



**Análisis de la producción de lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable  
ubicada en el corregimiento El Reposo, Apartadó - Antioquia**

Luis Alfonso Otero Moreno

Ingeniero Sanitario

Modalidad de Práctica Coursada

Práctica empresarial

Asesora

Ainhoa Rubio Clemente, Doctora (PhD.) en Ingeniería Ambiental y Doctora (PhD.) en Ciencias  
de la Salud

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental  
Ingeniería Sanitaria  
Apartadó, Antioquia  
2024

---

<b>Cita</b>	(Otero Moreno, 2024)
<b>Referencia</b>	(Otero Moreno, 2024). <i>Análisis de la producción lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable en el corregimiento El Reposo del municipio de Apartadó – Antioquia</i> . [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Apartadó-Antioquia, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	

---



Centro de documentación de ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a todas las personas perseverantes y resilientes que han luchado por alcanzar sus sueños pese a las dificultades del camino, a mis padres Lindelia Moreno y Luis Otero por haber sido la inspiración de mi vida, los cuales, con su amor y paciencia contribuyeron al desarrollo y logro de cada uno de mis metas, a Sofia Londoño por haber creído en mí y ser mi apoyo durante mi crecimiento formativo.

## **Agradecimientos**

Agradezco primeramente a Dios por su gracia y bondad en mi vida, por darme las capacidades y sabiduría para formarme como Ingeniero.

A mis padres, familiares y amigos que fueron pilar y apoyo emocional durante toda mi formación profesional.

A Aguas Regionales por haber dispuesto de sus instalaciones para poder ejecutar mis ideas y conocimientos.

A Neider Montoya Urango por su paciencia, orientación y apoyo constante durante mis prácticas académicas, su guía fue fundamental para el cumplimiento de los objetivos.

A mi asesora, Ainhoa Rubio Clemente por la dirección y compromiso que tuvo en todo este proceso.

Por último, a todos los docentes de pregrado que aportaron de su conocimiento y experiencia.

## Tabla de contenido

Resumen .....	10
Abstract .....	11
Introducción .....	12
1. Planteamiento del problema .....	14
2. Antecedentes .....	16
3. Justificación.....	19
4. Objetivos .....	21
3.1 Objetivo general .....	21
3.2 Objetivos específicos.....	21
4 Marco teórico .....	22
Descripción de la zona de estudio .....	30
Fuente de Abastecimiento .....	31
Generalidades de la PPAP del corregimiento El Reposo .....	35
Descripción de Procesos.....	35
Generación de lodos .....	41
5 Metodología .....	46
6 resultados.....	48
Determinación del Índice Volumétrico de Lodos (IVL).....	57
7. Discusión.....	60
8. Conclusiones .....	69
Referencias .....	70
Anexos.....	74

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Grado de tratamiento de acuerdo con la calidad del agua.....	23
<b>Tabla 2.</b> Caracterización fisicoquímica del agua.....	32
<b>Tabla 3.</b> Volumen de descargas de lodos por unidades.....	42
<b>Tabla 4.</b> Producción de agua y lodo generada en los procesos de retrolavado. ....	43
<b>Tabla 5.</b> Método, técnica y equipos utilizados para los ensayos en la fase experimental. ....	47
<b>Tabla 6.</b> Muestra 1 características de lodos.....	48
<b>Tabla 7.</b> Ensayo de tratabilidad preliminar .....	49
<b>Tabla 8.</b> Características de lodos, muestra 2. ....	49
<b>Tabla 9.</b> Características del agua sobrenadante sin polímero muestra 2. ....	50
<b>Tabla 10.</b> Ensayo de tratabilidad muestra de lodo 2.....	50
<b>Tabla 11.</b> Análisis de sólidos sedimentables de las descargas de lodos con respecto al tiempo de la purga.....	52
<b>Tabla 12.</b> Ensayo de tratabilidad de lodos, muestra 3 y 4.....	53
<b>Tabla 13.</b> Análisis del sobrenadante de cada una de las jarras con polímero.....	54
<b>Tabla 14.</b> Prueba de tratabilidad del agua sobrenadante. ....	54
<b>Tabla 15.</b> Caracterización del agua decantada en el tanque de recepción.....	55

<b>Tabla 16.</b> Prueba de tratabilidad de lodos, utilizando polímero catiónico. ....	56
<b>Tabla 17.</b> Sólidos totales muestras 3 y 4 .....	56
<b>Tabla 18.</b> Caracterización del lodo generado en la PPAP El Reposo. ....	57
<b>Tabla 19.</b> Sólidos deshidratados en base húmeda. ....	58
<b>Tabla 20.</b> Análisis de la eficiencia de las pruebas de tratabilidad de las muestras. ....	66

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Secuencia de los procesos unitarios aplicados en un PPAP con fuente de aguas subterráneas.....	24
<b>Figura 2.</b> Espesador de lodos a gravedad vista de corte transversal. ....	27
<b>Figura 3.</b> Filtro banda equipo de deshidratación.....	29
<b>Figura 4.</b> Configuración de los Lechos de secado.....	30
<b>Figura 5.</b> Ubicación del corregimiento de El Reposo. ....	31
<b>Figura 6.</b> Estructura externa de la captación del Pozo planta. ....	32
<b>Figura 7.</b> Comportamiento de las concentraciones de hierro desde el 2016 en el agua cruda de la fuente de abastecimiento de El Reposo.....	33
<b>Figura 8.</b> Comportamiento de las concentraciones de manganeso desde el 2016 en el agua cruda de la fuente de abastecimiento de El Reposo. ....	34
<b>Figura 9.</b> Esquemmatización de la PPAP El Reposo .....	35
<b>Figura 10.</b> Pre-cloración.....	36
<b>Figura 11.</b> Bandejas de aireación .....	37
<b>Figura 12.</b> Mezcla rápida aplicación de coagulante y polímero.....	37
<b>Figura 13.</b> Floculador. ....	38
<b>Figura 14.</b> Sedimentadores.....	39

<b>Figura 15.</b> Filtros de arena de flujo descendente.....	40
<b>Figura 16.</b> Tanque de recepción. ....	41
Figura 17. Aplicación de cloro gaseoso para desinfección .....	41
<b>Figura 18.</b> Esquema de PPAP EL Reposo y vertimientos de estas.....	44
<b>Figura 19.</b> Diseño de la nueva PPAP El Reposo y el tren de tratamiento de lodos. ....	45
<b>Figura 20.</b> Metodología del proyecto. ....	46
<b>Figura 21.</b> Evidencias del ensayo de tratabilidad y la medición del IVL. ....	50
<b>Figura 22.</b> Muestras de lodos tomadas en la descarga de los sedimentadores. ....	51
<b>Figura 23.</b> Ensayo de tratabilidad de lodos muestras 3 y 4.....	53
<b>Figura 24.</b> Sedimentación de la prueba de tratabilidad, utilizando polímero catiónico .....	55
<b>Figura 25.</b> Impurezas en el espejo del agua, en la implementación de polímeros catiónicos.....	56
<b>Figura 26.</b> Sólidos totales muestras 3 y 4.....	57
<b>Figura 27.</b> Sólidos totales base húmeda muestra 4 .....	59
<b>Figura 28.</b> Secado solar del lodo al aire libre.....	59
<b>Figura 29.</b> Concentración del lodo en función del tiempo de una descarga de lodos de sedimentadores. ....	64

---

### Siglas, acrónimos y abreviaturas

<b>PPAP</b>	Planta de Producción de Agua Potable
<b>LPP</b>	Lodos Producidos en Sistemas Potabilización
<b>IVL</b>	Índice Volumétrico de Lodos
<b>UNT</b>	Unidades Nefelométricas Totales
<b>UPC</b>	Unidades Platino-cobalto
<b>EPM</b>	Empresas Públicas de Medellín
<b>ST</b>	Solidos Totales
<b>Fe</b>	Hierro
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>SSed</b>	Solidos sedimentables
<b>VLS</b>	Volumen de lodo sedimentado.

## Resumen

Las plantas de tratamiento de agua potable son indispensables para garantizar el suministro de agua apta para el consumo humano. Sin embargo, estos sistemas generan lodos residuales como subproductos, los cuales suelen ser vertidos directamente en fuentes hídricas, ocasionando impactos negativos en la fauna y flora acuática. Por ello, se han implementado trenes de tratamiento de lodos en estas plantas para reducir estos daños ambientales.

Tal es el caso de la planta de potabilización del corregimiento El Reposo, que planea incluir un tren de tratamiento de lodos a corto plazo. En este estudio, se analizó la producción de lodos generados en este sistema, simulando experimentalmente a escala de laboratorio el tratamiento empleado en dicha planta. Además, se realizaron ensayos de tratabilidad de lodos para definir dosis óptimas de ayudantes químicos en el proceso de espesamiento, lo que permitirá hacer más eficiente este tratamiento, adicionalmente se realizó una caracterización de los lodos producidos, con el fin de proponer los usos que pueden tener.

*Palabras clave:* Planta potabilizadora, Aguas Subterráneas, Lodos, Tratamientos de Lodos.

### **Abstract**

Drinking water treatment plants are essential to guarantee the supply of water suitable for human consumption. However, these systems generate sewage sludge as by-products, which are usually discharged directly into water sources, causing negative impacts on aquatic fauna and flora. For this reason, sludge treatment trains have been implemented in these plants to reduce this environmental damage.

Such is the case of the water treatment plant in the village of El Reposo, which plans to include a sludge treatment train in the short term. In this study, the production of sludge generated in this system was analyzed, experimentally simulating the treatment used in this plant on a laboratory scale. In addition, sludge treatability tests were carried out to define optimal doses of chemical helpers in the thickening process, which will make this treatment more efficient, additionally a characterization of the produced sludge was carried out, in order to propose the uses they can have.

*Keywords:* Water treatment plant, Groundwater, Sludge, Sludge Treatment.

## Introducción

El agua es un recurso de gran importancia para la vida y el desarrollo de las actividades humanas, aunque esté presente en gran abundancia en el planeta es indispensable que esta tenga características físicas, químicas y microbiológicas específicas para que pueda ser apta para el consumo humano y para el uso doméstico. Si bien, hay fuentes que producen agua de buena calidad, la mayoría de las fuentes de captación de agua tienen problemas de contaminación (Quon. & Jiang, 2023); Esta razón, existen la planta de producción de agua potable (PPAP), cuya función es eliminar los contaminantes del agua, asegurando que cumplan con los estándares de calidad necesarios para el abastecimiento humano. Sin embargo, estas plantas generan lodos como subproductos del tratamiento, los cuales deben manejarse adecuadamente para evitar efectos nocivos al medio ambiente y a la salud pública (Ahmad, T. et al. 2016).

Los lodos producidos en los sistemas de potabilización (LPP) suelen tener grandes cargas de sólidos metálicos y no metálicos, ya sea derivados de la fuente abastecedora o del mismo proceso de coagulación; si bien, la resolución 4741 del 2005 define este tipo de lodos como residuos no peligrosos, Romero, J. (1999, p. 287 ) afirma que el vertimiento de estos lodos a fuentes hídricas de bajas velocidades pueden cubrir organismos bentónicos y alterar la cadena alimenticia de los peces, puede aumentar la turbiedad de la fuente receptora disminuyendo la actividad fotosintética, la descarga del agua de lavado de los filtros conlleva el riesgo de contaminación patogénica, y aumento del crecimiento microbiano del agua, los lodos con aluminio (Al) y hierro (Fe) pueden tener efectos tóxicos sobre algunos organismos acuáticos (Souza, et al. 2024). Es por ello, que se vuelve esencial tener un tren de tratamiento o un plan de gestión de estos lodos adecuado en las plantas potabilizadoras.

Este estudio se desarrolla en la PPAP ubicada en el corregimiento El Reposo del municipio de Apartado, que abastece con 1357.85 m<sup>3</sup> al día a una población de 8.115 habitantes, este sistema de potabilización utiliza como fuente de abastecimiento agua subterránea, con altas concentraciones de hierro y manganeso (Hernández, 2023). Este sistema de potabilización es una planta convencional adaptada específicamente para el tratamiento de aguas subterráneas; que a diferencia de un tratamiento convencional, este sistema incluye inicialmente un proceso de pre-cloración y aireación, estas unidades como objetivo oxidar el hierro y el manganeso presentes en

el agua, permitiendo su precipitación, seguido por un tanque de coagulación, aquí se realiza la aplicación de coagulante y floculante, el agua es dirigida hacia los tanques de floculación donde se permite la aglomeración de flocs, al final de esta unidad se realiza la descarga de soda caustica con el fin de aumentar el pH para facilitar la precipitación de manganeso en el proceso de sedimentación que es continuo a este, el sistema de tratamiento finaliza con las unidades de filtración y desinfección.

En aras de construir un tren de tratamiento de lodos para la PPAP, que incluirá las siguientes unidades: un tanque de recepción, un tanque de espesado y cuatro módulos de lechos de secado, se analizó la generación de lodos residuales de las unidades de potabilización, con el fin de estimar los volúmenes producidos diariamente. Además, se realizaron pruebas de tratabilidad de los lodos purgados para implementar las condiciones de este tratamiento. El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo en cuatro etapas, la primera etapa fue la revisión bibliográfica para el desarrollo del marco teórico y la construcción de ecuaciones y procedimientos para ensayos de laboratorios, en la segunda fase se realizó la fase experimental, la tercera fase fue la consolidación y organización de datos obtenidos; y en la última fase se realizó el análisis de los resultados reflejados en este documento.

## 1. Planteamiento del problema

Los sistemas de potabilización cumplen con la función de remover contaminantes del agua, ya sean orgánicos e inorgánicos, permitiendo que el agua al salir de la planta cumpla con todas las normativas de calidad de agua locales y nacionales, no obstante, para lograr este objetivo, las plantas generan grandes cantidades de lodos residuales como subproductos del tratamiento, producidos principalmente en las unidades de sedimentación y filtración. Estos lodos requieren especial atención, debido a que pueden contener sustancias tóxicas y microorganismos patógenos (Souza, A. et al. 2024), provenientes tanto de la fuente abastecedora como de los químicos aplicados en el sistema.

El tratamiento y la disposición final de los lodos juegan un papel crucial en la gestión de estos residuos. Durante mucho tiempo, los lodos se vertían en fuentes de aguas superficiales, lo que afectaba la salud de los ecosistemas. Sin embargo, tras la prohibición de esta práctica, se han implementado trenes de tratamiento de lodos que permiten reducir su volumen. Entre los procesos unitarios más utilizados se encuentran la deshidratación, el tanque de espesamiento y el secado. Este sistema facilita el transporte y la disposición final de los residuos (Shome, S. et al. 2022).

Es importante destacar que la Resolución 0330 de 2017, en su artículo 125, prohíbe la descarga o almacenamiento final de los lodos sin un tratamiento previo. Además, exige la caracterización de estos residuos para garantizar un manejo y gestión adecuados. Asimismo, el Decreto 1287 de 2014 establece las condiciones que deben cumplirse para el uso o disposición de los lodos. Sin embargo, estas normativas no siempre se ajustan a la realidad socioeconómica de ciertos territorios, ya que muchas plantas de potabilización carecen de tratamiento de lodos. Como resultado, existen descargas directas de estos residuos en fuentes hídricas, lo que altera las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de las mismas. Tal es el caso de la PPAP El Reposo, que no cuenta con estos tratamientos.

La planta de potabilización en El Reposo tiene como fuente captadora aguas subterráneas del acuífero del golfo de Urabá, esta fuente cuenta con altas cargas de contaminantes de acuerdo con el estudio hidrogeológico de Antioquia, entre los contaminantes que tiene mayor concentración encuentra el potasio, hierro, calcio y nitrato (Betancur, T. 2023), partiendo de análisis realizados

por el laboratorio de aguas de CORPOURABA en las fuentes de captación de la planta, se tiene altas concentraciones de metales como el hierro y manganeso, sumado a ello en este sistema se aplica 4 productos químicos los cuales son: Cloro Gaseoso, Policloruro de Aluminio 19%, Polímero aniónico y soda cáustica, todos estos productos de cuidado especial y altamente corrosivos. Como se mencionó anteriormente, los residuos de estos productos también se encuentran en los lodos descargados, lo que genera lodos con características desfavorables para la fauna y la flora afectada (Shome, S. et al. 2022; Souza, A et al. 2023).

Con el objetivo de construir un sistema de tratamiento de lodos, este estudio analiza los lodos generados en el sistema, calculando y caracterizando el volumen producido, considerando el historial de los lavados y purgas de las unidades. Además, se busca simular en laboratorio el tren de tratamiento seleccionado para este sistema, con el fin de establecer posibles dosis tentativas a utilidad.

