



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DE LA VIABILIDAD DE
RECIRCULACIÓN DE LOS LODOS GENERADOS EN EL PROCESO DE
POTABILIZACIÓN DE AGUA EN SAN SEBASTIÁN DE MARIQUITA - TOLIMA**

LABORATORY SCALE EVALUATION OF THE VIABILITY OF RECIRCULATION OF
THE SLUDGE GENERATED IN THE WATER POTABILIZATION PROCESS IN SAN
SEBASTIÁN DE MARIQUITA – TOLIMA

**YENNY MARCELA MEDINA CARMONA
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA AMBIENTAL – ÁREA SANITARIA**

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura,**

**Departamento De Ingeniería Química
Manizales, Colombia**

Año 2017

**EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DE LA VIABILIDAD DE
RECIRCULACIÓN DE LOS LODOS GENERADOS EN EL PROCESO DE
POTABILIZACIÓN DE AGUA EN SAN SEBASTIÁN DE MARIQUITA - TOLIMA**

YENNY MARCELA MEDINA CARMONA
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA AMBIENTAL – ÁREA SANITARIA

Trabajo de profundización presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería- Ingeniería Ambiental

Director (a):
Adela Londoño Carvajal
Profesora U.N. de Colombia sede Manizales

Línea de Investigación:
Ambiental Área Sanitaria

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Departamento De Ingeniería Química
Manizales, Colombia
Año 2017

RESUMEN

La ESP de Mariquita administra y opera una planta potabilizadora de agua por sistema de tratamiento convencional, donde se provee de agua a 15 mil usuarios, asegurando la calidad del agua potable. En este sistema se producen lodos de sedimentación y agua de lavado de filtros los cuales son vertidos a un canal de riego en desuso conocido como El Canal Rada que transporta los lodos hasta el río Gualí, así que el objetivo de este documento es evaluar si es viable la recirculación de los lodos en el proceso de potabilización de agua.

Para realizar la evaluación de esta alternativa a escala laboratorio, se inició con la recopilación de información operativa de la planta de tratamiento donde se tienen los valores históricos de turbiedad, dosis de coagulante y otras variables de proceso importantes. Luego se procedió a obtener información fisicoquímica actualizada de la materia prima y de los productos de la planta para lo cual se realizó toma de muestra y análisis de laboratorio al agua cruda, a los lodos del sedimentador y al agua de lavado de filtros, obteniendo valores de pH, Turbiedad, Color, Aluminio, Alcalinidad, Sólidos sedimentables entre otros.

Con esta información se obtuvo el volumen de control del proceso de potabilización y los balances de materia con los que se logró describir el proceso, para luego obtener el volumen de lodos, qué en conjunto con la caracterización analítica de los mismos; permitió evaluar las alternativas de reutilización o de tratamiento y disposición final de los lodos. Lo anterior con el fin de solucionar la problemática ambiental y social que se presenta alrededor del Canal Rada y el río Gualí.

PALABRAS CLAVES:

Reutilización, recirculación, lodos, potabilización de agua.

ABSTRAC

The ESP of Mariquita manages and operates a water purification plant by conventional treatment system, where it provides water to 15 thousand users, ensuring the quality of drinking water. In this system sedimentation sludge and filter washing water are produced, which are discharged into a disused irrigation channel known as El Canal Rada that transports the sludge to the Gualí River, so the objective of this document is to evaluate if it is feasible recirculation of sludge in the process of water purification.

To carry out the evaluation of this alternative on a laboratory scale, it began with the collection of operative information from the treatment plant where turbidity histories, coagulant doses and other important process variables are available. Then we proceeded to obtain updated physicochemical information on the raw material and the products of the plant, for which sampling and laboratory analysis were carried out on raw water, sedimentary sludge and filter washing water, obtaining values of pH, Turbidity, Color, Aluminum, Alkalinity, Solids settleable among others.

With this information, the volume of control of the purification process and the material balances with which the process was described was obtained, in order to obtain the sludge volume, which in conjunction with the analytical characterization of the same; allowed to evaluate the alternatives of reuse or treatment and final disposal of the sludge. The above in order to solve the environmental and social problems that arise around the Rada Channel and the Gualí River.

