiento de lodos, asegurando una gestión eficiente y efectiva de los mismos. Cada planta de tratamiento de aguas residuales puede generar lodos con diferentes propiedades y volúmenes, debido a las particularidades de sus operaciones y a los factores mencionados anteriormente. Por lo tanto, es importante considerar estas variaciones al diseñar sistemas de manejo y tratamiento de lodos, para garantizar una correcta gestión (10).

3.5 Métodos para el tratamiento de lodos

Dentro de los métodos utilizados para el tratamiento de lodos, la Resolución 330 define que el sistema de tratamiento debe contar con una unidad de homogeneización, una unidad de espesamiento y una unidad de deshidratación (13), dentro de esta última se encuentran diferentes alternativas como lechos de secado, lagunas de deshidratación y deshidratación mecánica, entre otros. Sin embargo, no hay un método generalizado, ya que la composición de los lodos puede variar significativamente. Además, la disponibilidad de recursos financieros juega un papel importante en la selección del proceso de tratamiento a adoptar, considerando soluciones a corto, mediano y largo plazo (16). En la siguiente tabla se muestra un compilado de ventajas y desventajas cada unidad de tratamiento.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de cada sistema de tratamiento. Tomado de: Granados, 2021
(17)

Unidad de tratamiento	Ventajas	Desventajas	Facilidad de uso
Homogeneización o equalizador	<ul style="list-style-type: none"> -Compensa los picos de carga y/o caudal que pueden ocurrir en momentos puntuales del proceso. -Se pueden adaptar fácilmente para satisfacer los requisitos de procesos específicos y pueden manejar una amplia gama de viscosidades, temperaturas y presiones. -Pueden procesar grandes volúmenes de líquido de forma rápida y eficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> -Requieren un mantenimiento regular, incluida la limpieza y la calibración, para garantizar que funcionen correctamente. -Pueden tener limitaciones en el tamaño de la muestra que pueden procesar, lo que puede ser un problema para aplicaciones a gran escala. -Puede conducir a la generación de calor y puede causar daño térmico a la muestra. 	<ul style="list-style-type: none"> -Facilidad de mantenimiento y facilidad de operación.
Espesamiento	<ul style="list-style-type: none"> -Mejoramiento del rendimiento del lodo. -Aumento del 20% - 25% de sólidos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Aumento de costos por consumo de químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Fácil remoción de lodo y operación.
Lechos de secado	<ul style="list-style-type: none"> -Bajos costos de inversión. -Bajos costos de operación. -Mantenimiento escaso. 	<ul style="list-style-type: none"> -Dependiente de las condiciones climáticas. - Posible generación de malos olores. -Necesidad de retirar el material del lecho. 	<ul style="list-style-type: none"> -Mano de obra no requiere habilidades especializadas
Filtros prensa	<ul style="list-style-type: none"> -Alta sequedad. -Ideales con proceso de estabilización química (cal). -Costos de operación medios. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto costo de implementación. - Proceso discontinuo. -Consumo elevado de reactivos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Presencia periódica de personal para la descarga.
Filtros banda	<ul style="list-style-type: none"> -Proceso continuo. -Consumo energético medio. -No requiere instalaciones auxiliares. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto costo de implementación y mantenimiento. -Consumo de agua para limpieza de telas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Mano de obra de forma continua. -Necesidad de protocolos de seguridad.
Centrifugas	<ul style="list-style-type: none"> -Proceso continuo. -Proceso fiable. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto costo de implementación y mantenimiento. -Sensible a la presencia de arenas. 	<ul style="list-style-type: none"> -No demanda mano de obra de forma continua. -Mantenimiento por personal cualificado.

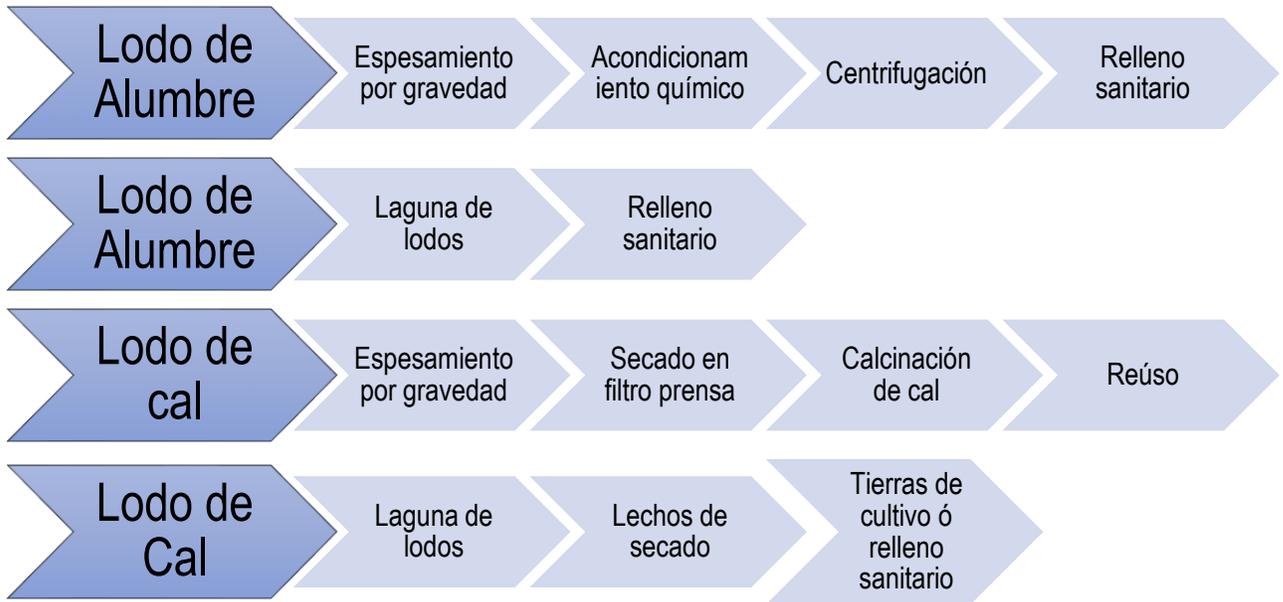


Figura 1. Alternativas de tratamiento y disposición de lodos. Tomado de: Ramos, 2008 (18)

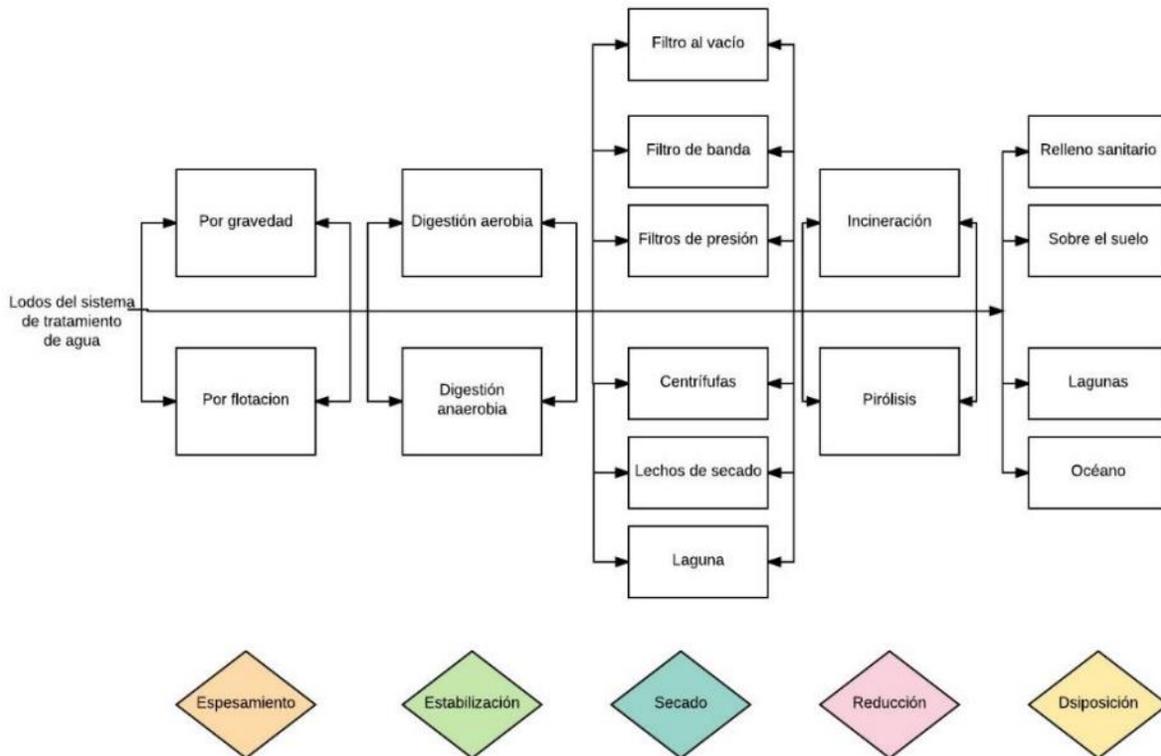


Figura 2. Alternativas de diseño y tratamiento (19)

3.6 Regulación de descargas

La Resolución 631 de 2015 establece el "Los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones", definiendo en el Artículo 15 los parámetros fisicoquímicos y los valores máximos permisibles para los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARnD) provenientes de actividades industriales hacia cuerpos de agua superficiales. En este artículo se especifican los límites máximos permitidos para diversos parámetros fisicoquímicos presentes en dichos vertimientos, también, cuando se realiza un vertimiento puntual de aguas residuales en un cuerpo de agua superficial destinado al consumo humano, doméstico o pecuario (20).

La potabilización de agua es un procedimiento de gran importancia para los seres humanos, durante este proceso, se generan residuos debido a la sedimentación de partículas suspendidas en el agua, que a menudo están acompañadas de residuos químicos formados por la coagulación de sólidos presentes en el agua natural. Estos sólidos no se sedimentan de manera natural y pueden ocasionar problemas de olor, sabor, color y a la salud, a menos que sean precipitados y eliminados mediante métodos físicos o químicos (1).

El manejo de los lodos en las plantas de tratamiento es crucial y requiere especial atención, estos pueden ser generados mediante la coagulación con sulfato de aluminio o compuestos férricos, para tratar el color o la turbidez (10). Los lodos aluminosos resultantes representan un riesgo ambiental grave, ya que su descarga en cuerpos de agua afecta bacterias acuáticas, algas y organismos bentónicos debido a la toxicidad del aluminio. Esto amenaza, por su acumulación, a los ecosistemas fluviales, como arroyos, pantanos y lagos, además, pueden tener impactos en la salud humana, especialmente en las células renales, lo que puede afectar el funcionamiento de otras células, como las del corazón y el cerebro (1).

La presencia de sulfato de aluminio en los lodos vertidos en cuerpos de agua tiene un efecto negativo en la flora y la fauna debido a su naturaleza corrosiva, debido a que estos compuestos inorgánicos forman depósitos y bancos de fango en sus tramos más lentos del flujo de agua, lo que afecta la turbidez y el color del cuerpo de agua. Esto, a su vez, disminuye la actividad fotosintética de las plantas acuáticas y generando problemas ambientales significativos. Las crías de animales que fueron

expuestos a altas cantidades de aluminio durante la etapa de gestación y lactancia presentaron debilidad, menor actividad en su entorno y falta de coordinación en algunos movimientos. Asimismo, el aluminio también tuvo un impacto en la memoria de estos animales, cabe resaltar que estos efectos son similares a los observados en animales adultos (17).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en su informe del año 2008 recomienda que la concentración de aluminio en el agua tratada de grandes instalaciones, destinada al abastecimiento de más de 10,000 habitantes, no supere los 0.1 mg/L. Sin embargo, la normatividad colombiana establecida en la Resolución 2115 del 2007 permite un límite de 0.2 mg/L, lo cual representa el doble de la recomendación de la OMS. Esta diferencia en los estándares puede plantear un riesgo para la salud humana y el ecosistema (17).

La Resolución 330 de 2017 establece diversas actividades para el manejo de lodos en plantas de tratamiento, estas actividades abarcan la caracterización de los lodos, la evacuación de las unidades de tratamiento de agua potable, el tratamiento de los lodos evacuados y la disposición final de los lodos tratados (artículos 123 a 126). Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario implementar técnicas efectivas para reducir su volumen y eliminar contaminantes, garantizando su adecuada disposición. También, el artículo 100 resalta la importancia de seleccionar un terreno con suficiente espacio para facilitar el manejo eficiente de los lodos (13).

El lodo generado en las plantas de tratamiento de agua tiene características especiales, ya que está compuesto por una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas. Estas sustancias incluyen sólidos presentes en el agua cruda, como arcillas que causan turbidez, y compuestos no minerales introducidos por hojas, plancton y desechos industriales o domésticos. También se agregan sólidos durante el proceso de tratamiento, como hidróxidos de aluminio y/o hierro, hidróxidos de calcio, polielectrolitos, carbón activado en polvo y otros productos químicos utilizados en la purificación (10). Es importante tener en cuenta que las características físicas y químicas, así como los volúmenes de los lodos, varían en cada caso. En los sedimentadores, los lodos representan alrededor del 60-70% de los sólidos totales, mientras que en los filtros esta cifra varía entre el 30% y el 40%. Sin embargo, en las plantas que eliminan hierro y manganeso, la mayoría de los lodos se retienen en los filtros, con un porcentaje de retención que va del 50% al 90% (10).

Dentro de los métodos utilizados para el tratamiento de lodos, la Resolución 330 define que el sistema de tratamiento debe contar con una unidad de homogeneización, una unidad de espesamiento y una unidad de deshidratación (13), dentro de esta última se encuentran diferentes alternativas como lechos de secado, lagunas de deshidratación y deshidratación mecánica, entre otros. Sin embargo, no hay un método generalizado, ya que la composición de los lodos puede variar significativamente. Además, la disponibilidad de recursos financieros juega un papel importante en la selección del proceso de tratamiento a adoptar, considerando soluciones a corto, mediano y largo plazo (16).

3.7 Ubicación de la PTAP

La Planta de Tratamiento de Agua Potable – PTAP del acueducto San Antonio se encuentra ubicada en el sector de Santagueda al Noroeste del municipio de Palestina Caldas a 1140 msnm. Santagueda corresponde a una de las veredas de mayor importancia para este municipio por el acelerado crecimiento demográfico y turístico, este se encuentra ubicado a 36 kilómetros de Manizales, capital del departamento. El Valle de Santagueda se considera la zona turística más importante de la región centro sur de Caldas, entre los cuales se concentran centros vacacionales, fincas de recreo, hoteles campestres y otras actividades de interés recreativo para los visitantes como cabalgas, pesca deportiva, feria ganadera y deportes de aventura (21). En la siguiente figura se presenta la ubicación del municipio y la zona del proyecto.

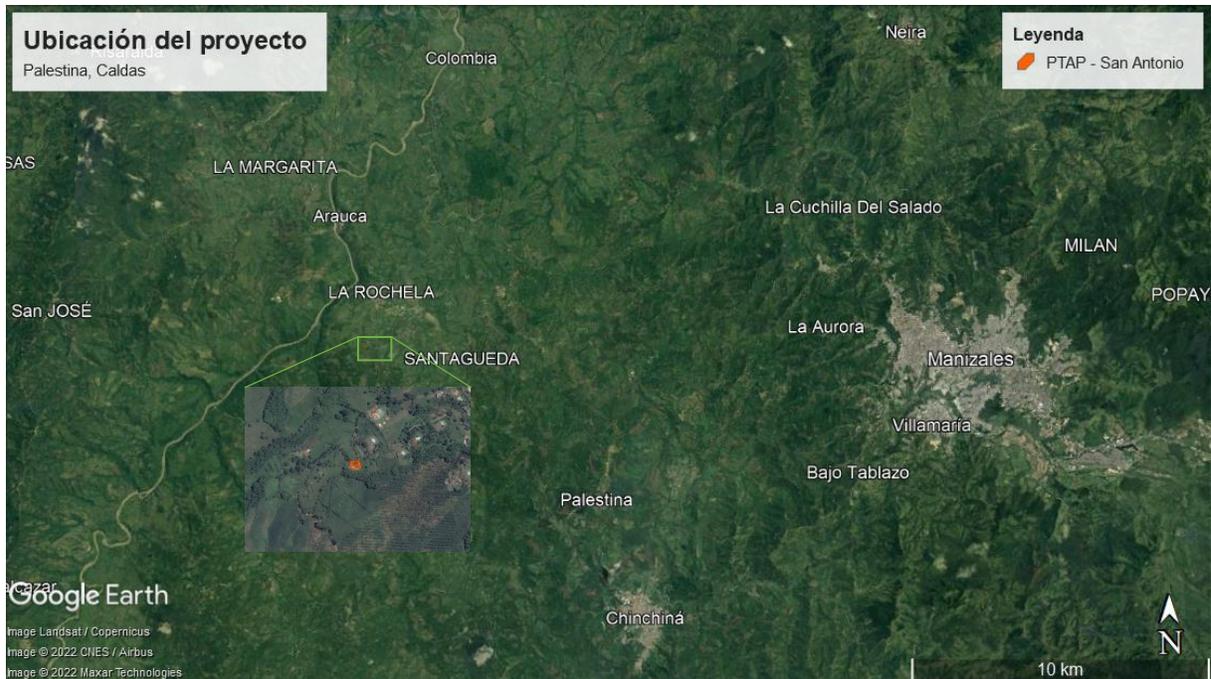


Figura 3. Ubicación del proyecto, Google Earth, 2023

A continuación, se presenta un registro fotográfico asociado a la ubicación del proyecto y sus alrededores.

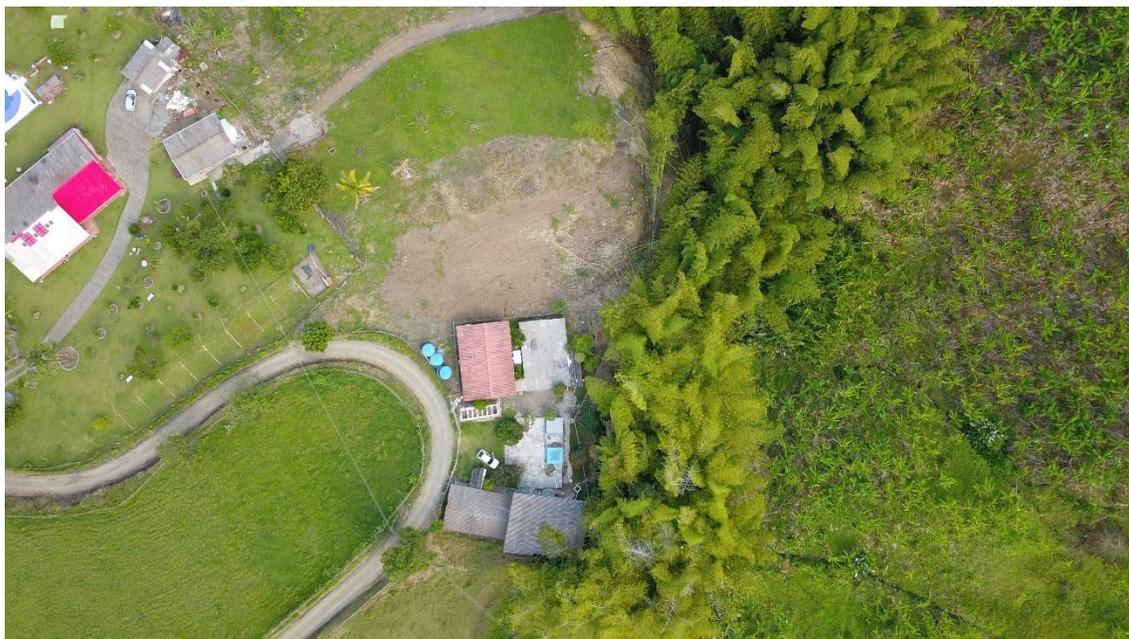


Figura 4. Vista superior del sistema de tratamiento de agua potable, San Antonio

3.8 Descripción de las unidades de tratamiento

La PTAP cuenta con 6 filtros de la marca VALREX, los cuales trabajan con un sistema de doble filtración, con una primera etapa de clarificación ascendente en gravas muy profunda y segunda etapa descendente en antracita gruesa, teniendo carreras típicas de filtración entre 36 y 48 horas, aunque en épocas pico puede estar entre las 24 y 18 horas. Este cuenta con un mezclador estático turbulento que genera vórtices para lograr una buena mezcla rápida del agente coagulante que es dosificado para el tratamiento fisicoquímico de potabilización, mediante una bomba de velocidad y desplazamiento variable (22).

La planta se construyó en el año 1991, y el proceso de potabilización se automatizó desde el año 2017, dando la posibilidad de controlar el proceso remotamente, observando en línea y tiempo real, cantidad de agua tratada, turbiedad de entrada y salida, pH, color aparente, cloro libre a la salida del tanque de distribución, niveles de los tanques de almacenamiento, agua despachada, picos, sectores de mayor consumo y presión de los tanques de potabilización, permitiendo aplicar los insumos dependiendo de la cantidad y la calidad del agua cruda que entra al proceso de tratamiento (22).

Esta planta se abastece de dos fuentes de agua superficial y una fuente de agua subterránea, mediante concesiones otorgadas por CORPOCALDAS. El agua es conducida hasta una primera estructura de almacenamiento, la cual mediante un sistema de bombeo da paso a un caudal entre 15 y 25 L/s. En la siguiente figura se presenta el sistema de tratamiento de agua potable San Antonio.



Figura 5. Vista de los seis (6) filtros de la PTAP, San Antonio

3.9 Registros históricos disponibles

A partir de la automatización de la PTAP, se han realizado seguimientos a diferentes variables como caudal, turbiedad, cloro residual, conductividad y presión, en puntos como la entrada y/o salida de la planta, a continuación, se presentan los datos diarios para seis meses del año 2017 para la variable turbiedad, los cuales presentan rangos entre 5 y 60 NTU, como valores promedio al día, mientras que, como valores máximos, se han tenido picos de 1200 NTU, esto para el mes de octubre.

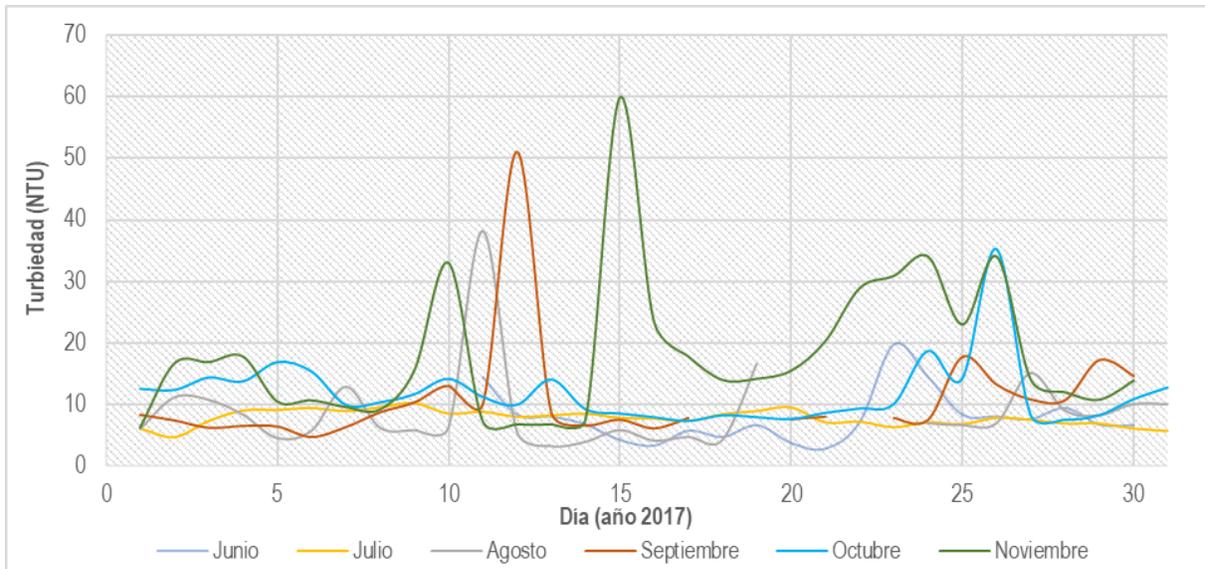


Figura 6. Seguimiento de turbiedad media diaria a la entrada de la PTAP

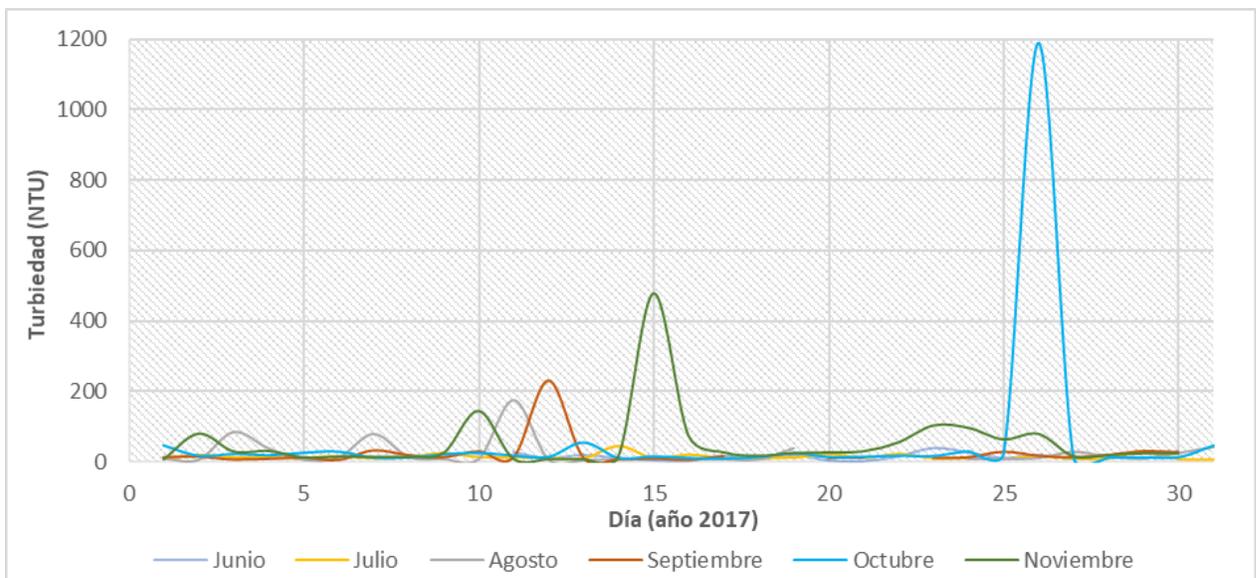


Figura 7. Seguimiento de turbiedad máxima diaria a la entrada de la PTAP

3.10 Caracterización de la zona del proyecto

Para la caracterización de la zona del proyecto, se tuvo en cuenta la información primaria, obtenida de la caracterización fisicoquímica de la fuente receptora del vertimiento, información medida en campo durante el recorrido, como variables in situ, aforos y demás datos relevantes para este estudio; también se tiene en cuenta la información secundaria obtenida de fuentes como el POMCA del río Chinchiná, CORPOCALDAS, entre otros. En la siguiente figura se observan las cuencas que

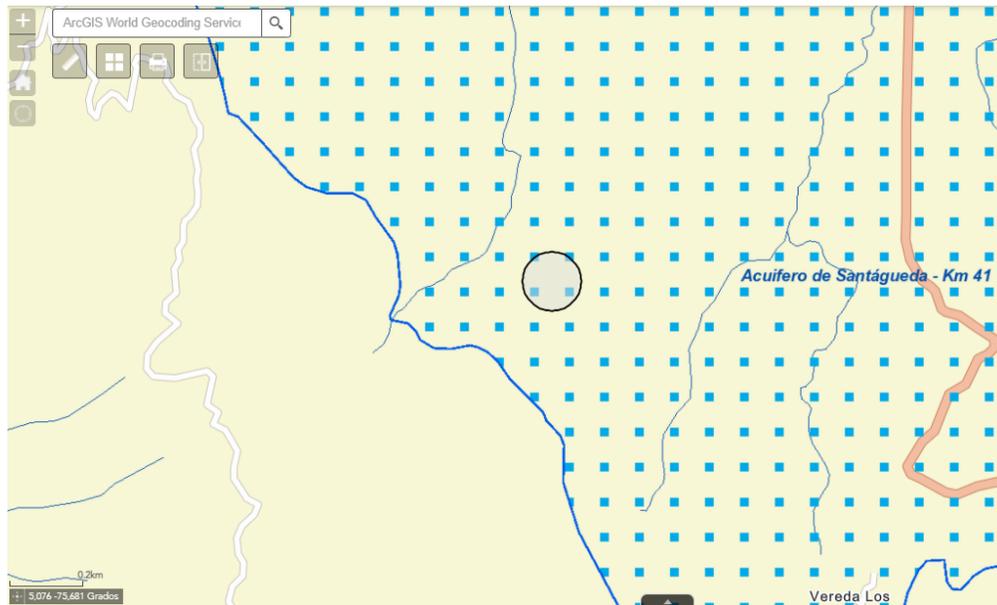


Figura 9. Mapa de límite de acuífero en la zona de interés, POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS (23)

Las zonas de recarga de los acuíferos son aquellas áreas de la cuenca hidrográfica donde, debido a las condiciones climáticas, geológicas y topográficas, una gran cantidad de precipitaciones se infiltran en el suelo y recargan los acuíferos en las partes más bajas de la cuenca. En la siguiente figura se muestran las zonas de recarga, y se clasifica la zona del proyecto como de baja recarga, principalmente. Sin embargo, en los alrededores también se observa una clasificación de alta recarga (24).