---

## 2. Antecedentes

Los lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable se han convertido en un tema de investigación relevante en los últimos años, debido a su gran producción. Algunos estudios estiman que la cantidad de lodos producidos en una planta de potabilización oscila entre el 1% y el 3% del agua cruda tratada (Zhao et al., 2021; Messias, 2013). Este aumento se debe principalmente al crecimiento poblacional, la cual requiere grandes volúmenes de agua tratada, lo que a su vez genera más lodos. Además, se ha observado un notable deterioro en la calidad del agua de las fuentes de captación, influyendo en algunos parámetros físicos que contribuyen al aumento de estos residuos, como se mencionó en un estudio realizado por Ahmad et al. (2016).

Según los investigadores Gonzales et al. (2020), la mayor parte de los lodos se genera en los tanques de sedimentación de una planta de tratamiento convencional. Estos lodos requieren una disposición final adecuada debido a sus propiedades químicas nocivas, ya que contienen componentes inseguros y peligrosos que pueden causar efectos perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Esto se debe a que los lodos provienen de las impurezas del agua cruda y de los químicos utilizados en el proceso de potabilización.

Se ha investigado ampliamente la composición de los lodos generados en los procesos de potabilización de agua. Castro et al. (2024) caracterizaron lodos provenientes de Plantas de Producción de Agua Potable (PPAP) que captan fuentes superficiales de agua, encontrando que el contenido de aluminio residual en los lodos oscila entre el 30% y 34%, la sílice entre el 21% y 26%, y el hierro entre el 11% y 13%. Rozhkovskaya et al. (2020) reportaron que el porcentaje de alúmina en los lodos es de  $29.7 \pm 13.3\%$  en peso seco, mientras que el de sílice es de  $33.4 \pm 26.2\%$ .

Por otro lado, estudios han caracterizado lodos de plantas que captan agua subterránea. Zhu et al. (2019) analizaron estos lodos, encontrando una composición de: hierro ( $28.9 \pm 0.9\%$ ), manganeso ( $8.5 \pm 0.2\%$ ), silicio ( $8.1 \pm 0.4\%$ ), aluminio ( $2.3 \pm 0.2\%$ ), calcio ( $2.1 \pm 0.1\%$ ) y potasio ( $1.3 \pm 0.1\%$ ). De manera similar, Qu et al. (2019) identificaron como principales elementos del lodo en peso seco: hierro (33.2%), silicio (6.2%), manganeso (4.9%), calcio (2.1%), aluminio (1.4%), potasio (0.3%) y magnesio (0.2%).

---

La disposición final de los lodos durante tradicionalmente, ha sido el vertimiento a fuentes de hídricas o a suelos, debido al bajo costo de este, no obstante, esta práctica no es la adecuada, debido a las implicaciones ambientales, que ocasiona las altas concentraciones de aluminio y otros compuestos nocivos (Okuda et al. 2014), es por ello que se han venido estableciendo normativas como la Resolución 0330 de 2017 y el Decreto 1287 de 2014, la cual prohíbe las descargas de estos residuos sin un tratamiento previo, exigiendo su caracterización y gestión adecuada. Pese a esto, muchas PPAP no cuentan con sistemas de tratamiento de lodos, lo que resulta en descargas directas a fuentes hídricas (Ahmad et al. 2016).

Con el fin de destacar las consecuencias ecotoxicológicas asociadas con los vertimientos inadecuados de lodos procedentes de sistemas de potabilización, Wand et al. (2024) revisan su composición, efectos tóxicos y algunas alternativas de tratamiento. En términos generales, los autores relacionan la composición de los lodos con la calidad de la fuente de agua y los químicos utilizados en su tratamiento, concluyendo que es inviable la descarga directa en cuerpos de agua superficiales, ya que estos vertimientos son perjudiciales para el medio ambiente.

Messias (2013) analizó extractos acuosos de lodos y detectó efectos tóxicos, desde leves hasta letales, en diversos organismos acuáticos utilizados para evaluar la ecotoxicidad del agua, como *Hydra attenuata*, *Chironomus xanthus*, *Pseudokirchneriella subcapitata* y *Danio rerio*. Estos efectos tóxicos se observaron especialmente en presencia de metales pesados o altas concentraciones de hierro y zinc (Ranjbar et al., 2018; Souza et al., 2023).

Muisa et al. (2011) destacaron los efectos nocivos del aluminio, que puede provocar efectos citotóxicos, mutagénicos y cancerígenos. Además, el aluminio puede bioacumularse en peces, causando cambios de comportamiento, mortalidad y daños en las branquias, entre otros efectos adversos. Wand et al. (2024) también mencionan impactos negativos en la biota del suelo y en microorganismos, además de la bioacumulación en vegetales, lo que puede generar problemas de salud a lo largo de la cadena alimentaria. Para mitigar estos efectos, los autores proponen la biorremediación como un método eficiente y de bajo costo para la descontaminación y el uso posterior de estos lodos.

---

Los tratamientos convencionales de lodos se realizan para reducir los volúmenes, concentrándolos a través de procesos físicos y químicos como lo mencionaron Shome et al. (2022), en su artículo sobre el papel de los lodos en la eliminación de estos contaminantes, en el cual propuso un tren de tratamiento compuesto por cuatro procesos secuenciales, los cuales son: espesamiento, deshidratación, acondicionamiento de lodos y secado, dependiendo de la complejidad de los lodos pueden aplicarse algunos métodos de estabilización posterior a este proceso. Así pues, en el artículo 125 de la resolución 0330 de 2017, sugiere este mismo tren de tratamiento, para que se adoptado por las Plantas de potabilización, y así reducir las descargas de lodos.

El gran volumen de lodos producidos por los sistemas de tratamiento de aguas potable, a menudo, son dispuesto sin ser aprovechado, ya sea por vertimiento directo o por disposición en rellenos sanitarios posteriores a un tratamiento. Aunque esta práctica sea de bajo costo, no es la mejor teniendo en cuenta el potencial que estos residuos tienen de ser aprovechadas. Adicionalmente, hoy en día, la economía circular pretende aplicar el concepto de las 3 R (recuperar, reciclar y reusar), siendo la última opción la disposición final. En este sentido, un estudio realizado por Ahmad et al. (2016), define algunos usos potenciales de estos lodos, los cuales se mencionan a continuación:

- Recuperación y reutilización de coagulantes de plantas de tratamiento de aguas residuales,
- Uso de lodos como coagulante en plantas de tratamiento de aguas residuales,
- Aplicación de LPP en la eliminación de contaminantes y metales pesados de aguas residuales,
- Uso de LPP como sustrato en humedales construidos,
- Utilización de LPP en la producción de cemento,
- Utilización de LPP en la fabricación de agregados livianos,
- Mejora de la estructura del suelo,
- Aplicación de LPP en la práctica agrícola y otros usos de la tierra,
- Inmovilización de fósforo en suelos cargados con este elemento.

Un estudio realizado por Montoya (2016) en el que se analiza la producción de lodos de la planta de potabilización en el municipio de Apartadó Antioquia, establece que los lodos producidos por

---

esta planta tienen un potencial de ser aprovechado, debido a que no tiene concentraciones de sólidos peligrosos, además este estudio sugirió un el tren de tratamiento de lodos incluir lechos de secados debido al bajo costo y la fácil operación de esta alternativa. Ulloa (2023), estimó en su análisis que el tiempo de secado de estos lodos es de 72 horas, en un lecho de secado.

### 3. Justificación

El análisis de los lodos producidos en las plantas de tratamiento de agua potable es crucial debido a los posibles impactos ambientales y de salud que pueden generar al ser vertidos. Estos lodos contienen partículas suspendidas, coagulantes y otros productos químicos utilizados en los procesos de clarificación y sedimentación, lo que los convierte en un problema global que requiere una gestión sostenible mediante métodos ecológicos (Nayeri & Alireza, 2022).

Los lodos de tratamiento de aguas potable pueden contener sustancias tóxicas y microorganismos patógenos, lo que demanda una atención especial. La alta demanda de agua potable y la expansión de las redes de tratamiento de aguas residuales sanitarias incrementan significativamente la cantidad de lodos generados. La eliminación inadecuada de estos residuos puede comprometer la calidad ambiental (Souza et al., 2023).

Ahmad & Ahmad (2016) destacan que los métodos actuales de eliminación de lodos representan un peligro para el medio ambiente y la salud pública, subrayando la necesidad de encontrar opciones de reutilización beneficiosas para una gestión sostenible. Souza et al. (2023) también señalan que la presencia de metales como Al y Fe plantea preocupaciones ambientales, mientras que los lodos de aguas residuales contienen contaminantes orgánicos y emergentes que requieren una disposición final cuidadosa para evitar efectos ecotoxicológicos.

En Urabá las plantas de potabilización no tienen un tren de tratamiento de lodos adecuado, incluso la gran mayoría de estos vierten este volumen de lodo directamente a las fuentes de aguas superficiales, como lo muestran algunos estudios de lodos realizados en la región (Montoya, 2016) (Ulloa, 2022). Esta situación es preocupante por lo dicho en párrafos anteriores; un caso similar es el que sucede en la PPAP del corregimiento El Reposo, que actualmente vierte lodos generados en este proceso sobre el río Vijagual, lodos cuyas características más importantes son las

concentraciones de metales procedentes de las aguas subterráneas y químicos utilizados en el proceso.

En ese sentido, en aras de revertir tal situación, la empresa Aguas Regionales EPM construirá un nuevo sistema de tratamientos de agua potable en la que se incluirá un tren de tratamiento de lodos, por tal motivo, en este estudio se analizó la producción de lodos en esta planta, además de la identificación de diferentes alternativas de aprovechamiento y de disposición final.

## **4. Objetivos**

### **3.1 Objetivo general**

Analizar los lodos generados en la planta de tratamientos de producción de agua potable (PPAP) del corregimiento El Reposo del municipio de Apartadó de forma experimental a escala de laboratorio.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Realizar pruebas de tratabilidad de los procesos de pre-cloración, coagulación, floculación y sedimentación con el fin de simular el tratamiento de la PPAP El Reposo.
- Determinar el volumen de lodo producido en la PPAP El Reposo por medio de las pruebas de tratabilidad, mediante el índice volumétrico de lodos (IVL) y sus características fisicoquímicas.
- Optimizar la dosis de polímetro aniónico y catiónico a ser usado en el proceso de espesamiento en el tratamiento de lodos.

---

#### 4 Marco teórico

La planta de producción o tratamiento de agua potable (PPAP) es definida por el Ministerio de Vivienda (2024) como: “un conjunto de obras, equipos y materiales necesarios para efectuar los procesos que permitan cumplir con las normas de calidad del agua potable”. Según Romero J. (1999) no existe un único tren de tratamiento de agua, pueden existir múltiples tipos de planta potabilizadoras que dependen principalmente de las características del agua cruda o de las unidades tecnológicas que estas contengan, no obstante, la más usada en la actualidad son las plantas convencionales, las cuales incluyen en términos generales los siguientes procesos: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, con el fin de realizar una separación física de los contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua, removiendo turbiedad, color, bacterias, olor, sabor, dureza, hierro y manganeso.

Los procesos aplicados a los sistemas de tratamiento de agua dependen directamente de la calidad de la fuente de agua, para ello el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS (2020) establece una relación de entre el tratamiento a utilizar y la calidad de la fuente (como se muestra en la Tabla 1), se establece una clasificación de los niveles de calidad de las fuentes de agua potable, teniendo en cuenta los parámetros básicos de análisis microbiológicos, físicos y químicos, y el grado de tratamiento asociado a esta calidad.

**Tabla 1.***Grado de tratamiento de acuerdo con la calidad del agua.*

Parámetros	Análisis según		Nivel de calidad de acuerdo al grado de contaminación			
	Norma técnica NTC	Standard Method ASTM	1. Fuente aceptable	2. Fuente regular	3. Fuente deficiente	4. Fuente muy deficiente
<b>DBO 5 días</b>	3630					
Promedio mensual mg/L			<1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4	>4
Máximo diario mg/L			1 - 3	3 - 4	4 - 6	>6
<b>Coliformes totales (NMP/100 mL)</b>						
Promedio mensual		D-3870	0 - 50	50 - 500	500 - 5000	>5000
Oxígeno disuelto mg/L	4705	D-888	>=4	>=4	>=4	<4
PH promedio	3651	D 1293	6.0 - 8.5	5.0 - 9.0	3.8 - 10.5	
Turbiedad (UNT)	4707	D 1889	<2	2 - 40	40 - 150	>= 150
Color verdadero (UPC)			<10	10 -20	20 - 40	>= 40
Gusto y olor		D 1292	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo	Inaceptable
Cloruros (mg/L - Cl)		D 512	< 50	50 - 150	150 - 200	300
Fluoruros (mg/L - F)		D 1179	<1.2	<1.2	<1.2	>1.7
<b>GRADO DE TRATAMIENTO</b>						
Necesita un tratamiento convencional			NO	NO	Sí, hay veces (ver requisitos para uso FLDE : literal C.7.4.3.3)	SI
Necesita unos tratamientos específicos			NO	NO	NO	SI
Procesos de tratamiento utilizados			(1) = Desinfección + Estabilización	(2) = Filtración Lenta o Filtración Directa + (1)	(3) = Pretratamiento + [Coagulación + Sedimentación + Filtración Rápida] o [Filtración Lenta diversas etapas] + (1)	(4) = (3) + Tratamientos específicos

Nota. Título C, RAS (2020, p. 64)

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (s.f.) “Las Aguas subterráneas en Colombia han venido adquiriendo gran importancia en todo el territorio colombiano, convirtiéndose como fuente principal, complementaría o alterna de abastecimiento para poblaciones localizadas en cuencas con acceso limitado de aguas superficiales” tal es el caso del acuífero del golfo de Urabá que “abarca 4 municipios con inventario de 8.203 acometidas entre pozos y aljibes”, las aguas subterráneas se caracterizan en general por “tener turbiedades débiles,

temperatura y composición química constantes y generalmente en ausencia de oxígeno” (IDEAM, 2023).

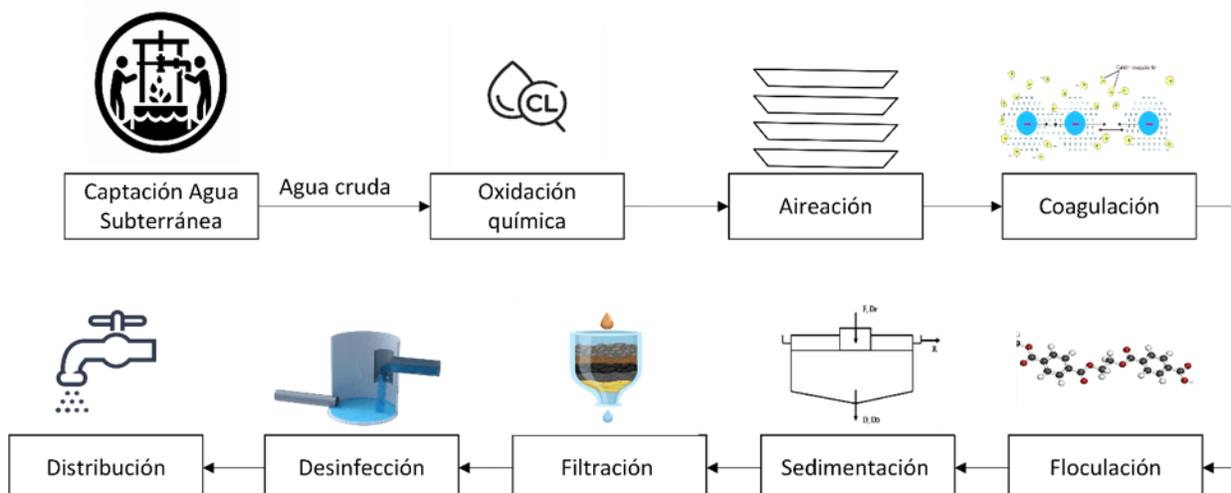
Dependiendo de la composición del material geológico, las aguas subterráneas pueden tener concentraciones de contaminantes metálicos (Corporación Autónoma Regional de Urabá, s.f.). Entre los compuestos metálicos más comunes en aguas subterráneas están el hierro y el manganeso (Zhang, Y., 2019; Smith, J., 2019). De la misma manera, el golfo de Urabá experimenta altas concentraciones de hierro, manganeso, potasio, calcio, sulfatos y nitratos, por encima de los niveles de referencia nacional (Betancur, T., 2023).

La presencia de estos contaminantes ocasiona que se implementen tratamientos adicionales a los procesos convencionales. La resolución 0330/2017, en el artículo 109, recomienda utilizar los procesos de aireación y la oxidación química con cloro para este tipo de agua. En ese mismo sentido, Smith, J. (2023) y Romeros, J. (1999) hacen esta misma mención. Incluso, este último sugiere, dentro de los trenes de tratamiento de aguas con hierro y manganeso, modificar el pH para mejorar la eficiencia en la remoción de estos a altas concentraciones.

A continuación, en la Figura 1 se muestra un esquema de los procesos que incluyen el tratamiento de aguas subterráneas para potabilización.