KEYWORDS

Reuse, recirculation, sludge, water purification.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3.	JUSTIFICACIÓN	16
4.	OBJETIVOS	18
	OBJETIVO GENERAL	18
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
5.	BASE TEÓRICA.....	19
	TRATAMIENTO CONVENCIONAL.....	19
	➤ PRETRATAMIENTO	19
	➤ COAGULACIÓN.....	19
	➤ COAGULACIÓN.....	19
	➤ FLOCULACIÓN.....	20
	➤ SEDIMENTACIÓN	21
	➤ FILTRACIÓN.....	21
	➤ DESINFECCIÓN	21
	CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS	23
	TRATAMIENTO DE LOS LODOS.....	23
	➤ HOMOGENIZACIÓN.....	23
	➤ ESPESAMIENTO	24
	➤ DESHIDRATACIÓN	24
	Filtros prensa	25
	Centrifugación.....	25
	ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN DE LODOS.....	26
	APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	26
	RECUPERACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO Y UTILIZACIÓN COMO COAGULANTE	27
	RECIRCULACIÓN	27
6.	ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE	29

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA CRUDA.....	29
CARACTERÍSTICAS DEL AGUA POTABLE	33
CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL RIO GUALI	34
7. METODOLOGÍA	35
CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA (AGUA CRUDA):	36
CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO (AGUA POTABLE)	36
BALANCES DE MATERIA	36
BALANCE DE MATERIA PARA CONCENTRACIÓN DE LODOS.....	37
BALANCE DE MATERIA PARA CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO	39
CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ESPERADOS.....	40
Caracterización agua de lavado de filtros	40
Caracterización lodos de sedimentación.....	41
PRUEBAS DE TRATABILIDAD	42
ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN	42
8. RESULTADOS OBTENIDOS.....	45
CARACTERIZACIÓN DEL AGUA CRUDA	45
CARACTERIZACIÓN DEL AGUA POTABLE	45
CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS	46
Caracterización agua de lavado de filtros:	46
Caracterización de los lodos del sedimentador:.....	48
PRUEBAS DE TRATABILIDAD	51
9. ANÁLISIS	56
10. DISPOSICIÓN Y MANEJO DE LODOS.....	57
BALANCE DE MATERIA DE LODOS	57
BALANCE DE MATERIA DE ALUMINIO	59
ESPESADOR POR GRAVEDAD	61
LECHOS DE SECADO	63
11. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	65
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67