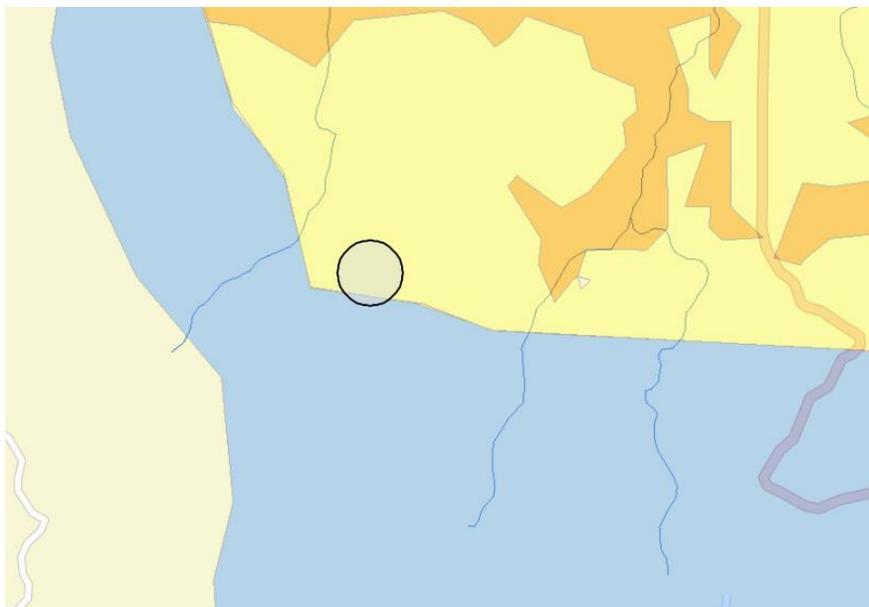


Figura 10. Mapa de zonas de recarga de acuíferos en la zona de interés, POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS, azul-alta, amarillo-baja, naranja-moderada (23)

Finalmente, se muestra el mapa de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea, el cual indica una clasificación de baja vulnerabilidad para la zona del proyecto. Sin embargo, es importante mencionar que el proyecto se encuentra en las proximidades de una clasificación de alta vulnerabilidad, como se puede observar en la siguiente representación (24).

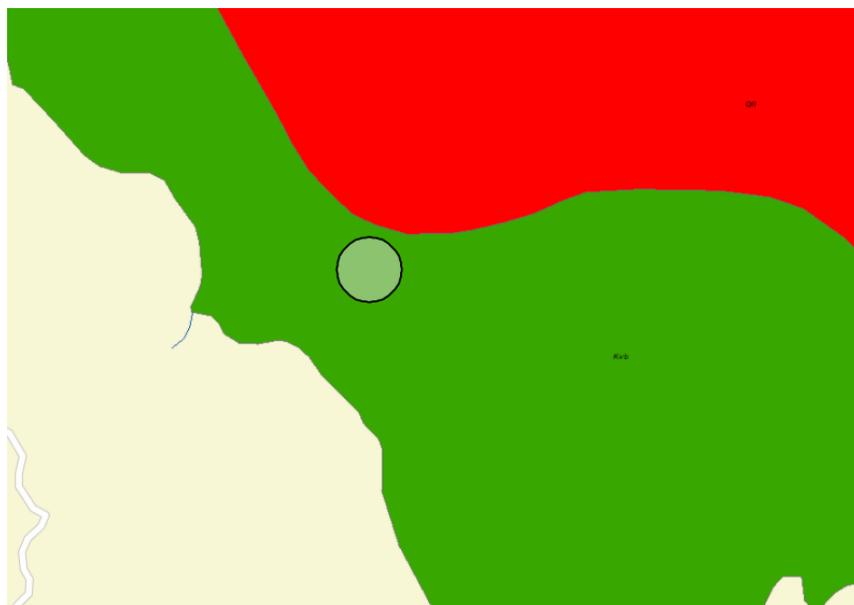


Figura 11. Mapa de vulnerabilidad de contaminación en la zona de interés, POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS, rojo-alta, verde-baja, blanca-despreciable (23)

Dentro de la zona de interés, se encuentran diversos usos del agua en fuentes superficiales. A continuación, se presentan los mapas correspondientes a las concesiones, captaciones, ocupaciones de cauce y vertimientos de la zona, incluyendo aquellos que están reglamentados y los que no lo están.

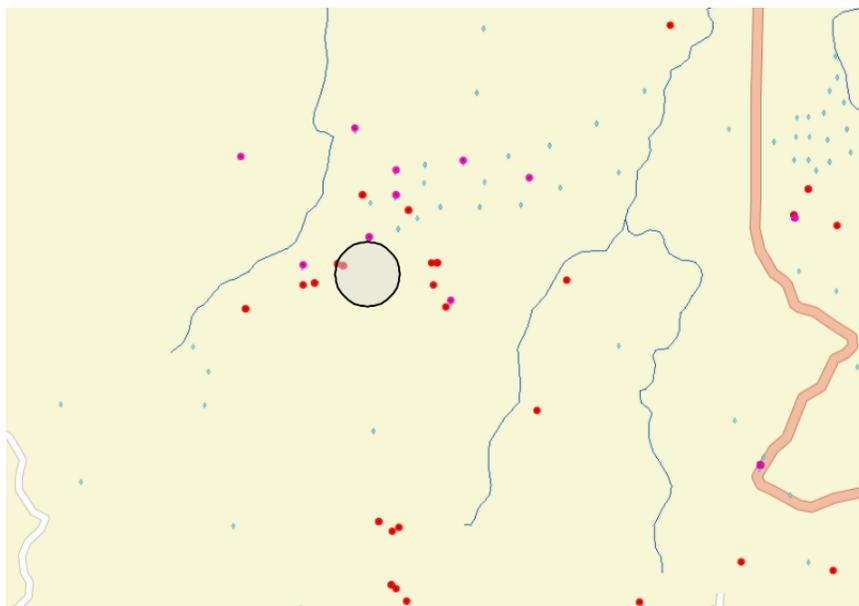


Figura 12. Mapa de usos del agua en la zona de interés (concesiones, captaciones y ocupaciones de cauce), POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS, fucsia-concesiones, rojo-captación, azul-ocupaciones de cauce (23)

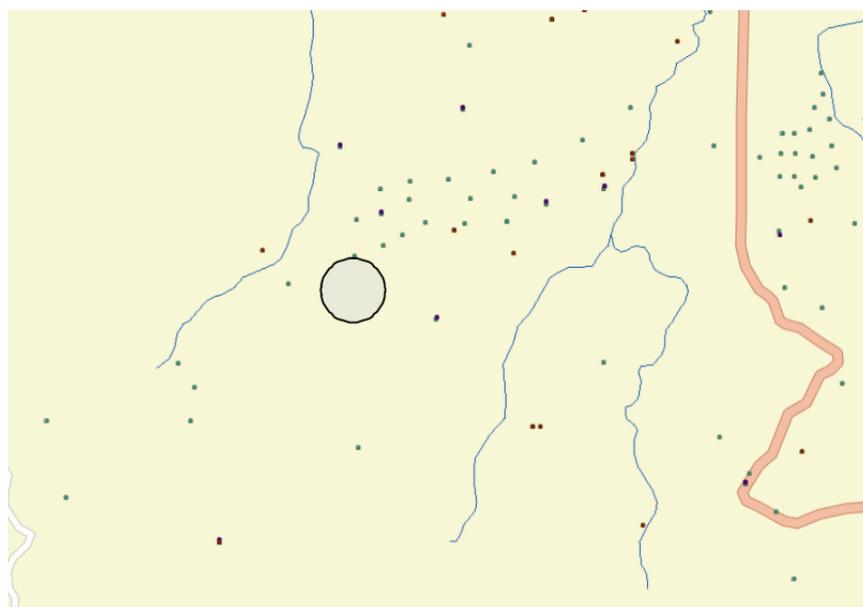


Figura 13. Mapa de usos del agua en la zona de interés (vertimientos y ocupaciones de cauce), POMCA río Chinchiná – CORPOCALDAS, negro-vertimientos, azul-ocupaciones de cauce (23)

4. ANTECEDENTES

Los subproductos de la potabilización del agua pueden contener contaminantes que representan riesgos para la salud humana si no se tratan adecuadamente. Por ejemplo, el lodo de depuración puede contener patógenos, metales pesados u otros compuestos químicos nocivos. El tratamiento adecuado garantiza que estos contaminantes se eliminen o se reduzcan a niveles seguros antes de que los subproductos se dispongan en el medio ambiente o se reutilicen. Las regulaciones ambientales y de salud establecen límites para la concentración de contaminantes en los subproductos de la potabilización del agua. El tratamiento adecuado es necesario para cumplir con estas regulaciones y evitar posibles sanciones o problemas legales (13).

Algunos subproductos de la potabilización del agua, como el lodo de depuración, pueden contener nutrientes y otros materiales que pueden ser reutilizados en aplicaciones agrícolas o industriales. El tratamiento adecuado puede facilitar la recuperación y reutilización de estos recursos, lo que reduce la dependencia de materias primas y minimiza la generación de residuos. El tratamiento adecuado de los subproductos de la potabilización del agua puede mejorar la eficiencia global del proceso al reducir la cantidad de residuos generados y minimizar los costos asociados con su gestión y disposición final (13).

Al indagar sobre diferentes diseños para el tratamiento de lodos, se puede observar que para su estudio y elaboración se deben evaluar las diferentes alternativas con sus respectivas ventajas y desventajas; además, se determinan los criterios más importantes para la elección de estas, tales como: área requerida, costos de inversión, tiempo de tratamiento, eficiencia y mantenimiento. Además, algunos productos químicos que se utilizan frecuentemente como agentes floculantes son el sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sulfato férrico, cloruro férrico y polielectrolitos. Estos últimos han experimentado un aumento en su disponibilidad en el mercado debido a que los polímeros orgánicos pueden funcionar como iones cargados positiva o negativamente. Además, presentan varias ventajas clave, como la capacidad de ser utilizados en dosis pequeñas (17).

Actualmente, existen diversos estudios, propuestas y alternativas para el manejo y/o tratamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable donde se suministran diferentes metodologías que presentan opciones para el diseño de un sistema básico de tratamiento de lodos.

Estas metodologías incluyen información detallada sobre la naturaleza de los lodos, su cantidad, diseño, costos de implementación, así como opciones para su uso o disposición final para diferentes departamentos y municipios del país.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de propuestas de diseños realizados para plantas de tratamiento de agua potable en Colombia

- Para el caso de la Planta de Potabilización ubicada en el municipio La Mesa, Cundinamarca, se empleó un enfoque metodológico que comprendió varias fases. En primer lugar, se llevó a cabo la recopilación de información existente, junto con la obtención de nuevos datos siguiendo los protocolos vigentes y cumpliendo con la normativa nacional. Posteriormente, se procedió a analizar detalladamente estos datos, planteando y evaluando distintas alternativas. Finalmente, como resultado de este proceso, se propone un sistema que no involucra el uso del alcantarillado público; en su lugar, se propone el espesamiento de los lodos a través de la construcción de tanques especialmente diseñados para este propósito, así como lechos de secado adecuados. Además, se establece un plan para el manejo y disposición de estos lodos mediante una empresa autorizada (25).
- Este estudio se basó en el análisis de once Plantas de Tratamiento de Agua Potable ubicadas en diferentes municipios del departamento de Risaralda, el objetivo principal de esta investigación consistió en identificar una posible solución que fuera beneficioso en términos de costos y ventajas para el manejo de lodos procedentes de estas plantas de potabilización de agua. Para alcanzar este propósito, se llevaron a cabo análisis económico y se contrastaron diferentes aspectos normativos y ambientales. Finalmente, tras realizar el análisis, se llegó a la conclusión de que los lechos de secado representan la alternativa más adecuada y viable en comparación con otras opciones estudiadas (19).
- Para el caso de tratamiento de lodos provenientes de la Planta de Potabilización ubicada en Madrid, Cundinamarca, se consideraron tres opciones diferentes con el objetivo de mejorar los resultados en el producto final. Por esta razón, se optó por utilizar un tanque ecualizador como tratamiento inicial, con el propósito de homogenizar el lodo de purga proveniente de los tanques

sedimentadores y filtros del sistema de potabilización. Una vez obtenido el lodo con una humedad uniforme, se requiere un tratamiento que permita su acondicionamiento previo y que sea capaz de manejar un flujo continuo de lodos, lo que garantiza la obtención de resultados más rápidos. Para llevar a cabo esta tarea, se diseñó un espesador, el cual es especialmente adecuado para lodos con alto contenido de humedad, posteriormente, el lodo se debe acondicionar para someterlo al último tratamiento, que consiste en la filtración a través de un filtro prensa (16).

- La técnica más adecuada para estabilizar los lodos, considerando su aplicabilidad técnica y operativa dentro de la PTAP ubicada en El Espinal, Tolima, fue la deshidratación mediante lechos de secado. Esta alternativa es más viable, ya que los lodos solamente necesitan ser deshidratados, sin requerir técnicas adicionales para reducir el contenido de aluminio, ya que, el coagulante utilizado en la planta es policloruro de aluminio (19). Adicionalmente, en la propuesta realizada para la Planta de Potabilización ubicada en el municipio de Fresno, Tolima, se consideró que la mejor alternativa de tratamiento de lodos fue, igualmente, la deshidratación mediante lechos de secado, debido a su bajo costo, buena eficiencia y facilidad de mantenimiento (17).

Ahora, se presentan algunos ejemplos de aplicaciones de tratamiento, disposición y aplicación de lodos residuales en Colombia:

- Planta de tratamiento de lodos con secado térmico en Bello, Antioquia: La planta de tratamiento de aguas residuales “Aguas Claras” emplea tecnologías de secado térmico para reducir el volumen de lodos y estabilizarlos antes de su disposición final (26).
- Relleno sanitario en Manizales: La aplicación de lodos residuales provenientes de plantas de potabilización contribuye a la remoción de turbiedad y color proveniente de aguas residuales generado en el relleno sanitario La Esmeralda, reduciendo significativamente la dosis de coagulante primario necesario, disminuyendo gastos en el tratamiento del lixiviado (27).

Además, en otros países como México y Ecuador, se realiza la digestión anaerobia de lodos de desecho de planta de tratamiento mediante un reactor tipo lecho de lodos (UASB) (28).

5. METODOLOGÍA

La metodología se planteará para cada uno de los objetivos propuestos:

5.1 Metodología para el objetivo 1:

Caracterizar física y químicamente los subproductos (lodo/agua) generados en la planta de potabilización "San Antonio".

La Resolución 0631 de 2015 define los parámetros y los límites máximos permitidos que deben cumplir aquellos que realizan vertidos directos a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillado público. Además, se establecen los parámetros que deben ser analizados y reportados por parte de las actividades industriales, comerciales y de servicios (20).

El muestreo de agua implica recolectar una pequeña parte que refleje con precisión la calidad del cuerpo de agua en el momento y lugar de toma de la muestra. Esto es fundamental en un programa de control de calidad analítica para obtener datos confiables sobre las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del agua. Es crucial que las muestras sean homogéneas y representativas para establecer criterios uniformes de preservación. El proceso de monitoreo de la red de calidad ambiental del IDEAM inicia con la implementación del plan, que incluye la toma y preservación de muestras de agua superficial y sedimentos. Estas muestras se recolectan según las variables de interés y los requisitos del programa, finalizando con la ejecución del muestreo (29).

Según el artículo 123 de la Resolución 330 de 2017, para el diseño, optimización, ampliación o rehabilitación de estructuras de tratamiento de subproductos, es necesario iniciar con la caracterización de los lodos generados en los procesos unitarios. Esta caracterización se realiza en conjunto con los análisis y ensayos del estudio de tratabilidad del agua cruda (13).

La composición de los lodos residuales suele cambiar según la calidad del agua cruda tratada, su origen, la tecnología de tratamiento utilizada, así como el tipo y la cantidad de productos químicos empleados, lo anterior dificulta establecer una composición precisa para estos lodos. Por lo tanto, es crucial llevar a cabo una caracterización que considere tanto su naturaleza fisicoquímica como microbiológica, lo cual nos permitirá determinar los métodos y equipos más adecuados para su tratamiento (16).

Se realizó una primera visita a la PTAP San Antonio el día 7 de noviembre de 2022, donde se identificaron las unidades que componen el sistema de tratamiento de agua potable, el protocolo de lavado de los seis filtros, mediante retrolavado, el funcionamiento y dosificación del coagulante, en este caso sulfato de aluminio – Tipo A. A continuación, se presenta el registro fotográfico de la PTAP, en la siguiente figura se muestran las placas aireadoras del agua cruda.



Figura 14. Placas aireadoras del agua cruda

En las siguientes figuras se presentan los tanques de preparación y dosificación de químicos y, además, los sistemas de filtros.



Figura 15. Tanques de preparación y dosificación de químicos (coagulante – cloro)



Figura 16. Sistema de filtración

A continuación, se observan el tanque de almacenamiento de agua cruda y la vista frontal de la planta.



Figura 17. Tanque de almacenamiento de agua cruda (flecha de color naranja)

5.2 Metodología para el objetivo 2:

Realizar pruebas de tratabilidad a los subproductos para establecer, cantidad de lodos generados y parámetros de diseño.

Para diseñar nuevas estructuras de tratamiento de subproductos o para mejorar, ampliar o rehabilitar las existentes, es necesario comenzar con la caracterización de los lodos generados en los diferentes procesos unitarios. Esta caracterización debe estar relacionada con los análisis y ensayos realizados en el estudio de tratabilidad del agua cruda (13). De esta manera, se obtendrá información relevante que permitirá tomar decisiones eficientes en el diseño y optimización de las instalaciones de tratamiento.

La determinación de las propiedades de los lodos es fundamental para medir las concentraciones de nutrientes que pueden ser utilizadas en la aplicación en suelos, así como para identificar los compuestos nocivos que deben ser eliminados. Es necesario recolectar muestras de lodos derivados del tratamiento de aguas con el fin de llevar a cabo su caracterización. Estas muestras se obtienen tanto con propósitos operativos, para su aprovechamiento y disposición final, como para realizar un seguimiento por parte de las autoridades ambientales (13).

Teniendo en cuenta el lodo que es vertido directamente a la fuente superficial, se plantea el desarrollo de pruebas de tratabilidad, con el fin de evaluar diferentes químicos, que ayudan en el proceso de espesamiento y deshidratación de los lodos obtenidos en el lavado de filtros. No obstante, la primera evaluación que se realizará corresponde a la cantidad de lodo generado, teniendo en cuenta el tiempo de lavado de cada filtro; se pretende optimizar este tiempo, para disminuir el volumen de lodo por cada lavado y así, diseñar un sistema de tratamiento con un tamaño adecuado, proporcional a este volumen.

Los químicos por evaluar corresponden a agentes coagulantes o espesantes, que modifican las características químicas y enlaces moleculares del lodo, permitiendo una mayor aglomeración de este, que facilita el proceso de sedimentación de los lodos presentes en el sistema, adicionalmente, el espaciado entre moléculas se reduce a tal punto, que no permite el ingreso de agua a estos, favoreciendo su deshidratación.

Se plantean diferentes pruebas y mediciones que permiten determinar la eficiencia de remoción de sólidos en el agua tratada con cada uno de los agentes químicos utilizados y las posibles mezclas

entre estos, que optimicen el proceso de sedimentación y deshidratación. Dentro de las pruebas a realizar, se plantea el seguimiento al lodo de partida y al lodo tratado, para cada prueba, así como la evaluación de tiempo de filtración y remoción de turbiedad en cada uno de estos procesos.

Durante la operación de lavado de los filtros, se genera un agua residual con una concentración baja de sólidos, esta cantidad puede representar aproximadamente entre el 2% y el 6% del volumen de agua filtrada, y los sólidos presentes son aquellos que fueron retenidos por el filtro durante el proceso de filtrado. La cantidad de sólidos retenidos en el filtro está influenciada por el tipo de pretratamiento aplicado y el tipo de filtro utilizado (18).

Se planteó ejecutar pruebas de jarras, donde se prepararon seis jarras con un volumen de 1 Litro cada una, y se agregó en mezcla rápida (200 rpm) una dosis de 20 mg/L, cada uno de los agentes químicos a evaluar. Seguidamente, se realizó el seguimiento al proceso de sedimentación, el cual duro ocho (8) horas, donde se tomó muestra en la primera hora y al final de la sedimentación. Debido a que las pruebas están enfocadas en la tratabilidad de los lodos, se realizó medición de densidad a cada floc formado, pruebas de velocidad de filtración y evaluación de características reológicas a cada uno, también se implementaron estos mismos análisis a un blanco, con el fin de comparar los resultados de cada químico contra esta muestra. De esta forma también se ejecutaron pruebas con mezclas de agentes químicos con el fin de evaluar las remociones al final del seguimiento.

A cada una de las pruebas ejecutadas, se les realiza mediciones de tiempo de filtración y turbiedad al final de la filtración, que simulan el proceso de deshidratación del lodo, una de las unidades de tratamiento requeridas para estos procesos, esta información se utilizó de forma íntegra, para definir el mejor conjunto de químicos para el tratamiento del agua de lavado de filtros de esta PTAP. De igual forma se analizó el volumen de agua filtrado, el cual facilita la disposición final de los lodos tratados, ya que permite una mayor separación de estos evitando posibles infiltraciones o lixiviados que afecten la zona de disposición.

5.3 Metodología para el objetivo 3:

Evaluar diferentes alternativas de tratamiento para la selección del tren de tratamiento más adecuado de un diseño conceptual.

Los lodos provenientes de los procesos unitarios deben pasar por técnicas de homogeneización, seguidas de tratamientos de espesamiento y deshidratación. En ningún caso se permite la descarga o almacenamiento final de lodos sin un tratamiento previo. Es importante tener en cuenta los requisitos establecidos en el artículo 123 de la Resolución 330 de 2017, centrándose específicamente en la selección del tratamiento de lodos (13). Se evaluarán alternativas que cumplan con los requisitos normativos, satisfagan las necesidades hídricas y mejoren el entorno socio-ambiental (16).

Para reducir la alta humedad presente en los lodos, es necesario llevar a cabo procesos de deshidratación. Durante este proceso, se realizan comparaciones entre las diferentes características de los sistemas disponibles con el fin de seleccionar la alternativa más adecuada, teniendo en cuenta las consideraciones establecidas en el artículo 125 de la Resolución 330 de 2017 (13).

La evaluación de los diferentes sistemas de tratamiento se realizará mediante análisis multicriterio de matrices de alternativas, considerando variables ambientales, sociales, técnico y económicas, fijando las ponderaciones según lo establecido en la resolución 330 de 2017, la cual estará enfocada en la unidad de deshidratación, dado que la homogeneización y el espesamiento manejan un único proceso. En las siguientes tablas se presenta la ponderación otorgada a cada componente a evaluar, teniendo en cuenta las consideraciones definidas en el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, título E, anexo 1 (30).

Tabla 5. Componentes y sus respectivos pesos. Tomado de: RAS, 2000 (30)

Componente	Peso
Socioeconómico y ambiental	50%
Técnico-operativo	50%

A su vez, se agruparon los factores en cada uno de los componentes de la siguiente forma:

Tabla 6. Factores considerados por componentes y su respectivo peso. Adaptado de: RAS, 2000 (30)

Socioeconómico y ambiental	Peso	Técnico-operativo	Peso
Acceso a Bienes y Servicios	10%	Subproductos	12%
Aceptabilidad Social	10%	Área	12%
Administración	10%	Flexibilidad	6%
Ambiental	20%	Mano de obra calificada (Personal)	8%
-	-	Operación y mantenimiento (6%)	6%
-	-	Servicio/Respaldo	6%
Total	50%	-	50%

Finalmente, a continuación, se presentan los criterios considerados para cada factor con su respectivo peso (decisión), que serán evaluados en este proyecto.