### Figura 1.

*Secuencia de los procesos unitarios aplicados en un PPAP con fuente de aguas subterráneas.*



Nota. Esquema realizado teniendo en cuenta algunas recomendaciones de la resolución 033072017 y Romeros J. (1999).

---

Los lodos son subproductos o residuos generados por las PPAP, al remover sólidos suspendidos, coloidales y disueltos del agua. Los lodos son producidos en mayor porcentaje en los procesos de coagulación-floculación-sedimentación, en esta última unidad se decantan sólidos suspendidos aglomerados en los procesos previos; los tratamientos utilizados para la remoción de hierro y manganeso también producen lodos, tanto la oxidación física como la química, aunque en menor volumen al generado en el proceso de coagulación convencional y el retro lavado de filtros, al igual que las unidades anteriores contribuye en la formación de lodo con bajas concentraciones de sólidos. En general la cantidad de lodo puede ser del 2% al 5% del agua filtrada, este material es retenido en la carrera filtrante. De acuerdo con Romero J. (1999). La composición de lodos puede variar conforme con la fuente del agua tratada o a los químicos utilizados en esta, sin embargo, a menudo tiende a caracterizarse por el tipo de coagulante utilizado, como lodos aluminosos cuando se utiliza sales de aluminio entre los más conocidos se encuentra el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio; y los lodos férricos que incluyen al cloruro férrico y al sulfato férrico.

Los tratamientos de lodos de PPAP en general consiste en remover el exceso de agua, mediante los procesos de homogeneizador o tanque de resección de purgas, espesamiento y deshidratación. El tanque de espesamiento concentra el lodo de un 99.5% de agua a un 95% de agua con el principio de la decantación, este proceso puede ser mejorado utilizando coagulante o polímero, el agua decantada puede ser recirculada al sistema y el lodo pasa al proceso de deshidratación. Romero, J. (1999) afirma que en la deshidratación se pretenden obtener contenidos de lodos mayor al 15% o también puede ser secado, por medio de técnicas como, los lechos de secado, los filtros a vacíos, las centrifugas, las lagunas de secado, la filtro prensa, entre otras, La resolución 0330 del 2017 en el artículo 125 declara que los lodos evacuados en los procesos unitarios deberán ser sometidos a técnicas de homogeneización, complementadas con tratamientos de espesamientos y deshidratación. Anulando las descargas y vertimientos directos.

A continuación, se describen diferentes tecnologías utilizadas para el tratamiento de lodos, tomando como referencia principal el anexo 2 del RAS Título E (2020):

---

## **Homogeneización**

Este procedimiento se lleva a cabo para uniformar la concentración de lodos y, al mismo tiempo, disponer de un volumen que permita el funcionamiento continuo de la planta de lodos, ya que los lodos se extraen de manera intermitente y sus concentraciones varían (Zamora, et al, 2008). Es importante considerar la homogeneización, ya que, si las concentraciones que llegan a las fases de espesamiento de la planta de lodos son muy variables, el rendimiento de esta se verá significativamente afectado. Por lo tanto, es beneficioso realizar una mezcla previa para obtener una concentración lo más constante posible (Amador & Bataller, 2014).

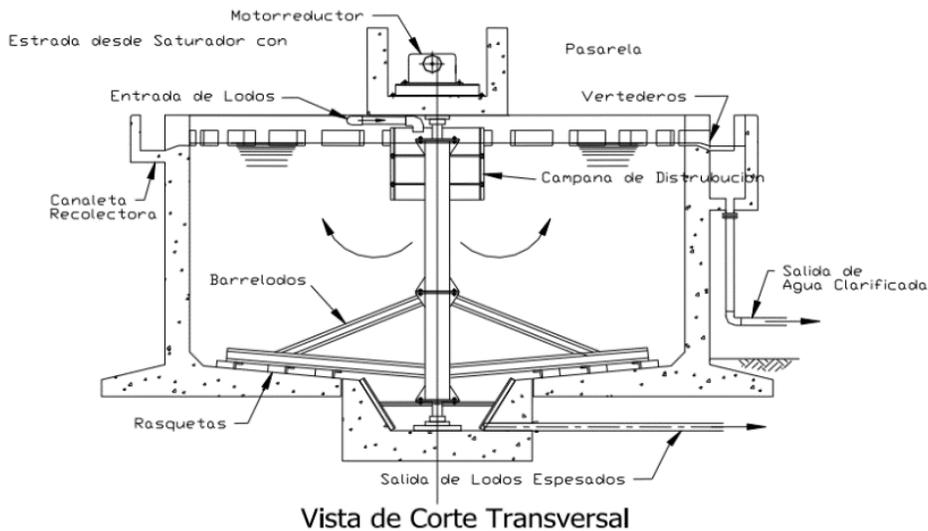
## **Espesador**

El propósito del espesamiento de lodos es incrementar su concentración de sólidos y disminuir el volumen de agua libre, reduciendo así la carga en los procesos posteriores como la digestión y la deshidratación. Hay dos métodos principales de espesamiento: por gravedad y por flotación.

El espesador a gravedad es un tanque diseñado para la decantación de lodos, equipado con mecanismos que facilitan su remoción. Para que el proceso de espesamiento sea efectivo, es crucial mantener condiciones de calma dentro del tanque. Esta estructura suele ser circular con un fondo cónico. El flujo de entrada se dirige al centro del tanque, donde su energía se disipa, y luego el agua clarificada se desborda a través de un vertedero perimetral.

Existen dos métodos principales para extraer los lodos espesados. El primero consiste en un fondo cónico con paredes inclinadas, que permite que los lodos decantados se concentren por gravedad en el centro del tanque, desde donde son evacuados continuamente hacia las estructuras de procesamiento. El segundo método utiliza un barrelos mecánico que dirige los lodos sedimentados hacia una tolva central en el fondo inclinado del tanque, este último se muestra en la Figura 2.

**Figura 2.**  
*Espesador de lodos a gravedad vista de corte transversal.*



Nota: Título C, RAS - Anexo 2 (2020)

## **Deshidratación**

La deshidratación es una operación física empleada para reducir el contenido de humedad y el volumen del lodo. El objetivo de este método es aumentar el contenido de materia seca del lodo de un 3-40%, disminuir los costes de transporte por reducción de volumen, mejorar el manejo y transporte de los lodos, evitar olores ofensivos y aumentar el poder calorífico por disminución de la humedad (Fernández, 2022).

Estos dispositivos aceleran la separación de agua y sólidos mediante centrifugación y filtración, reduciendo rápidamente el contenido de agua en los lodos y otorgándoles una consistencia pastosa que facilita su transporte y manejo. Para deshidratar los lodos, se suelen añadir floculantes, generalmente polielectrolitos, cuya dosificación debe ser controlada cuidadosamente para asegurar un rendimiento óptimo del proceso. El agua extraída durante la deshidratación suele ser reciclada al inicio del sistema de tratamiento (Título C, RAS - Anexo 2. 2020). A continuación, se describe los equipos más utilizados en este proceso:

### **Filtro de prensa:**

El filtro prensa se compone de una serie de placas verticales, muy próximas entre sí, revestidas con filtros permeables. Una bomba de alta presión llena el espacio entre las

---

placas, que se juntan mediante un mecanismo mecánico, forzando la salida del agua a través de ellas. Luego, la torta de lodos se descarga manualmente. Este proceso es secuencial, con la apertura y cierre de las placas generalmente automatizados. Una variante reciente incluye un sistema de compresión neumática, donde las placas con membranas se expanden al recibir aire comprimido, presionando la torta de lodos y logrando un mayor contenido de sólidos (Título C, RAS - Anexo 2. 2020).

### **Centrifugación:**

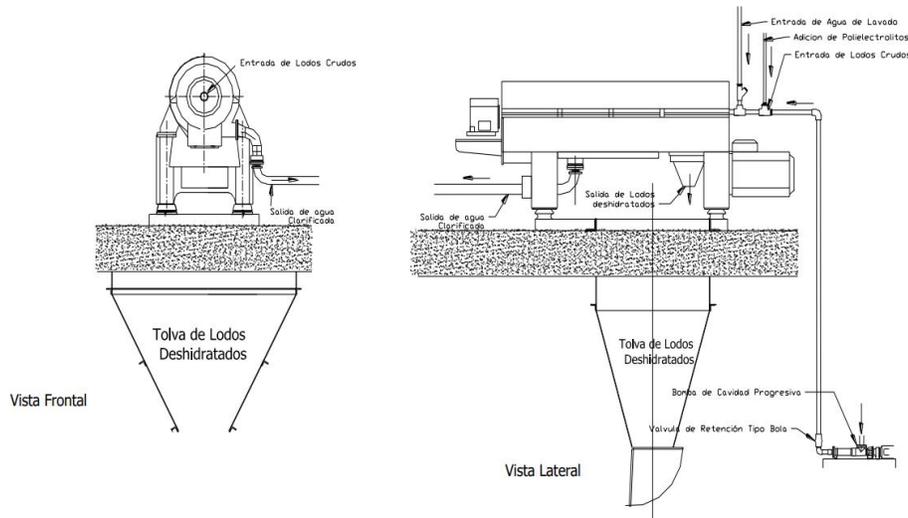
Este dispositivo acelera la deshidratación del lodo mediante una rotación de alta velocidad, generando fuerzas centrífugas que facilitan la separación de las fases líquida y sólida. El agua es expulsada hacia la periferia, mientras que un tornillo sin fin transporta los lodos deshidratados hacia una abertura en el extremo. Posteriormente, un tornillo o una banda transportadora externa lleva los lodos a un área de almacenamiento.

La separación del agua ocurre dentro del cilindro del rotor y se evacua a través de diques de placa ajustables. El líquido clarificado se dirige a un ducto en la parte inferior, conectado a una tubería que lo retorna a las lagunas de estabilización. El panel de control permite iniciar y supervisar el funcionamiento del decantador. Existen variantes con tazón de eje vertical o tambor de eje horizontal, adecuadas para caudales de lodos más pequeños (Título C, RAS - Anexo 2. 2020).

### **Filtro de banda:**

Se trata de una cinta transportadora que se mueve de manera continua. En un extremo, una caja de distribución alimenta la cinta con lodo, que pasa a través de una serie de rodillos de diámetros decrecientes, aplicando presión sobre el lodo. Mientras el agua se filtra a través de la cinta, la torta de lodo deshidratado sale al final. En algunos diseños, se utilizan pistones hidráulicos para aumentar la presión a medida que la cinta rota alrededor de los rodillos. La cinta se lava antes de ser alimentada nuevamente con lodo crudo. A diferencia del filtro de prensa, este es un proceso continuo (Título C, RAS - Anexo 2. 2020).

**Figura 3.**  
*Filtro banda equipo de deshidratación.*



Nota: Título C, RAS - Anexo 2 (2020)

## Secado

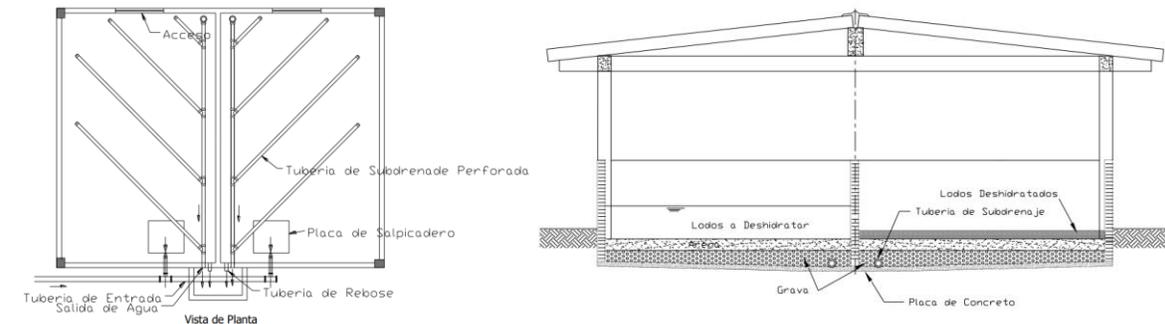
El lecho de secado es una estructura que consiste en una cama de arena sobre la cual se depositan los lodos crudos. Cuenta con un sistema de subdrenaje para evacuar el agua filtrada. Esta estructura puede estar cubierta con un techo o una cubierta baja para evitar la entrada de agua de lluvia.

El secado de los lodos se produce mediante la combinación de evaporación y filtración hacia el sistema de subdrenaje. A medida que los lodos se secan, se contraen y agrietan, lo que facilita la evaporación en las capas inferiores (Título C, RAS - Anexo 2. 2020).

La duración del proceso de secado de los lodos depende de las condiciones climáticas, principalmente de la temperatura y el viento, por lo que es recomendable realizar esta operación en períodos secos. Para reducir el tiempo de secado, se pueden utilizar cal o polímeros coagulantes como el cloruro férrico. Una vez que la capa de lodo se ha secado, adquiere una consistencia pastosa

o sólida que permite su manejo. Se retira manualmente con palas o con equipos mecánicos como cargadores (Título C, RAS - Anexo 2. 2020).

**Figura 4.**  
*Configuración de los Lechos de secado*



Nota: Nota: Titulo E, RAS - Anexo 2 (2020)

### Descripción de la zona de estudio

La planta de tratamiento de agua potable se encuentra en la manzana 21 del barrio El Bosque, en el corregimiento de El Reposo, municipio de Apartadó. El corregimiento está situado en la margen oriental de la Troncal hacia Carepa, a 12 km al suroeste de la cabecera municipal de Apartadó. El área limita con el municipio de Carepa a través del Río Vijagual. El Reposo es un corregimiento constituido por 6 veredas adicionales a la cabecera del corregimiento, cuenta con 8.115 habitantes de acuerdo con los datos consultados en el SISBÉN Versión IV, sus principales actividades comerciales son la agricultura y el comercio.

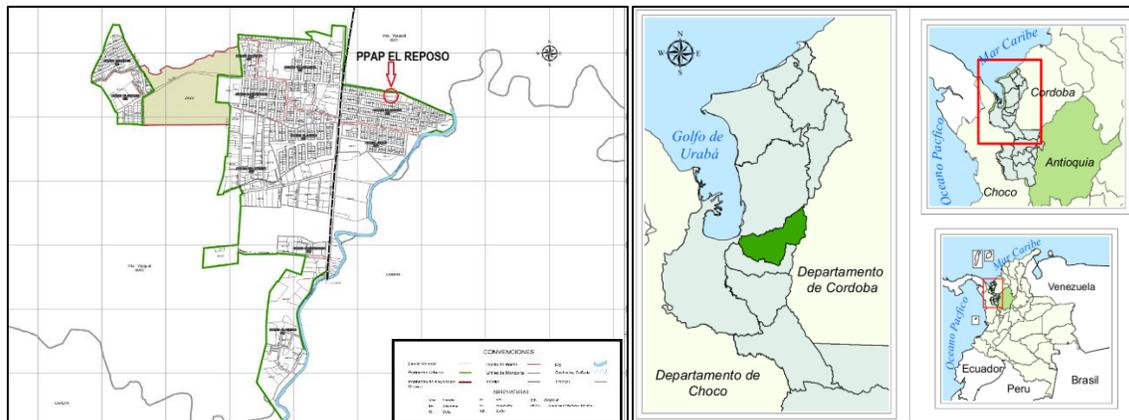
El municipio está ubicado dentro de la cuenca del río Vijagual, que sirvió como fuente de abastecimiento para las comunidades locales hasta principios de la década de 2000. En 1999, la Facultad de Salud Pública de la Universidad de Antioquia, en conjunto con CORPOURABÁ, llevó a cabo un estudio ambiental sobre el uso de agroquímicos en la región de Urabá, en el que se evaluó la calidad fisicoquímica y microbiológica del río Vijagual. Los resultados del estudio fueron alarmantes, ya que se encontraron altas concentraciones de mercurio, hierro, coliformes totales, nitritos y un déficit de oxígeno disuelto a lo largo del cauce del río. Estas condiciones hacían que

el agua no fuera apta para el consumo humano y presentara una calidad insuficiente incluso para el uso pecuario.

El tratamiento que realizaban las comunidades era muy básico, consistiendo únicamente en tanques de recepción y un sistema de elevación, lo que resultaba en un agua de mala calidad para la población. Además, la fuente de agua del río era limitada en cuanto a volumen, cubriendo solo al 52% de los habitantes. Como consecuencia de estos problemas, se gestionó la búsqueda de una nueva fuente de abastecimiento. Las aguas subterráneas fueron la opción más viable y, desde principios del siglo XXI, se adoptaron como la fuente principal de abastecimiento para el corregimiento, práctica que continúa hasta la actualidad (Municipio de Apartadó, 2019; Corregimientos de Antioquia, s.f.).

### Figura 5.

*Ubicación del corregimiento de El Reposo.*



Fuente: (Corregimientos de Antioquia, s.f.)

### Fuente de Abastecimiento

Actualmente, el corregimiento de El Reposo se abastece de agua subterránea captada desde dos pozos profundos: el Pozo Planta, con una captación aproximada de 8.5 L/s (Figura 6 muestra la captación de este pozo), y el Pozo Colegio, que produce entre 9 y 9.5 L/s. Ambas fuentes pertenecen al mismo acuífero, por ello tienen una calidad similar.