13. BIBLIOGRAFÍA 69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Municipio de Mariquita	11
Figura 2. Ubicación de la ptap	12
Figura 3. Tratamiento convencional de producción de agua potable	13
Figura 4. Caudal mensual promedio del agua cruda, año 2013.....	30
Figura 5. Valor promedio de turbiedad para cada mes del año 2013.	30
Figura 6. Promedio diario de la turbiedad agua cruda, año 2013	31
Figura 7. Turbiedad mensual promedio del agua cruda, año 2013.....	31
Figura 8. Coliformes totales y fecales Ríosucio – año 2013	32
Figura 10. Dosis de coagulante utilizado, año 2013	32
Figura 11. Dosificación de coagulante promedio año 2013	33
Figura 13. Características del agua potable distribuida en el municipio de Mariquita año 2013	34
Figura 14. Esquema general del proceso	37
Figura 15. Volumen de control del proceso de potabilización – balance lodos.....	37
Figura 16. Volumen de control del sedimentador.....	38
Figura 17. Volumen de control del proceso de potabilización – balance de aluminio	39
Figura 18. Sólidos sedimentables – Agua lavado de filtros.....	47
Figura 19. Concentración de aluminio sobrenadante – Agua lavado de filtros	47
Figura 20. Sólidos sedimentables - Lodos de sedimentador.....	48
Figura 21. Concentración de aluminio sobrenadante - Lodos de sedimentador	49
Figura 22. Sólidos sedimentables - Lodos de sedimentador filtrados	50
Figura 23. Concentración de aluminio en el recuperado - Lodos de sedimentador filtrados.....	50
Figura 24. Variación turbiedad – Prueba de jarras con lodos sedimentador.....	52
Figura 25. Variación Color – Prueba de jarras con lodos sedimentador	53
Figura 26. Variación turbiedad – Prueba de jarras con sobrenadante	54
Figura 27. Variación Color – Prueba de jarras con lodos sobrenadante.....	54
Figura 28. Esquema general de la planta de tratamiento	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Usos de suelo	11
Tabla 2. Indicadores de gestión técnica Servicio de Acueducto	13
Tabla 3. Alternativas de disposición.....	17
Tabla 4. Tipos de espesadores.....	24
Tabla 5. Tipos de secado mecánico	25
Tabla 6. Objetivos de Calidad tramo 5 – Cuenca del río Gualí	35
Tabla 7. Comparación opciones de reutilización de los lodos.....	43
Tabla 8. Caracterización agua cruda Ríosucio	45
Tabla 9. Caracterización agua potable PTAP Mariquita	45
Tabla 10. Caracterización agua lavado de filtros	46
Tabla 11. Caracterización lodos del sedimentador	48
Tabla 12. Caracterización lodos filtrados del sedimentador.....	49
Tabla 13. Prueba de jarras con lodos del sedimentador	52
Tabla 14. Prueba de jarras con sobrenadante.....	53
Tabla 15. Resumen prueba de jarras.....	55
Tabla 16. Datos requeridos para el balance de lodos.....	58
Tabla 17. Datos requeridos para el balance de aluminio	60
Tabla 18. Parámetros diseño espesador de lodos.....	62
Tabla 19. Cálculo de la bomba para llevar los lodos del lavado de sedimentadores al espesador.....	62
Tabla 20. Diseño de los lechos de secado.....	63
Tabla 21. Inversión planta de tratamiento de lodos propuesta.....	65
Tabla 22. Gastos operativos del sistema de tratamiento de lodos propuesto	66
Tabla 23. Pago tasa retributiva	66

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de producción de agua potable se realiza comúnmente a través de un sistema de tratamiento convencional (coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección), que tiene como residuo o subproducto lodos. Estos lodos de acuerdo a su concentración y a la etapa del proceso donde son producidos se consideran lodos de sedimentación o agua de lavado de filtros.

Las características de estos subproductos varían de una planta a otra, debido a que se ven influenciados primero por la calidad del agua superficial captada para el proceso y del tipo de coagulante que se utilice, sea sales de hierro o de aluminio. Lo anterior convierte a los lodos en un residuo tóxico, con un gran porcentaje de su contenido en agua y por ende difícil de manejar.

Las Empresas Prestadoras de Servicios Públicos. ESP son quienes administran las Plantas de Tratamiento de Agua Potable y por ende son las encargadas de la disposición de los lodos, los cuales en muchos casos son vertidos directamente a la fuente superficial más cercana. Aunque esta práctica no es permitida por la normatividad ambiental, es común debido a los costos que implica la implementación de un sistema de tratamiento de lodos, y debido a la toxicidad que éstos generan, conlleva a graves consecuencias al ecosistema acuático del recurso hídrico donde son vertidos, así como a humanos, animales y plantas que se beneficien de este recurso.

Debido a los perjuicios ambientales y a los efectos nocivos sobre la salud que causan estos residuos, la legislación colombiana establece que deben ser tratados y dispuestos como residuos sólidos para que así no sean llevados a corrientes de aguas cercanas.