Tabla 7. Factores, criterios y parámetros de decisión. Adaptado de: RAS, 2000 (30)

Factor	Criterio	Decisión	Id Factor
Acceso a Bienes y Servicios (10%)	Oferta regional/local de materiales y equipos requeridos para la construcción o implementación de la alternativa	3 si se consiguen los materiales y equipos requeridos para la construcción o implementación de la alternativa a nivel municipal, 2 si se consiguen la mayoría de los materiales y equipos, 1 si no se consiguen	F1a
	Disponibilidad a nivel regional/local del personal básico requerido para la	2 si dispone de personal básico requerido para la construcción o implementación de la alternativa a	F1b

Factor	Criterio	Decisión	Id Factor
	construcción o implementación de la alternativa.	nivel municipal (local). 1 no dispone de personal	
	Oferta energética para el funcionamiento de la alternativa	2 si hay disponibilidad de servicio de energía eléctrica interconectado, 3 si debe llevarse la red de baja tensión hasta el sistema de tratamiento, 1 si no hay disponibilidad de servicio	F1c
	Oferta de recolección de residuos asociados a partes, componentes o subproductos generados en el proceso de construcción de la alternativa de tratamiento propuesta.	2 si existe oferta de recolección en el municipio, y 1 si no existe	F1d
Aceptabilidad Social (10%)	Compatibilidad de la alternativa desde las costumbres, conductas o cosmovisiones de los beneficiarios	5 si la comunidad acepta la solución que se plantee, 3 si hay posiciones encontradas y 1 si no la aceptan	F2a
	Capacidad y disponibilidad de pago	5 si se tiene la capacidad y disponibilidad a pagar, y 1 si no tiene capacidad no disponibilidad de pago	F2b
Administración (10%)	Costos administrativos adicionales relacionados con la tecnología: personal de celaduría y laboratorios, suministros de laboratorio, requerimientos de área, servicios públicos y otros. Nota: Personal diferente a la mano de	10 si no necesita costos administrativos adicionales, 1 para la tecnología que requiere los mayores costos administrativos adicionales.	F3a

Factor	Criterio	Decisión	Id Factor
	obra calificada requerida para operación y mantenimiento de la alternativa propuesta.		
Ambiental (20%)	Generación de residuos tales como partes cambiadas o subproductos que requieran una disposición o manejo especial.	10 si no los genera, 5 posiblemente los genera y 1 si genera residuos	F4a
	Impactos ambientales asociados con ruido, contaminación de aire y olores en la construcción, operación y mantenimiento de la alternativa propuesta	10 si no los genera y 1 si los genera	F4b
Subproductos (12%)	Generación de vertimientos	4 el que no genera y 1 el que genere	F5a
	Producción de Lodos (estimación de la cantidad producida y/o generada)	8 el que menos genera y 1 el que más genere	F5b
Área (12%)	Área requerida para la construcción de la alternativa planteada	12 lo toma la alternativa que tenga la menor área requerida, 1 la alternativa que requiere la mayor área, las otras alternativas toman un puntaje proporcional a su área requerida	F6a

Factor	Criterio	Decisión	Id Factor
Flexibilidad (6%)	Capacidad del sistema para operar con variaciones en las concentraciones de los parámetros básicos, tales como pH, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables, otros	2 si la alternativa propuesta no tiene problemas en funcionamiento frente a variaciones del parámetro en un 10% por encima del promedio; 3 si el sistema propuesto no tiene problemas en funcionamiento frente a variaciones del parámetro en un 5% por encima del promedio. 1 si el sistema propuesto tiene problemas en funcionamiento frente a variaciones.	F7a
	Requiere de procesos adicionales para el tratamiento de aguas residuales para dar cumplimiento con los parámetros de calidad establecidos para la recirculación	3 si la alternativa propuesta no requiere procesos adicionales; 1 si requiere procesos adicionales.	F7b
Mano de obra calificada (Personal) (8%)	Nivel técnico - operativo y/o especializado requerido para la operación o mantenimiento rutinario de la alternativa propuesta.	3 si no necesita personal especializado para la operación o mantenimiento rutinario, 2 si no se necesita personal especializado para la operación, pero si para el mantenimiento, 1 si necesita personal especializado para la operación y mantenimiento rutinario	F8a

Factor	Criterio	Decisión	Id Factor
	<p>Nivel técnico - operativo y/o especializado requerido para la operación o mantenimiento preventivo de la alternativa propuesta.</p>	<p>3 si no necesita personal especializado para la operación y mantenimiento preventivo, 2 si no se necesita personal especializado para la operación, pero si para el mantenimiento preventivo, 1 si necesita personal especializado para la operación y mantenimiento preventivo</p>	F8b
	<p>Nivel técnico - operativo y/o especializado requerido para la operación o mantenimiento correctivo de la alternativa propuesta</p>	<p>2 si no necesita personal especializado para la operación y mantenimiento correctivo, 1 si necesita personal especializado para la operación y mantenimiento correctivo</p>	F8c
Operación y mantenimiento (6%)	<p>Requerimientos energéticos para el funcionamiento de la alternativa.</p>	<p>3 a menor cantidad de KW que requiera para funcionar la alternativa; 1 punto para la tecnología que necesite mayor cantidad de KW, las otras alternativas toman un puntaje proporcional a sus necesidades de energía</p>	F9a
	<p>Necesidades de cambio y periodicidad de uso de elementos consumibles (repuestos, reactivos, entre otros) que demanda la alternativa</p>	<p>3 si no necesita consumibles; 1 la alternativa que requiera más consumibles expresados en costos estimados; las otras alternativas toman un puntaje proporcional a sus necesidades de consumibles</p>	F9b

Factor	Criterio	Decisión	Id Factor
Servicio/Respaldo (6%)	Oferta local y regional de insumos, partes y materiales para mantenimiento y operación de la alternativa	6 si existe soporte local (municipal) para la operación y mantenimiento de la tecnología, 3 si existe soporte a nivel nacional para la operación y mantenimiento de la tecnología y 1 si no lo hay.	F10a

A continuación, se muestran diferentes alternativas para el tratamiento y disposición final de lodos

Tabla 8. Procesos de tratamiento y disposición de lodos. Tomado de: Ramos 2018 (18)

Alternativa	Ventaja y/o desventaja
Acondicionamiento químico	Se utilizan polímeros para incrementar la concentración de sólidos y liberar agua.
Tanques de espesamiento	Reducen el volumen del lodo antes de la disposición final.
Deshidratación	
Lechos de secado	Aumenta la concentración de sólidos.
Lagunas	Económicas cuando el terreno está disponible y es relativamente barato. El clima influye de manera importante en su efectividad.
Filtros prensa	Utilizados después del acondicionamiento químico. Es capaz de aumentar la concentración de sólidos del 15% al 20%. El proceso es caro.
Filtros a vacío	Entre mayor sea la concentración de aluminio en el lodo, es más gelatinoso y difícil de filtrar.
Centrifugación	Requiere un espacio pequeño, no se recomienda para lodos de aluminio por su alto

	contenido de humedad y su alto consumo de energía.
Congelamiento	El congelamiento remueve agua y destruye la estructura coloidal. Se recomienda el espesamiento como una condición preliminar.
Acidificación	El empleo de ácido puede romper las uniones del coagulante con los sólidos. El coagulante puede ser reutilizado en el sistema de tratamiento del agua.
Disposición final	
Descargas a aguas superficiales	Es el método de disposición más económico, en términos de contaminación, esta práctica no debe ser utilizada.
Relleno sanitario	Los lodos de aluminio se mezclan con desechos de plantas residuales, de manera que no se afecten los procesos biológicos.
Incineración	Requiere de poca área y reduce el volumen del lodo del 80% al 95%. Requiere altos costos de inversión y operación. Los metales aumentan su concentración en las cenizas.

Existen diferentes alternativas de disposición final de lodos, entre las cuales se incluyen: (18)

- ✓ Descargas en cuerpos de agua: Consiste en liberar los lodos tratados en cuerpos de agua, cumpliendo con los requisitos ambientales establecidos. Esta opción requiere un tratamiento adecuado de los lodos para asegurar que no se produzcan impactos negativos en el medio ambiente acuático.
- ✓ Disposición en rellenos sanitarios: Los lodos se pueden disponer en rellenos sanitarios diseñados específicamente para su recepción y manejo adecuado. Este método implica la colocación de los lodos en capas controladas dentro del relleno sanitario, donde se someten a procesos de compactación y cubierta con material adecuado para su adecuada disposición.

- ✓ Recuperación de subproductos: En algunos casos, los lodos pueden someterse a procesos de valorización para recuperar subproductos o generar energía. Por ejemplo, se pueden utilizar tecnologías de digestión anaerobia para obtener biogás, que puede ser utilizado como fuente de energía. También se pueden recuperar nutrientes como el nitrógeno y el fósforo para su uso en la agricultura como fertilizantes.

5.4 Metodología para el objetivo 4:

Plantear el diseño detallado del sistema de tratamiento.

Las circunstancias socio-ambientales actuales requieren implementar medidas que mejoren los sistemas de tratamiento de agua potable y reduzcan sus impactos en el entorno. Este proyecto presenta una metodología para el diseño de un sistema básico de tratamiento de lodos. Este planteamiento incluye información detallada sobre la naturaleza, cantidad, diseño, costos de implementación, memorias de cálculo, planos arquitectónicos, así como opciones para el uso o disposición final de los lodos generados durante las actividades de potabilización del agua. Es posible utilizar uno o más métodos para obtener los mejores resultados en la formación de subproductos durante el diseño del tratamiento (16).

En el diseño y construcción de proyectos relacionados con la gestión de lodos residuales, es crucial considerar los siguientes aspectos: (18)

- ✓ Capacitación y competencia del personal: Es fundamental contar con un equipo técnico capacitado y experimentado en la ejecución de proyectos de manejo de lodos. El personal debe tener los conocimientos y habilidades necesarios para llevar a cabo las tareas requeridas y responder a las necesidades específicas de la población a la que se presta el servicio.
- ✓ Cumplimiento normativo: Los criterios de diseño deben ajustarse a la normatividad vigente en el ámbito local, regional y nacional. Esto incluye regulaciones relacionadas con la calidad del agua, el manejo de residuos, la protección del medio ambiente y la salud pública. Es fundamental asegurarse de que el proyecto cumpla con todos los requisitos legales y normativos aplicables, para el caso del diseño de sistemas de tratamiento de lodos generados en la PTAP se debe tener en cuenta la Resolución 330 de 2017 y su modificatoria la

Resolución 799 de 2021, Artículo 39 el cual define las unidades que deben componer dicho sistema.

- ✓ Evaluación de alternativas: Antes de seleccionar una alternativa específica de manejo de lodos residuales, es recomendable realizar un estudio exhaustivo de las diferentes opciones disponibles. Se debe evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental. Es importante considerar la experiencia previa de la alternativa seleccionada, tanto a nivel nacional como internacional, para garantizar su eficacia y éxito en proyectos similares.

Al tener en cuenta estos aspectos, se puede garantizar que el diseño y construcción del proyecto de manejo de lodos residuales se realice de manera adecuada, cumpliendo con las necesidades de la población y los requisitos normativos establecidos.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Caracterización física, química y microbiológica

El día 29 de marzo del 2023, se realizó la campaña de monitoreo a la PTAP San Antonio, tomando muestra y realizando aforos sobre la fuente receptora del vertimiento en el punto aguas arriba y aguas abajo de la descarga, teniendo en cuenta las guías y metodologías definidas por el IDEAM, donde se tuvo en cuenta las medidas para la preservación y envasado de cada muestra, las cuales fueron enviadas para su respectiva cuantificación. En primera instancia, se realizó el aforo y toma muestra en el punto aguas arriba de la quebrada receptora, seguidamente, se descendió 100 metros aproximadamente, donde se ejecutó la toma de muestra en el punto aguas abajo, destacando la implementación de la metodología de IDEAM dentro del proceso. En la siguiente tabla se presentan las coordenadas de los puntos de seguimiento.

Tabla 9. Coordenadas de puntos monitoreados

Punto muestreado	Coordenadas
Aguas Arriba – Vertimiento	5° 4'8.58"N 75°41'38.34"O
Aguas Abajo - Vertimiento	5° 4'8.40"N 75°41'34.80"O
Vertimiento ARnD	5° 4'8.73"N 75°41'38.10"O

En la siguiente figura se presentan los puntos de interés del proyecto, según lo mencionado anteriormente.

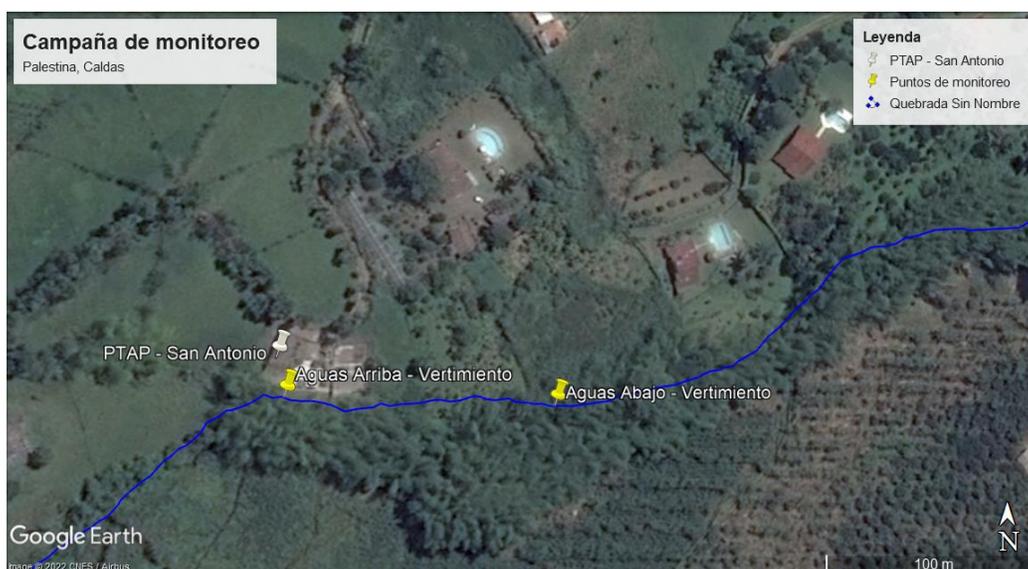


Figura 18. Ubicación de los puntos monitoreados, Google Earth - 2023

Las variables por monitorear en los puntos sobre la fuente receptora están definidas en la resolución 0330 de 2017 en su artículo 107 y su modificatoria en la resolución 0799 de 2021 en su artículo 30, también se tienen en cuenta las variables definidas en la GUÍA NACIONAL DE MODELACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO PARA AGUAS SUPERFICIALES CONTINENTALES, adicionalmente, se realizaron cuantificaciones microbiológicas, para conocer la calidad del agua en estos términos. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos y el respectivo registro fotográfico, asociado al tipo de aforo ejecutado, las mediciones in situ y la toma de muestra en los dos puntos sobre la fuente receptora de la descarga.

Tabla 10. Resultados de variables in situ, quebrada Sin Nombre

Variable	Aguas arriba	Aguas abajo
Caudal (L/s)	2.39	2.84
pH (Unid. de pH)	7.32	7.82
Conductividad eléctrica (uS/cm)	190	204
Oxígeno disuelto (mg/L)	6.86	7.33
Temperatura agua(°C)	22.8	23.0
Sólidos disueltos totales (mg/L)	88	97
Temperatura ambiente (°C)	23.9	26
Humedad relativa (%)	75	73



Figura 19. Aforo volumétrico, aguas arriba del vertimiento



Figura 20. Medición de variables in situ, aguas arriba del vertimiento



Figura 21. Toma de muestra de variables fisicoquímicas (izquierda - aguas arriba, derecha – aguas abajo)



Figura 22. Toma de muestra de variables microbiológicas (izquierda - aguas arriba, derecha – aguas abajo)

A continuación, se presentan los resultados de laboratorio obtenidos para los seguimientos sobre la fuente superficial.

Tabla 11. Resultados de caracterización fisicoquímica y microbiológica

Variable	Aguas Arriba		Aguas Abajo	
	Resultado	Incertidumbre	Resultado	Incertidumbre
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	93.3	± 1.9	92.3	± 1.9
Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	520	± 1.46	75000	± 1.46
Coliformes Totales (NMP/100 mL)	20980	± 0.73	300000	± 0.73
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	< 3.00	-	< 3.00	-
DQO (mg O ₂ /L)	< 15.0	-	< 15.0	-
Fosforo reactivo soluble (mg P-PO ₄ /L)	< 0.010	-	< 0.010	-
Fosforo total (mg P/L)	< 0.030	-	< 0.030	-
Nitratos (mg N-NO ₃ /L)	< 1.40	-	3.66	± 0.31

Variable	Aguas Arriba		Aguas Abajo	
	Resultado	Incertidumbre	Resultado	Incertidumbre
Nitritos (mg N-NO ₂ /L)	< 0.010	-	< 0.010	-
Nitrógeno amoniacal (mg NH ₃ -N/L)	< 5.00	-	< 5.00	-
Nitrógeno Kjeldahl (mg/L N-NTK)	< 5.00	-	< 5.00	-
Nitrógeno total (mg N/L)	< 6.41	-	8.67	-
Sólidos suspendidos totales (mg SST/L)	< 13.43	-	< 13.43	-
Sólidos suspendidos volátiles (mg SSV/L)	< 6.88	-	< 6.88	-

6.2 Lodos de retrolavado de filtros

Para el muestreo del vertimiento, se realizó el lavado de filtros como se mencionó anteriormente y se tomó la muestra de forma puntual, cuando se observó la mayor cantidad de lodo en el vertimiento. En la siguiente tabla se presentan los resultados de las mediciones in situ y el registro fotográfico del aforo, toma de muestra, embalaje de muestras y mediciones in situ.

Tabla 12. Resultados de variables in situ, vertimiento

Variable	Resultado
pH (Unid. de pH)	7.62
Conductividad eléctrica (uS/cm)	170
Oxígeno disuelto (mg/L)	7.36
Temperatura agua(°C)	24.9
Temperatura ambiente (°C)	35.2
Humedad relativa (%)	50
Caudal (L/s)	5.60
Duración del lavado (min)	90
Volumen por lavado (m ³)	30.78



Figura 23. Aforo volumétrico del vertimiento



Figura 24. Toma de muestras fisicoquímicas, vertimiento

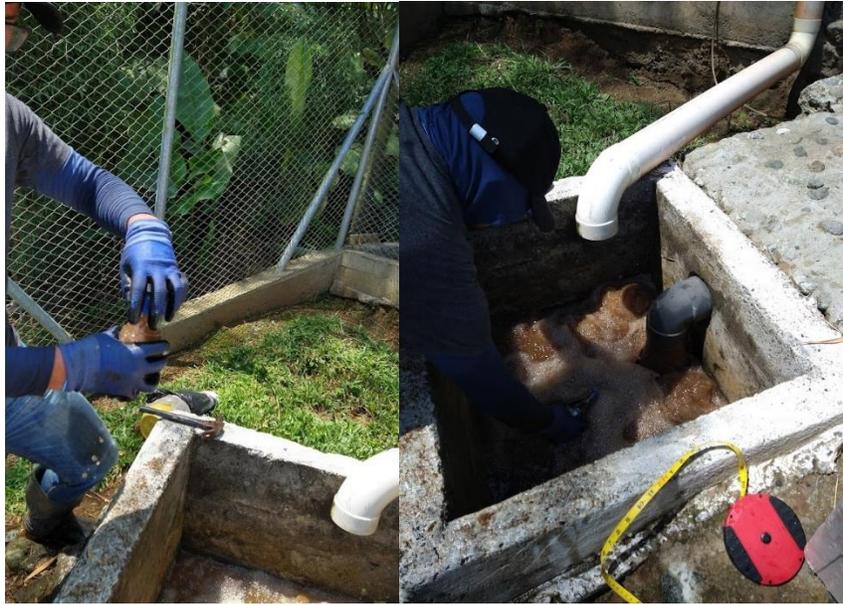


Figura 25. Toma de muestras microbiológicas, vertimiento



Figura 26. Nevera con muestras del vertimiento



Figura 27. Mediciones in situ del vertimiento

En la siguiente tabla se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica del vertimiento, también se presenta la comparación con la normativa ambiental vigente, resolución 631 de 2015, en su artículo 15, teniendo en cuenta que esta es la encargada de regular este tipo de descargas.

Tabla 13. Resultados de caracterización fisicoquímica del vertimiento y comparación con la normativa (Art. 15 – Res. 631 de 2015)

Variable	Resultado	Art. 15 - Resolución 631	Cumple
Acidez total (mg CaCO ₃ /L)	< 5.00	A & R	-
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	75.9	A & R	-
Aluminio total (mg Al/L)	26.4	A & R	-
Antimonio total (mg Sb/L)	< 0.02	0.3	Si
AOX (ug/L)	154	A & R	-
Arsénico total (mg As/L)	0.001	0.1	Si
Bario total (mg Ba/L)	0.136	1	Si
Berilio total (mg Be/L)	0.001	A & R	-
Boro total (mg B/L)	0.032	A & R	-
BTEX (mg/L)	< 0.030	A & R	-
Cadmio total (mg Cd/L)	< 0.010	0.01	Si

Variable	Resultado	Art. 15 - Resolución 631	Cumple
Cianuro total (mg CN-/L)	< 0.020	0.1	Si
Cloruros (mg Cl-/L)	< 10.0	250	Si
Cobalto total (mg Co/L)	0.006	0.1	Si
Cobre total (mg Cu/L)	< 0.200	1	Si
Color real a 436 nm (m-1)	< 1.6	A & R	-
Color real a 525 nm (m-1)	< 0.9	A & R	-
Color real a 620 nm (m-1)	< 0.5	A & R	-
Compuestos Fenólicos Semivolátiles (mg/L)	< 0.002	A & R	-
Cromo total (mg Cr/L)	< 0.050	0.1	Si
DBO ₅ (mg/L)	< 3.00	50	Si
DQO (mg O ₂ /L)	161	150	No
Dureza cálcica (mg CaCO ₃ /L)	40	A & R	-
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	100	A & R	-
Estaño total (mg Sn/L)	< 0.05	2	Si
Fenoles (mg Fenol/L)	< 0.10	0.2	Si
Fluoruros (mg F-/L)	< 0.2	5	Si
Formaldehido (mg/L)	1.58	A & R	-
Fósforo reactivo soluble (mg P-PO ₄ /L)	< 0.010	A & R	-
Fósforo total (mg P/L)	1.33	A & R	-
Grasas y aceites (mg/L)	< 10.0	10	Si
Hidrocarburos (mg/L)	< 10.0	10	Si
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (mg/L)	< 0.010	A & R	-
Hierro total (mg Fe/L)	24	1	No
Litio total (mg Li/L)	0.008	A & R	-
Manganeso total (mg Mn/L)	2.42	A & R	-
Mercurio total (mg Hg/L)	< 0.001	0.002	Si
Molibdeno total (mg Mo/L)	< 0.005	A & R	-
Níquel total (mg Ni/L)	< 0.050	0.1	Si

Variable	Resultado	Art. 15 - Resolución 631	Cumple
Nitratos (mg N-NO ₃ -/L)	< 1.40	A & R	-
Nitritos (mg N-NO ₂ -/L)	0.02	A & R	-
Nitrógeno Amoniacal (mg NH ₃ -N/L)	< 5.00	A & R	-
Nitrógeno Kjeldahl (mg/L N-NTK)	< 5.00	A & R	-
Nitrógeno total (mg N/L)	6.42	A & R	-
pH (Unidades de pH)	7.1	6.00 - 9.00	Si
Plata total (mg Ag/L)	< 0.002	0.2	Si
Plomo total (mg Pb/L)	< 0.100	0.1	Si
Selenio total (mg Se/L)	< 0.005	0.2	Si
Sólidos sedimentables (mL/L)	125	1	No
Sólidos suspendidos totales (mg SST/L)	809	50	No
Sólidos suspendidos volátiles (mg SSV/L)	171.6	-	-
Sólidos totales (mg ST/L)	12050	-	-
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)	< 10.0	250	Si
Sulfuros (mg S ²⁻ /L)	< 1.00	1	Si
Surfactantes aniónicos como SAAM (mg SAAM/L)	< 0.400	A & R	-
Titanio total (mg Ti/L)	< 1.00	A & R	-
Vanadio total (mg V/L)	0.017	1	Si
Zinc total (mg Zn/L)	0.209	3	Si
Coliformes Totales (NMP/100 mL)	10500	-	-
Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	175	-	-
Huevo de Helminto (Huevos/L)	< 1,00	-	-
Salmonella (A/P)	Ausencia	-	-

Teniendo en cuenta la caracterización fisicoquímica y su comparación con la normativa ambiental vigente, se determina el incumplimiento en las variables sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, hierro total y DQO, las cuales, con la implementación de un sistema de tratamiento, se espera disminuir su concentración.

Al analizar los resultados de los metales, se puede observar que el aluminio presenta la concentración más alta, lo cual se asocia al uso del sulfato de aluminio tipo A como coagulante en el proceso de tratamiento de agua potable. El valor residual de aluminio de 26.4 mg Al/L indica una dosificación significativa del coagulante, lo que contribuye a la eliminación de sólidos suspendidos, color y turbidez en el agua. Esto optimiza la formación de flócs y mejora la velocidad de sedimentación, además, esta concentración de aluminio nos indica que el metal residual queda contenido en la mezcla lodo/agua que genera la planta de tratamiento (19).

6.3 Determinación de lodos

La determinación del volumen de lodo liviano producido por la planta de tratamiento de agua potable San Antonio, ubicado en el municipio de Palestina, Caldas, se realizó mediante el método volumétrico en dos campañas de seguimiento, siendo la primera el día 29 de marzo de 2023, día en el cual se llevó a cabo la toma de muestra para caracterizar lo definido en el artículo 15 de la resolución 0631 de 2015; la segunda campaña de monitoreo se realizó el día 10 de abril de 2023, en esta ocasión se tomó la muestra (60 L) de agua de lavado de filtros para la implementación de las pruebas de tratabilidad.

Para la cuantificación de los lodos livianos producidos en la PTAP, se aplicó la metodología de aforo volumétrico, el cual consiste en definir en cuanto tiempo se llena un volumen conocido, para lo cual, el caudal es fácilmente calculable, mediante la siguiente expresión.

$$Q = V / t$$

Donde:

Q = caudal, en L/s o m³/s

V = volumen del recipiente, en L o m³

t = Tiempo en que se llena el recipiente, en s.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos, para cada ensayo realizado.