Para conocer las características de estas aguas, la empresa Aguas Regionales EPM, que opera los sistemas de abastecimiento del corregimiento, realiza análisis fisicoquímicos y microbiológicos periódicos a través del laboratorio de aguas de CORPOURABÁ. La Tabla 2 presenta el último análisis realizado al Pozo Planta, mientras que los análisis anteriores, desde 2016, se encuentran en el Anexo 1.

**Figura 6.**

*Estructura externa de la captación del Pozo planta.*



Nota. Pozo ubicado en la PPAP El Reposo de 110 metros de profundidad.

De acuerdo con las características del agua presentadas en la Tabla 2, es importante destacar algunos parámetros como el hierro y el manganeso, cuyas concentraciones se encuentran significativamente elevadas en comparación con los límites permisibles establecidos para el consumo humano en la Resolución 2115 de 2007. Estas altas concentraciones son típicas de las aguas subterráneas del acuífero de Urabá, lo que plantea un reto importante para los sistemas de tratamiento, ya que su remoción puede ser compleja. Por esta razón, es fundamental realizar un seguimiento continuo del comportamiento de estas concentraciones a lo largo de los años, con el fin de asegurar que los niveles se mantengan dentro de los límites aceptables y garantizar la calidad del agua destinada al consumo humano.

**Tabla 2.**

*Caracterización fisicoquímica del agua*

PUNTO DE MUESTREO	Salida llave Planta de tratamiento Reposo
FECHA DE LA MEDICIÓN	12/06/2024
NOMBRE DEL LABORATORIO	Laboratorio de aguas Corpourabá
TIPO DE LABORATORIO	Análisis

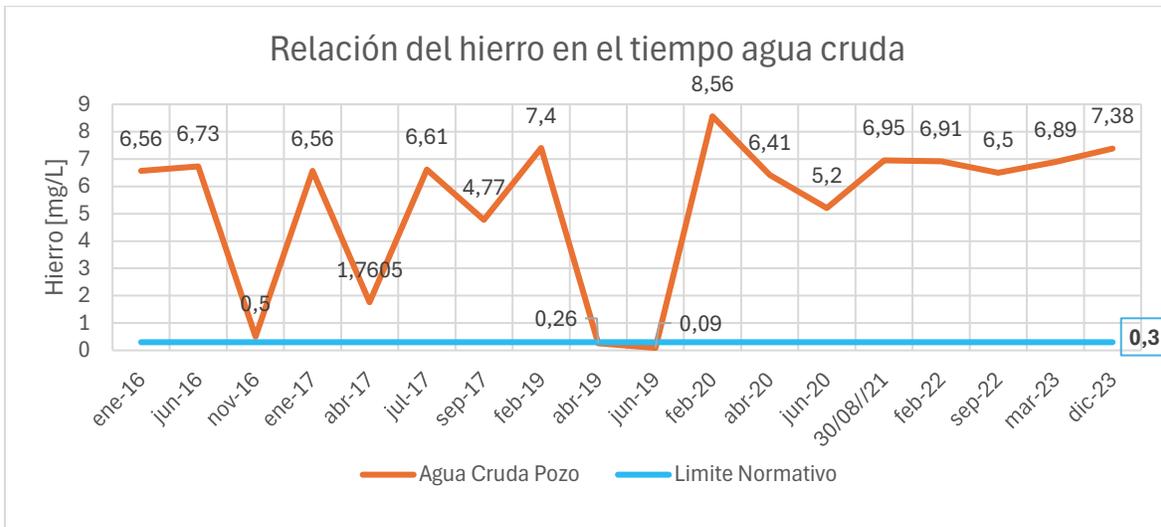
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
PH in situ	6,28	Unidades de pH
TEMPERATURA in situ	27,8	°C
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	9	mg/L
CONDUCTIVIDAD	432,8	uS/cm
TURBIEDAD In situ	13,2	UNT
COLOR REAL	61,96	UPC
COLIFORMES TOTALES	1	NMP/100ml
E. COLI	1	NMP/100ml
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO – DBO	2,86	mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO – DQO	30	mg/L
OXÍGENO DISUELTO	4,43	mg/L
SODIO	12,5	mg/L
CLORUROS	5,07	mg Cl-/L
FLUORUROS	0,2	mg F1-/L
HIERRO	4,934	mg/L
MANGANESO	0,79	mg/L
FENOLES	0,2	mg/L
NITROGENO AMONICAL	0,1	mg/L
NITRITO	0,003	mg /L N-NO2
NITRATO	0,17	ug/L N-NO3-
DUREZA TOTAL	88,13	mg CaCO <sub>3</sub> /L
CIANUROS	0,01	mg CN /L
SULFATOS	10	mg/L
FÓSFORO REACTIVO DISUELTO (ORTOFOSFATO)	0,78	mg/L

Nota. Realizada por el laboratorio de aguas de CORPOURABÁ, en solicitud de la empresa Aguas Regionales EPM.

Teniendo en cuenta la información presentada en la Tabla 2 y las Figuras 7 y 8, el comportamiento del hierro y manganeso ha estado, en la mayoría de los casos, muy por encima del límite permisible para agua potable. Esto ha llevado a que la planta de tratamiento de El Reposo implemente tres procesos unitarios adicionales a los convencionales, con el fin de lograr una remoción eficiente de estos elementos.

### Figura 7.

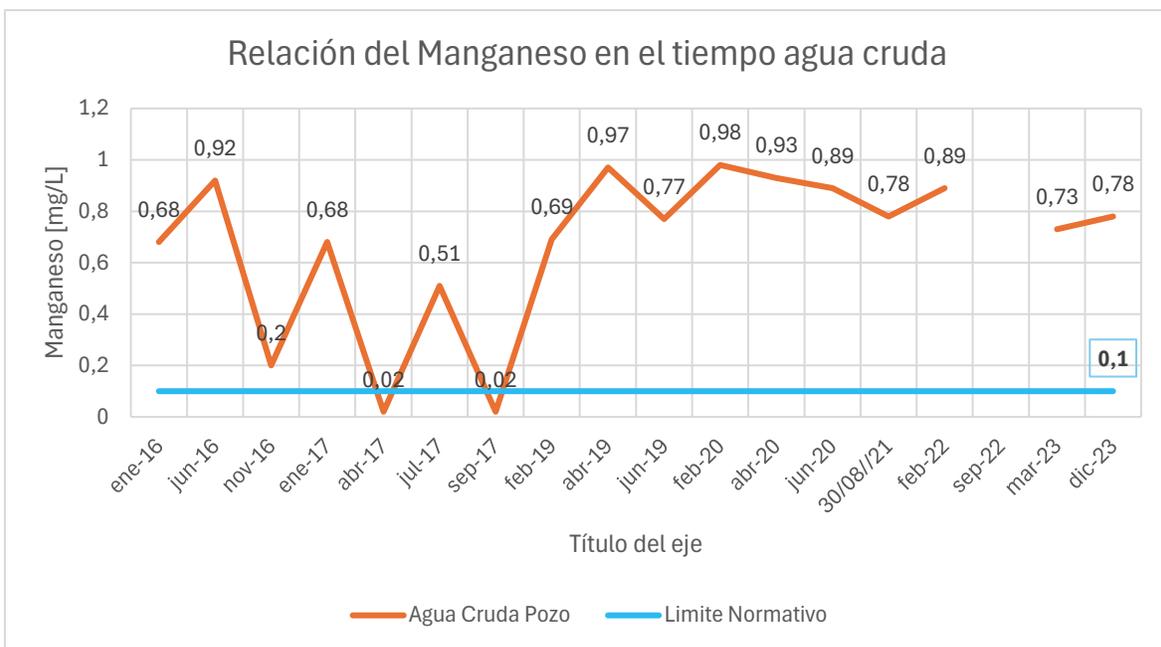
*Comportamiento de las concentraciones de hierro desde el 2016 en el agua cruda de la fuente de abastecimiento de El Reposo.*



Nota. Realizada teniendo en cuenta el análisis histórico desde el 2016 realizado por el laboratorio de aguas de CORPOURABÁ, contratado por la empresa Aguas Regionales EPM.

### Figura 8.

*Comportamiento de las concentraciones de manganeso desde el 2016 en el agua cruda de la fuente de abastecimiento de El Reposo.*



Nota. Realizada teniendo en cuenta el análisis histórico desde el 2016 realizado por el laboratorio de aguas de CORPOURABÁ, contratado por la empresa Aguas Regionales EPM.

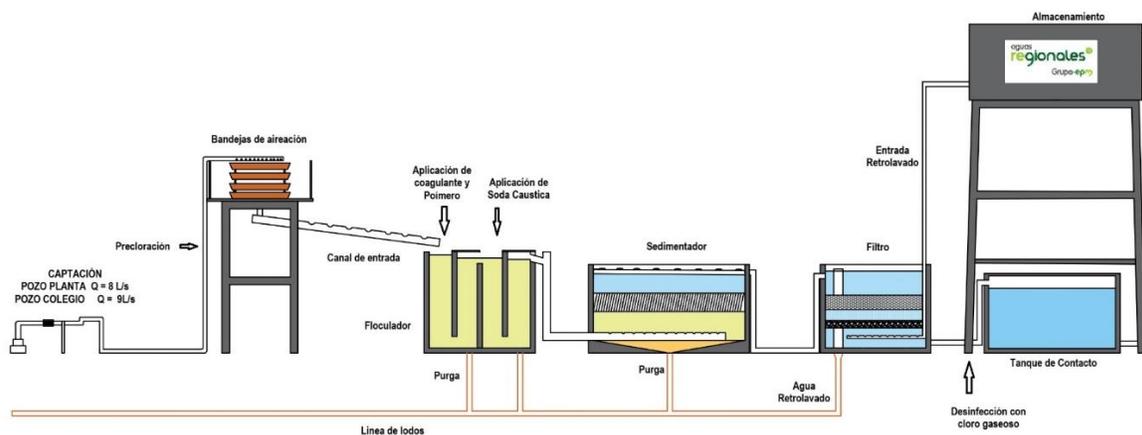
## Generalidades de la PPAP del corregimiento El Reposo

### Descripción de Procesos

La PPAP El Reposo está compuesta por un sistema de tratamiento convencional adaptado para aguas subterráneas, con capacidad máxima nominal de 15 L/s. Se analizó desde el 01 de enero del 2024 hasta los siguientes 8 meses, encontrando que la planta ha manejado un caudal promedio de 16.72 L/s, produciendo en promedio 1357.85 m<sup>3</sup>, de acuerdo con el consolidado reportado por los operadores del sistema, en plataformas internas de Aguas Regionales EPM, denotando un sobredimensionamiento con respecto al caudal de diseño. La Figura 9, presenta de manera esquemática este tren de tratamiento, que cuenta con la siguiente secuencia: Oxidación química, aireación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

A continuación, se describe cada uno de los procesos aplicados en la plantade tratamientos de El Reposo, partiendo de la ilustración del sistema mostrado en la Figura 9, en donde se observa a modo general, las unidades y los productos aplicados en cada una de ellas.

**Figura 9.**  
*Esquemización de la PPAP El Reposo*



Nota. Esquema realizado de acuerdo con los procesos vistos en la PPAP el Reposo.

## Oxidación química

Las elevadas concentraciones de hierro y manganeso en la fuente de agua hacen necesario implementar un proceso de oxidación química para remover estos contaminantes antes de que el agua llegue al final del sistema. En la planta de El Reposo, se utiliza cloro gaseoso como agente oxidante, aplicando este proceso al inicio del tratamiento, lo que se conoce como pre-cloración. Este método ha demostrado ser altamente eficiente en la remoción de hierro y manganeso.

El cloro gaseoso se aplica en la tubería de aducción, justo antes del proceso de aireación, como se muestra en la Figura 10. Este punto de aplicación es estratégico, ya que facilita la oxidación de los metales y su posterior eliminación en las etapas siguientes del tratamiento.

### Figura 10.

#### *Pre-cloración*



Nota: La pre-cloración se realiza en la red de tubería como se muestra en la imagen, con cloro gaseoso previo a las bandejas de aireación.

## Aireación

La aireación es un proceso de oxidación física que contribuye significativamente a la oxidación de metales como el hierro y el manganeso. En la planta de El Reposo, debido a los elevados niveles de estos contaminantes, se implementa este proceso específicamente para favorecer su remoción. El sistema de aireación consta de un módulo con 4 bandejas, las cuales contienen en su interior un lecho de contacto de material plástico, conocido como anillos Pall-rings.

Estos anillos aumentan la superficie de contacto entre el agua y el aire, facilitando la oxidación de los metales, como se muestra en la Figura 11.

**Figura 11.**  
*Bandejas de aireación*



Nota: Imagen tomada las bandejas de aireación de El Reposo, en donde se muestra la composición de estas y el ingreso del agua cruda a la planta.

## Coagulación

La coagulación se lleva a cabo en un vertedero, el cual permite una mezcla rápida mediante un sistema hidráulico; en este punto se aplica el coagulante, que en este sistema es policloruro de aluminio, con un 19% de alúmina en base líquida, mostrando gran eficiencia en el proceso. Adicionalmente, se utiliza un floculante o polímero aniónico, que ayuda a mejorar el proceso de sedimentación. Los productos son dosificados a través de bombas de dosificación, como se muestra en la Figura 12.

**Figura 12.**  
*Mezcla rápida aplicación de coagulante y polímero.*



Nota. Este proceso se realiza en la entrada del floculador.

## Floculación

La unidad de floculación es de tipo vertical, en la cual se favorece la formación de flocs, permitiendo la aglomeración de sustancias coloidales o sólidos suspendidos en el agua, esta unidad está compuesta por 4 divisiones internas, en la 3 división se le aplica soda cáustica, este es un alcalinizante del agua, que permite subir el pH del agua de 6.83 a 7.72 en promedio, cambiando el estado de oxidación del manganeso y removerlo de manera más fácil del agua. Esta unidad se ilustra en la Figura 13.

### Figura 13.

*Floculador.*



El tanque floculador; si bien su función principal no es contener sólidos, en este se acumulan sólidos que hacen necesario un lavado o purga periódica de esta unidad, en el sistema se realiza

este proceso aproximadamente cada mes, descargando estos lodos y mejorando la eficiencia de este.

### **Sedimentadores**

Los sedimentadores son estructuras diseñadas para facilitar la sedimentación de los flóculos formados en etapas previas del tratamiento; generalmente están compuestos por placas paralelas inclinadas a un ángulo de 60 grados, lo que favorece a la precipitación eficiente de las partículas aglomeradas. La Planta de Potabilización de El Reposo cuenta con dos unidades de sedimentación (como se ilustra en la Figura 14): una es un sedimentador convencional rectangular con paneles tipo colmena, y la otra es un sedimentador compacto circular, también equipado con estos mismos paneles.

Estas unidades de sedimentación son las principales receptoras de los lodos generados en el tratamiento, debido a esto, están equipadas en su parte inferior con válvulas de purga, que permiten liberar los lodos de manera periódica. En la planta de El Reposo, este proceso de descarga se realiza, en promedio, cada 8 a 10 horas, con una duración de entre 20 a 30 minutos. La frecuencia y duración de las purgas varían según las condiciones de turbidez y color del agua sobrenadante en los sedimentadores.

**Figura 14.**  
*Sedimentadores*



Sumado a las purgas diarias realizadas a los sedimentadores, es necesario realizar un lavado o un mantenimiento, que conlleva al descargue total del tanque sedimentador, este proceso genera un mayor volumen de descarga de lodos.

## Filtros

Los filtros de la planta están conformados por cuatro módulos de filtros rápidos de arena descendentes, como se logra evidenciar en la Figura 15, estos filtros tienen un lecho de filtración compuesto por antracita, arena silíceo y grava como medio de soporte, permitiendo obtener turbiedades por debajo de 1 UNT. Debido al gran porcentaje de sólidos retenidos en el lecho filtrante, este tiende a colmatarse afectando su rendimiento, por esta razón los filtros requieren de un retrolavado, que puede durar entre 5 y 8 minutos en promedio para cada unidad, este retrolavado se realiza con agua tratada del tanque elevado que se encuentra en las instalaciones de la planta.

### Figura 15.

*Filtros de arena de flujo descendente.*



## Tanque de recepción

Este tanque de recepción era el antiguo tanque de contacto de la planta, sin embargo, al aumentar el caudal de diseño de la planta, este ya no cumplía con las especificaciones técnicas para este proceso, por ello se dejó como un tanque de recepción que permite contener, el material filtrante que es arrastrado por flujo del agua filtrada, al final de este tanque se encuentra una canaleta Parshall que funcionaba como medidor de caudal de salida, la Figura 16 permite evidenciar esta unidad.