De otro lado, han surgido diversas alternativas de reutilización de los lodos para obtener un beneficio económico de ellos y reducir el impacto ambiental; entre las opciones de reutilización se encuentran: La fabricación de materiales para construcción a partir de lodos aluminosos, recuperación del sulfato de aluminio de los lodos y recirculación de los lodos al proceso para su aprovechamiento como coagulante.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

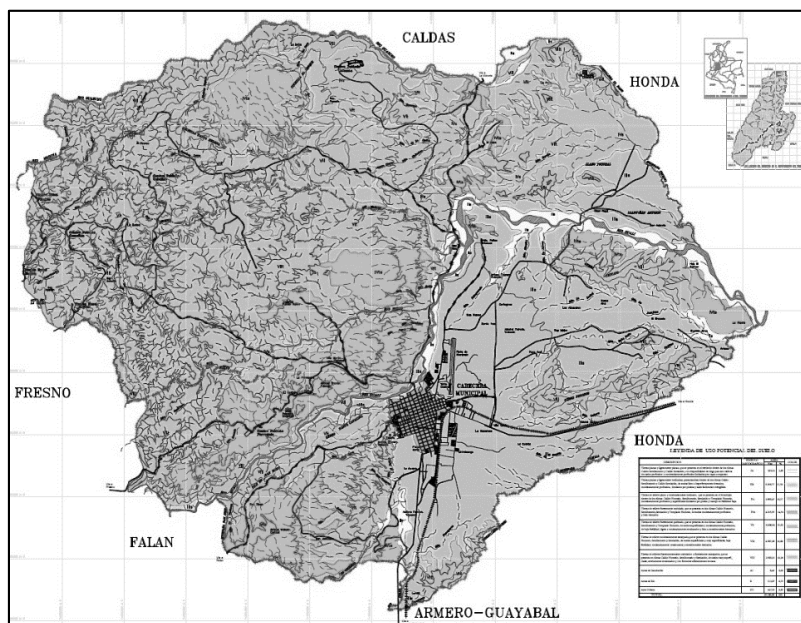
El municipio de San Sebastián de Mariquita está ubicado al norte del departamento del Tolima en las coordenadas 05°11'54" latitud norte y 74°53'37" latitud oeste, a una altura de 495 msnm. Es conocido como la Capital Frutera de Colombia y la Puerta de la Ruta Mutis y sus principales actividades económicas son la agricultura (cultivo del aguacate y la producción de frutas como el Mangostino), la ganadería y el turismo.

Tabla 1. Usos de suelo

USOS	HECTÁREAS	%
Agrícola	4.800	16,20
Pastos	6.400	21,59
Bosques	6.500	21,93
Otros Usos	11.937	40,28
Área total del municipio	29.637	

(Plan de Ordenamiento Territorial de Mariquita, 2011)

Figura 1. Municipio de Mariquita



(Alcaldía de San Sebastián de Mariquita, s.f.)

La fuente hídrica de la cual se realiza el abastecimiento la planta de tratamiento del municipio de San Sebastián de Mariquita es el Río Sucio que es afluente del río Gualí. La concesión de agua otorgada por CORTOLIMA, la autoridad ambiental para el departamento del Tolima, sobre el río es de 180 lps y sólo se captan 158 lps a través de una bocatoma de fondo mediante el represamiento de la corriente en el

cauce del río Sucio; el sitio de captación está ubicado en el límite entre la vereda Oritá y Amaya del mismo municipio.

Tras ser captada, el agua es dirigida hacia dos unidades de desarenadores, donde posteriormente se distribuye en dos líneas de aducción de 10" cada una con una longitud de 5700 y 5900 m, para transportar el líquido por gravedad hasta la planta de tratamiento.