Tabla 14. Resultados del aforo de lodos livianos

Variable	Ensayo 1	Ensayo 2
Volumen (m ³)	0.19	0.18

Variable	Ensayo 1	Ensayo 2
	0.16	0.15
	0.17	0.16
	0.19	0.16
Tiempo (s)	33.02	29.87
	30.20	26.33
	32.37	27.90
	33.50	29.96
Caudal (m ³ /s)	0.00567	0.00617
	0.00517	0.00583
	0.00525	0.00573
	0.00567	0.00534
Caudal promedio (m ³ /s)	0.00544	0.00577
	0.00560	

En promedio se obtuvo un caudal de lodo liviano de 5.60 L/s, calculado a partir de 4 ensayos realizados en cada una de las jornadas en que se tomó muestra, la primera fue para el seguimiento fisicoquímico de la fuente receptora y el segundo, fue para el seguimiento del vertimiento y la elaboración de las pruebas de tratabilidad. A continuación, se presenta el registro fotográfico, asociado a las mediciones de caudal.



Figura 28. Cámara de aforo y medición de caudal en la cámara

Como se mencionó anteriormente, el retrolavado de los filtros, se realiza en dos etapas, una primera en la que se lavan los seis filtros en forma continua, y una segunda donde se repite el retrolavado en los tres primeros filtros, dando un total de 9 unidades, donde cada una de estas recibe el flujo de agua durante aproximadamente 10 minutos, para un total de 90 minutos de lavado. Actualmente el vertimiento de lodos livianos corresponde a 30.78 m^3 por lavado.

6.4 Pruebas de tratabilidad

Teniendo en cuenta el lodo que es vertido directamente a la fuente superficial, se desarrollaron pruebas de tratabilidad, con el fin de evaluar diferentes químicos, que ayudan en el proceso de espesamiento y deshidratación de la mezcla lodo/agua obtenida en el lavado de filtros. No obstante, la primera evaluación que se realizará corresponde a la cantidad de lodo generado, teniendo en cuenta el tiempo de lavado de cada filtro; se pretende optimizar este tiempo, para disminuir el volumen de lodo por cada lavado y así, diseñar un sistema de tratamiento con un tamaño adecuado, proporcional a este volumen.

Los químicos por evaluar corresponden a agentes coagulantes o espesantes, que modifican las características químicas y enlaces moleculares del lodo, permitiendo una mayor aglomeración de este, que facilita el proceso de sedimentación de los lodos presentes en el sistema, adicionalmente, el

espaciado entre moléculas se reduce a tal punto, que no permite el ingreso de agua a estos, favoreciendo su deshidratación.

Se plantean diferentes pruebas y mediciones que permiten determinar la eficiencia de remoción de sólidos en el agua tratada con cada uno de los agentes químicos utilizados y las posibles mezclas entre estos, que optimicen el proceso de sedimentación y deshidratación. Dentro de las pruebas a realizar, se plantea el seguimiento al lodo de partida y al lodo tratado, para cada prueba, así como la evaluación de tiempo de filtración y remoción de turbiedad en cada uno de estos procesos.

6.4.1 Tiempo de lavado de filtros

Primeramente, se evaluó el tiempo de lavado de filtros actual, por medio de la medición de turbiedad en diferentes tiempos del lavado de un filtro, partiendo de los diez (10) minutos que tarda en realizarse el retrolavado a un equipo, para esto se utilizaron recipientes de 100 mL, en donde se tomó la muestra cada cuarenta (40) segundos aproximadamente, durante once (11) minutos para el filtro uno y doce (12) minutos para el filtro seis, con el fin de realizar la curva de tiempo de lavado contra turbiedad en el agua. A continuación, se presenta una tabla con los resultados obtenidos, seguidamente se grafican dichos resultados.

Tabla 15. Tiempo de lavado de filtros

Dato	Filtro No. 1		Filtro No. 6	
	Tiempo (s)	Turbiedad (NTU)	Tiempo (s)	Turbiedad (NTU)
1	0	120.0	0	7.32
2	15	456.5	30	64.30
3	40	632.0	50	167.00
4	120	840.5	90	512.50
5	160	806.5	120	670.00
6	200	533.5	150	639.50
7	240	538.0	190	626.00
8	280	271.0	230	580.00
9	320	242.5	270	440.50
10	360	269.5	310	417.00

Dato	Filtro No. 1		Filtro No. 6	
	Tiempo (s)	Turbiedad (NTU)	Tiempo (s)	Turbiedad (NTU)
11	400	218.5	350	269.50
12	460	167.0	390	225.50
13	520	142.0	460	179.00
14	580	104.0	520	140.00
15	660	82.7	760	83.90

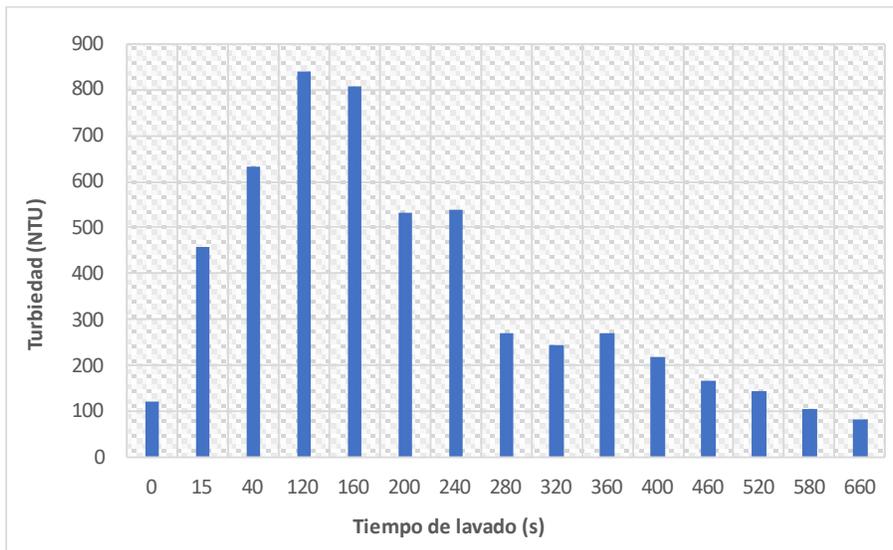


Figura 29. Tiempo de lavado de filtro 1 vs. Turbiedad

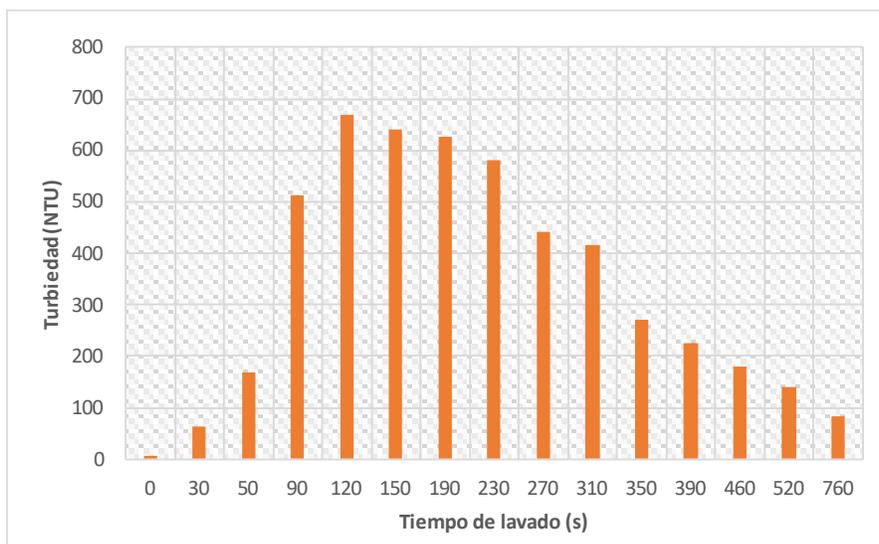


Figura 30. Tiempo de lavado de filtro 6 vs. Turbiedad

De los resultados obtenidos se evidencia un valor de turbiedad alto, incluso en los tiempos finales del retrolavado, teniendo en cuenta lo reportado en la literatura, ya que, según Arboleda (10), el tiempo adecuado de lavado se obtiene cuando el agua de lavado alcance una turbiedad de 25 NTU (valor sugerido para que no se genere desgaste del medio filtrante), sin embargo, este valor no logra ser alcanzado en ninguno de los dos ensayos realizados. No obstante, cabe mencionar que los filtros 1, 2 y 3, reciben un segundo ciclo de retrolavado, ya que, debido a la configuración de las válvulas del sistema, al realizarse el retrolavado a los filtros 4, 5 y 6, los primeros sufren un ensuciamiento adicional en su lecho. En las siguientes figuras, se logra evidenciar la disminución de turbiedad a medida que se aumenta el tiempo de lavado de filtro, y como se menciona anteriormente, para el filtro 1, se percibe una tonalidad más oscura en los últimos recipientes, aunque la coloración más alta se presenta en el lavado del filtro 6, durante los primeros minutos.



Figura 31. Recipientes con el agua de lavado del filtro 1



Figura 32. Recipientes con el agua de lavado del filtro 6

De los lavados de filtros, se tomaron cuatro (4) muestras que fueron enviadas al laboratorio, con el fin de cuantificar los sólidos suspendidos totales y construir una curva que relacione la turbiedad, la cual fue medida in situ, con los sólidos suspendidos totales, esta curva sirve para generar una ecuación que correlacione esta información, para la muestra en estudio, teniendo en cuenta la facilidad de cuantificar la turbiedad, en las pruebas de tratabilidad y así mismo comparar el valor obtenido de sólidos suspendidos totales según lo definido en la norma, resolución 631 de 2015, artículo 15. A continuación, se presenta la gráfica obtenida de la correlación de estas dos variables, las muestras enviadas al laboratorio y una tabla con los resultados obtenidos.

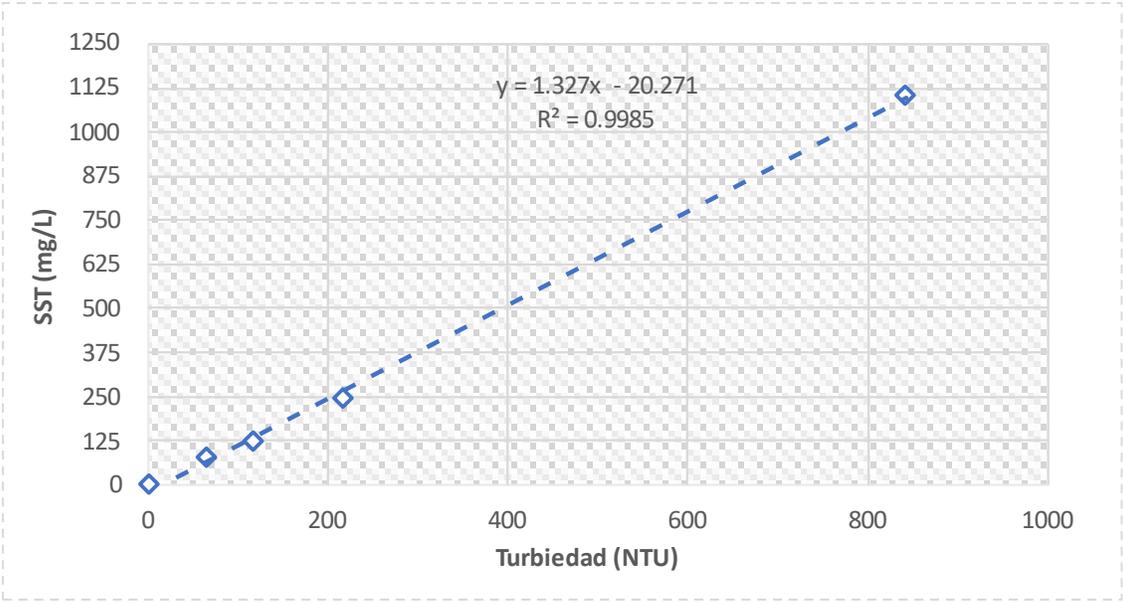


Figura 33. Curva de Turbiedad vs SST

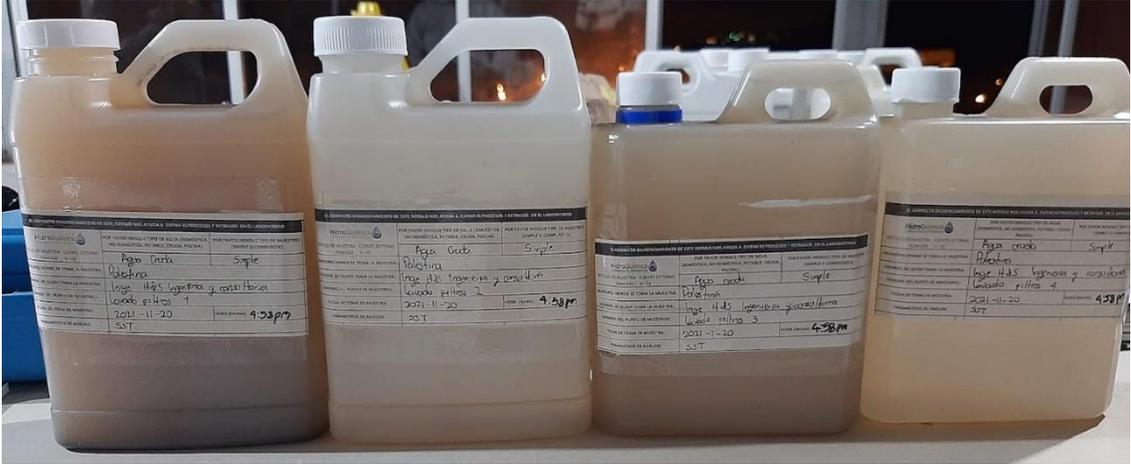


Figura 34. Muestras enviadas al laboratorio, para cuantificar SST

Tabla 16. Resultados de cuantificación de SST del vertimiento

Muestra	SST (mg/L)	Turbiedad (NTU)
Lavado filtros 4	75	65.4
Lavado filtros 2	124	117.5
Lavado filtros 3	244	217.5
Lavado filtros 1	1105	842.5

6.4.2 Seguimiento a las mejores condiciones de operación

Se realizaron con las dosis y agentes químicos que presentan las mejores condiciones de remoción, para esto se montaron cuatro jarras con las dosis y químicos presentados en la siguiente tabla, con el fin de comprobar el comportamiento del lodo a tratar con los agentes químicos adicionados, siendo el valor de turbiedad el que definió la factibilidad de la propuesta realizada en cuanto a dosis agregadas y agentes químicos implementados.

Tabla 17. Montaje de pruebas y resultados obtenidos

Jarra	Coagulante	Dosis	Espesante	Dosis	Turbiedad final
1	Al ₂ (SO ₄) ₃ – Tipo A	70 mg/L	DA-Aniónico	3 mg/L	2.70 NTU
2	-	-	DA-Aniónico	3 mg/L	16.3 NTU
3	Al ₂ (SO ₄) ₃ – Tipo A	70 mg/L	F7000	3 mg/L	1.89 NTU
4	T-2F	70 mg/L	F7000	3 mg/L	37.3 NTU

Se busca evaluar la necesidad de la adición de agente coagulante, para lo cual se preparó una jarra sin este químico y con la dosis de espesante encontrada, también, se plantea el uso del segundo mejor espesante, que corresponde al F7000, en caso de que esté presente un menor valor en el mercado e incluso su disponibilidad sea mayor, que el definido como mejor agente espesante. Finalmente, se preparó una jarra con el otro agente coagulante evaluado y F7000, ya que ambos pertenecen a la misma casa matriz (TQI), con el fin de evaluar su eficiencia y poder contar con la disponibilidad de estos, en caso de algún contratiempo en la adquisición de los demás productos. A continuación, se presentan el respectivo registro fotográfico del seguimiento a las pruebas realizadas, desde el montaje de jarras, durante la sedimentación, y al finalizar esta.



Figura 35. Montaje de muestras finales



Figura 36. Resultados de las pruebas finales, después de dos minutos de sedimentación

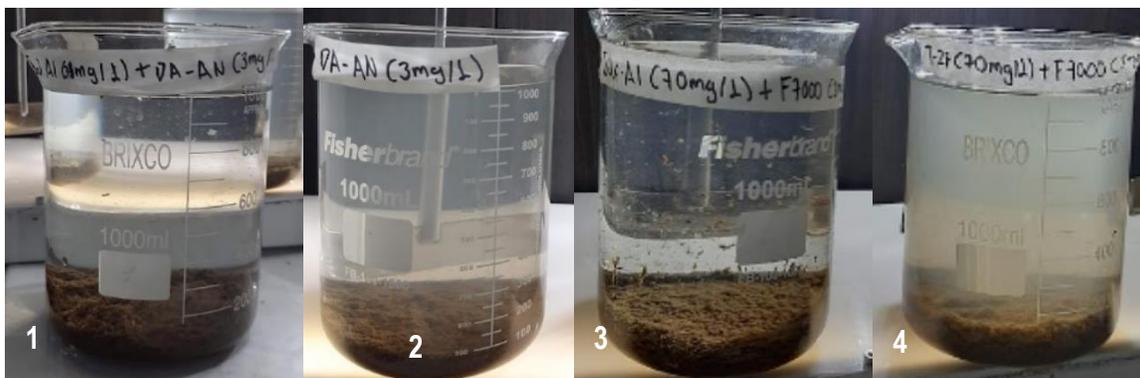


Figura 37. Resultados finales de la prueba

Como se define anteriormente, los mejores resultados están en la jarra 1 y en la jarra 3, indicando adecuado el coagulante seleccionado y su dosis, sulfato de aluminio – Tipo A a 70 mg/L, por otra parte, también se define el DA-Aniónico a 3 mg/L, como agente espesante y se encuentra que el F7000 a 3 mg/L, presenta turbiedades de 1.89 NTU, indicando que también puede ser implementado como agente espesante en el sistema de tratamiento de agua residual de la PTAP San Antonio. A estas dos

jarras se le realizaron pruebas de velocidad de filtración y se determinó la turbiedad final del agua filtrada, a continuación, se presentan los resultados obtenidos y el registro fotográfico.



Figura 38. Determinación de densidad y resultado de filtración

Tabla 18. Resultados de velocidad de filtración en las pruebas finales

Tiempo (s)	Al₂(SO₄)₃ – Tipo A + DA-Aniónico	Al₂(SO₄)₃ – Tipo A + F7000
0	0	0
10	46	35
20	55	48
30	60	57
40	60	62
50	61	65
60	62	68
Turbiedad final	6.19	0.89
Vln. Final filtrado	77	88

Finalmente, con los resultados de velocidad de filtración, se encuentran comportamientos favorables para el agua tratada con estas dos combinaciones de químicos, tanto en la separación del agua y el lodo, como en la turbiedad remanente en el agua filtrada. A partir de estos resultados, se envían muestras de agua tratada al laboratorio, con el fin de determinar concentraciones microbiológicas y fisicoquímicas, como coliformes termotolerantes, fósforo total, DQO, DBO₅ y nitrógeno Kjeldahl. Así

mismo, se reservó el lodo espesado en una muestra para cuantificar los sólidos suspendidos totales. A continuación, se presenta el respectivo registro fotográfico y los resultados obtenidos.

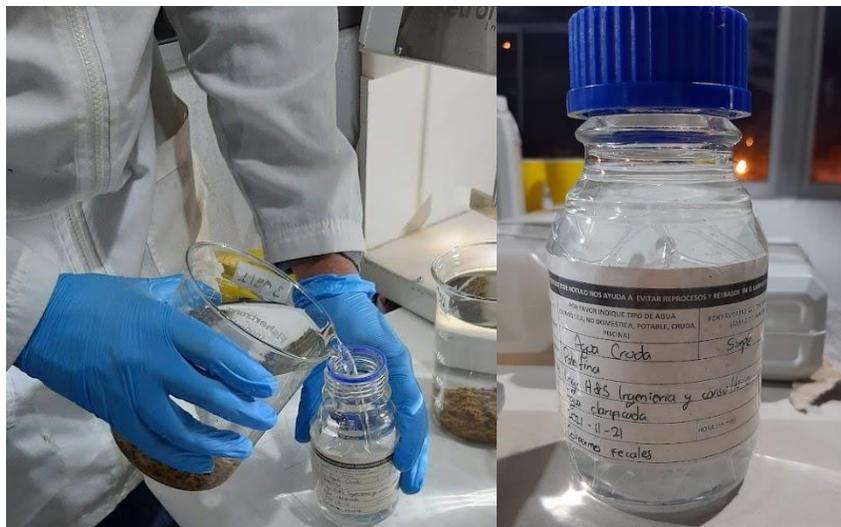


Figura 39. Envasado de muestras microbiológicas tratadas

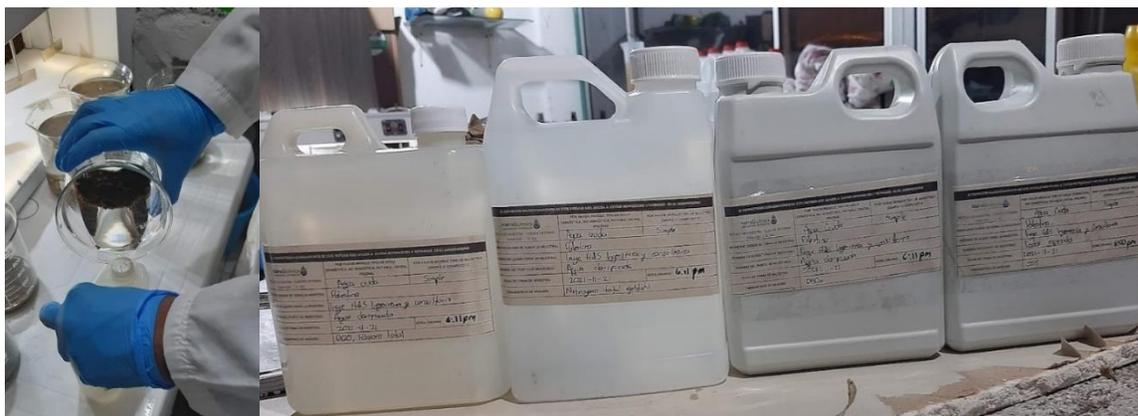


Figura 40. Envasado de muestras fisicoquímicas tratadas



Figura 41. Muestra de lodos espesada con los químicos seleccionados

Tabla 19. Resultados de cuantificaciones finales en laboratorio

Variable	Muestra	Valor	Incertidumbre	Remoción
*Fósforo total (mg P/L)	Vertimiento	1.33	± 0.19	97.6 %
	Agua tratada	0.032	± 0.004	
*DQO (mg O ₂ /L)	Vertimiento	161	± 9	80.9 %
	Agua tratada	30.8	± 1.7	
*DBO ₅ (mg O ₂ /L)	Vertimiento	< 3.00	-	NA
	Agua tratada	< 3.00	-	
*Nitrógeno Kjeldahl (mg/L N-NTK)	Vertimiento	< 5.00	-	NA
	Agua tratada	< 5.00	-	
*Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Vertimiento	175	± 1.46	88.6 %
	Agua tratada	20	± 1.46	
Sólidos suspendidos totales (mg SST/L)	Vertimiento	809	± 50	99.5%
	Agua tratada	3.9	-	
Sólidos sedimentables (mL/L)	Vertimiento	125	± 1	99.9%
	Agua tratada	< 0.1	-	
*Sólidos suspendidos totales (mg SST/L)	Lodo espesado	27016	± 513	NA

NA, no aplica para valores por debajo del límite de cuantificación del método implementado o no tiene valor comparativo.

En la tabla anterior se presentan los resultados obtenidos de las caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas del agua vertida (lodos livianos) y del agua tratada mediante las mejores dosificaciones de agentes químicos, como coagulante y espesante, donde se puede comparar las remociones que se obtienen al implementar este tratamiento al vertimiento de la PTAP San Antonio

6.5 Descripción de alternativas

Los lodos generados en la PTAP San Antonio pueden ser tratados mediante diferentes sistemas, sin embargo, como se indica en el artículo 125 de la resolución 330 de 2017 (modificado por el artículo 39 de la resolución 799 de 2021), *“Los lodos evacuados de los procesos unitarios deberán ser sometidos a técnicas de homogeneización, complementadas con tratamientos de espesamiento y deshidratación. Bajo ninguna circunstancia se permite la descarga o almacenamiento final de lodos sin previo tratamiento”*; por esta razón todas las alternativas de tratamiento de lodos incluyen cada una de las unidades descritas (homogeneización, espesamiento, espesamiento y deshidratación), con la una diferencia entre cada una de estas que el equipo utilizado en la deshidratación no es el mismo.

A continuación, se describen cada una de las alternativas de tratamiento que se tendrán en cuenta para la evaluación técnica y socioeconómica.

6.5.1 Alternativa 1: Homogeneización + Espesamiento + Deshidratación (Filtro prensa) con recirculación de agua clarificada

La primer alternativa de tratamiento integra en su esquema las unidades mínimas requeridas en la resolución 330 de 2017, iniciando por un sistema de homogeneización, seguido de una unidad de espesamiento y finalizando con un equipo de deshidratación de lodos, en este caso filtro prensa, además de contar con recirculación del agua clarificada de los espesadores al tanque de agua cruda y recirculación de agua filtrada al tanque de homogeneización, de esta forma no se generan vertimientos líquidos en el tren de tratamiento.

En la siguiente figura se presenta un esquema del tren de tratamiento propuesto para los lodos generados en la potabilización.

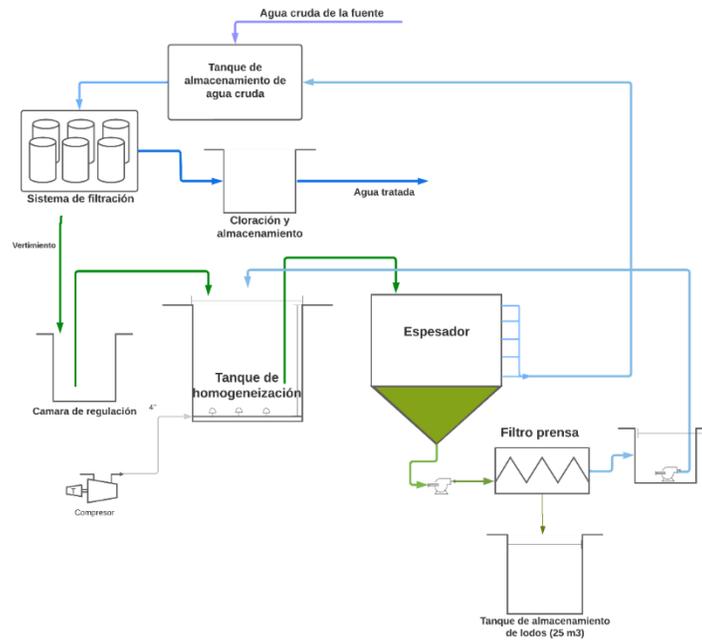


Figura 42. Esquema de alternativa 1

La homogeneización se utiliza para acondicionar el agua que ingresa al sistema de tratamiento antes del espesamiento, esto debido a que durante el retrolavado la turbiedad del efluente es variante, como se identificó durante los aforos y pruebas de tratabilidad, por esta razón es recomendable que se tenga un volumen homogéneo que permita un mejor espesamiento de los lodos bombeados.