**Figura 16.**  
*Tanque de recepción.*



### **Tanque de Contacto**

El tanque de contacto es un tanque de almacenamiento en el cual se realiza la desinfección, este permite que el agua pueda actuar con el desinfectante durante un tiempo mayor a 20 minutos. en el sistema se realiza una desinfección con cloro gaseoso, el cual se descarga en el interior del tanque, cerca de la tubería de ingreso del agua filtrada como se evidencia en la figura 17.

**Figura 17.**  
*Aplicación de cloro gaseoso para desinfección*



### **Generación de lodos**

Los lodos producidos en la PPAP El Reposo es ocasionado principalmente por los sólidos presentes en el agua cruda y los químicos utilizados durante el proceso, los cuáles son: el policloruro de aluminio, el polímero aniónico y la soda cáustica.

El policloruro de aluminio se utiliza en el proceso de coagulación, la descarga de este varía de acuerdo con la turbiedad o color del agua cruda, la planta El Reposo al utilizar agua subterránea no presenta grandes variaciones en la dosificación de este producto, en el sistema se utiliza dos dosis fijas, una está destinada al arranque del bombeo de los pozos con una dosis de 36 mg/L, debido a que las bombas generan un arrastre de material aumentando la turbiedad y el color durante la primera hora de funcionamiento, y la dosis cuando el proceso se encuentra estabilizado es de 8 mg/L.

Por otro lado, el polímero aniónico es un floculante que permite ayudar el proceso de sedimentación ya que, aglomera los flocs formados por el proceso de coagulación, esta se mantiene con una dosis de 0.03 mg/L durante el tratamiento del agua, usualmente la dosis no varía sin importar el incremento de la turbiedad o color.

Por último, la soda cáustica es un producto alcalinizante utilizado para remover principalmente concentraciones de hierro y manganeso, la dosis utilizada para su funcionamiento es de 38 mg/L, estas no se modifican frecuentemente, su variación depende de las concentraciones de manganeso en el agua, las cuales suelen ser concentraciones constantes.

Dicho lo anterior, las unidades en las que se genera mayor cantidad de lodos en la planta son los sedimentadores, los filtros y los floculadores. Como se muestra en la Tabla 3, la unidad que presentó el mayor volumen de lodos durante el mes de agosto fue el sedimentador, con un 72.4% del total de lodos generados por la planta; le sigue el retrolavado de los filtros, que representó un 27.1%, mientras que el floculador contribuyó en menor proporción, con un 0.6%.

**Tabla 3.**

*Volumen de descargas de lodos por unidades.*

Agosto Día	Volumen de purgas Sedimentador [m <sup>3</sup> ]	Volumen de purgas Floculador [m <sup>3</sup> ]	Volumen de Retrolavado de filtros [m <sup>3</sup> ]	Total, Lavado
1	63		34,32	97,32
2	66,15		34,32	100,47

3	73,5		0	73,5
4	78,75		0	78,75
5	71,4		34,32	105,72
6	66,15		34,32	100,47
7	76,65		64,35	141
8	73,5		0	73,5
9	78,75		0	78,75
10	63		0	63
11	67,2		60,06	127,26
12	71,4		34,32	105,72
13	99,75	15,75	0	115,5
14	67,65		42,9	110,55
15	42		38,61	80,61
16	56,1		42,9	99
17	71,4		0	71,4
18	61,2		0	61,2
19	61,2		60,06	121,26
20	61,2		38,61	99,81
21	68,34		42,9	111,24
22	61,2		0	61,2
23	66,3		0	66,3
24	61,2		42,9	104,1
25	71,4		30,03	101,43
26	64,26		34,32	98,58
27	64,26		34,32	98,58
28	66,3		0	66,3
29	40,8		25,74	66,54
30	50,4		0	50,4
31	58,14		34,32	92,46
Promedio	65,89	15,75	24,63	91,03
Máximo	99,75	15,75	64,35	141
Mínimo	40,8	15,75	0	50,4
Porcentaje del agua de lavado al mes	72,4%	0,6%	27,1%	

Nota. Esta tabla se realizó con la información reportada por los operadores de la planta El Reposo

La Tabla 4 muestra el volumen promedio de lodo producido diariamente por la Planta de Potabilización desde el 1 de enero hasta el 31 de agosto de 2024, para evaluar la producción media diaria de lodos en este periodo, se calculó el promedio diario, que corresponde a 87.73 m<sup>3</sup>.

**Tabla 4.**

*Producción de agua y lodo generada en los procesos de retrolavado.*

FECHA	DETALLES DE PRODUCCION				
	HORAS TTMT0	CAUDAL PROMEDIO (L/S)	AGUA PRODUCIDA (M3)	LAVADO DE UNIDADES (M3)	EFICIENCIA PRODUCCION (SUMINISTRO)

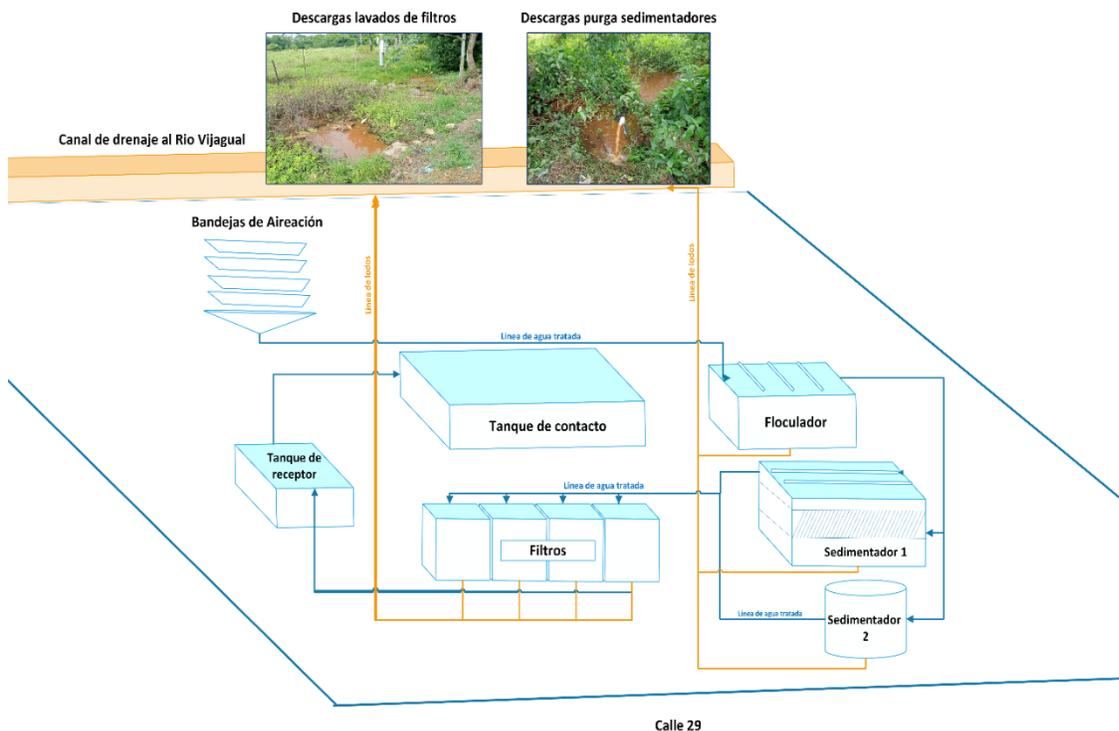
Enero	23,03	16,75	1389,03	89,15	93,59	6,41
Febrero	22,38	16,75	1307,20	80,07	88,18	6,08
Marzo	22,94	16,76	1221,57	68,84	83,07	6,57
Abril	22,57	16,78	1244,77	77,09	85,19	5,58
Mayo	20,29	17,00	1279,26	63,04	93,68	5,78
Junio	22,01	16,73	1277,01	72,03	88,83	6,03
Julio3	22,71	16,98	1152,14	68,08	90,94	6,52
Agosto	22,00	16,63	1314,15	91,03	88,02	6,23
PROM	22,56	16,72	1357,85	87,73	93,54	6,46
MIN	12,00	14,37	734,40	33,60	91,67	4,58
MAX	24,00	17,50	1512,00	220,50	95,49	14,58

Nota. Esta tabla se realizó con la información reportada por los operadores de la planta El Reposo

Este volumen de lodo es vertido en dos puntos sobre un canal de drenaje que alimenta al río Vijagual, ilustrado en la figura 18; En este esquema se muestra las imágenes de las condiciones en que se encuentra la fuente receptora.

**Figura 18.**

*Esquema de PPAP EL Reposo y vertimientos de estas.*



*esquema se realiza con las configuraciones actuales de la PPAP El Reposo.*

*Nota. Este*

La nueva PPAP El Reposo incluye en su diseño un tren de tratamiento de lodos, el cual estará compuesto por un tanque de recepción u homogeneización, un tanque de espesamiento y 4 lechos de secados (como se muestra en la figura 20).

El tanque de homogeneización operará con un volumen de 60 metros cúbicos, este contará con un sistema de recirculación del agua sobrenadante, que retornarán al inicio del tratamiento de agua y un sistema de succión que entregarán los lodos al tanque de espesamiento.

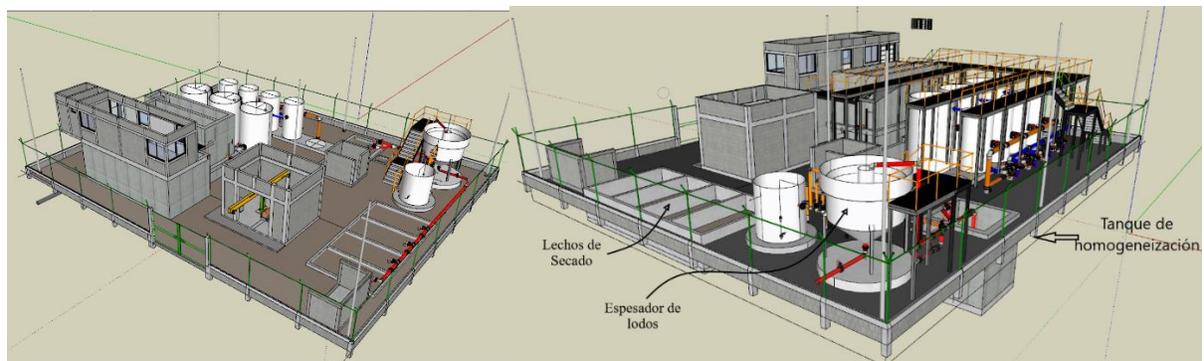
El tanque de espesamiento está proyectado para una capacidad de 12 metros cúbicos, este tratamiento se realiza de forma discontinua o por baches, en esta unidad también se le adicionará un acondicionamiento químico, que contribuya en la eficiencia de este proceso, los lodos decantados en esta unidad se derivan a los lechos de secado, y el agua clarificada retorna al inicio del tratamiento de agua.

Los lechos de secado tendrán unas dimensiones de 4 metros de largo, 2 metros de ancho y 1.45 metros de profundidad.

Una vez que los lodos de los lechos de secados estén empastados, estos se depositan en un cuarto de almacenamiento, de allí se derivan a darle uso o disponerse en el vertedero regional.

### Figura 19.

*Diseño de la nueva PPAP El Reposo y el tren de tratamiento de lodos.*



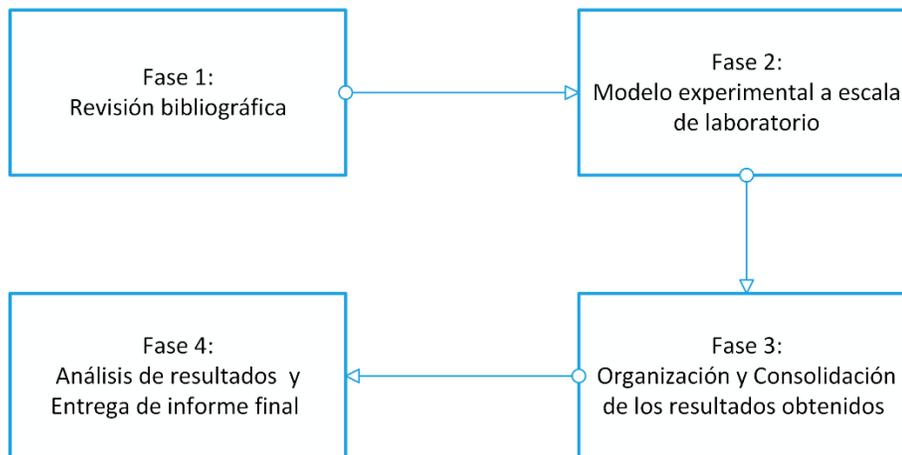
Nota: Este es el diseño preliminar de la nueva PPAP El Reposo, imágenes suministradas por el área de diseño de la empresa Aguas Regionales EPM.

Estas dimensiones fueron evaluadas en el análisis de producción de lodos de este trabajo.

## 5 Metodología

Este proyecto se realiza bajo un modelo experimental con enfoque cuantitativo, el cual se distribuye en cuatro fases, ilustradas en la Figura 20, posterior a esta se describe estas fases:

**Figura 20.**  
*Metodología del proyecto.*



La primera fase consta de una revisión bibliográfica, en bases de datos científicas, páginas gubernamental y repositorios de la empresa Aguas Regionales EPM S.A E.S.P, con el fin de desarrollar el marco teórico, la construcción de ecuaciones y procedimientos de ensayos de laboratorios, tales como ensayos de tratabilidad de agua potable, ensayos de tratabilidad para el espesamiento de lodos, índice volumétrico de lodos y otros ensayos de caracterización agua.

En la segunda fase se desarrolla el modelo experimental a escala de laboratorio, en el cual se realiza primeramente una breve caracterización tanto del agua cruda como de los lodos producidos en la planta de tratamiento, posteriormente se procede a realizar ensayos de tratabilidad o ensayo de jarras, para simular los procesos de pre-cloración, coagulación, floculación y sedimentación, se evalúa la eficiencia de este proceso midiendo los parámetros de Turbiedad, Color y pH al finalizar el ensayo. Para medir el volumen de lodo producido se hace el ensayo de sólidos sedimentables con un cono Imhoff. El ensayo de tratabilidad de lodos se hace similar el proceso de espesamiento con una metodología ensayo error, con el fin de establecer una guía de referencia

para las dosificaciones en el proceso de espesamiento. Las técnicas, métodos y equipos a utilizar en esta fase se muestran en la tabla 1.

**Tabla 5.**

*Método, técnica y equipos utilizados para los ensayos en la fase experimental.*

Ensayo	Método	Técnica	Equipo
Ensayo de Jarras	Mecánico y físico	NTC 3903	Floculador de 6 aspa PHIPPS & BIRD™
Sólidos sedimentables	Volumétrico	SM 2540 F	Cono Imhoff
Turbiedad	Nefelométrico	SM 2130 B	Turbidímetro 2100Q is HACH
pH	Electrométrico	SM 4500 B	pH metro HQ Series HACH
Color	Espectrofotométrico	SM 2120 C	Espec. DR 3900 HACH
Sólidos Totales	Físico	SM 2540-B	Balanza, Horno, Desecador.
Manganeso	Espectrofotométrico	Método PAN	Espec. DR 3900 HACH
Hierro	Espectrofotométrico	FerroVer	Espec. DR 3900 HACH

Nota. Los análisis se hacen de acuerdo con las diferentes técnicas aquí mostradas

En la tercera fase se realiza la consolidación, ajustes y organización de los resultados y materiales obtenidos durante la fase experimental. En esta etapa se pretende tabular la información obtenida en tablas de Excel y organizar imágenes u otros materiales entregables.

En la fase final se hace el análisis de los resultados, utilizando gráficos y tablas, en el que se pueda mostrar claramente, cuáles son los volúmenes de lodos generados en el tiempo, la relación entre dosis de los polímeros aniónicos y catiónicos y las turbiedades de los lodos, que quedarán consolidados en la entrega final.

### **Prueba de tratabilidad de lodos**

Las pruebas de tratabilidad se realizan conforme al procedimiento descrito por Gutiérrez J. et al. (2014), el cual tiene una mezcla rápida de 150 RPM durante 1 minuto, posteriormente se deja sedimentando por 60 minutos, esto en función con lo que sucede en el proceso de espesado.

## Muestreo

El muestreo realizado a las purgas es compuesto, con el objetivo de que este sea lo más representativo posible.

## Sitio del muestreo

Sitio de descarga de los sedimentadores en el canal donde se lleva a cabo el vertimiento.

## 6 resultados

### Muestra 1.

Con el objetivo de realizar un análisis preliminar se toma una muestra de los lodos provenientes de los sedimentadores, esta purga tuvo una duración de 5 minutos, se realiza una muestra compuesta recolectando dos litros de lodos cada minuto durante los primeros 4 minutos, a la cual se le realiza una caracterización fisicoquímica, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 6.