Figura 2. Ubicación de la ptap

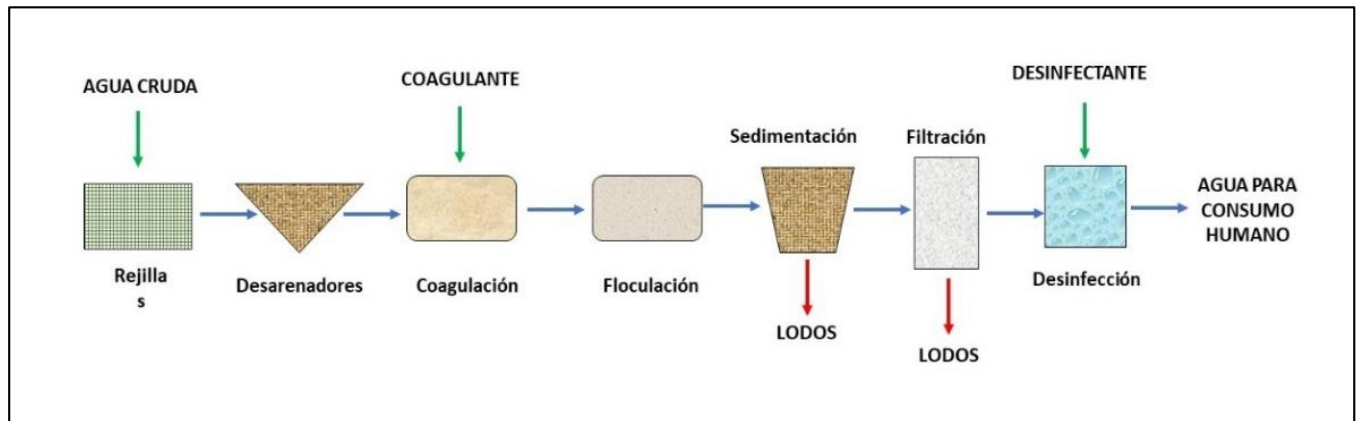


(Google Earth)

La planta de tratamiento es de tipo convencional, donde el caudal de entrada se mide con una canaleta Parshall y se utiliza como coagulante sulfato de aluminio tipo B granular que se prepara en solución para ser dosificado. La floculación se lleva a cabo en dos unidades de tipo hidráulico de flujo horizontal, que maneja tres zonas a diferentes gradientes cada una. De allí, siguen las dos unidades de sedimentación de alta tasa con módulos plásticos tipo colmena con un área de sedimentación de 65 m² para tratar 75.7 L/s cada uno. La filtración se realiza a través de seis filtros de tasa declinante, con lechos conformados por grava, arena y antracita.

La última etapa del proceso químico de potabilización de agua es la desinfección, para la cual, el agua filtrada pasa al tanque de almacenamiento por gravedad y en la canaleta que comunica las dos unidades se dosifica el cloro gaseoso y la cantidad la maneja el operario según el volumen de agua tratado. El almacenamiento del agua tratada se realiza en un tanque con capacidad de 978 m³.

Figura 3. Tratamiento convencional de producción de agua potable



Fuente: Propia

La conducción de agua tratada se hace por gravedad, de acuerdo con lo reportado por el prestador al SUI para el año 2013 las redes de conducción tienen una longitud aproximada de 611.413 metros en cloruro de polivinilo “PVC”. (SUPERSERVICIOS, 2014).

Tabla 2. Indicadores de gestión técnica Servicio de Acueducto

Indicador	Variable	Normativa que lo exige	Unidad	Dato	Período de información	Observaciones
Cobertura Acueducto			%	91.16%	2013	Reportado por prestador en visita octubre 2014.
Continuidad		Resolución CRA 315 de 2005	%	99.69	2013	Reportado por prestador al SUI 2013
		Resolución 2115 de 2007	Horas/día	23.8	2013	Reportado por prestador al SUI 2013
Micromedición	Cobertura de micromedición	Ley 142 de 1994	Usuarios	80%	2013	Reportado por prestador en visita octubre 2014.
Macromedición	N° de sectores en red	Ley 142 de 1994	Usuarios	8	2013	Reportado por prestador en visita octubre 2014.
	N° de sectores con macromedición		%	--	---	No reporta información SUI
IANC		Resolución CRA 151 de 2001	%	52%	A diciembre de 2013	Reportado por prestador al SUI 2013
Calidad del agua	IRCA	Resolución 2115 de 2007 Decreto 1575 de 2007	%	0.9%	2013	SIVICAP 2013
	Actas de Concertación	Resolución 811 de 2008	-	Reportada	2008	SUI
	Actas de materialización		-	Reportada	2008	SUI
	Actas de actualización		-	Reportada	2013	SUI

(SUPERSERVICIOS, 2014)