Para este sistema se opta por hacer una homogeneización con aireación, recomendable que sea de burbuja gruesa, lo que permitirá que se genere una turbulencia adecuada y un lote con una muestra homogénea. En este equipo el agua no debe permanecer más de 6 horas, es recomendable que la homogeneización sea de 1 hora después de llenado, sin embargo, es preferible que el sistema de aireación se active durante el llenado de este, con el fin de prevenir acumulación de lodos al fondo de la unidad.

Los espesadores de gravedad son contenedores usualmente redondos que alcanzan una profundidad o altura de agua de entre 3 y 4 metros y un diámetro de hasta 25 metros. La base del sedimentador está diseñada con una inclinación que varía entre 1:6 y 1:3.

El filtro prensa es un dispositivo de deshidratación fácil de usar, de consumo energético mínimo y alta capacidad de compactación. Este equipo extrae la máxima cantidad de agua de los lodos procedentes de un tratamiento de agua o un proceso de producción. El filtro prensa consta de una serie de placas verticales que están firmemente juntas; telas filtrantes se ubican en ambos lados de estas placas, que acumulan los lodos deshidratados y permiten que el agua fluya. El proceso de filtrado se lleva a cabo en lotes e incluye tres etapas fundamentales: cierre de la prensa, filtración y apertura - descarga.

Las fases de funcionamiento de un filtro prensa son (25):

- Llenado con una duración de 15 a 20 minutos.
- Filtrado con una duración que oscila entre 1 y 3 horas en función del tipo de lodo.
- Vaciado con una duración de 30 minutos.
- Lavado con una duración de 30 minutos cada 2 o 3 filtrados.

Los filtros prensa presentan varios problemas operacionales y de mantenimiento que varían desde dificultades en los sistemas de alimentación de reactivos y acondicionamiento del lodo hasta periodos que se encuentra fuera del servicio para realizar las labores de mantenimiento demasiado prolongados. Los aspectos para tener en cuenta en el diseño de instalaciones de filtros prensa incluyen:

- Ventilación adecuada del edificio de deshidratación (se recomienda adoptar entre 6 y 12 regeneraciones de aire por hora, en función de la temperatura ambiente).
- Sistemas de lavado a presiones elevadas.
- En los casos en los que se emplea cal, provisión de un sistema de lavado por circulación de ácido para eliminar las incrustaciones que se puedan formar.
- Incluir un sistema de rotura de la torta de lodo seguido del filtro prensa (especialmente si el lodo deshidratado se desea incinerar).
- Equipos para facilitar la extracción y mantenimiento de las placas

La ventaja principal de los filtros prensa es su capacidad para conseguir humedades menores al 35%. Por otro lado, tienen un costo de inversión muy alto y necesitan gran cantidad de reactivos en la fase de acondicionamiento (25).

6.5.2 Alternativa 2: Homogeneización + Espesamiento + Deshidratación (Filtro banda) con recirculación de agua clarificada

Al igual que la alternativa anterior, en este caso se contará con homogeneización y espesamiento, con la única diferencia que la unidad de deshidratación corresponde a un equipo de filtro banda, en la siguiente figura se presenta la alternativa 2.

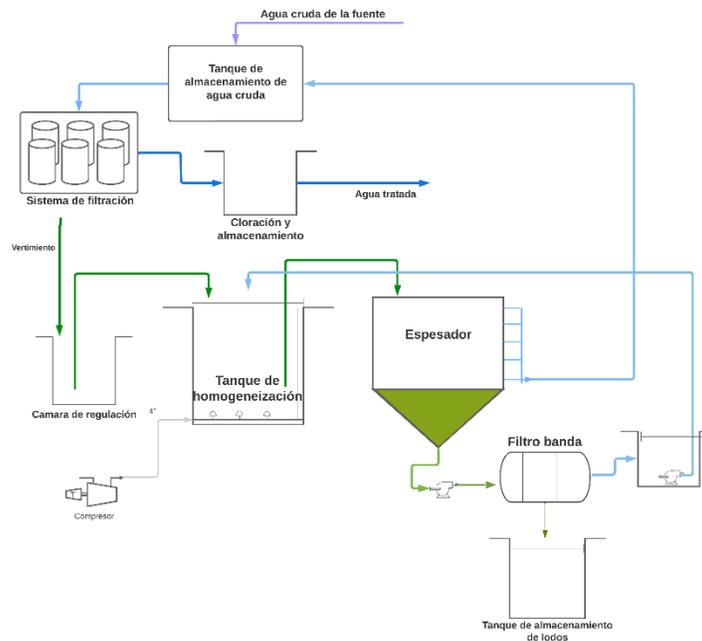


Figura 43. Esquema de alternativa 2

Los filtros de banda aprovechan la gravedad y la presión para deshidratar el lodo tratado. Estos se basan en un principio sencillo: los lodos, intercalados entre dos cintas porosas, son llevados a través de rodillos de diversos tamaños. A medida que disminuye el diámetro de los rodillos, se ejercen fuerzas de presión y de corte sobre el lodo, facilitando la extracción del agua. Aunque existen diferentes modelos de filtros de banda en el mercado, todos incorporan los siguientes componentes fundamentales:

- Zona de acondicionamiento del polímero
- Zona de drenaje por gravedad
- Zona de baja presión
- Zona de alta presión

6.5.3 Alternativa 3: Homogeneización + Espesamiento + Deshidratación (lecho de secado) con recirculación de agua clarificada

En este caso se plantean las mismas unidades de tratamiento, variando en el proceso de deshidratación, los filtros y pasando a un lecho de secado, a continuación, se presenta el diseño conceptual de la alternativa 3.

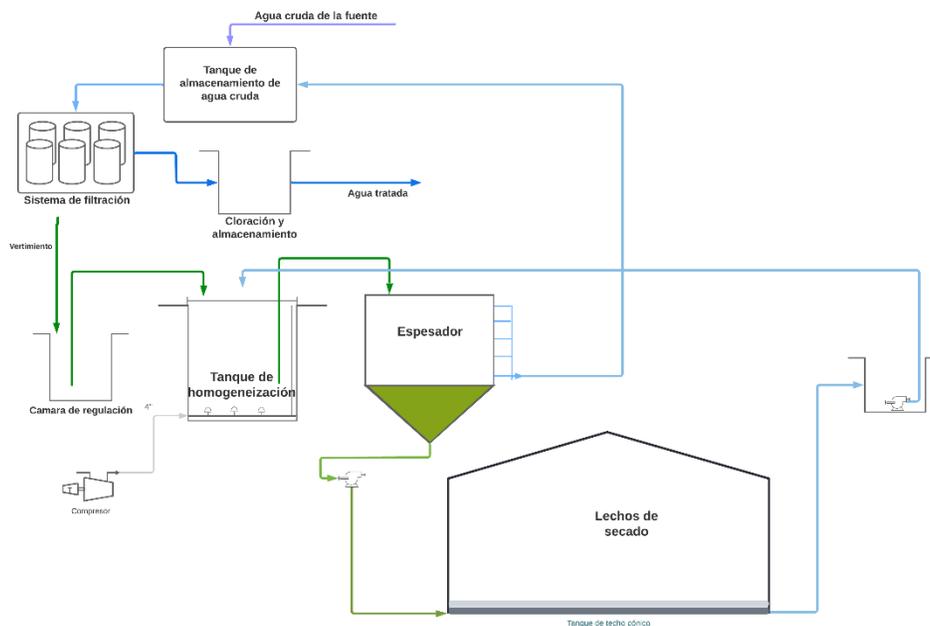


Figura 44. Esquema de alternativa 3

Los lechos de arena son menos propensos a verse afectados por la concentración de sólidos en el flujo entrante y generan un lodo más seco en comparación con cualquier método que utilice un dispositivo mecánico. El secado en lechos de arena es un proceso que demanda más mano de obra y espacio. Sin embargo, la necesidad de reparaciones frecuentes y los elevados costos iniciales de los sistemas mecánicos hacen que el secado en arena sea una opción atractiva donde hay suficiente terreno y condiciones ambientales favorables. No obstante, los gastos adicionales relacionados con el recubrimiento y la supervisión de la calidad del agua subterránea pueden incrementar los costos.

Los lechos de secado de arena son los más clásicos y frecuentes en la tecnología de secado de lechos. Estos lechos suelen ser rectangulares para facilitar la recolección o almacenamiento del lodo con un cargador frontal. Sus dimensiones pueden variar entre 4.5 a 18 metros de ancho y de 15 a 45 metros de largo, con paredes hechas, por lo general, de concreto (31). Normalmente se depositan de

10 a 23 cm de arena y de 20 a 46 cm de grava graduada o piedra. El diámetro de la arena suele ser de 0.3 a 1.2 mm y tiene un coeficiente de uniformidad menor a 5.0. La grava se clasifica generalmente con un diámetro efectivo de 0.3 a 2.5 cm.

6.6 Evaluación de alternativas

Se realizó la evaluación de alternativas, teniendo en cuenta la metodología presentada anteriormente, para valorar los componentes socioeconómicos, ambiental, técnico y operativo, sin embargo, esta evaluación fue complementada, con un segundo análisis enfocado en el componente económico, donde se evalúa costos del equipo de deshidratación, partiendo de las tres opciones presentadas, filtro prensa (alternativa 1), filtro banda (alternativa 2) y lechos de secado (alternativa 3).

6.6.1 Evaluación socioeconómica y técnica

A continuación, se presenta la evaluación de alternativas teniendo en cuenta aspectos socioeconómicos, operativos, técnicos y ambientales.

Tabla 20. Evaluación de alternativas, componente socioeconómico y técnico

Id criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Observación
F1a	2	2	3	Es posible que algunos elementos electromecánicos (filtro prensa, filtro banda), requieran ser importados
F1b	2	2	2	Existen proveedores nacionales que prestan el servicio de instalación y mantenimiento
F1c	2	2	3	La alternativa 3 no requiere de energía eléctrica para la deshidratación de los lodos
F1d	2	2	2	Si existe oferta de empresas recolectoras y con permisos

Id criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Observación
				de disposición en la región del proyecto
F2a	5	5	5	En todos los casos se plantea la recirculación de agua, lo que implica una disminución en el impacto de la PTAP sobre la quebrada Sin Nombre al no tener vertimiento
F2b	5	5	5	El acueducto se verá beneficiado en la reducción de pagos por tasa retributiva y posibles pagos por incumplimiento de la norma (construcción de la PTAR)
F3a	1	1	1	En todos los casos se presenta un incremento en los costos administrativos, debido al manejo propio de la PTAR
F4a	5	5	10	Para los equipos electromecánicos se podrían generar residuos de los consumibles, sin embargo, el proveedor y/o el responsable de los mantenimientos gestionará su disposición
F4b	10	10	10	En todos los casos se espera el ingreso de vehículos y maquinaria para la

Id criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Observación
				construcción e instalación de las unidades de tratamiento
F5a	4	4	4	En todos los casos se encontró que es posible recircular el agua clarificada del espesamiento
F5b	8	4	1	De acuerdo con las cotizaciones, el filtro prensa presenta una humedad remanente del 30% y el filtro banda del 40%
F6a	12	10	1	Los lechos de secado requieren un área extensa para el tratamiento del volumen de lodos generado
F7a	3	3	2	Los lodos generados están directamente relacionados a los sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables, por tanto, la carga de sólidos aplicados por área de lecho podría superar los valores de diseño, los equipos electromecánicos presentan un mayor rango de operación, y el incremento de tiempo de tratamiento corresponde a horas, mientras que, para los lechos, corresponde a días

Id criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Observación
F7b	3	3	3	De acuerdo con las pruebas de tratabilidad, las remociones encontradas para DQO, SST, SSED, Turbiedad y coliformes termo tolerantes, están por encima del 80%, permitiendo que el agua sea apta para su potabilización
F8a	2	2	3	La alternativa 3 permite que el mantenimiento lo realice el mismo operario
F8b	2	2	3	La alternativa 3 permite que el mantenimiento preventivo lo realice el mismo operario
F8c	1	1	2	La alternativa 3 permite que el mantenimiento correctivo lo realice el mismo operario
F9a	1	1	3	-
F9b	1	1	3	-
F10a	3	3	6	A nivel nacional se cuenta con proveedores que brindan soporte para el caso de los equipos electromecánicos
Total	74	68	72	-

6.6.2 Evaluación preliminar de costos

Como se indicó anteriormente las alternativas de tratamiento se diferencian entre ellas únicamente en la unidad de deshidratación de lodos, por esta razón la evaluación preliminar de costos se realiza con base al sistema de deshidratación propuesto, en la siguiente tabla se aprecian los valores aproximados de cada alternativa de tratamiento.

Para realizar la evaluación económica de las alternativas se cuenta con la cotización de los 3 equipos preseleccionados que se mostraron en la descripción de alternativas.

Para la selección de la alternativa en el aspecto económico se sigue la recomendación de que la selección de la alternativa de largo plazo se deberá hacer teniendo en cuenta aquella que, solucionando el problema planteado en el horizonte de diseño y satisfaciendo las condiciones técnicas particulares, corresponda a la de menor costo con el criterio del menor valor presente de todos los costos de inversión y operación considerados y análisis de costo mínimo, involucrando variables de tipo ambiental, social y económico.

La recirculación de lodos requiere de una bomba con un costo bajo en comparación al de las demás alternativas, y solo se requiere un precio adicional por envío y puesta en marcha, posiblemente se requiera de suministros luego de que empiece a funcionar, como lo son empaques y otros repuestos. Para el filtro prensa, se incluye dentro del valor de los equipos el motor principal, el panel de potencia y control, el adaptador para salida de torta seca, herramientas especiales, juego de lubricantes, kit de servicio mayor y repuestos de las placas. Por lo cual no hay suministros extras que se necesiten para la puesta en marcha, por otro lado, para los lechos de secado deben construirse y requieren de varios elementos que se pueden conseguir en el mercado nacional.

Teniendo en cuenta el anterior análisis se puede concluir que la recirculación de lodos es la alternativa más viable económicamente.

Tabla 21. Características de las alternativas para tratamiento de los lodos

EQUIPO	Alternativa 1: Filtro prensa	Alternativa 2: Filtro banda	Alternativa 3: Lechos de secado
MODELO	FM -25/800-500-A	EKOSEP LS10B06	N. A
Tiempo de Operación del equipo (horas/día)	12	2	24
Tiempo de secado de los lodos generados en un día de operación	12 h	2 h	4 días
Caudal hidráulico de entrada (m ³ /h).	1.5	4	5
Concentración de lodo de entrada (% SST)	2.7	2.7	2.7
Densidad de lodo deshidratado (kg/m ³)	1.4	1.4	1.4
Porcentaje de deshidratación mínimo	25%	40%	16%
Longitud (m)	2.23	5.397	35
Ancho (m)	0.89	1.410	30
Alto (m)	1.38	1.216	0.3
Área de filtrado (m ²)	10	5.5	1030*
Peso (ton)	2.6	2.8	616
Potencia Eléctrica consumida (KW/h)	4	1.1	-
Costo Unitario de Energía (\$ / KW)	\$ 622	\$ 622	-
Horas de operación en un año	2920	803	8760
Consumo de Energía 2020 (KW-año)	11680	803	-
Costos de Energía 2020 (\$ / año)	\$ 7,264,960	\$ 499,466	-
Costo del equipo (Total cotización) pesos colombianos	\$ 179,690,000	\$ 227,456,409	\$ 755,449,872

*Esta área es necesaria para recibir el lodo espesado de dos retrolavados (lodo máximo diario), para una operación continua, se requieren por lo menos otros tres lechos de esta área.

De acuerdo con estos valores se puede identificar que, en términos de costos de equipo, el uso de un filtro prensa resulta viable y se podría considerar la recirculación de lodos.

6.6.3 Ventajas /desventajas por alternativa

La evaluación de alternativas requiere la consideración de características cualitativas y cuantitativas, es por esto que a continuación, se presenta una tabla con las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas para el tratamiento de lodos gruesos y posteriormente se realiza una calificación más detallada de las variables técnicas, presupuesto comparativo, calificación de vulnerabilidad, evaluación de variables económicas y finalmente se identifica la alternativa que se adapte mejor a las necesidades de la PTAP San Antonio.

Tabla 22. Análisis de ventajas y desventajas de alternativas

Alternativas	Ventajas	Desventajas
Filtro Prensa	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Generación de agua completamente clarificada. ✓ Alta eficiencia de deshidratación de lodos, producción de tortas semisólidas de fácil manejo y disposición. ✓ Mantenimiento poco frecuente. ✓ Independencia de las condiciones meteorológicas 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevados costos para sistemas automatizados ✓ Elevada mano de obra para sistemas no automatizados ✓ Funcionamiento discontinuo, prensados de varias horas. ✓ Se requiere el cambio del material filtrante por desgaste. ✓ Alto consumo energético
Filtro Banda	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Velocidad variable de las bandas ✓ Rodillos perforados para la rápida evacuación del agua. ✓ Zona de deshidratación de alta presión ✓ Bandas de larga duración ✓ Mantenimiento poco frecuente. ✓ Baja generación de ruido 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevados costos para sistemas automatizados ✓ Mayor consumo de polímero ✓ Funcionamiento discontinuo, prensados de varias horas. ✓ Se requiere el cambio del material filtrante por desgaste. ✓ Alto consumo de agua para el lavado
Lechos de secado	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No es necesario implementar estructuras complejas para el montaje, solo se requiere de los lechos y de pocas estructuras complementarias. ✓ La operación es sencilla y resulta eficiente con altos tiempos de retención. ✓ Se obtiene agua clarificada 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se requiere de extensas áreas superficiales para la correcta operación del sistema. ✓ Se debe intervenir constantemente para retirar los lodos secados, para esto se requiere de maquinaria. ✓ El mantenimiento es complejo debido a que se debe hacer limpieza de todo el material filtrante del lecho.

6.6.4 Descripción de la alternativa de tratamiento seleccionada

Teniendo en cuenta toda la información presentada a lo largo de este documento, especialmente de la sección anterior donde se evalúan las diferentes alternativas, en cuanto a variables técnicas, costos y vulnerabilidad; a continuación, se presenta una descripción general de la alternativa seleccionada para la gestión de los lodos livianos provenientes del lavado de filtros y para los lodos gruesos provenientes del lavado de los sedimentadores.

La alternativa seleccionada para la gestión de los lodos livianos fue la de recirculación del agua de lavado de filtros a la entrada de la PTAP mediante bombeo, de tal forma que se elimine este vertimiento y el agua de retrolavado se mezcle en una proporción determinada con el agua cruda para su tratamiento. Para lo anterior, se implementará un tanque de homogenización, al cual será conducida el agua de lavado de filtros para posteriormente realizar la distribución del agua mediante un sistema de bombeo. En la figura a continuación se muestra la esquematización del sistema de recirculación a implementar.

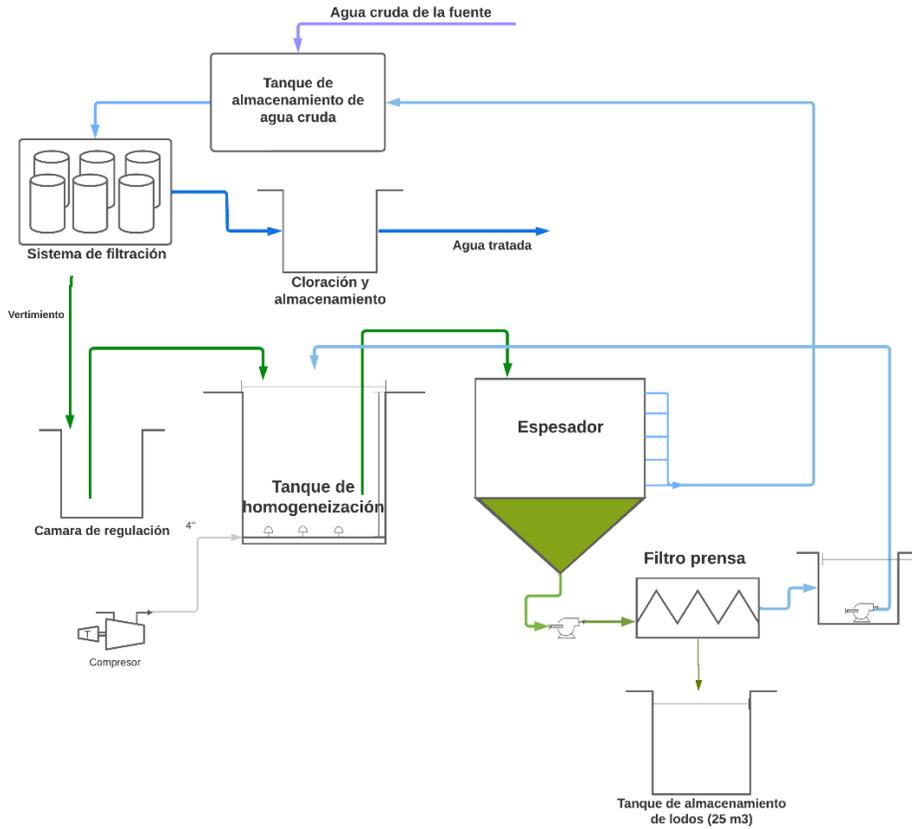


Figura 45. Esquema de sistema de recirculación de agua de lavado de filtros

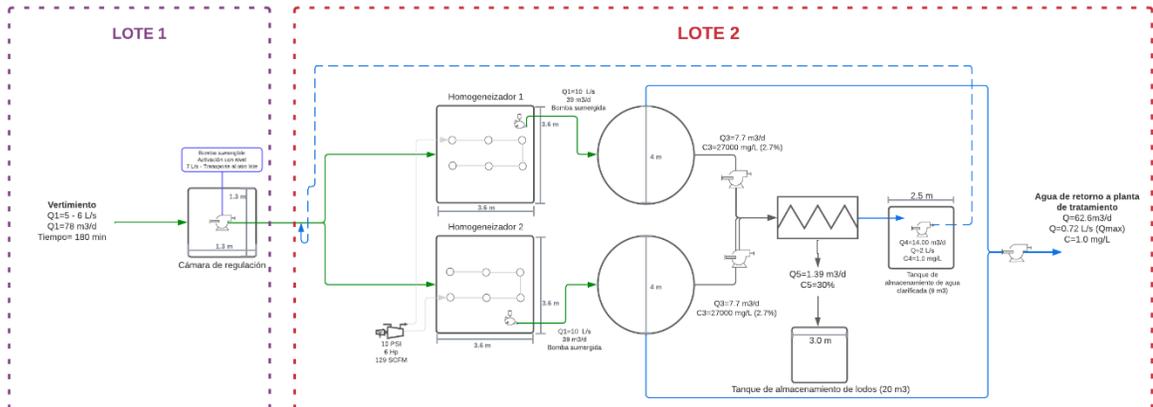


Figura 46. Esquematización de equipos

En el apartado siguiente se explica de manera detallada el diseño del sistema de tratamiento de agua residual no doméstica, proveniente del retrolavado de filtros de la planta de potabilización del acueducto San Antonio.

6.7 Diseño del sistema de tratamiento de subproductos de la potabilización

Como se mencionó en el apartado de determinación de volumen de lodo, el volumen de lodos líquidos seleccionado para el desarrollo del diseño de tratamiento corresponde al volumen obtenido por aforo es de 60.48 m³/d.

El sistema de tratamiento estará compuesto por los siguientes elementos: un tanque de homogenización (el cual permitirá un almacenamiento de los lodos), seguido por un espesador en donde se aplicará un agente coagulante y un agente espesante que ayude a la compactación de los lodos y finalmente un filtro prensa como equipo de deshidratación de los lodos.

6.7.1 Diseño del tanque de homogenización

La evacuación de lodos del sistema de potabilización se realiza actualmente por medio de una tubería en PVC de 4" la cual descarga en una cámara de concreto, en la cual se realizó el aforo y las respectivas caracterizaciones. En el presente diseño se propone que esta cámara siga recibiendo los lodos de retrolavado de filtros y permita regular el caudal de agua a transportar hasta el sistema de tratamiento de ARnD, esta cámara debe contar con la capacidad de almacenar por lo menos los primeros 6 minutos de descarga de lodos y permitir que una bomba sumergible se encargue de transportar el agua desde esta cámara hasta los tanques de homogeneización.

$$V_{\text{camara de lodos}} = 6 \text{ min} * \frac{60\text{s}}{1 \text{ min}} * 5.6 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 2016 \text{ L}$$

Para esto se propone una cámara con capacidad de 2.1 m³ con dimensiones de lado de 1.3 m y profundo de 1.5 m (borde libre 0.2 m), en donde quedará una estructura semejante a la mostrada a continuación:

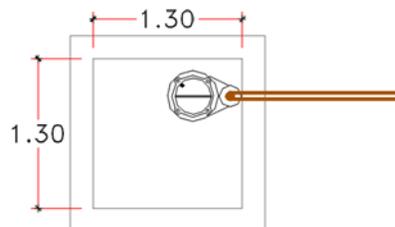


Figura 47. Cámara de recepción de lodos de retrolavado

La bomba encargada de realizar la conducción de lodos desde la cámara de regulación hasta los homogeneizadores debe tener capacidad de vencer 24 metros de columna más las respectivas pérdidas y soportar un caudal de por lo menos 10 L/s, por esta razón la bomba sugerida por el proveedor corresponde a la siguiente:



REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
ROBUSTA75	MOTOBOMBA SUMERGIBLE PARA EFLUENTES Y LODOS 7,5 HP 220 V AC 3 F Hmax 45 mt Qmax 850 L/m SALIDA 2" ALTAMIRA

Figura 48. Bomba sumergible para transporte de lodos desde homogeneizador a espesador.

El tanque de homogenización que se utilizará para los lodos livianos debe tener en conjunto la capacidad para soportar el volumen aportado por dos retrolavados de los filtros, debido a que este corresponde al escenario crítico.