#### Tabla 6.

*Muestra 1 características de lodos.*

Características del lodo muestra 1		
SSed	500	mL/L
Turbiedad	371	UNT
Color	5300	UPC
pH	7,93	Und pH
Temperatura	28.4	°C
Manganeso	16,22	mg/L
Hierro	126	mg/L

A continuación, se realiza un ensayo de tratabilidad de lodos, con el fin de conocer la interacción y eficiencia del polímero aniónico en la concentración del volumen de sólidos sedimentables de la muestra, a los cuales se les aplicó unas dosis de este polímero de 5 a 30 mg/L, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.***Ensayo de tratabilidad preliminar*

Número de Jarra	1	2	3	4	5	6
Dosis de Polímero aniónico [mg/L]	5	10	15	20	25	30
SSed [mL/L]	350	300	400	400	400	400
Imagen						
Observaciones	En todas las jarras donde los tamaños de los flocs son muy grandes están inducidos por una sobredosificación del polímero, esto no permite una buena acomodación de las partículas en el sedimento, los mejores resultados se evidenciaron en la jarra 1 y 2.					

**Muestra 2**

Partiendo del ensayo preliminar se realiza un segundo muestreo de las descargas de los lodos de los sedimentadores, esta purga tuvo una duración de 15 minutos, de la cual se tomó una muestra compuesta, recolectando 2 litros de muestra cada 5 minutos desde el inicio la purga, al igual que la muestra 1 se le realiza una caracterización fisicoquímica de esta, el resultado de este análisis se puede evidenciar en la tabla 8.

**Tabla 8.***Características de lodos, muestra 2.*

Características del lodo muestra 2		
SSed	250	mL/L
Turbiedad	251	UNT
Color	3259	UPC
pH	8.01	Und pH
Temperatura	28.5	°C
Manganeso	5	mg/L
Hierro	122	mg/L

Una vez se sedimente todos los flocs, se realiza una analiza la caracterización del agua sobrenadante, estos resultados se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Características del agua sobrenadante sin polímero muestra 2.*

<b>Sobrenadante agua sin polímero</b>	
UNT	4.71
UPC	44
ph	7,65

De la muestra anterior, se realiza un ensayo de tratamiento de lodos con el fin de obtener una dosis óptima de polímero aniónico, aplicando este acondicionamiento en el canal receptor, en el cual se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 10, donde se varió la dosis de polímero entre 0.5 mg/L y 3 mg/L.

**Tabla 10.**

*Ensayo de tratabilidad muestra de lodo 2.*

<b>Numero de Jarra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Dosis de polímero [mg/L]	0,5	1	1,5	2	2,5	3
SSed (mL/L)	170	230	200	160	150	130
Color	17	21	5	7	11	11
Turbiedad	4.97	1.27	0.30	0.55	0.45	0.41
% de lodo sedimentado	20	8	20	36	40	48

**Figura 21.**

*Evidencias del ensayo de tratabilidad y la medición del IVL.*



### Muestra 3

La muestra de lodos se tomó de la purga de sedimentadores, la cual consistió en tomar 1 litro de lodo cada 2 minutos, esto con el fin de tener un volumen de lodo más representativo de estos con respecto a una descarga habitual, la duración de esta fue de 20 minutos, adicionalmente se tomó 5 muestras de lodos cada 5 minutos, desde el minuto 0 de la purga hasta los 20 minutos, para observar el cambio en la concentración de lodos con respecto al tiempo de la purga. A la muestra compuesta y a las 5 muestras puntuales de la descarga se les realizó la medición de los sólidos sedimentables, como se en la Tabla 11.

Además, se caracterizó el sobrenadante de la muestra compuesta, obteniendo una turbiedad de 5.7 UNT, un color de 63 UPC y un pH de 7.66.

### Figura 22.

*Muestras de lodos tomadas en la descarga de los sedimentadores.*

**Tabla 11.**

*Análisis de sólidos sedimentables de las descargas de lodos con respecto al tiempo de la purga.*

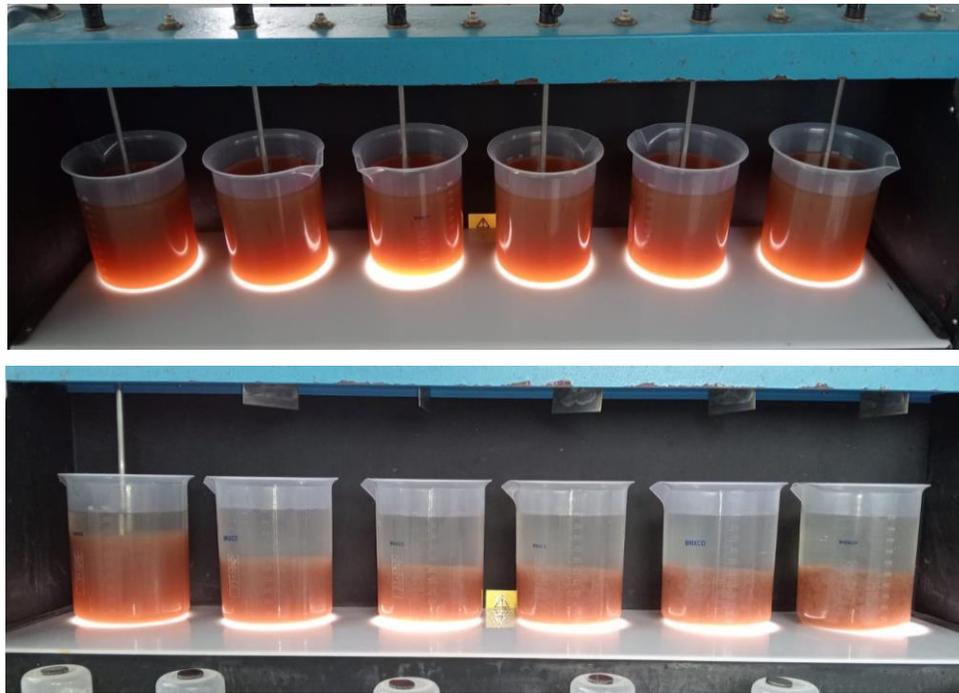
Número de Jarra	1	2	3	4	5	6
Tiempo de recolección [min]	Compuesta	0	5	10	15	20
SSed [mL/L]	150	900	130	125	100	98

**Muestra 4**

La muestra 4 se toma de manera similar a la muestra 3, se tomó 2 litros lodos cada 2 minutos, durante los 20 minutos de duración de la purga, a la muestra compuesta se le midió los sólidos sedimentables resultando en 230 mL/L, adicionalmente se caracteriza el agua sobrenadante, teniendo una turbiedad de 15.6 UNT, un pH de 8.13 y un color de 161 UPC.

Con el fin de realizar más pruebas de tratabilidad se realiza una combinación entre las muestras 3 y 4 de lodos (Tabla 12), para así simular un tren de tratamiento convencional de lodos que cuenta con un tanque de recepción de lodos, espesador y lechos de secados.

La combinación de estos lodos resultó en un nuevo lodo, con una concentración de sólidos sedimentables de 200 mL/L, de este volumen se retira el 75% de lodos, el restante se unifica y sobre estos se realiza el ensayo de tratabilidad de lodos con polímero aniónico y del 75% se realiza un ensayo de tratabilidad con fines de observar el comportamiento de estos al ser recirculados en la planta de tratamiento. Los SSed de este nuevo lodo más concentrado es de 900mL/L, en la figura 23 se muestran evidencias del ensayo de tratabilidad.

**Figura 23.***Ensayo de tratabilidad de lodos muestras 3 y 4.***Tabla 12.***Ensayo de tratabilidad de lodos, muestra 3 y 4.*

N° de Jarras	1	2	3	4	5	6
Dosis Polímero aniónico (mg/L)	1	2	3	4	5	6
SSed (mL/L)	500	500	460	450	470	490
Análisis físico del floc						
Sedimentación del lodo, en función de la dosis de polímero						

Después del ensayo de tratamiento empleado, se llevó a cabo un análisis detallado del sobrenadante de cada una de las jarras tratadas con polímero. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 13. Este análisis permitió evaluar la eficacia del polímero en la remoción de contaminantes, así como su impacto en las propiedades fisicoquímicas del sobrenadante.

**Tabla 13.**

*Análisis del sobrenadante de cada una de las jarras con polímero.*

Análisis del sobrenadante							
N° de Jarras	1	2	3	4	5	6	Sin Tratamiento
Turbiedad	1,76	1,35	1,67	1,73	2,04	2,61	14,6
Color	25	8	32	35	34	39	169
pH	8,23	8,13	8,1	8,09	8,09	8,09	8,37

Se llevaron a cabo pruebas de tratabilidad en el agua sobrenadante procedente del tanque receptor. Para dicho tratamiento, se evaluaron dos tipos de coagulantes, y se midieron diversos parámetros fisicoquímicos como turbiedad, color y pH. Los datos obtenidos de estas mediciones se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14.**

*Prueba de tratabilidad del agua sobrenadante.*

Tratabilidad de las aguas sobrenadantes provenientes del tanque receptor						
N° de Jarras	1	2	3	4	5	6
Polímero aniónico (mg/L)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Coagulante PAC-19 (mg/L)	18	16	14	12	10	8
Turbiedad	0,6	0,39	0,42	0,64	0,61	0,75
Color	7	9	9	7	8	9
pH	8,17	8,22	8,33	8,35	8,37	8,38

## Muestra 5

El análisis de la muestra 5, se realizó similar al procedimiento anterior, se midió los SSed del lodo, dando una concentración de 250 mL/L; esta muestra se dejó decantar sin adicionarle y se extrajo el agua sobrenadante, que representó cerca del 70% del volumen de la muestra, obteniendo un lodo más concentrado, obteniendo un volumen de lodo de sedimentado de 925 mL en un litro, a este lodo se le realizó una caracterización básica, la cual se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15.**

*Caracterización del agua decantada en el tanque de recepción.*

Caracterización		
Post-Tanque de recepción		
Turbiedad	1095	UNT
Color	10370	UPC
SSed	925	mL/L
Agua de la purga sin tratamiento		
SSed	250	mL/L

Se evaluó el comportamiento del polímero catiónico, como acondicionamiento químico en el proceso de espesado, los resultados se presentan en la Figura 24 y Tabla 16.

**Figura 24.**

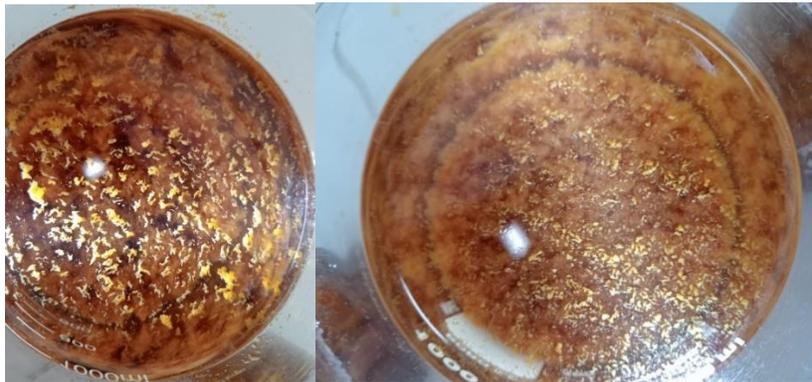
*Sedimentación de la prueba de tratabilidad, utilizando polímero catiónico*



**Tabla 16.***Prueba de tratabilidad de lodos, utilizando polímero catiónico.*

Nº de Jarras	1	2	3	4
Dosis Polímero Catiónico (mg/L)	6	9	12	15
SSed	520	520	500	550

Se evidenció sobre las muestras acondicionadas por este polímero, una nata en el espejo del agua, la cual afecta la calidad del agua sobrenadante, como se presenta en la Figura 25.

**Figura 25.***Impurezas en el espejo del agua, en la implementación de polímeros catiónicos.***Sólidos totales**

Se determina los sólidos totales, de acuerdo con el método estándar, a las muestras 3 y 4, obteniendo los siguientes resultados como se muestran en la tabla 17 y Figura 26.

**Tabla 17.***Sólidos totales muestras 3 y 4*

Sólidos Totales muestra 3		
Volumen de la muestra	50	mL
Peso crisol	49,3941	g
Peso crisol + muestra	49,4289	g
Peso de la muestra	0,0348	g
Sólidos Totales	696	mg/L
Sólidos Totales muestra 4		
Volumen de la muestra	50	mL

Peso crisol	51,4581	g
Peso crisol + muestra	51,5012	g
Peso de la muestra	0,0431	g
Sólidos Totales	862	mg/L

**Figura 26.**

*Sólidos totales muestras 3 y 4.*



A partir del combinado de la muestra 4 se analizan algunos parámetros de interés de acuerdo con el tipo de fuente y los químicos utilizados en el proceso, el resultado de estos se muestra en la Tabla 18, estos parámetros complementan el análisis que se ha venido realizando en este estudio, permitiendo reconocer el aluminio residual como un que recién aparece, pero que es de gran importancia dentro de este estudio.

**Tabla 18.**

*Caracterización del lodo generado en la PPAP El Reposo.*

Parámetro	Valor	Unidad
DBO5	17	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	152	mg/L
Manganeso	8,8	mg/L
Hierro	175	mg/L
Aluminio residual	28	mg/L

Nota: Este análisis fue realizado por el laboratorio de aguas de CORPOURABÁ, a través de la solicitud de la empresa Aguas Regionales EPM, en el anexo 2 se muestra más información de estos resultado.

### **Determinación del Índice Volumétrico de Lodos (IVL)**

Se determina el IVL de las muestras con la siguiente ecuación 1.

$$IVL = \frac{VLS [mL]}{SST \left[ \frac{mg}{L} \right] * 1000} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

IVL: Índice volumétrico de lodos

VLS: Volumen de lodo sedimentado

SST: Sólidos suspendidos totales.

La Tabla 19, muestra el IVL de cada una de las muestras, los SST se toma el valor presentado en la tabla 18, esta concentración se usa para todas las muestras, el VLS se toma del valor medido para SSed.

**Tabla 19.**

*Determinación de IVL*

ID de la muestra	SST (mg/L)	VLS (mL)	IVL (mL/g)
1	152	500	3.29
2	152	250	1.64
3	152	150	0.99
4	152	230	1.51
5	152	250	1.64

### Sólidos Totales en base húmeda

Con el fin de conocer cuál es el volumen generado por los lodos en base húmeda, se realiza el análisis de los sólidos totales sin ser secados al horno, solo se deshidrató mediante un filtro y bomba a vacío, para posteriormente determinar la masa de los sólidos retenidos en el filtro, los resultados del análisis se muestran en la Tabla 19 y en la Figura 27.

**Tabla 20.**

*Sólidos deshidratados en base húmeda.*

Sólidos deshidratados en base húmeda		
Volumen de la muestra	50	mL
Peso filtro húmedo	0.20	g
Peso filtro + muestra húmeda	0.65	g
Peso de la muestra	0.45	g
Sólidos Totales	9000	mg/L

**Figura 27.**

*Sólidos totales base húmeda muestra 4*



Se estima el tiempo de duración del secado del lodo en estos lechos, por medio de una simulación a escala de laboratorio, el montaje se realiza como el que se muestra en la Figura 28, se utiliza arena silíceica en el fondo, con el fin de mejorar el drenaje del lodo depositado aquí, se agregó 2 litros de lodo espeso, y se deja secar por 8 días, de acuerdo con lo evidenciado, el lodo al día 7, se encuentra lo suficientemente solidificado para ser manejado, con este experimento se permite determinar que el tiempo de residencia de los lodos en un lecho de secado debe ser mayor a 7 días, para poder ser recogido y almacenado, cabe resaltar que las condiciones climáticas pueden variar la duración del secado.

**Figura 28.**

*Secado solar del lodo al aire libre.*



Uno de los objetivos de este trabajo era recolectar lodos, simulando en tratamiento de aguas desde el laboratorio; esta estrategia se desarrolló inicialmente, aplicando las dosis de químicos antes mencionado, utilizando agua cruda del pozo planta, sin embargo, se obtuvo bajas concentraciones de lodos, lo que no permitió que este análisis por este método, el agua cruda empleada tenía las siguientes características:

- Turbiedad de 7.77 UNT
- Color de 144 UPC
- pH de 7.33
- SSed de 5 mL/L

El volumen de lodo producido de esta manera fue muy bajo, lo que dificultó el análisis mediante el método propuesto. Por esta razón, se optó por recolectar los lodos directamente de las descargas del sedimentador, para obtener una muestra más representativa, la Figura 29 presenta evidencias de este ensayo.

### Figura 29.

*Ensayo de tratabilidad de agua cruda.*



## 7. Discusión

El agua cruda del pozo de la planta, al ser un agua subterránea, contiene bajas concentraciones de sólidos suspendidos, esta cantidad es relativamente baja con respecto a las aguas superficiales, de la misma manera sucede con parámetros como la turbiedad y color (como

se puede evidenciar en la tabla 2), estas propiedades, particularmente la turbiedad se asocia directamente con la generación de lodos en un sistema de tratamiento (Smith, J., & Doe, A. 2024), teniendo en cuenta esta consideración se puede decir que la producción de lodos en la planta El Reposo es relativamente baja en relación a una planta donde se trate aguas superficiales, (Montoya, N. 2016), sin embargo, al observar las concentraciones de hierro y manganeso del agua de cruda de esta planta (Figuras 7 y 8), se observan altas concentraciones de estos metales, como consecuencia de lo mencionado anteriormente, se puede decir que, si bien la planta de tratamiento no genera un gran volumen de lodo, el hierro representó un papel importante dentro de este.