Cómo se observa en la Figura 3. Tratamiento convencional de producción de agua potable, hay dos corrientes de lodos que son vertidos directamente a fuentes de agua superficial en este caso a un canal que los conduce al río Gualí, por lo tanto se hace necesario implementar sistemas de tratamiento para los lodos provenientes de las unidades de sedimentación y del lavado de los filtros de las Plantas de Potabilización ya que el agua del retrolavado diario de filtros y la del lavado de los sedimentadores que se realiza cada 15 días o según la necesidad, constituyen vertimientos que tienen gran cantidad de lodos tóxicos que llegan directamente a un antiguo canal de riego conocido como El Canal Rada, que los conduce hacia el río Gualí. No se conocen estudios sobre el impacto que causa este vertimiento sobre el río Gualí, pero se tienen el requerimiento de la autoridad ambiental para que se busque una opción de disposición de los lodos producidos por la planta.

En Colombia, la normatividad ambiental con respecto a estos residuos tiene los siguientes planteamientos:

Ley 9 de 1979, en su Título I de la Protección del Medio Ambiente, establece en el Artículo 8.-“*La descarga de residuos en las aguas deberá ajustarse a las reglamentaciones que establezca el Ministerio de Salud para fuentes receptoras.*”, en el Artículo 10.- “*Todo vertimiento de residuos líquidos deberá someterse a los requisitos y condiciones que establezca el Ministerio de Salud, teniendo en cuenta las características del sistema de alcantarillado y de la fuente receptora correspondiente.*” Y en el artículo 11.- “*Antes de instalar cualquier establecimiento industrial, la persona interesada deberá solicitar y obtener del Ministerio de Salud o de la entidad en quien éste delegue, autorización para verter los residuos líquidos.*” (Ley 9, 1979)

Decreto 1076 de 2015 que es el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible: CAPÍTULO 3 del Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos, en la Sección 3 de los Vertimientos, en el **Artículo 2.2.3.3.4.4.** presenta las actividades no permitidas y en el numeral 3 plantea que no está permitido: “*Disponer en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, y sistemas de alcantarillado, los sedimentos, lodos, y **sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de agua** o equipos de control ambiental y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo. Para su disposición deberá cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos.*”. CAPÍTULO 7 de las Tasas Retributivas Por Vertimientos Puntuales al Agua, en la Sección 1, **Artículo 2.2.9.7.1.1. Objeto**, “*Por el cual se reglamente la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones*”. (Decreto 1076, 2015).

Resolución 330 de 2017, en el artículo 125. Tratamiento de lodos generados en la potabilización. Expresa “*Los lodos evacuados de los procesos unitarios deberán ser sometidos a técnicas de*

homogeneización, complementadas con tratamientos de espesamiento y deshidratación. Bajo ninguna circunstancia se permite la descarga o almacenamiento final de lodos sin previo tratamiento.” (Resolución 0330, 2017)

Con el fin de dar solución al problema expuesto anteriormente y ante la necesidad de cumplir lo establecido en la normatividad Colombiana, se presenta en este documento la evaluación a escala laboratorio de la viabilidad de recircular los lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de San Sebastián de Mariquita, a partir de la caracterización y cuantificación de los lodos producidos en el lavado de sedimentadores y filtros, así como de la realización de pruebas de tratabilidad simulando la recirculación de los lodos.

3. JUSTIFICACIÓN

El proceso de potabilización del agua para consumo humano por medio del tratamiento convencional tiene como residuo los lodos formados por las partículas sólidas separadas en las etapas de sedimentación y filtración, que varían en cantidad y composición según la calidad del agua cruda a tratar y el coagulante utilizado.

Los lodos tienen un contenido entre 93 y 99.5% de agua y constituyen un residuo líquido de valor escaso o nulo, relativamente inerte y predominantemente inorgánico. (Hull, y otros, 1992); que presenta efectos nocivos en la salud humana, animal y vegetal. Los lodos más característicos y de efectos más graves sobre el medio ambiente son los lodos aluminosos, producto del proceso de coagulación donde se utiliza sales de aluminio, ya que la descarga directa de lodos aluminosos sobre cuerpos de agua puede tener efectos directos en las plantas, debido a la toxicidad del aluminio (Taylor, 1989). Así mismo los lodos aluminosos pueden generar graves problemas a la salud humana, e incluso se han detectado pacientes sometidos a diálisis que sufrían demencia cuando el agua utilizada poseía concentraciones de aluminio por encima del 0.08 mg/L. (Gallo & Uribe, 2003).