Deberá tenerse en cuenta los requerimientos del artículo 123 de la resolución 330 de 20177 (modificado por el artículo 39 de la resolución 799 de 2021) para el sistema de homogeneización, en donde se indica que *“se tendrá que dimensionar una estructura en la cual se asegure mezcla completa, cuyo volumen sea como mínimo equivalente a poder almacenar el volumen de purga del sedimentador, más el 75% del volumen de lavado de un filtro. El tiempo de retención no podrá superar las 6 horas, la geometría del tanque podrá ser circular, rectangular, o de otra superficie que garantice flujo pistón; siempre y cuando se garantice un nivel de potencia del mezclado superior a 5 W/m³”*. Cabe reiterar que en el sistema de tratamiento de agua potable no cuenta con sedimentador.

A partir del volumen total utilizado para el lavado de un sedimentador y de un factor de seguridad de 1.2 se determinó el volumen total del tanque de homogenización

Caudal de diseño (1.5 horas de vertido por retrolavado y máximo 2 retrolavado por día):

$$Q = 5.6 \frac{\text{L}}{\text{s}} * 180 \frac{\text{min}}{\text{d}} * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 60.48 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$V_{TH} = 60.48 * 1.29 = 78 \text{ m}^3$$

El volumen final de tanque de homogenización es de 78 m³, sin embargo, se proponen dos tanques en paralelo, cada uno con un volumen mínimo de 39 m³ Para el dimensionamiento de los tanques se propone una profundidad útil (P_u) de 3 m.

$$\text{Área Interna} = \frac{V_{TH}}{P_u} = \frac{39 \text{ m}^3}{3 \text{ m}} = 13.0 \text{ m}^2$$

Para definir las dimensiones del tanque se fija una relación Largo/ancho de 1 y se calculan el largo y el ancho del tanque.

$$\text{Ancho} = \text{Largo} = \sqrt{\text{Área Interna}} = \sqrt{13.2} = 3.6 \text{ m}$$

En la tabla a continuación se presenta un resumen de los parámetros de diseño del tanque de homogenización.

Tabla 23. Parámetros del tanque de homogenización

Parámetro	Unidades	Valor
Volumen del Tanque de Homogenización	m ³	39
Profundidad útil	m	3.0
Área Interna	m ²	13.2
Longitud	m	3.6
Ancho	m	3.6

Internamente el tanque de homogeneización contará con una bomba sumergible encargada de transportar los lodos de retrolavado homogeneizados a los espesadores, para esto se adecua una sección la cual aporta 10 m³ adicionales al sistema de homogeneización, quedando con un volumen final de 50 m³ cada uno.

Las características generales del tanque se presentan a continuación.

- ✓ Tipo de esquema de mezcla: Mezclado con difusores de burbuja gruesa

- ✓ Tipo de esquinas: Achaflanadas
- ✓ Borde libre: 0.2 m
- ✓ Pendiente de limpieza: 2 %
- ✓ Sistema de alivio: Rebose superior, a 0.03 m de la altura útil
- ✓ No. de módulos: 1 (con 1 acceso de 0.80x0.80m)

En la siguiente figura se aprecian los cortes de los homogeneizadores propuestos, en donde se aprecia que al interior de estos se encuentra, una bomba con capacidad de transportar los lodos desde el homogeneizador hasta los espesadores, en donde se tiene una cabeza hidráulica de 8 metros más pérdidas en la tubería, para esto se propone la bomba presentada a continuación.

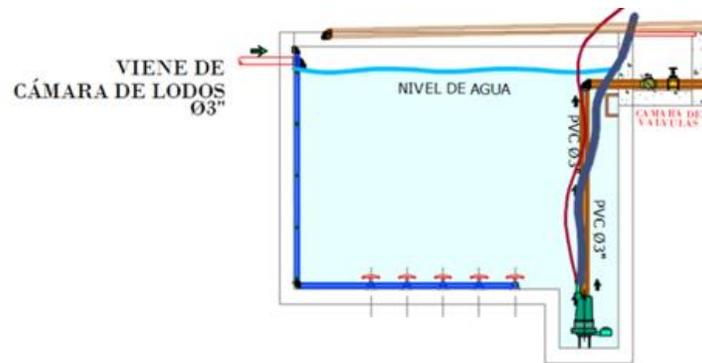


Figura 49. Homogeneizador – vista transversal.

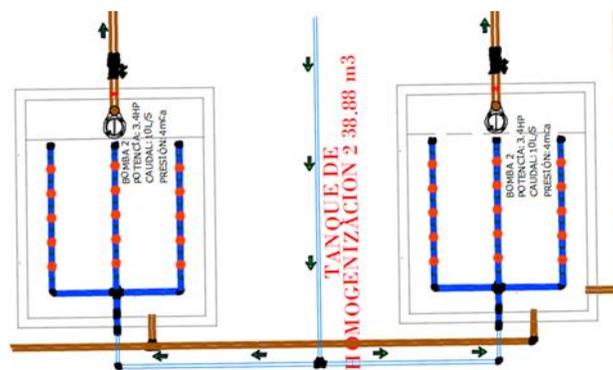


Figura 50. Homogeneizador – vista en planta

A los tanques de homogeneización, además de llegar el agua de retrolavado de filtros, se reciclará el agua filtrada desde los filtros prensa (14 m³/d) y del lixiviado del zodme este volumen, de esta forma por cada homogeneizador entrarían como máximo 7 m³/d de agua filtrada, valor que se tuvo en cuenta para el sobredimensionamiento de estas unidades.

El sistema de homogenización funcionara con ayuda de un soplador de aire, para esto se parte de relaciones teóricas de volumen de aire requerido por unidad de volumen, un valor recomendado es de $0.6 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{h}$.

$$\text{Aire requerido} = 0.6 \frac{\text{m}^3 \text{aire}}{\text{m}^3 - \text{h}} * 38.5 = 23.08 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

El valor anterior se calculó considerando que solo habrá un homogeneizador funcionando durante cada evacuación de lodos de retrolavado.

La presión hidrostática se calcula a partir de la altura de agua a vencer por la burbuja:

$$P_h = h * \rho * g$$

$$P_h = 3\text{m} * 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$P_h = 35,280 \text{ Pa} = 5.12 \text{ psi}$$

Presión absoluta.

$$P_a = 5.12 + 14.7 = 19.81 \text{ psi}$$

La diferencia de temperatura adiabática se calcula a partir de la temperatura ambiente, presiones de entrada y salida del compresor:

$$T_{ad} = \frac{T_1}{n} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right]$$

$$T_{ad} = \frac{298}{0.8} \left[\left(\frac{19.81}{14.7} \right)^{0.283} - 1 \right] = 32.86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 32.86 + 25 = 57.86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este aumento de temperatura afecta el caudal, por tanto, se relaciona con el caudal calculado previamente.

$$Q_1 = \frac{Q_2 * P_a * T_1}{P_{atm} * T_2}$$

$$Q_1 = \frac{23.08 * 19.81 * 25}{14.7 * 57.86} = 14.56 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_1 = 14.56 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 0.5881 = 8.56 \text{ CFM}$$

Se propone para el suministro de aire se proponen difusores de burbuja gruesa modelo CAP AFC75 (3-6 SCFM)



Figura 51. Difusor de burbuja gruesa

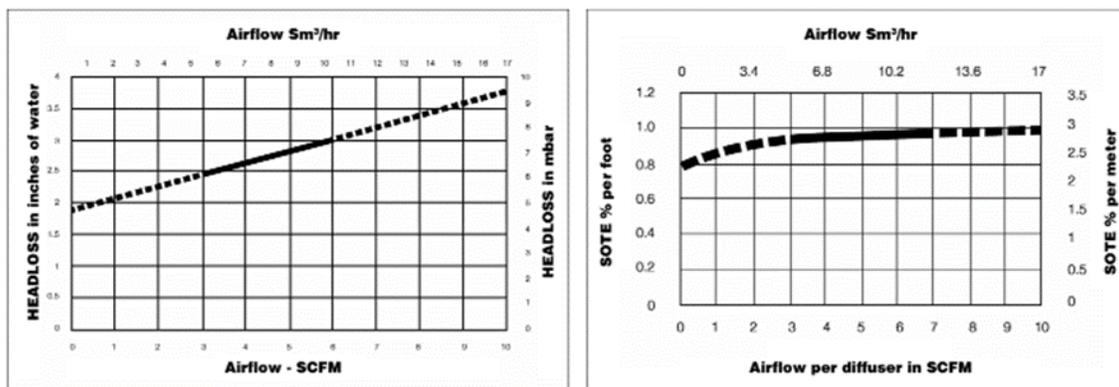


Figura 52. Curvas de difusor

Pérdidas en sistema de aireación (lodos activados)

- ✓ Pérdidas por fricción, tubería y accesorios:
Las pérdidas por fricción están entre 0.5 m y 1.5 m

- ✓ Otras pérdidas:
Pérdida en el domo: 0.27 m H₂O Esta pérdida se encuentra en el catálogo correspondiente al caudal de aire que pasa por el difusor.

- ✓ Sumatoria de pérdidas

$$h \text{ totales} = 1.5 + 0.27 = 1.77\text{m}$$

Pérdidas en tanque de homogeneización

Para el sistema de homogeneización las pérdidas por domo son de 0.066 m H₂O, de acuerdo con el catálogo del producto, por otro lado, se agregan pérdidas similares a las del sistema de aireación por accesorios.

$$h \text{ totales homogeneización} = 1.5 + 0.066 = 1.57 \text{ m}$$

Pérdidas totales

De esta forma se determinan las pérdidas totales, como la suma de pérdidas en homogeneización y en lodos activados.

$$h \text{ totales} = 1.57 \text{ m} + 1.77 \text{ m} = 3.34 \text{ m}$$

Presión requerida a la salida del compresor

Para esto se debe tener en cuenta las condiciones del equipo crítico, en este caso el que cuenta con mayor altura a vencer por la burbuja es el homogeneizador.

$$\text{Altura a vencer por la burbuja} = 3.15 \text{ m}$$

$$\text{Presión salida} = h \text{ totales} + \text{altura a vencer por la burbuja}$$

$$\text{Presión salida} = 3.34 + 3.15 = 6.49 \text{ mH}_2\text{O} = 9.2 \text{ Psi}$$

Para determinar las características del soplador se debe tener en cuenta lo siguiente:

Tabla 24. Cantidad de aire requerido o demandado para el sistema de tratamiento

Parámetro	Valor	Unidades
Cantidad total de aire en tanque de homogeneización	3.12	m ³ aire/min
Cantidad total de aire en lodos activados	7.4	m ³ aire/min
Cantidad de aire total del sistema	10.5	m ³ aire/min
Cantidad de aire total del sistema	371	SCFM

Se encontró que se necesita un soplador para una presión de 9.2 Psi y se debe suministrar aproximadamente 371 CFM o lo que es equivalente a 10.5 m³/min. Teniendo en cuenta la información disponible en catálogos el soplador sugerido se selecciona el soplador rotativo positivo – ROOTS (Anexo 1).

6.7.2 Diseño del espesador

A continuación, se presenta el desarrollo matemático, así como los parámetros y variables empleadas para el diseño del espesador, el cual recibirá los lodos gruesos provenientes del tanque de homogeneización.

Tabla 25. Valores a la entrada y salida del espesador

Parámetro	Unidades	Valor
Volumen de lodo húmedo	m ³	78
Tiempo de operación	hora	6
Caudal entrada espesador (Q ₁)	m ³ /hora	36
Caudal entrada espesador (Q ₁)	L/s	10
Concentración SST entrada espesador (C ₁)	%	0.0809
Concentración SST va al filtro prensa (C ₂)	%	2.7
Caudal salida, va al filtro prensa(Q ₂)	m ³ /hora	15.4
Caudal salida agua clarificada (Q ₃)	m ³ /hora	62.6
Concentración SST agua clarificada (C ₃)	%	0.0001
Tiempo de residencia	hora	6

SST: Sólidos Totales, C: Concentración, Q: Caudal

En la figura a continuación se presenta el balance de masa empleado para el diseño del espesador.

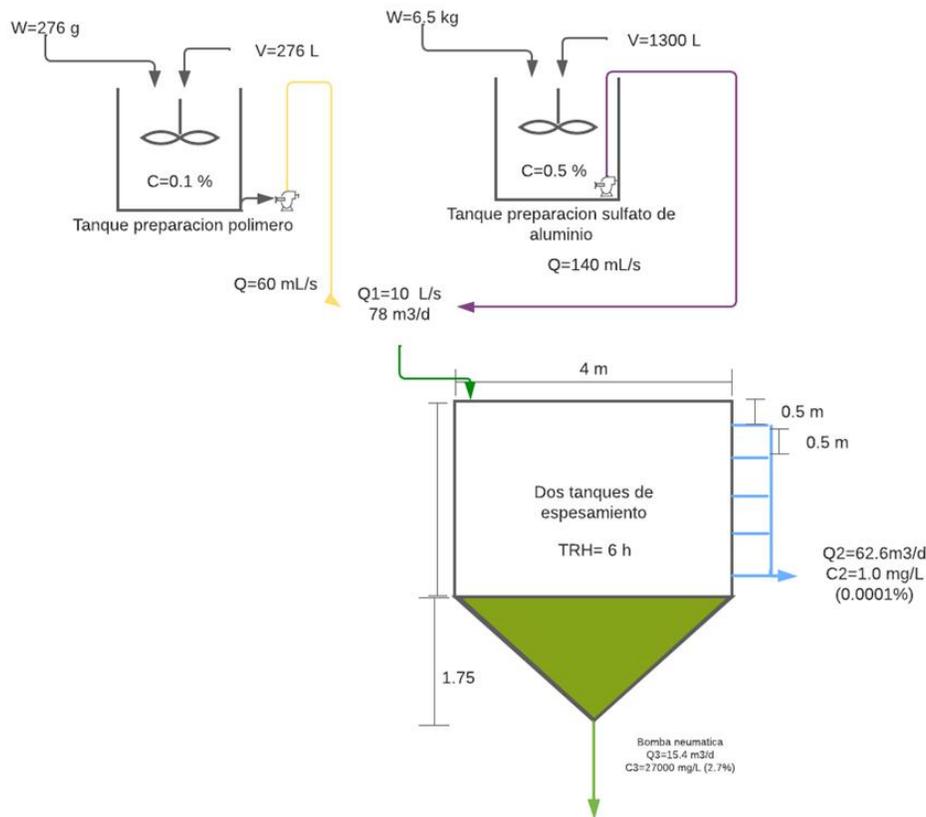


Figura 53. Esquema balance de masa del espesador.

Se debe aclarar que el caudal de 10 L/s se regula desde el equipo de homogeneización por medio de la bomba sumergible ubicada al interior de este, y descrita en la figura anterior.

A partir de los valores mostrados en el balance anterior se dimensiona el espesador, como se muestra a continuación. La carga de sólidos debe estar en el rango sugerido por el artículo 125 de la resolución 0330 de 2017 (15-25 kg/m². día), sin embargo, una carga por debajo de este rango implica que los sólidos van a contar con más área para realizar la correspondiente sedimentación, por esta razón se opta por utilizar una carga de 4 kg/m². día, con lo cual se determina el área total para espesamiento, teniendo en cuenta que la carga de solidos a la entrada del sistema es la siguiente:

$$W = 809 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 6 \frac{\text{L}}{\text{s}} * 3\text{h} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} * \frac{1\text{kg}}{1000000 \text{mg}}$$

$$W = 52.42 \text{ kg/d}$$

$$A_{TE} = \frac{52.4 \text{ kg/día}}{2.5 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{día}} = 24.5 \text{ m}^2$$

La carga hidráulica será entonces:

$$\text{Carga hidráulica} = \frac{\text{Volumen lodo húmedo}}{A_{TE}} = \frac{\frac{78\text{m}^3}{6\text{h}}}{24.5 \text{ m}^2} = 0.5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2\text{h}}$$

Según Letterman RD. (32), la carga hidráulica para unidades de espesamiento que usan polímero como agente espesante deben tener cargas hidráulicas en un rango de 0.12 a 0.5 m³/m².h, por esta razón se corrobora el correcto funcionamiento en términos hidráulicos.

Debido a que el área es considerablemente grande, se opta por diseñar 2 unidades de espesamiento, de esta forma el área superficial por unidad debe ser de 12.5 m², con esto se determinan las dimensiones de cada equipo, como diámetro, profundidad útil y volumen del cono, entre otros.

$$\text{Diámetro del Espesador} = \left(\frac{4 \cdot A_{TE}}{\pi} \right)^{0.5} = \left(\frac{4 \cdot 12.5 \text{ m}^2}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$D_E = 4 \text{ m}$$

El espesador está compuesto de una zona cilíndrica y de otra zona semicónica, para el semicono se tomó criterio de diseño una pendiente de 1x1 o 45°, partiendo de una base de 0.5 m y una zona superior de 4 m, por lo que la altura calculada corresponde a 1.75 m.

El volumen de cono se determinó a partir del diámetro del Espesador D_E y de la profundidad útil del cono $P_{\text{útil cono}}$ la cual se definió como 1.75 m y un diámetro al fondo del cono de 4.0 m.

$$V_{\text{Cono}} = \frac{1}{3} (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2) * \pi * P_{\text{ucono}}$$

$$V_{\text{Cono}} = \frac{1}{3} (2.0^2 + 0.25^2 + 2.0 * 0.25)^2 \cdot \pi \cdot 1.75 \text{ m}$$

$$V_{\text{Cono}} = 8.5 \text{ m}^3$$

Para determinar el volumen del cilindro, se requiere el diámetro del espesador y la profundidad útil del cilindro ($P_{\text{ucilindro}}$), la cual se definió como 2.5 m.

$$V_{\text{Cilindro}} = \pi \cdot r^2 \cdot P_{\text{ucilindro}}$$

$$V_{\text{Cilindro}} = \pi \cdot 2^2 \cdot 2.5$$

$$V_{\text{Cilindro}} = 30.5 \text{ m}^3$$

El volumen del espesador será la suma del volumen del cono y del cilindro, y teniendo en cuenta que sólo será una unidad de espesamiento, el volumen del espesador corresponderá al volumen total.

$$V_{\text{Espesador}} = V_{\text{Cono}} + V_{\text{Cilindro}}$$

$$V_{\text{Espesador}} = 30.5 \text{ m}^3 + 8.5 \text{ m}^3 = 39 \text{ m}^3$$

Adicional a la altura útil de la zona cilíndrica se agregó 30 cm de borde libre.

Finalmente, se verificó el tiempo de retención hidráulica (TRH) del equipo.

$$\text{TRH} = \frac{V_{\text{Espesador}}}{\left(\frac{\text{Volumen lodo humedo}}{\# \text{ de Espesadores}} \right)} \cdot \text{Tiempo de Operación} = \frac{39 \text{ m}^3}{\left(\frac{78 \text{ m}^3}{2} \right)} \cdot 6 \text{ h}$$

$$\text{TRH} = 6.0 \text{ horas}$$

Como se demostró en las pruebas de tratabilidad, para el correcto funcionamiento de la unidad de espesamiento es necesario la adición de polímero espesante y coagulante a las dosis encontradas por medio de las pruebas de tratabilidad. Las sustancias que se deben adicionar corresponden a sulfato de aluminio tipo A y polímero espesante (DA-Aniónico o F7000).

Para el polímero la dosis fue de 3 mg/L, partiendo de una solución concentrada de 1000 mg/L (0.1%):

$$Q_p = \frac{10,000 \frac{\text{mL}}{\text{s}} * 3 \text{ mg/L}}{1000 \text{ mg/L}} = 30 \frac{\text{mL}}{\text{s}} = 108 \text{ L/h}$$

Para esta preparación se debe contar con un equipo especializado en la preparación y dosificación de este polímero, teniendo en cuenta que al día se espera como máximo 78 m³/d de lodos, la cantidad de polímero preparado por día debe ser de 234 L, la información de los equipos requeridos se encuentra en el anexo 2.

Para el sulfato de aluminio la dosis fue de 70 mg/L, partiendo de una solución concentrada de 5000 mg/L.

$$Q_p = \frac{10,000 \frac{\text{mL}}{\text{s}} * 70 \text{ mg/L}}{5,000 \text{ mg/L}} = 140 \frac{\text{mL}}{\text{s}} = 504 \text{ L/h}$$

Para el caso del sulfato de aluminio, se puede hacer su preparación en un tanque convencional plástico, el volumen total necesario por día es de 1094 L, se recomienda que se prepare de forma diaria para conservar sus propiedades coagulantes. Sin embargo, es necesario contar un equipo de agitación mecánica, que se encarga de esta preparación (Anexo 3).

Por último, se debe considerar que los espesadores contarán con tolvas en donde se almacenarán los lodos espesados y servirán de depósito para la alimentación al filtro prensa. Esta tolva contará con el volumen suficiente para soportar un lote de lodos espesados, por esta razón cada una de estas tolvas tendrá un volumen disponible de 9 m³ que tiene la capacidad de almacenar el 20% del volumen de lodos totales que ingresan a los espesadores.

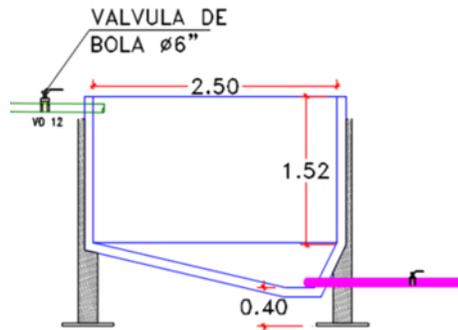


Figura 54. Tolva de lodos espesos

Esta tolva será alimentada por gravedad de los lodos provenientes del espesador, se suministrará aire con el fin de fluidizar estos lodos por medio de un compresor. En la siguiente figura se describe las características del compresor que se utilizará para la difusión de aire.

**Compresor de aire lubricado 2 etapas 5 Hp
motor eléctrico con tanque de 500 litros 175 PSI**

MOTOR	
Potencia	5.00 HP
Velocidad	1750 RPM
Tipo	Eléctrico
Marca	Weg/Siemens
Fases	Monofásico
Voltaje	220 V

CENTRO DE COMPRESION	
Unidades	1
Etapas	2
Cilindros	2
Código de unidad	CE230
Aceite unidad	AW100 (Incluido) y X3000 (No incluido)
Capacidad de aceite unidad	1.50 L
Primer cambio de aceite unidad	25/50 horas (RC-AW100, incluido)
Cambios posteriores de aceite unidad	1500 horas (RC-X3000, no incluido)
Potencia mecanica unidad	5.00 HP
Desplazamiento	23.00 pcm

Figura 55. Características de compresor para difusión de aire en las tolvas de lodo espeso

En la siguiente figura se aprecia la vista de perfil del sistema de espesamiento a implementar.

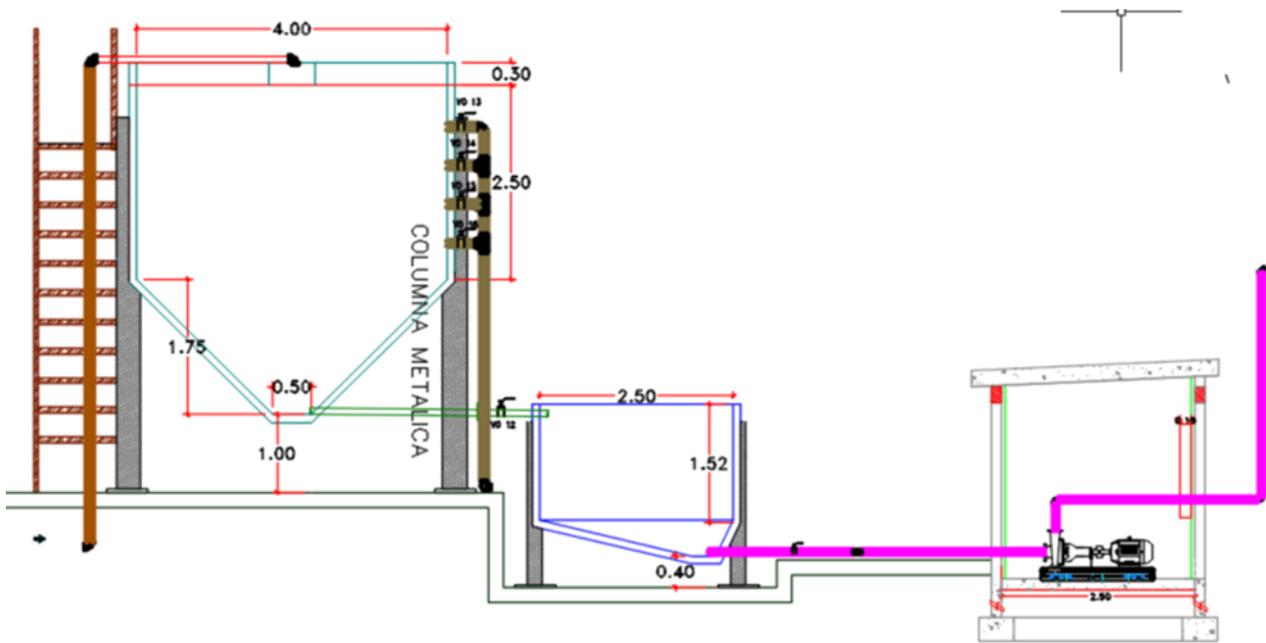


Figura 56. Vista de perfil de sistema de espesamiento.

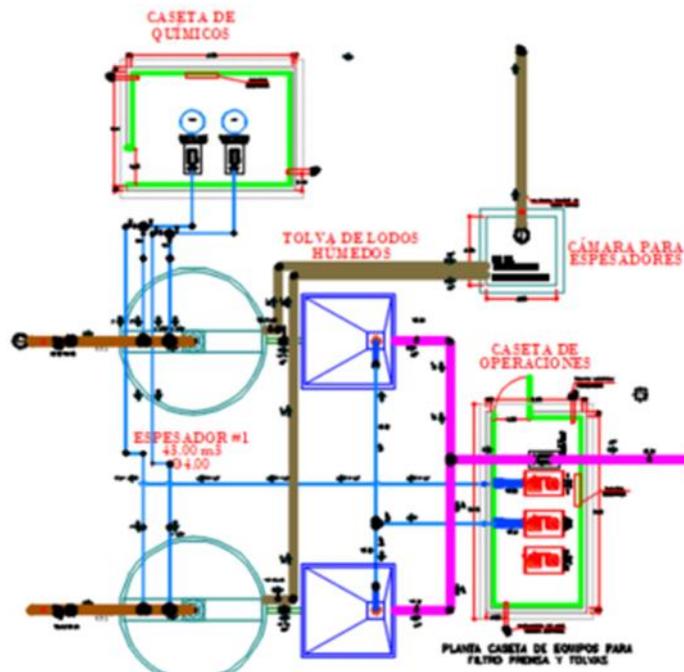


Figura 57. Vista en planta de plano de sistema de espesamiento

Teniendo en cuenta el artículo 125 de la resolución 0330 de 2017, el tiempo de operación del equipo es de 6 horas al día y el volumen de lodos húmedos tiene un valor de 78 m³, por lo que el tiempo de retención empieza a contar después del llenado del espesador.