La planta de potabilización de El Reposo actualmente descarga 6.46% del volumen de agua que ingresa al sistema, es decir, 87.73 metros cúbicos en promedio diario, de acuerdo con la información suministrada por la empresa Aguas Regionales EPM en la Tabla 4. Este valor en comparación con el porcentaje medio del volumen de agua descargada diariamente en la PPAP Apartadó (la cual capta agua de una fuente superficial) es bastante grande, esta última planta solo descarga a diario el 1.6% del agua que ingresa al sistema, resaltando que la turbiedad promedio de este sistema es de 766 UNT, de conformidad con un estudio realizado por Messas, T. (2013), el volumen de lodo generado en una planta es del 1 al 3% del agua cruda tratada.

Este alto valor en el porcentaje de descarga lodos puede deberse a varias razones entre las que destacan:

- La PPAP trata un caudal promedio por encima del caudal máximo nominal proyectado para el buen funcionamiento del sistema, esto ocasiona que los tiempos de retención se acorten, y en algunas unidades como el sedimentador este tiempo juega un gran papel para el correcto funcionamiento del proceso de sedimentación.
- Las unidades de sedimentación no tienen tolvas que permitan concentrar más el lodo en la parte inferior de los tanques.
- El floc formado por este tipo de agua es bastante liviano y cuando no se purga con una frecuencia, este se suspende en toda la columna de agua, ya que su velocidad de sedimentación es baja.

En consecuencia, casi todas las problemáticas de la planta están relacionadas con las unidades de sedimentación, esto se ve reflejado en que el 72.4% del volumen de la descarga corresponden a las purgas de sedimentación (como se muestra en la tabla 3).

Las descargas realizadas por estos lodos al canal de drenaje que conduce al río Vijagual (figura 18), ha tenido un impacto sobre este canal, principalmente porque ha venido cambiando las características físicas que este originalmente tenía, la descarga de estos lodos contiene un porcentaje importante de sedimentos, lo que afecta directamente la profundidad del canal, debido a ello también se modifica la dinámica biológica alrededor de este. La calidad de este lodo aunque no es considerado como peligroso, tiene algunas repercusiones ambientales, pues tiene altas concentraciones de aluminio residual del coagulante y una alta concentración de hierro como se reveló en la Tabla 18, estas componentes son perjudiciales para la salud ambiental y humana, como lo expresó Wand, H et al (2024) en su revisión de las consecuencia ecotoxicológicas asociadas a estos vertimientos, el cual mostró que se han encontrado en diferentes estudios efectos nocivos de estas agua sobre la fauna y flora acuática, efectos de tipo citotóxicos, mutagénicos y cancerígenos.

Para el análisis de producción de lodos PPAP se tomó las descargas de los sedimentadores, debido a la dificultad que implicaba producir estos lodos desde a escala laboratorio, por otro lado, no se pudo sacar lodos de otras unidades, ya que el retrolavado de los filtros se realizan mayormente en las noches, por lo que era inviable realizar este muestreo, y teniendo en cuenta que el porcentaje de lodos generados a diario por las unidades de sedimentación son del 76.2%, se decide solo trabajar con estos.

La prueba de tratabilidad del lodo tomado en la muestra 1, sirvió para identificar las posibles dosis de polímero aniónico, en este ensayo con un lodo que, si bien no estaba tan concentrado, contenía un volumen de lodos sedimentables muy por encima del promedio, esta prueba se realizó teniendo en cuenta el procedimiento realizado por Gutiérrez-Rosero, J. et al. (2014), aplicando unas dosis de 5 a 30 mg/L (tabla 7), sin embargo, se logró evidenciar que de las jarras de la 3 a la 6, hubo una sobredosis de polímero, manifestándose con formación de flocs grandes, los cuales, no se producía una buna sedimentación, pues quedaba muchos espacios entre estos, en el caso de las jarras 1 y 2, al igual que los anteriores tuvieron una formación de floc rápida, no obstante, el tamaño

de estos flocs fueron adecuados, tanto así que permitieron tener una mejor sedimentación, siendo la jarra 2 de 10 mg/L la que tubo mejor sedimentación.

Se analizó las concentraciones de hierro y manganeso de esta muestra, utilizando reactivos para determinar hierro y manganeso de la marca Hach, en el cual dio como resultado que este lodo tiene una alta concentración de hierro y manganeso como era de esperarse debido a la fuente, no obstante, cabe resaltar la alta concentración de hierro, que se deja ver por el color rojizo de los lodos, este análisis se realizó por el método de espectrofotometría, y las concentraciones de estos metales eran mucho mayor a lo que este método lo permitía, por lo tanto, estos valores tienen un nivel de incertidumbre alto.

La caracterización de la muestra 2 es proporcional a la 1, aunque es evidente la reducción de los parámetros medidos, debido a la reducción de la concentración del lodo, debido a que el tiempo de purga en esta muestra fue más prologando, al ser una muestra compuesta la concentración de este se reduce notoriamente, adicionalmente se le realiza un análisis de los parámetros básicos, al agua sobrenadante, con el fin de observar su calidad para el retorno al sistema de tratamiento (tabla 10), estas características permiten inferir que el agua tiene condiciones adecuadas para ser recirculada en el sistema sin necesidad de adicionar más dosis de coagulante u otro químico, ya que tiene características similares al agua cruda recibida por el sistema, e incluso es mejor que esta.

En el ensayo de tratabilidad de lodos las dosis se aplicaron de 0.5 mg/L a 3 mg/L, esto teniendo en cuenta la experiencia del pedido anterior, se puede ver que las dosis óptimas de este ensayo fue 3 mg/L el cual permitió reducir el VLS de 230 mL a 130 mL en un litro, lo que es correspondiente a un 48% de eficiencia en la deshidratación con respecto a los SSed iniciales sin polímero.

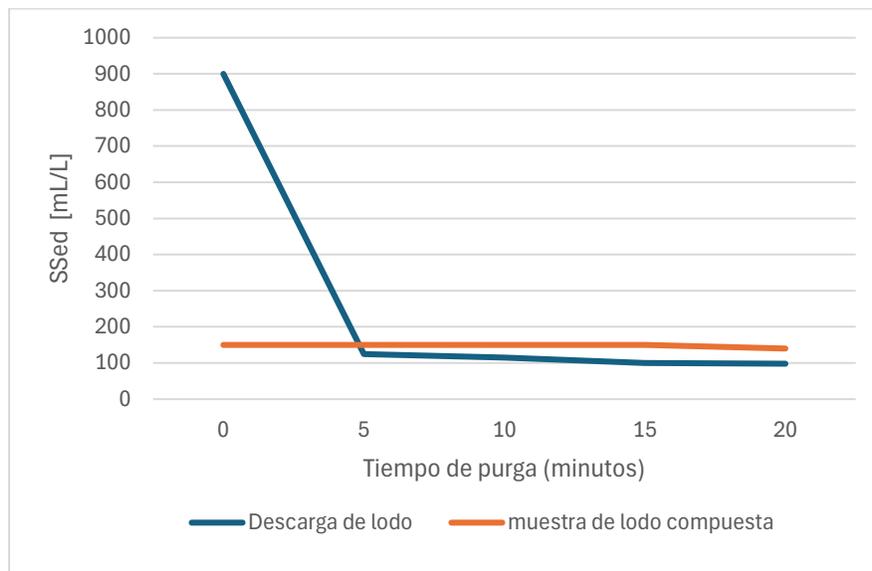
Como se ha evidenciado la concentración de lodo de estas descargas han sido bajas, por lo que se sugirió establecer una nueva metodología, que consiste en dejar que el lodo se decante sin polímero durante 1 hora, y posteriormente se retira el agua sobrenadante, el resto se acumula para realizar un espesado de estos con acondicionamiento químico, esto se asemeja más a lo que

sucedería en un tratamiento de lodos. Esto también valida los resultados que se obtengan en el espesamiento de las siguientes muestras.

A partir de lo observado en los ensayos realizados con la muestra 3 (figura 29), se tiene que los lodos concentrados de la purga se descargan durante los primeros 5 minutos, posterior a ello se tienen unos lodos con una concentración de sólidos sedimentables menores al 13%, esto implica que durante los siguientes 15 minutos se está descargando un gran porcentaje de agua, con un lodo cerca del 10%. La figura 30, representa gráficamente este comportamiento.

**Figura 30.**

*Concentración del lodo en función del tiempo de una descarga de lodos de sedimentadores.*



Los SSed de la muestra fueron de 150 mL/L, valor esperado teniendo en cuenta la gráfica anterior, ya que, al prologarse la descarga, la concentración de lodo de la muestra compuesta se diluye, debido a lo dicho anteriormente, se analizó el agua sobrenadante de la muestra compuesta sin polímero al igual que los sobrenadantes de las muestras anteriores, pueden ser recirculadas a la planta debido a sus buenas características en comparación con el agua cruda.

Los sólidos sedimentables (muestra 4), fue de 230 mL/L, el sobrenadante no tuvo la misma calidad que los anteriores, esto puede asociarse a que el análisis de esta muestra se realizó 5 días después de haberse tomado la muestra.

La prueba de tratabilidad de lodos realizada de la forma mencionada en los resultados, la cual dio un resultado satisfactorio, ya que, es este punto se encontró la curva de dosis óptima con esta concentración de lodo, a la cual consideramos como representativa de una purga normal diaria de la planta El Reposo, dando una dosis óptima de 3 mg/L, ya que, con mayor dosis se evidencia un floc de mayor tamaño que no permite una buena sedimentación, y por debajo de esta dosis el floc, es bastante liviano, que si bien presenta una buena sedimentación, con el menor contacto se perturba afectando el sobrenadante, la tabla 13 denota la apariencia de estos.

Al realizar el análisis de tratabilidad del agua sobrenadante, se puede observar en la Tabla 14 que las características de esta agua indican que la dosis óptima de coagulante es de 16 mg/L. Sin embargo, aunque esta dosis es bastante efectiva, requiere una mayor cantidad de producto, lo que incrementa el costo del tratamiento. En esta planta se pretende mantener una turbiedad del agua sedimentada cercana a 1 NTU. Para lograr esto, una dosis de 8 mg/L de coagulante es eficiente, ya que alcanza este valor y reduce el costo del tratamiento en un 50% asociado a este producto. Esta es la dosis que se aplica actualmente en el proceso, lo que significa que al recircular el agua del tanque de recepción no es necesario aumentar la dosis del tratamiento.

La Tabla 13 muestra las características del agua sobrenadante con diferentes dosis de polímero aplicadas en el proceso de espesado del lodo. Al analizar estas dosis, se evidencia que la adición de polímero también mejora la calidad del agua sobrenadante, reduciendo la turbiedad en más del 82%; esto significa que, al igual que el agua sobrenadante del tanque de recepción, el clarificado del tanque de espesamiento también puede ser recirculado al inicio del sistema de tratamiento de agua potable, sin alterar las condiciones del tanque de sedimentación.

Con el fin de evaluar la eficacia de otros productos que ayuden en el proceso de espesamiento, se evaluó la eficiencia de un polímero catiónico, el cual mostró resultados positivos con dosis por encima de los 6 mg/L, como se evidencia en la Figura 21 y en la Tabla 19. En este

análisis, la dosis óptima correspondió a 12 mg/L, que tuvo un volumen de sedimentación de 500 mL/L. Adicionalmente, se evidenciaron impurezas en el espejo de agua, las cuales, al momento de recircular el agua a la planta, podrían afectar su calidad. Considerando esto y que las dosis de polímeros usadas son bastante altas, se estima que el producto más adecuado para el tratamiento de lodos es el polímero aniónico. De acuerdo con Aldaco G. y Hiram J. (s.f.), este tipo de polímero, con cargas iónicas negativas, tiende a ser mucho más eficiente en aguas con iones metálicos, como es el caso del agua subterránea de la planta El Reposo. Es por ello por lo que este proceso con este producto químico fue más eficiente. Con el fin de relacionar la información obtenida durante las pruebas de tratabilidad de lodos, se toma la dosis optima en cada ensayo y se relación final de los sólidos sedimentables, en el caso las muestras en las que el polímero se aplicaría en el proceso de espesado se tienen en cuenta el volumen aportado por cada jarra al espesamiento y el volumen de espesado, dando como resultado unos SSed final, con respecto al volumen inicial del lodo, estos valores se muestran en la tabla 20.

**Tabla 21.**

*Análisis de la eficiencia de las pruebas de tratabilidad de las muestras.*

ID de la muestra	SSed (mL/L)	Dosis de Polímero mg/L	SSed Final	Volumen descargado m <sup>3</sup>	Volumen de lodo espesado	% de agua recirculada
Aplicando polímero en el tanque de recepción						
1	500	10	300	87,73	26,32	70
2	250	3	130	87,73	11,40	87
Aplicación del polímero en el tanque de espesado						
3	200	4	110	87,73	9,65	89
4						
5	230	12	150	87,73	13,16	85

De las muestras tomadas en este análisis solo se tuvo en cuenta las muestras 3 y 4, pues su muestreo no tuvo intermitencias, y el tiempo de purga, fue de 20 minutos, (la duración normal de una purga en este sistema), adicionalmente se toma la información mostrada en la tabla 21, la cual muestra un buen resultado con respecto al porcentaje de recirculación de agua clarificada, teniendo en cuenta la dosis aplicada, el tipo de polímero y el lugar de aplicación, se define esta como la representativo el análisis realizado a la muestra 3 y 4.

El IVL de las muestras de lodos presentados en la Tabla 19, permiten inferir que el lodo tiene una muy buena sedimentación, este resultado obedece a la gran concentración de coagulante y polímero residual del proceso de potabilización, de acuerdo con Ferrara & Ramírez (2013), un lodo con excelente sedimentabilidad y compactación, debe tener un IVL menor a 80 mL/g, en nuestro análisis todos los IVL estuvieron por debajo de 4 mL/g, lo que refuerza el argumento dado anteriormente.

Dicho lo anterior el volumen de lodo espeso generado a diario por la planta es de 9.65 metros cúbicos, partiendo de que la planta descarga cerca de 87.73 metros cúbicos diario en promedio, es volumen debe ser contenido por los lechos de secado, de acuerdo con el dimensionamiento de estos, pueden contener 11.6 metros cúbicos cada uno, para un total de 46.4 metros cúbicos, es decir, que en un módulo puede descargarse la totalidad de lodos generados a diario.

La tabla 17 muestra el resultado del análisis de sólidos totales para la muestra 3 y 4, para continuar analizando estos sólidos se toma un promedio de ellos, se determinan el volumen de lodo secos producidos por cada descarga.

$$ST_{PR} = \frac{ST_{m3} + ST_{m4}}{2} = \frac{696 \frac{mg}{L} + 862 \frac{mg}{L}}{2} = 779 \text{ mg/L}$$

*Peso del Lodo seco generado por la PPAP El Reposo en un día:  $L_{SR}$*

$$L_{SR} = 779 \frac{mg}{L} * 87730 \text{ L} * \frac{1Kg}{1.000.000mg} = 68.34Kg$$

Donde:

$ST_{PR}$ : Promedio de Sólidos Totales

$ST_{m3}$ : Sólidos totales muestra 3

$ST_{m4}$ : Sólidos totales muestra 4

$L_{SR}$ : Lodos secos generados.

Se determina la concentración de sólidos en base húmeda, como se muestra en la tabla 20, que corresponderían a los sólidos deshidratados durante un día en los lechos de secados, con este

valor se determina la cantidad de lodos que se generaría en base húmeda para planta El Reposo, como se muestra a continuación

$$L_{hR} = \text{Peso de Lodo humedo} \left( \frac{mg}{L} \right) * \text{Volumen de lodo producido (L)} * \frac{1Kg}{1.000.000mg}$$

$$L_{hR} = 9000 \frac{mg}{L} * 87730 L * \frac{1Kg}{1.000.000mg} = 790 Kg$$

Teniendo en cuenta este último valor, que representa un lodo deshidrato por acción de la filtración, se determina el volumen de agua resultante del proceso de lechos de secados, considerando la densidad del agua lodos como 1 kg/L, se tiene que el volumen de lodos descargados al lecho de secado fue de 9650 L, que con la consideración se puede entender como 9650 Kg, de los cuales 790Kg se retuvieron en el lecho, el agua filtrada puede ingresar al sistema nuevamente, es decir, 8860 Litro correspondiente al 10.1% de la descarga total del lodo, esto se suma al 89 % que se recirculo de los procesos de espesamiento y el tanque de recepción, para un total del 99.1% de recuperación de las perdidas por descarga, esto sin considerar algunas algunas perdidas técnicas o por evaporación en los lechos de secado.