El aluminio también ha sido clasificado en un nivel medio de fitotoxicidad para plantas terrestres, causando daños en los tejidos de las plantas en concentraciones de 5 a 200 mg/g, y se ha encontrado que los iones aluminosos son tóxicos para los peces en niveles mayores a 0,5 mg/l (Kaggwa , Mulalelo, Denny , & Okurut, 2001), disminuye la disponibilidad del fósforo asimilable por las plantas afectando el ciclo del fósforo e induciendo a la eutrofización a la vegetación acuática. Adicionalmente, los contaminantes como fertilizantes, pesticidas y residuos industriales que son transportados por escorrentía a los ríos, aumentan su concentración en presencia de lodos aluminosos. (Raigosa Restrepo M. , 2012)

Por lo anterior este desecho del proceso de potabilización de agua no debe ser dispuesto en los cuerpos de agua, aunque sea una práctica común en los acueductos de nuestro país, y además es considerada una actividad no permitida de acuerdo al Artículo 2.2.3.3.4.4 del Decreto 1076 del 2015 donde se encuentra la prohibición de esta actividad: *“No se permite disponer en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, y sistemas de alcantarillado, los sedimentos, lodos, y sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de control ambiental y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo. Para su disposición deberá cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos”* (Decreto 1076, 2015).

Por esto se buscan alternativas para su disposición de manera que no se vierta en forma líquida al afluente, como las presentadas en el RAS 2000:

Tabla 3. Alternativas de disposición

TRATAMIENTO	CARACTERÍSTICAS
Filtración al Vacío	Después de la adición de polímeros y cuando se presenta una gran concentración de sólidos inertes debe implementarse la filtración al vacío que puede secar los lodos del coagulante hasta el 20 % de sólidos.
Filtración a Presión	Debe usarse cuando las características del lodo son difíciles de manejar ya que puede mantener los sólidos bajo presión por extensos períodos de tiempo hasta que la consistencia deseada sea alcanzada.
Lechos de secado	El uso de las camas de secado está limitado por el clima pero los rangos pueden variar de 1 a 20 por año, ésta tasa de utilización puede incrementarse con el uso de polímeros.

(MINDESARROLLO, 2000)

También existen varios estudios sobre opciones para su utilización la mayoría a escala piloto, que permiten observar las características aprovechables de este residuo. Entre estos estudios se encuentran:

- Recuperación del sulfato de aluminio presente en este residuo mediante acidificación con ácido sulfúrico (25%), a partir de lodos recolectados de los sedimentadores y lavado de filtros en la planta de tratamiento aprovechando así su composición química y mineralógica; con una recuperación del 71,5%. (Nuñez Zarur & Peña Castro, 2011).
- Fabricación de ladrillos cerámicos a partir de la incorporación de lodos aluminoso. Con este estudio se evaluó el uso del lodo aluminoso como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos, aprovechando el lodo e inmovilizando a su vez elementos tóxicos. Según los resultados obtenidos de los análisis mineralógicos, la plasticidad y las pruebas de resistencia a la compresión, se identificó que el reemplazo de arena por lodo aluminoso compromete de manera significativa la resistencia a la compresión. Por lo cual, desde el punto de vista técnico no es posible utilizar el lodo aluminoso como agregado en ladrillos cerámicos (Hernández, Villegas, Castaño, & Paredes, Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistema de potabilización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción, 2016).
- Recirculación de los lodos al caudal de entrada a la planta, lo cual permite reducir el volumen de la captación y el volumen de coagulante. Esta es la opción que deseamos evaluar en el presente documento mediante la caracterización de los lodos con el fin de aprovechar sus propiedades y disminuir así los costos de coagulante, así como analizar el impacto en la disminución del caudal captado. (Martinez, 2010)

4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar a escala laboratorio la viabilidad de recircular los lodos generados en las unidades de sedimentación y filtración de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de San Sebastián de Mariquita

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar y cuantificar el agua de lavado de los sedimentadores y filtros, de la planta de tratamiento de agua potable de San Sebastián de Mariquita.
- Evaluar la viabilidad de la recirculación de lodos mediante la simulación con pruebas de tratabilidad.
- Proponer la mejor alternativa para el manejo de los lodos.