6.7.8 Diseño del equipo de deshidratación: filtro prensa

A continuación, se presenta el desarrollo matemático, así como los parámetros y variables empleadas para el diseño del filtro prensa, el cual recibirá el lodo proveniente del espesador.

El tiempo de operación del filtro prensa oscilara entre 8 y 12 horas diarias, **teniendo en cuenta que en este tiempo se garantiza una concentración de lodos entre el 25 y 35%, como lo exige la resolución 330 de 2017.** En la tabla a continuación se presentan los datos que determinan el dimensionamiento y operación del filtro prensa. Las especificaciones técnicas de este equipo se entregan como anexos a este documento.

Tabla 26. Valores a la entrada y salida del filtro prensa

Parámetro	Unidades	Valor
Número de unidades	-	1
Tiempo de operación	Hora	8 - 12
Volumen por tratar por el filtro prensa	m ³ /día	15.4
Numero de ciclos	Veces	4
Duración del ciclo	Hora	2 – 3
Caudal entrada a filtro prensa (Q2)	m ³ /ciclo	3.85
Concentración SST en la entrada del filtro prensa (C2)	%	2.7
Volumen lodo deshidratado	m ³ /día	1.39
Masa lodo seco diario	Ton/día	1.95
Caudal salida lodo deshidratado (Q4)	m ³ /ciclo	0.35
Concentración ST lodo deshidratado (C4)	%	30
Caudal de salida agua clarificada (Q5)	m ³ /ciclo	3.50
Concentración ST agua clarificada (C5)	%	0.003

ST: Sólidos Totales, C: Concentración, Q: Caudal

En la figura a continuación se presenta el balance de masa empleado para el diseño del filtro prensa.

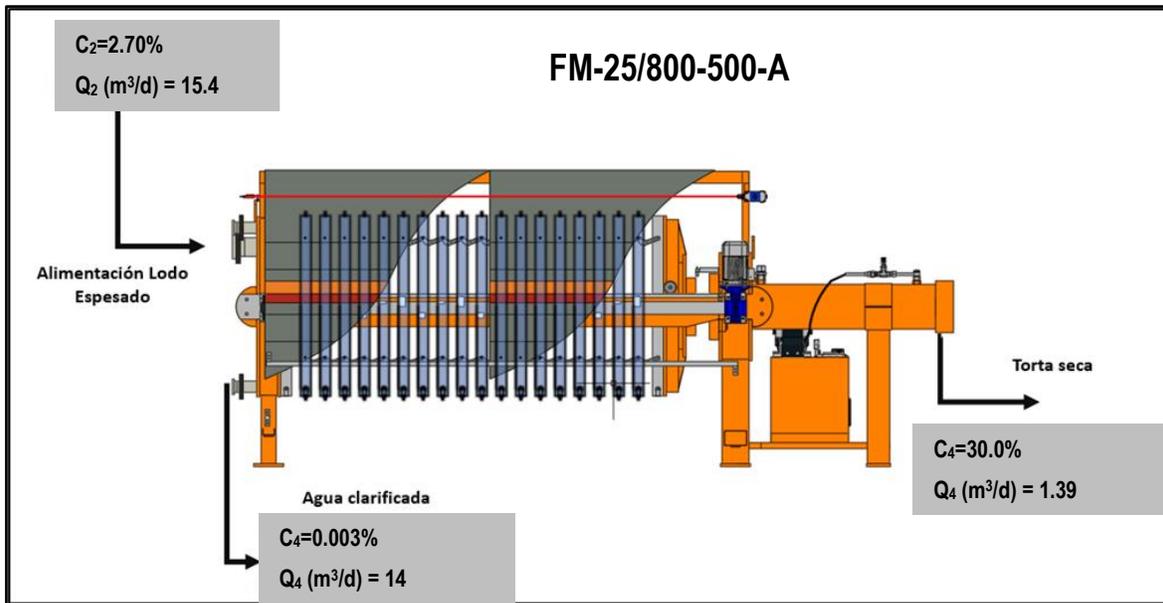


Figura 58. Esquema balance de masa en filtro prensa de placas. Fuente: (33)

La alimentación de lodos al filtro prensa se realizará con una bomba con las siguientes características:

5. BOMBA NEUMÁTICA PARA BOMBEO DE LODOS:

Marca:	Sandpiper o graco.
Ref:	S1F
Presión Máxima	100 PSI
Entrada/Salida:	1" bridada.
Capacidad Bomba:	43 GPM.
Cuerpo Bomba:	Polipropileno
Diafragma:	Santopreno.
Asientos:	Polipropileno.
Consumo de aire:	20 cfm



Se incluye una trampa de sólidos para evitar la obstrucción de la bomba neumática.



Figura 59. Características de bomba de paso de lodos de espesador a filtro prensa

También se presenta en la siguiente figura los planos de la caseta que almacenará el filtro prensa con detalles y medidas específicas, teniendo en cuenta que la caseta sirve para la adecuada recolección de los lodos deshidratados mecánicamente, dependiendo la cantidad de lodos que se obtengan, es necesario ayuda de un vehículo o carretillas para su disposición.

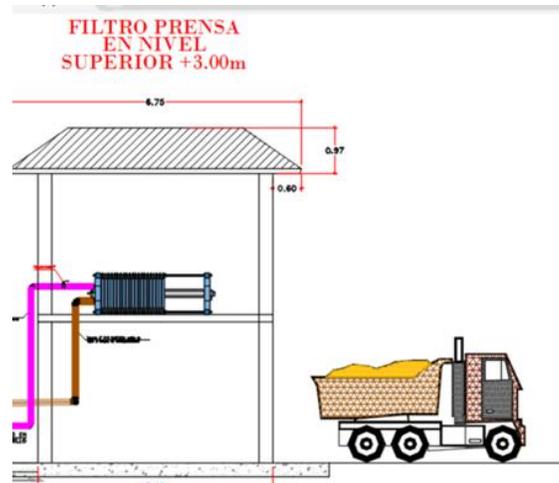


Figura 60. Plano caseta de filtro de prensa.

De acuerdo con el diseño del sistema de tratamiento y a la operación normal de la planta, al día se podría generar como máximo un total de 1.39 m³/d de lodo deshidratado mecánicamente, de esta forma, la máxima cantidad de lodo generado de forma semanal corresponde a 9.73 m³/semana y 507.35 m³/año, y de acuerdo con las especificaciones del proveedor del sistema de deshidratación la humedad es de alrededor de 30%. Por esta razón se espera que estos lodos se puedan disponer en rellenos sanitarios, sin embargo, se tendrá un área destinada para el almacenamiento de lodos hasta que se pueda llevar al relleno sanitario u otro lugar de disposición.

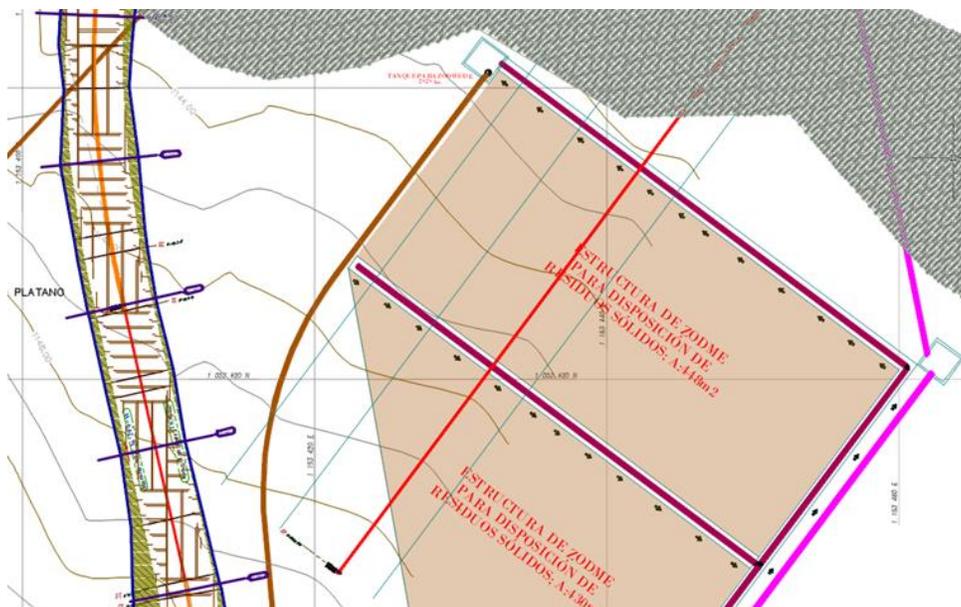


Figura 61. Vista en planta de zodme para almacenamiento y secado de lodos deshidratados por filtro prensa.

En la siguiente figura (Figura 62 – Anexo 4) se aprecian las unidades que conforman el sistema de tratamiento de la PTAP San Antonio, en donde se muestra la identificación de cada uno de los equipos y válvulas presentes. Este sistema recibirá como máximo dos retrolavados de filtros, de esta forma se recomienda que no se supere este número de retrolavados y en medida de lo posible solo realizar el tratamiento de lodos cuando sea necesario.

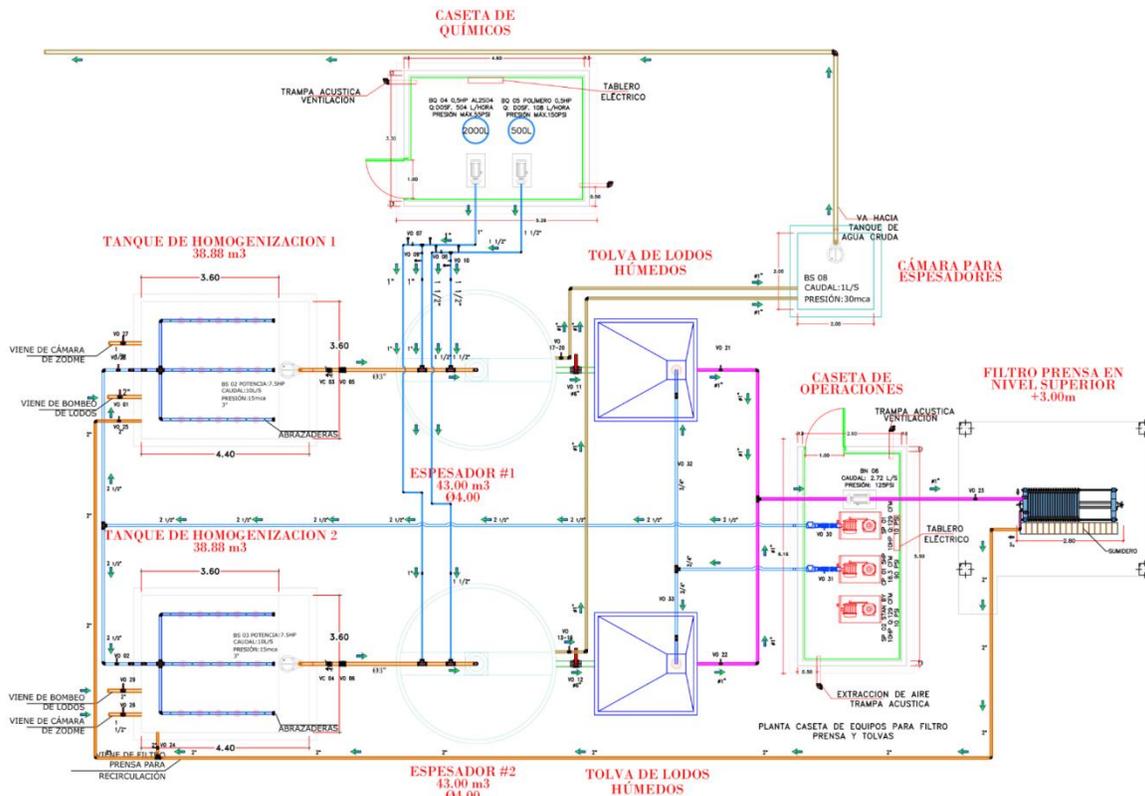


Figura 62. Esquema de sistema de tratamiento de lodos y componentes principales

6.8 Propuesta de recirculación de agua clarificada

El caudal recirculado corresponde al volumen máximo calculado de agua clarificada, el cual corresponde a 62.6 m³/d, de esta forma se propone que este volumen se recircule a lo largo del día al tanque de almacenamiento de agua cruda, antes de tratamiento, de esta forma el caudal recirculado se calcula a continuación.

$$Q_{\text{recirculación}} = \frac{V_{\text{max tratado}}}{1 \text{ día}} = \frac{62.6 \text{ m}^3}{\text{d}} * \frac{1 \text{ d}}{86400 \text{ s}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$Q_{\text{recirculación}} = 0.72 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

El caudal de agua clarificada a recircular desde los espesadores es de 0.72 L/s, sin embargo, para fines prácticos se estima un caudal de **1 L/s**.

Para la recirculación se propone una cámara ubicada entre espesadores y el tanque de almacenamiento, esta cámara debe contar con flotador, recibirá por gravedad el agua clarificada y la bomba contará con activación por nivel.

A continuación, se presenta el sistema de recirculación de agua clarificada al sistema de potabilización (Figura 63), en donde se tiene que los equipos de mayor importancia corresponden a los espesadores y bomba de recirculación, este sistema está diseñado para recircular un máximo de 1 L/s al tanque de almacenamiento de agua cruda.

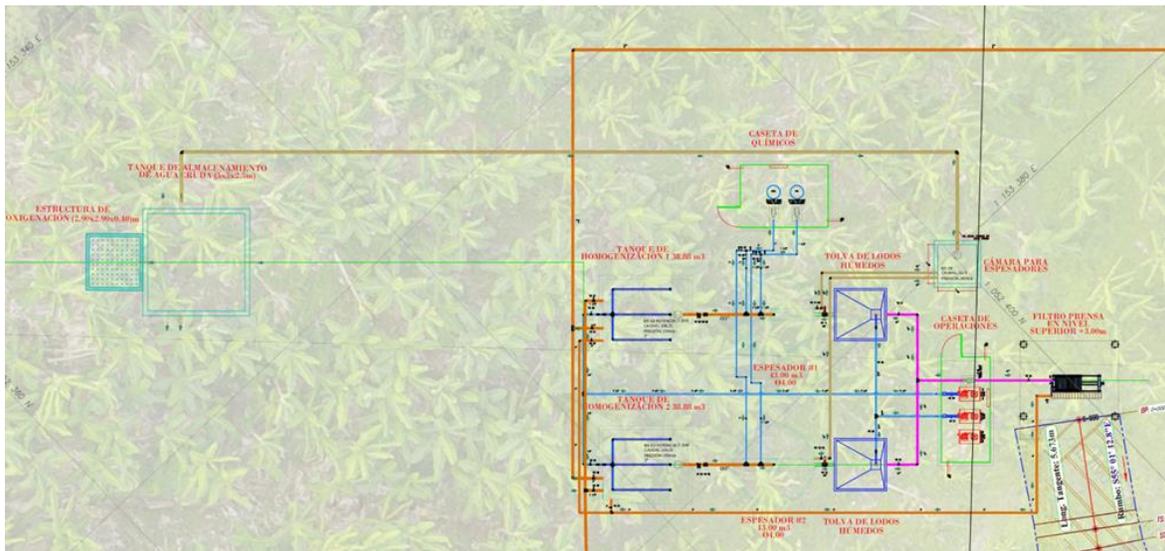


Figura 63. Plano en planta de sistema de recirculación de agua clarificada

6.9 Resumen de equipos a implementar

En la siguiente tabla se presentan los equipos disponibles para la correcta operación del sistema de tratamiento de lodos y recirculación de agua clarificada.

Tabla 27. Equipos presentes en el sistema de tratamiento

Equipo	Función	Caudal operado	Fluido	Potencia
SP 01	Suministrar aire a los homogeneizadores	129 CFM	Aire	10 HP
SP 02	Suministrar aire a los homogeneizadores	129 CFM	Aire	10 HP
BS 07	Transportar lixiviados de zodme a homogeneizador	2 L/s	Lixiviado	7.5 HP
BS 01	Transportar lodos desde el tanque de regulación hasta los homogeneizadores	10 L/s	Lodo	7.5 HP
BS 02	Transportar lodos desde homogeneizador 1 hasta espesador 1	10 L/s	Lodo	7.5 HP
BS 03	Transportar lodos desde homogeneizador 2 hasta espesador 2	10 L/s	Lodo	7.5 HP
BQ 04	Dosificación de sulfato de aluminio	504 L/h	Coagulante	0.5 HP
BQ 05	Preparación y dosificación de polímero espesante	108 L/h	Polímero espesante	0.5 HP
BN 06	Alimentación de filtro prensa	43 GPM	Lodo espesado	0.5 HP
BS 08	Bombear agua clarificada hasta tanque de agua cruda	1 L/s	Agua clarificada	7.5 HP
CP 01	Compresor	23 CFM	Aire	5 HP
BS 07	Transportar lixiviados de zodme a homogeneizador	2 L/s	Lixiviado	7.5 HP
	Filtro prensa		Lodo espesado	3 HP

7. CONCLUSIONES

Dentro de la caracterización fisicoquímica del vertimiento, se determinó que las variables DQO (161 mg/L), hierro total (24 mg Fe/L), sólidos sedimentables (125 mL/L) y sólidos suspendidos totales (809 mg SST/L) están por encima del valor establecido por la normativa ambiental, definiendo la necesidad de implementar un sistema de tratamiento basado en la remoción de sólidos principalmente, ya que esta es la variable con mayor porcentaje de incumplimiento, adicionalmente, se menciona que la concentración de DBO₅, es menor al límite de cuantificación del método del laboratorio, < 3.00 mg/L, indicando la baja biodegradabilidad de la materia orgánica presente, que a su vez sugiere la implementación de sistemas de tratamientos fisicoquímicos para la disminución en las concentraciones de las variables que están incumpliendo.

En cuanto a las variables microbiológicas analizadas, se encontró concentraciones bajas para huevos de Helminto (inferiores al límite de cuantificación) y ausencia de Salmonella, debido a que desde un principio se consideró la recirculación del agua tratada, se observa factibilidad en realizarlo siempre y cuando el tratamiento propuesto garantice una remoción adecuada de coliformes totales y coliformes termotolerantes, con el fin de no agregar organismos patógenos en los sistemas de almacenamiento de agua cruda y en el sistema de filtración.

En la determinación de condiciones apropiadas del espesamiento de lodos, se encontró adecuado el uso de agentes químicos combinados, teniendo un coagulante y un espesante, siendo la combinación de sulfato de aluminio – Tipo A, como agente coagulante a una dosis de 70 mg/L, la opción para el tratamiento junto con el DA-Aniónico o el F7000, agentes espesantes a una dosis de 3 mg/L, para el tratamiento del vertimiento en estudio, teniendo turbiedades remanentes de 2.70 NTU, para la combinación con DA-Aniónico y 1.89 NTU para la combinación con F7000, teniendo como turbiedad de partida valores entre 842 NTU y 65.4 NTU, según el filtro al que se le realice el retrolavado.

Los mejores resultados obtenidos con la dosificación química fueron evaluados una segunda vez mediante una prueba adicional, en donde se replicaron las mejores condiciones de tratamiento y se cuantificaron variables de interés al agua tratada, donde se evidencia remociones por encima del 80% para el fósforo total, DQO, coliformes termotolerantes, sólidos suspendidos totales y sólidos

sedimentables (variables cuantificadas - Tabla 19), teniendo en cuenta que la DQO representa la materia orgánica y los sólidos en suspensión el material particulado en suspensión, se plantea que la remoción de otros contaminantes sea también aproximadamente del 80%, teniendo en cuenta que la mayor parte de los contaminantes se sedimentaría en el proceso de espesamiento, y el sobrenadante tendría características apropiadas para la recirculación.

De las alternativas evaluadas, la alternativa seleccionada para la gestión de los lodos livianos es la de recirculación del agua de lavado de filtros a la entrada de la PTAP mediante bombeo, inicialmente el retrolavado de filtros pasaría por el proceso de homogeneización, espesamiento y filtración (con filtro prensa), cumpliendo con lo establecido en el artículo 125, de la resolución 330 de 2017, de tal forma que se elimine este vertimiento tratado y el agua de retrolavado se mezcle en una proporción determinada con el agua cruda para su tratamiento. De acuerdo con esto, y la evaluación preliminar de costos realizada, se puede identificar que el uso de un filtro prensa resulta viable, además se podría considerar la recirculación de lodos debido a los porcentajes de humedad de la torta deshidratada y las características fisicoquímicas del agua removida, teniendo en cuenta que se garantiza una concentración de lodos entre el 25 y 35%, como lo exige la resolución 330 de 2017, dentro de un tiempo de operación de 8 a 12 horas al día.

El diseño de este sistema de tratamiento de agua residual no doméstica tiene como uno de sus objetivos la reducción del impacto ambiental en la zona, de manera que al garantizar concentraciones aptas al final proceso de tratamiento, se tenga un agua clarificada (proveniente de espesadores), que permita generar un aprovechamiento por medio de su recirculación. A su vez que el subproducto obtenido del tratamiento (lodo deshidratado) cuente con una baja humedad y alto contenido de sólidos, que facilite su almacenamiento y posterior disposición. De esta forma, la PTAP no generará ningún tipo de descarga líquida.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda profundizar en las siguientes áreas de estudio para complementar el análisis de este proyecto, teniendo en cuenta que es importante validar los ciclos de recirculación, enfocado en la caracterización de coliformes totales y coliformes termotolerantes remanentes, ya que es indispensable validar la remoción de estos mediante un sistema complementario, con el fin de evitar la resistencia microbiana generada a partir de la exposición repetida a desinfectantes a lo largo del tiempo, la presencia de subpoblaciones de microorganismos naturalmente resistentes o la adquisición de genes de resistencia a través de mutaciones o transferencia genética horizontal. Es importante evaluar medidas para prevenir o mitigar la resistencia bacteriana, como el uso adecuado de desinfectantes, la rotación de desinfectantes con diferentes mecanismos de acción y el monitoreo regular de la eficacia del tratamiento.

También es necesario llevar a cabo pruebas a escala piloto para la evaluación y puesta en marcha en continuo del sistema de tratamiento propuesto, ya que permite evaluar la eficacia de los diferentes procesos y tecnologías de tratamiento propuestos en condiciones reales. Ayudando a determinar qué sistemas son más efectivos para eliminar los contaminantes presentes en el agua residual y garantizar la calidad del agua tratada. Además, proporcionan datos prácticos y específicos sobre el rendimiento del sistema de tratamiento en situaciones operativas reales. Lo que permite realizar ajustes y optimizaciones en el diseño del sistema para maximizar su eficiencia y rendimiento antes de su implementación a gran escala.

Las plantas piloto proporcionan un entorno controlado para probar nuevos conceptos y tecnologías de tratamiento de agua residual, dando viabilidad técnica y operativa de los diseños propuestos antes de su implementación, incluyendo la optimización de parámetros de diseño, como el tiempo de retención hidráulico, la dosificación de productos químicos y la configuración del equipo de tratamiento. Al definir variables replicables y establecer condiciones operativas óptimas, las pruebas en plantas piloto proporcionan información valiosa que puede ser aplicada en otros sistemas de tratamiento de agua residual, sin embargo, debe ser validadas con pruebas piloto para la optimización en cada caso, según las concentraciones de contaminantes en el agua que se plantea tratar.