El lodo generado en la planta de tratamiento de El Reposo tiene una gran concentración de hierro, aproximadamente el 22% de los solidos totales, de acuerdo con la caracterización mostrada en la tabla 18, este valor junto con las concentraciones de aluminio y manganeso, son similares a la encontrada en la literatura, por los autores Zhu et al. (2019) y Qu et al. (2019). Teniendo en cuenta estas propiedades se puede decir que este lodo puede ser aprovechado como material para la construcción, particularmente para la elaboración de ladrillos entre otros usos.

## 8. Conclusiones

El análisis realizado sobre el tratamiento de agua en la planta de potabilización El Reposo revela que el agua cruda, al ser captada de una fuente subterránea, presenta altos niveles de hierro y manganeso, esto implica un desafío significativo para el tratamiento. En este contexto, se encontraron lodos con altas concentraciones de hierro, manganeso y aluminio residual (procedente del coagulante utilizado en el sistema), la descarga de estos lodos en fuentes de aguas superficiales puede generar efectos negativos para la salud humana y ambiental, por ello, se hace necesaria una gestión adecuada de estos residuos.

A lo largo de este trabajo, se ha comprobado que, aunque el agua captada tiene bajas concentraciones de sólidos suspendidos, la planta genera un porcentaje de descarga alto de lodos en comparación con plantas que procesan aguas superficiales, esto se debe principalmente a algunas fallas de diseño de las unidades de sedimentación, los lodos producidos en esta unidad corresponden al 72.4% del volumen total.

El volumen de lodo producido por la planta de tratamiento a diario es de 87.73 m<sup>3</sup>, estos lodos tienen una concentración de sólidos sedimentables entre 150 mL/L y 230 mL/L, con unas descargas de 20 minutos, estas variaciones se presentan principalmente por el periodo de ejecución de las purgas.

Las pruebas de tratabilidad realizadas han permitido identificar dosis óptimas de polímeros, tanto aniónicos como catiónicos, para el espesamiento de lodos, evidenciando que el polímero aniónico es el más efectivo en el contexto de la planta. Los resultados muestran que una dosis de 3-5 mg/L es ideal para optimizar el espesamiento de los lodos, mientras que el análisis del agua sobrenadante indica que una dosis de 8 mg/L de coagulante puede mantener la turbidez por debajo de 1 NTU, reduciendo significativamente los costos del tratamiento.

En términos de manejo de lodos, la implementación de un sistema de tratamiento que permita la decantación inicial sin adición de polímeros, seguido por el espesador en el cual, se requiriese de un acondicionamiento químico con polímero aniónico, para mejorar la eficiencia del

proceso de espesamiento; permite reducir el porcentaje de lodos producidos en el sistema de 87.73m<sup>3</sup> a solo 9.65 m<sup>3</sup> y la implementación de las unidades de lechos de secado convierte este ultimo volumen a solo 790Kg de lodo solidificado húmedo.

### Referencias

Aldaco G, Hiram J. (s.f.). *Teoría básica para el diseño de una planta potabilizadora (coagulación-floculación)*, Tesis Digitales, 8773, Biblioteca Digital, Universidad de Sonora, México.

Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016). *Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R' concept*. *Journal of Cleaner Production*, 124, 1-13. <https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.1007/s13762-023-05338->

Amador, A., Veliz, E., & Bataller, M. (2014). *Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones*. *Revista CENIC*, 46, 1–10. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>

Barakwan RA, Trihadiningrum Y, Bagastyo AY (2019) *Caracterización de lodos de alumbre de la planta de tratamiento de agua de Surabaya*. Indonesia. *J Ecol Eng* 20(5):7–13. <https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.12911/22998993/104619>

Betancur, T. (2023). *Potencial de las aguas subterráneas*. Universidad de Antioquia. Recuperado de [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/37051/1/BetancurTeresita\\_2023\\_PotencialAguasSubterranas.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/37051/1/BetancurTeresita_2023_PotencialAguasSubterranas.pdf)

Castro-Jiménez, C. C., Saldarriaga-Molina, J. C., & García, E. F. (2024). Physical-chemical characterisation of an alum-based water treatment sludge in different raw water turbidity scenarios. *Heliyon*, 10(17).

Corporación Autónoma Regional de Urabá. (s.f.). *Caracterización física hidrogeología*. Corpourabá. <https://corpouraba.gov.co/wp-content/uploads/Cap-2.3.-Caracterizacion-fisica-hidrogeologia.pdf>

Corregimientos de Antioquia. (s.f.). *Corregimiento El Reposo*. Corregimientos de Antioquia. <https://corregimientos.antioquia.gov.co/corregimiento-el-reposo/>

Fernández Montes, Y. (2022). *Estudio del potencial aprovechamiento de los lodos de la PTAP Progresar ESP*.

Ferrara-Giner, Griselda, & Ramírez, Armando. (2013). *Análisis de la sedimentabilidad de los lodos biológicos producidos en un RCS durante la desnitrificación de un efluente de un biorreactor de crecimiento adherido*. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 28(1), 37-44. Recuperado de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652013000100005&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652013000100005&lng=es&tlng=es).

Gutiérrez-Rosero, J. A., Ramírez-Fajardo, Á. I., Rivas, R., Linares, B., & Paredes, D. (2014). *Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua*. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 13-27.

Hernández Arboleda, S., (2022)., *Alternativa para la remoción de Manganeso (Mn) presente en el agua de la planta de producción de agua potable del corregimiento el Reposo mediante la evaluación de sus parámetros fisicoquímicos, en la empresa AGUAS REGIONALES EPM S.A. E.S.P.* [Ingeniería Bioquímica]. Universidad de Antioquia, Carepa-Antioquia, Colombia.

Messias, T. G. (2013). *Evaluación ecotoxicológica de lodos generados por una estación de tratamiento de agua*. Doctorado, Universidad de São Paulo.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (n.d.). Anexo 3: *Tecnologías de tratamiento de lodos*. Recuperado de <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/anexo-3-tecnologias-de-tratamiento-de-lodos.pdf>

Municipio de Apartadó. (2019). *Diagnóstico del Plan de Ordenamiento Territorial*. Antioquia Datos. [https://www.antioquiadatos.gov.co/wp-content/uploads/2022/07/Plan-de-ordenamiento/APARTADO/POT%20DEROGADO%20DIC\\_2019/Diagn+%C2%A6stico/DIAGNOSTICO%20Vo.pdf](https://www.antioquiadatos.gov.co/wp-content/uploads/2022/07/Plan-de-ordenamiento/APARTADO/POT%20DEROGADO%20DIC_2019/Diagn+%C2%A6stico/DIAGNOSTICO%20Vo.pdf)

Nayeri, D., & Mousavi, S. A. (2022). *A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge*. *Journal of Environmental Management*, 319, 115649.

Qu, Z., Wu, Y., Zhu, S., Yu, Y., Huo, M., Zhang, L., ... & Wang, Y. (2019). *Green synthesis of magnetic adsorbent using groundwater treatment sludge for tetracycline adsorption*. *Engineering*, 5(5), 880-887.

Montoya Urango, N., (2016). *Alternativas de disposición de lodos provenientes de la Planta de tratamiento de agua potable del municipio de Apartado*. [Especialización Evaluación Ambiental De Proyectos] Universidad Manuela Beltrán.

Nayeri, D., & Mousavi, S. A. (2022). *A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge*. *Journal of*

Quon, H., Jiang, S. (2023). *Toma de decisiones para la implementación de fuentes de agua no tradicionales: una revisión de los desafíos y las posibles soluciones*. *npj Clean Water* 6 , 56. <https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.1038/s41545-023-00273-7>

Rastetter, N., & Gerhardt, A. (2016). *Toxic potential of different types of sewage sludge as fertiliser in agriculture: ecotoxicological effects on aquatic, sediment, and soil indicator species*. *J Soils Sediments*, 17(1), 106–121. <https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.1007/s11368-016-1468-4>

Shome, S., Venkatesan, D., & Aravind Kumar, J. (2022). *Role of Water/Wastewater/Industrial Treatment Plants Sludge in Pollutant Removal*. En E. Lichtfouse, S. S. Muthu, & A. Khadir (Eds.), *Inorganic-Organic Composites for Water and Wastewater Treatment*. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes. Springer, Singapore. [https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.1007/978-981-16-5916-4\\_9](https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.1007/978-981-16-5916-4_9)

Smith, J. (2023). *Environmental impacts of urbanization*. En N. Editor (Ed.), *Handbook of Environmental Science* (pp. 123-145). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66382-1\\_64-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66382-1_64-1)

Souza, A. C. Z., Santos, J. E., & Marin-Morales, M. A. (2024). *Ecotoxicological aspects and environmental implications of the use of water and sewage treatment sludges*. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 21, 3527–3552.

T. Okuda, W. Nishijima, M. Sugimoto, N. Saka, S. Nakai, K. Tanabe, et al., *Eliminación de aluminio coagulante de los residuos del tratamiento del agua mediante ácido*. *Water Res.* 60 , 75–81 (2014)

Ulloa Gutiérrez, D., (2022). *Estimación y análisis de la producción de lodos provenientes de la planta de producción de agua potable del municipio de Apartadó*. [Ingeniería Bioquímica]. Universidad de Antioquia, Carepa Antioquia, Colombia.

Wang, H., Zhang, Y., Rong, X., Zhou, X., Fei, J., Peng, J., & Luo, G. (2024). *Biochar and organic fertilizer applications enhance soil functional microbial abundance and agroecosystem multifunctionality*. *Biochar*, 6(3). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00296-w>

Zhang, Y., Wang, H., Rong, X., Zhou, X., Fei, J., Peng, J., & Luo, G. (2019). Environmental impacts of urbanization. *Journal of Environmental Management*, 245, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.049>

Zhao, Y., Nzihou, A., Ren, B., Lyczko, N., Shen, C., Kang, C., & Ji, B. (2021). *Waterworks sludge: An underrated material for beneficial reuse in water and environmental engineering*. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 4239-4251.

Zhu, S., Lin, X., Dong, G., Yu, Y., Yu, H., Bian, D., ... & Huo, M. (2019). *Valorization of manganese-containing groundwater treatment sludge by preparing magnetic adsorbent for Cu (II) adsorption*. *Journal of environmental management*, 236, 446-454. *environmental management*, 319, 115649.

## Anexos

### Anexo 1.

Caracterización del agua cruda de la PPAP Ubicada en El Reposo desde el año 2016 al año 2023, realizada por el laboratorio de aguas de CORPOURABÁ, en solicitud de la empresa Aguas Regionales EPM.

NUFUS	FECHA DE LA MEDICIÓN	PH	TEMPERATURA [°C]	SÓLIDOS TOTALES [mg/l]	CONDUCTIVIDAD [uS/cm]	TURBIEDAD [UNT]	COLOR REAL [Pt-Co]	COLIFORMES TOTALES [NMP/100 ml]	E. COLI [NMP/100 ml]	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO - BOD [mg/l]	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO - DQO [mg/l]
PLANTA DE TRATAMIENTO	12/01/2016	6,87	25,5	222	350,2	75,8	71,23	40	40	20	4,22
GRIFO POZO PROFUNDO PLANTA DE TRATAMIENTO	22/06/2016	7,59	26,2	317	382,1	1243	137,86	127	127	1,4	81
GRIFO POZO PROFUNDO PLANTA DE TRATAMIENTO	15/11/2016	7,22	24,4	246	379,5	106	31,3	1	1	1,5	50
PLANTA DE TRATAMIENTO REPOSO - SISTEMA DE ADUCCIÓN	12/01/2017	6,87	25,5	222	350,2	75,8	71,23	40	20	1,4	<50
SALIDA DE GRIFO, POZO PLANTA DE TRATAMIENTO DEL MUNICIPIO DEL REPOSO	18/04/2017	7,23	26,1	290	393,2	618	50,2	0	0	1,5	50
SALIDA GRIFO POZO, PLANTA DE TRATAMIENTO MUNICIPIO DE REPOSO	7/07/2017	6,88	25,1	316	422,9	87	337,8	5,2	<1	1,39	<50
SALIDA GRIFO POZO, PLANTA DE TRATAMIENTO MUNICIPIO DE REPOSO	25/09/2017	6,51	25,1	264	365,7	1,08	96,8	1	<1	<1,5	<50
ENTRADAS BANDEJAS DE AIREACIÓN, PLANTA DE TRATAMIENTO REPOSO	20/02/2019	6,7	27,9	12	444	63	81,07	8,5	1	1,5	50
ENTRADAS BANDEJAS DE AIREACIÓN, PLANTA DE TRATAMIENTO REPOSO	4/04/2019	6,98	28	41	437	64,4	122,84	1	1	1,5	50
ENTRADAS BANDEJAS DE AIREACIÓN, PLANTA DE TRATAMIENTO REPOSO	18/06/2019	6,82	28,3	21	420	100	108	98,7	1	3,1	50
ENTRADAS BANDEJAS DE AIREACIÓN, PLANTA DE TRATAMIENTO REPOSO	7/02/2020	7,51	27,8	71	210,8	126	11,33	22	2	1,5	50
ENTRADAS BANDEJAS DE AIREACIÓN, PLANTA DE TRATAMIENTO REPOSO	14/04/2020	6,75	27,7	17	384,8	124	27,3	12,1	1	1,5	59
TANQUES BANDEJAS DE AIREACIÓN, PLANTA DE TRATAMIENTO DEL REPOSO	10/06/2020	6,9	27,3	10	389,1	92,7	155,2	1	<1	1,5	50
BANDEJAS DE AIREACIÓN, PLANTA DE TRATAMIENTO DEL MUNICIPIO DEL REPOSO	30/08//21	6,95	25	29	442,4	148	37,77	1	1	1,5	50
POZO PLANTA, PLANTA DE TRATAMIENTO DEL REPOSO	18/02/2022	6,89	27,9	37	378	85,7	208,2	1	1	1,5	50
POZO PLANTA, PLANTA DE TRATAMIENTO DEL REPOSO	26/09/2022	5,8	26,1	19	351,9	74,2	63,6	1	1	1,5	
POZO COLEGIO, PLANTA DE TRATAMIENTO CORREGIMIENTO REPOSO	15/03/2023	7,67	28,1	40	448,3	3,75	20,20	312,3	1	1,5	30
POZO PLANTA DE TRATAMIENTO CORREGIMIENTO REPOSO	12/12/2023	6,93	23,5	9	363,4	77,1	10,31	1	1	1,5	30

### Anexo 2

Los resultados de la caracterización de los lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable ubicada en El Reposo fueron obtenidos a través de un análisis realizado por el laboratorio de aguas de CORPOURABÁ, a solicitud de la empresa Aguas Regionales EPM. Este estudio permitió identificar algunas propiedades fisicoquímicas de los lodos. Además, en el informe se detallan los métodos utilizados para este análisis, lo que incluye procedimientos estandarizados para asegurar la precisión y fiabilidad de los resultados.

DATOS RECEPCIÓN DE LA MUESTRA							
Fecha / Hora de Recepción:	2024-09-12 / 14:12:00	Tipo de muestra:	Sedimento	Clase de muestra:	Lodo		
INFORMACIÓN DE MUESTREO							
Código	Sitio de Muestreo	Fecha / Hora	Tipo	Responsable			
0430924	Purga Sedimentador Resposo	2024-09-06/14:30:00	Puntual	USUARIO: Luis Alfonso Otero moreno			
Plan y Procedimientos de Muestras Utilizados							
No Aplica.							
Condiciones Ambientales durante el Muestreo							
No Aplica.							
Datos de Campo							
No Aplica.							
INFORMACIÓN Y RESULTADOS DEL ANÁLISIS							
Parámetro	Método Analítico	Tecnica	Valor	Valor Adm.	Incertidumbre (+/-)	Unidad (Valor e incertidumbre)	F. Aná.
DBO <sub>5</sub> <sup>(1)</sup>	SM 5210 B, ASTM D888-18 e1 Método C	Incubación a 5 días y Sensor Luminiscencia	17	NA	0,92	mg O <sub>2</sub> /L	2024-09-13
Sólidos Suspendidos Totales	SM 2540 D	Secado a 103-105°C	152	NA	3,91	mg/L	2024-09-14
Manganeso <sup>(1)</sup>	Digestión - SM 3111 B	Digestión Microondas HPR-EN-33 - Digestión Microondas - Llama Directa Aire - Acetileno.	8,8	NA	NR	mg Mn/L	2024-09-27
Hierro	Digestión - SM 3111 B	Digestión Microondas HPR-EN-33 - Digestión Microondas - Llama Directa Aire - Acetileno	175	NA	NR	mg Fe/L	2024-09-27
Aluminio	Digestión - SM 3111 B	Digestión Microondas HPR - EN- 33 - Llama Óxido Nitroso - Acetileno	28	NA	6,79	mg Al/L	2024-09-27