9. REFERENCIAS

1. Raigosa Restrepo MA. Evaluación de alternativas para el manejo de lodos provenientes de las plantas de potabilización de agua de los municipios del departamento de risaralda mediante el análisis costo-beneficio. 2012;113.
2. Avendaño Cardenas FY, Martinez Gonzalez JA. Recuperación de lodos de las lagunas de oxidación provenientes del proceso de extracción de aceite de palma, para usar como abono en cultivos de palma africana. 2015;(1):1–27.
3. Mendivil Reynoso J. Riesgos a la salud en el manejo de lodos biológicos generados en el tratamiento de aguas residuales. 2008;
4. Mogollon Lozano SM, Carrillo Castañeda CH. Evaluación técnica, económica y ambiental de lodos provenientes de la PTAR de la compañía internacional de alimentos agropecuarios (Cialta S.a.S) como alternativa de aprovechamiento para producción de ladrillos cerámicos. 2016; Available from: http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/20445/41102090_2016.pdf?sequence=1
5. Ramírez Ortega N. Métodos para el manejo y la mitigación ambiental generada por lodos secundarios en las plantas de tratamiento de agua residual y posible aplicación en Colombia. Casos de estudio Japón, México y Suiza. 2020;
6. US EPA. A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. Epa-832/R-93/003 [Internet]. 1994;(September):175. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-12/documents/plain-english-guide-part503-biosolids-rule.pdf>
7. Lizarazo Becerra JM, Orjuela Gutiérrez MI. Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Univ Nac Colomb [Internet]. 2013;82. Available from: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/20486/marthaisabelorjuela2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
8. Protección Social M, Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial M. Resolución 2115 de 2007. D Of No 46679 4 julio 2007 [Internet]. 2007;1:23. Available from: https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislación_d_el_agua/Resolución_2115.pdf.
9. Ortiz Fontecha J, Tovar Barrios J. Propuesta de manejo de los lodos generados en la planta potabilizadora de la Mesa (Cundinamarca). 2019; Available from: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria
10. Arboleda J. Teoría y práctica de la purificación del agua [Internet]. Colombia: Ed. Mc Graw Hill. 2000. 1–390 p. Available from: <http://fing.uncu.edu.ar/catedras/sanitaria/archivos/libros-arboleda-valencia/Teoria y Practica de la Purificacion del H2O - Tomo 1 - Arboleda Valencia.pdf>
11. Ulloa Gutiérrez DV. agua potable del municipio de Apartadó : Métodos de estandarización , estimación y reducción del impacto ambiental en las fuentes superficiales del municipio de Apartadó Ingeniera Bioquímica Asesor Catalina Andrea Lugo de Ossa , Magister en ingeniería Uni. 2023;
12. Pérez Valencia E, Ramos Ledezma CA. Caracterización de lodos generados por las unidades de sedimentación y filtración de la planta de tratamiento de agua potable el Arroyo en el municipio de Santander de Quilichao. 2020;21(1):73.
13. MVCT. Resolución 0330 de 2017: Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico -RAS- y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009 [Internet]. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Republica de Colombia. 2017. p. 182. Available from:

- <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330 - 2017.pdf>
14. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio R de C. Resolución 799. Minist Vivienda, Ciudad y Territ República Colomb [Internet]. 2021;(0330). Available from: www.minvivienda.gov.co
 15. Laca A, Díaz JM. Produccion y características de lodos. Ediciones Paraninfo [Internet]. 2019;251–62. Available from: <http://hdl.handle.net/10651/50969>
 16. Rodríguez Torres JN. Propuesta metodologica para tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilizacion en la sabana de bogotá (Estudio De Caso Madrid, Cundinamarca). instnameUniversidad Libr. 2013;
 17. Granados Durán DC, Carrillo Ortega JC. Alternativas de tratamiento de lodos provenientes de la PTAP del municipio de Fresno Tolima. 2021; Available from: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria
 18. Ramos Valencia AF, Duque Chaves CM, Pérez Giraldo DA. Propuesta para el manejo de los lodos aluminosos generados en la planta de tratamiento de agua potable Villa Santana, municipio de Pereira, Risaralda. 2008;
 19. Aldana A, Pérez R. Propuesta para el tratamiento y aprovechamiento de lodos en una PTAP convencional. caso de estudio: planta de tratamiento de agua potable de el espinal - Tolima. 2017;107. Available from: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/702/
 20. MADS M de A y DS. Resolución 631 de 2015. D Of No 49486 18 abril 2015 [Internet]. 2015;2015(49):73. Available from: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
 21. Alcaldía de Palestina Caldas [Internet]. 2023 [cited 2023 Jun 16]. Available from: <https://www.palestina-caldas.gov.co/>
 22. VALREX S.A. Manual de operación Santaguada. 2008. p. 34.
 23. Corpocaldas [Internet]. 2023 [cited 2023 Jun 16]. Available from: <http://190.0.61.202/geoambiental/mapapublico/>
 24. Corpocaldas, ASOCARS, UN. POMCA río Chinchiná. 2013;
 25. Pérez García N. Optimización de un filtro prensa para el tratamiento de lodos generador en la planta de tratamkiento de la empresa Cueros y Diseños. 2021;
 26. Planta Aguas Claras opera a flujo pleno y con calidad de vertimiento [Internet]. [cited 2023 Jul 18]. Available from: <https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/planta-aguas-claras-opera-a-flujo-pleno-y-con-calidad-de-vertimiento.aspx>
 27. Gallo J, Uribe J. Reutilización de lodos de planta de potabilización en el tratamiento de aguas residuales. Univ Nac Colomb. 2003;
 28. Nacional U, México A De, Ingeniería I De, Ambientales CDB, Escolar C, Universitaria C, et al. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS DE DESECHO DE PLANTA DE TRATAMIENTO MEDIANTE UN REACTOR TIPO LECHO DE LODOS (UASB) A ESCALA PILOTO Francisco A . Cabeza de Vaca Inclán , Javier Martínez Pantaleón , Oscar Huerta Martínez Roberto Briones Méndez , y. 2003;36:2003.
 29. IDEAM. Instructivo de toma y preservación de muestras sedimentos y agua superficial para la red de monitoreo de calidad del IDEAM. 2020;21.
 30. RAS. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. República de Colombia Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Minist Desarro Económico, Dir Agua Potable y Saneam Básico [Internet]. 2000;22 De Novi:45. Available from: http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/7._Tratamiento_de_aguas_residuales.pdf
 31. Zhindón Arévalo CE. Tratamineto de los lodos generados en la planta potabilizadora de

- Mahuarcay mediante el uso de un lecho de secado. 2011;
32. Letterman RD. American Water Works Association - Water Quality & Treatment Handbook-McGraw-Hill Professional [Internet]. 1999 [cited 2023 Jun 21]. Available from: <https://drive.google.com/file/d/1WkXNMG77WfGSYVuJnapJlvqOzgUAcq9-/view?ts=64933d7e>
 33. ASI. Cotización filtro prensa. Ing Ambient y Sanit. 2020;(71).

10. ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones técnicas de soplador sugerido

- Soplador rotativo positivo - ROOTS	
	OMEGA PLUS ROTARY BLOWERS 03/14/22 - PACKAGE RECOMMENDATIONS - PAGE 2
Customer: H & S INGENIERIA	Prepared By: Mauricio
Kind of package: Com-paK Plus	Operating mode: Gauge pressure
Inlet temperature : 90 °F	
Inlet pressure : 13.0 psi	Valve set pressure: 11.9 psig
Input inlet flow: 159 icfm	
Package: BB 69C	Blower speed: 4860 rpm
Blower: OMEGA 22P	Connection ANSI: 2 1/2"
Motor power: 10.0 hp	% of maximum speed: 81
Operating voltage: 460V/60Hz	
Note: Motor operating in service factor!	
	MOTOR SIEMENS 10 HP, VÁLVULA DE ALIVIO, SENSORES DE TEMPERATURA Y PRESIÓN, FILTRO DE ADMISIÓN, SILENCIADOR, ESTRUCTURA SOPORTE DEL EQUIPO

*Es recomendable el contacto con un proveedor de estos equipos para la adecuada selección y operación de este.

Anexo 2: Especificaciones técnicas del sistema de preparación y dosificación de polímero espesante

Sistema de dosificación Ultromat® MT

Para trabajar exclusivamente con pequeñas cantidades o con soluciones de polímero ocasionalmente.



Sistema de Preparación de Polímero Ultromat MT - 500 litros 1037095

El Ultromat® MT es una solución óptima para la preparación a medida de soluciones de polímeros cuando no es necesario un funcionamiento automático. El polímero en polvo se añade manualmente desde el embudo de enjuague al recipiente de maduración y se mezcla mediante el agitador. Una vez terminado el tiempo de maduración, la solución de agentes de floculación se puede dosificar al sistema.

Detalles técnicos:

- Agitador de 0,75 kW
- Sistema de enjuague
- Interruptor de nivel (marcha en seco, contactos mín. y máx.)
- Caudal de dosificación máx.: 440 Litros/hora
- Volumen del depósito: 440 Litros
- Diámetro: 850 mm
- Altura del depósito: 1.018 mm
- Conexión de la línea de agua DIN: 20 mm

Voltaje/Frecuencia: 400 VAC / 50 Hz

Información técnica: <https://bit.ly/2Nshhne>

Motor-Driven Metering Pump Sigma/ 3 (Basic Type)

The robust pump for safe and reliable use



Type S3Ba	With 1500 rpm motor at 50 Hz			With 1800 rpm motor at 60 Hz			Suction lift m WC	Perm. pre- pressuredischarge suction side	Connection, G-DN	Shipping weight kg	
	Delivery rate at max. back pressure		Max. stroke rate	Delivery rate at max. back pressure		Max. stroke rate					
	bar	l/h	ml/stroke	Strokes/min	psi	l/h/gph (US)	Strokes/min				
120145 PVT	10	146	33.7	72	145	174/45.9	86	5	2	1 1/2-25	22

Anexo 3: Especificaciones técnicas de sistema de agitación y dosificación de sulfato de aluminio

- 3** Agitador de **baja** velocidad para productos químicos, marca **EMEC**, modelo **MIXV2NTRI** de **1400 RPM**, fabricación europea, para ser instalado en tanque con capacidad de 1000 litros. El eje del agitador se acopla directamente al motor, el cual a su vez se fija al tanque mediante un flanche. El sello contra vapores químicos es un sello giratorio en fluoropolímero.
 Características técnicas:
 * Motor: Trifásico (0.37 KW, 220 VAC)
 * Paleta en PVC.
 * Eje en acero inoxidable con una cubierta en PVC.

1 € **1.050** € **1.050**
ADICIONAL EL IVA

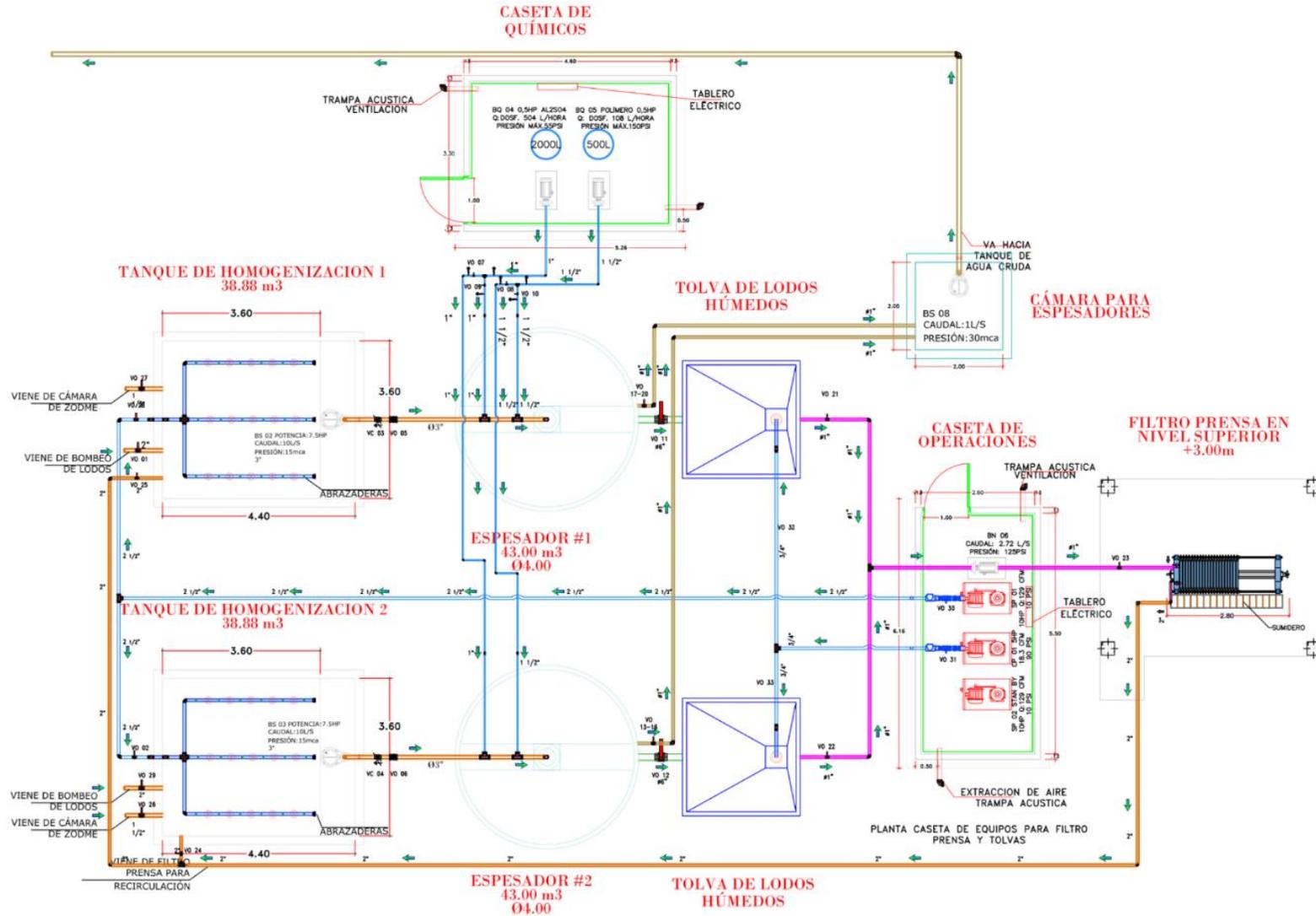


- Bomba dosificadora de productos químicos líquidos para trabajo industrial tipo diafragma mecánica, marca **EMEC** modelo **PD MF 002M00** de fabricación europea, con tasa de flujo ajustable.
 Características técnicas:
 * Caudal máximo: 1000 l/h
 * Presión máxima de descarga: 2 bar (29 PSI)
 * Motor eléctrico trifásico: 220 VAC, 0,37 Kw/ 60Hz
 * Grado de protección IP 55.
 * Material del diafragma: PTFE (Teflón)
 * Cabezal en PVDF
 * Sellos de la válvula en Vitón
 * Conexión 1 1/2"
 * Inyecciones por minuto: 175
 * Pantalla tipo LCD.
 * Señal digital proporcional de entrada con opción de división/multiplicación del pulso de entrada entre 1 y 999.
 * Señal de entrada: 0-20 mA ó 4-20 mA.
 * Control de nivel.
 * Ajuste de la frecuencia de dosificación
 * Regulación del recorrido
 Siete funciones de trabajo:
 1. Modo constante.
 2. Modo de división. Divide los pulsos provenientes de un medidor de caudal
 3. Modo de multiplicación. Multiplica los pulsos provenientes de un medidor de caudal.
 4. Modo PPM. La bomba mantiene la concentración en ppm a través de los pulsos externos de un medidor de caudal.
 5. Modo Batch. La bomba dosifica una cantidad

1 € **6.350** € **6.350**
ADICIONAL EL IVA

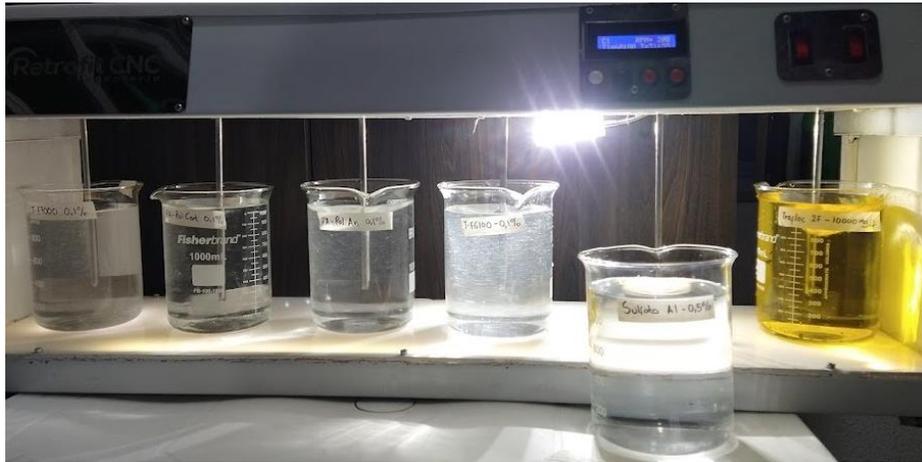


Anexo 4: Esquema de sistema de tratamiento de lodos y componentes principales



Anexo 5: Preparación de químicos

Nombre	Nomenclatura	Estado inicial	Tipo	Concentración
Sulfato de aluminio – Tipo A	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Sólido	Coagulante	0.5 %
Trafloc -2F	T-2F	Líquido	Coagulante	1.0 %
Trafloc – F7000	F7000	Sólido	Espesante	0.1 %
Trafloc – F6100	F6100	Sólido	Espesante	0.1 %
DA – Catiónico	DA-Cat	Sólido	Espesante	0.1 %
DA - Aniónico	DA-An	Sólido	Espesante	0.1 %



Anexo 6: Resultados de laboratorio ARnD – Lavado de filtros

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*Sulfuros (mg S ₂ -/L).	Yodométrico	SM 4500-S2- F	< 1,00	-
*Acidez Total (mg CaCO ₃ /L).	Volumétrico	SM 2310 B	< 5,00	-
*Fósforo Total (mg P/L).	Digestión – Ácido Ascórbico	SM 4500-P B, E	1,33	± 0,19
*Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /L).	Volumétrico	SM 2320 B	75,9	± 1,5
*Cloruros (mg Cl-/L).	Argentométrico	SM 4500-Cl- B	< 10,0	-
*Dureza Total (mg CaCO ₃ /L).	Titulométrico, EDTA	SM 2340 C	100	± 3
*Nitratos (mg N-NO ₃ -/L).	Electrométrico	SM 4500-NO3- D	< 1,40	-
*Nitritos (mg N-NO ₂ -/L).	Colorimétrico	SM 4500-NO2- B	0,020	± 0,001
pH a 25°C (unidades de pH).	Electrométrico	SM 4500-H+ B	7,10	-
*Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L).	Turbidimétrico	SM 4500-SO4 ²⁻ - E	< 10,0	-
*DQO (mg O ₂ /L).	Reflujo cerrado colorimétrico	SM 5220 D	161	± 9
*DBO ₅ (mg/L).	Incubación a 5 días - Electrodo de Luminiscencia	SM 5210 B - SM 4500 O - H	< 3,00	-
*Sólidos totales (mg ST/L).	Gravimétrico, secado a 103 - 105 °C	SM 2540 B	12050	± 313
*Sólidos Sedimentables (mL/L)	Volumétrico Cono Imhoff	SM 2540 F	125	± 19
*Dureza Cálrica (mg CaCO ₃ /L).	Titulométrico, EDTA	SM 3500-Ca B	40,0	± 2,6
*Grasas y aceites (mg /L).	Extracción Soxhlet	SM 5520 D	< 10,0	-
*Cianuro total (mg CN-/L).	Destilación - Colorimetría	SM 4500-CN- B, C, E Modificado	< 0,020	-

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*Hidrocarburos (mg/L).	Extracción Soxhlet	SM 5520 D, F	< 10,0	-
*,**Fenoles (mg Fenol/L).	Destilación - Fotométrico directo	SM 5530 B, D	< 0,10	-
*Cromo total (mg Cr/L).	Absorción Atómica - Llama Óxido nitroso Acetileno	SM 3030 E; SM 3111 D Modificado	< 0,050	-
*Niquel total (mg Ni/L).	Absorción Atómica - Llama Aire Acetileno	SM 3030 E; SM 3111 B	< 0,050	-
*Cobre total (mg Cu/L).	Absorción Atómica - Llama Aire Acetileno	SM 3030 E; SM 3111 B	< 0,200	-
*Mercurio total (mg Hg/L).	Absorción Atómica - Generador de Hidruros	SM 3112 B; SM 3114 C	< 0,001	-
*Plomo total (mg Pb/L).	Absorción Atómica - Llama Aire Acetileno	SM 3030 E; SM 3111 B	< 0,100	-
*Hierro Total (mg Fe/L).	Absorción Atómica - Llama Aire Acetileno	SM 3030 E; SM 3111 B	24,0	± 1,2
*Manganeso Total (mg Mn/L).	Absorción Atómica - Llama Aire Acetileno	SM 3030 E; SM 3111 B	2,42	± 0,14
*Aluminio total (mg Al/L).	Absorción Atómica - Llama Óxido nitroso Acetileno	SM 3030 E; SM 3111 D	26,4	± 2,2
*Cadmio Total (mg Cd/L).	Absorción Atómica - Llama Aire Acetileno	SM 3030 E; SM 3111 B	< 0,010	-
*Zinc total (mg Zn/L).	Absorción Atómica - Llama Aire Acetileno	SM 3030 E; SM 3111 B	0,209	± 0,009
*Fósforo Reactivo soluble (mg P-PO4/L).	Colorimétrico	SM 4500-P,B, E	< 0,010	-
*Surfactantes aniónicos como SAAM (mg SAAM/L).	Colorimétrico	SM 5540 C	< 0,400	-
Nitrógeno total (mg N/L).	Cálculo	Método Interno	6,42	-
*,**Sólidos Suspendedos Volátiles (mg SSV/L).	Gravimétrico - Ignición a 550 °C	SM 2540 E	171,60	± 2,74
*,**Compuestos Fenólicos Semivolátiles (mg/L)	Extracción Líquido-Líquido, CG-FID	EPA 3510 C / EPA 8041 A	< 0,002	-
*,**AOX (µg/L)	Determination of adsorbable organically bound halogens (AOX), 2004	ISO 9562	154	-
*,**Fluoruros (mg F-/L).	Electrometría	SM4500 F- C	< 0,2	-
*,**Color Real a 436 nm (m-1).	Espectrofotométrico	ISO 7887-2011	< 1,6	-
*,**Color Real a 525 nm (m-1).	Espectrofotométrico	ISO 7887-2011	< 0,9	-
*,**Color Real a 620 nm (m-1).	Espectrofotométrico	ISO 7887-2011	< 0,5	-
*,**Arsénico Total (mg As/L).	Digestión asistida por microondas, Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) -Generación continua de hidruros continuo (GH)	SM 3114 C	0,001	-
*,**Bario total (mg Ba/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos, Plasma de acoplado inductivamente (ICP) de espectroscopia óptica de emisión (OES)	SM 3120 B	0,136	-

*,**Estaño Total (mg Sn/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos EPA 3015 A Rev. 1 Febrero 2007 - Espectroscopía de emisión óptica - plasma acoplada Inductivamente (ICP-OES)	EPA 6010D	< 0,05	-
*,**Plata Total (mg Ag/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos, Plasma de acoplado Inductivamente (ICP) de espectroscopía óptica de emisión (OES)	SM 3120 B	< 0,002	-
*,**Antimonio total (mg Sb/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos, Plasma de acoplado Inductivamente (ICP) de espectroscopía óptica de emisión (OES), EPA 3015 A Revision 1, Febrero 2007	SM-3120 B	< 0,02	-
*,**Berilio Total (mg Be/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos, Plasma de acoplado Inductivamente (ICP) de espectroscopía óptica de emisión (OES), EPA 3015 A Revision 1, Febrero 2007	SM 3120 B	0,0010	-
*,**Litio Total (mg Li/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos, Plasma de acoplado Inductivamente (ICP) de espectroscopía óptica de emisión (OES), EPA 3015 A Revision 1, Febrero 2007	SM 3120 B	0,008	-
*,**Molibdeno total (mg Mo/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos, Plasma de acoplado Inductivamente (ICP) de espectroscopía óptica de emisión (OES), EPA 3015 A Revision 1, Febrero 2007	SM 3120 B	< 0,005	-
*,**Selenio Total (mg Se/L).	Digestión asistida por microonda, Espectrofotometría de Absorción Atómica -Generación continua de hidruros continuo	SM 3114 C	< 0,005	-
*,**Vanadio Total (mg V/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos, Plasma de acoplado Inductivamente (ICP) de espectroscopía óptica de emisión (OES), EPA 3015 A Revision 1, Febrero 2007	SM 3120 B	0,017	-
*,**Cobalto total (mg Co/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos, Plasma de acoplado	SM 3120 B	0,006	-

	inductivamente (ICP) de espectroscopia óptica de emisión (OES), EPA 3015 A Revision 1, Febrero 2007			
*,**Formaldehído (mg/L)	Fotométrico	GOST R 55227 - 2012 Método A, Instructivo V	1,58	± 0,038
*,**Sólidos Suspendidos Totales (mg SST/L)	Gravimétrico, secado a 103 - 105 °C	SM 2540 D	809,00	± 1,34
*,**Nitrógeno Kjeldahl (mg/L N-NTK).	Macro-Kjeldahl - Destilación y Volumétrico	SM 4500-Norg B, SM 4500-NH3 B, C.	< 5,00	-
*,**Nitrogeno amoniacal (mg NH3-N/L).	Destilación - Volumétrico	SM 4500 - NH3 B,C	< 5,00	-
*,**Boro total (mg B/L).	Digestión ácida asistida con microondas para muestras y extractos acuosos	EPA 6010 D	0,032	-
*,**Titanio total (mg Ti/L).	Digestión microondas- Espectrofotometría de Absorción Atómica con Llama Directa Aire - Acetileno	SM 3111 B	< 1,00	-
*,**Hidrocarburos aromáticos policíclicos (mg/L).	Cromatografía de Gases (CG-FID) Extracción por SPE	EPA 8100	< 0,010	-
*,**BTEX (mg/L).	Cromatografía de Gases (CG-FID) - Microextracción en Fase Sólida SPME	ASTM D6889-03 Reaprobado 2017	< 0,030	-

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23nd Edition

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*,**Coliformes Totales (NMP/100 mL).	Sustrato Enzimático	SM 9223 B	10500	± 1,58
*,**Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL).	Sustrato Enzimático	S.M. (9223 B) Modificado	175	± 1,46
*,**Huevos de Helminto (Huevos/L).	Flotación	Bailenger Modificado OMS 1996	< 1,00	-
Salmonella (A/P)	Cualitativo	NTC 5021	Ausencia	-

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del Laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23nd Edition
- DNPC: Demasiado Numerosos Para Contar

Anexo 7: Resultados de laboratorio ARnD – Pruebas de tratabilidad

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*Sólidos Suspendidos Totales (mg SST/L).	Gravimétrico, secado a 103 - 105 °C	SM 2540 D	1744	± 33

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23nd Edition

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*Sólidos Suspendidos Totales (mg SST/L).	Gravimétrico, secado a 103 - 105 °C	SM 2540 D	124	± 2

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23nd Edition

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*Sólidos Suspendidos Totales (mg SST/L).	Gravimétrico, secado a 103 - 105 °C	SM 2540 D	244	± 5

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23nd Edition

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*Sólidos Suspendidos Totales (mg SST/L).	Gravimétrico, secado a 103 - 105 °C	SM 2540 D	75,0	± 1,4

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23nd Edition

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*Sólidos Suspendidos Totales (mg SST/L).	Gravimétrico, secado a 103 - 105 °C	SM 2540 D	1105	± 21

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23nd Edition

Anexo 8: Resultados de laboratorio ARnD – Agua clarificada

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*,**Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL).	Sustrato Enzimático	S.M. (9223 B) Modificado	20	± 1,46

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del Laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23rd Edition
- DNPC: Demasiado Numerosos Para Contar

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*Fósforo Total (mg P/L).	Digestión – Ácido Ascórbico	SM 4500-P B, E	0,032	± 0,004
*DQO (mg O ₂ /L).	Reflujo cerrado colorimétrico	SM 5220 D	30,8	± 1,7
*DBO ₅ (mg/L).	Incubación a 5 días - Electrodo de Luminiscencia	SM 5210 B - SM 4500 O - H	< 3,00	-
*,**Nitrógeno Kjeldahl (mg/L N-NTK).	Macro-Kjeldahl - Destilación y Volumétrico	SM 4500-Norg B, SM 4500-NH3 B, C.	< 5,00	-

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23rd Edition

Anexo 9: Resultados de laboratorio ARnD – Lodo espesado

Parametro	Método	Referencia	Resultado	Incertidumbre
*Sólidos Suspendidos Totales (mg SST/L).	Gravimétrico, secado a 103 - 105 °C	SM 2540 D	27016	± 513

Observaciones: * Análisis acreditado por el IDEAM, ** Análisis subcontratado por el Laboratorio,

Notas:

- Resultados válidos solo para la muestra analizada
- No se debe reproducir este informe sin aprobación por escrito del laboratorio
- SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 23rd Edition