5. BASE TEÓRICA

TRATAMIENTO CONVENCIONAL

Este tipo de sistema es el más antiguo en nuestro medio. Se ha venido utilizando desde principios del siglo pasado (1910–1920). Se caracteriza por la gran extensión de área que ocupan las unidades. Para mejorar el funcionamiento de los sistemas convencionales, se fueron agregando equipos mecánicos y actualmente la mayor parte de estos sistemas son mixtos, es decir, están constituidos por unidades hidráulicas y mecánicas. (MARTÍNEZ, 2012)

➤ PRETRATAMIENTO

La primera operación unitaria de pre tratamiento consiste en la eliminación de los sólidos de gran tamaño que pueda contener el agua en el punto de captación, por ejemplo hojas o ramas de árbol, piedras, etc. Para ello, se utilizan rejas y/o tamices que retienen los sólidos.

➤ COAGULACIÓN

Cuando el contenido en arenas y sólidos en suspensión es elevado, se emplean canales o tanques desarenadores en los que los sólidos sedimentan por gravedad. (MARTÍNEZ, 2012)

➤ COAGULACIÓN

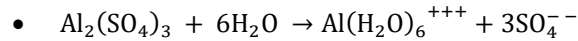
El objetivo principal de la coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración; por medio de la adición de los coagulantes químicos que son principalmente sales de hierro o aluminio, y la aplicación de la energía de mezclado.

En consecuencia, se eliminan las materias en suspensión estables y se realiza la concentración de materia orgánica y microorganismos. (OYARZO, 2007)

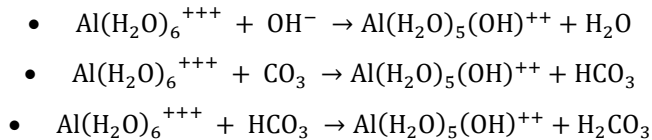
De acuerdo con lo planteado por la Ing. Yolanda Andia Cárdenas (CARDENAS, 2000), la coagulación elimina una gran cantidad de sustancias que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos; pero cuando este proceso no está bien realizado, representa grandes gastos de operación no justificados, y puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua. Por lo tanto, se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las demás unidades de potabilización y que es imposible realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante está mal ajustada.

Las reacciones que se llevan a cabo en etapa de coagulación con sales de aluminio son las siguientes:

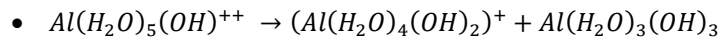
1. Cuando está en solución el sulfato de aluminio se hidroliza:



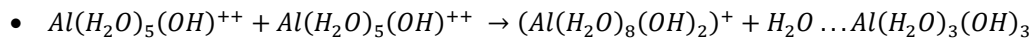
2. Reacciona con las bases (alcalinidad, hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos) que encuentra en el agua, así:



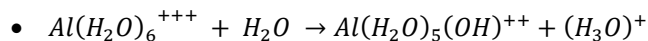
El $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{++}$ es un compuesto inestable y transitorio que se hidroliza rápidamente:



El $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{++}$ se polimeriza reaccionando entre sí:



3. Reacciona con el agua cuando se consume toda la alcalinidad:



Obteniendo al final de esta serie de reacciones, compuestos hidratados y poliméricos que pueden ser adsorbidos por las partículas coloidales del agua produciendo así su desestabilización.

Cuando la coagulación se realiza con sales de hierro como el cloruro férrico, la secuencia de reacciones es la misma.

➤ FLOCULACIÓN

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos flóculos inicialmente pequeños crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar. La floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flocos, un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no sólo incrementa el

tamaño de las partículas del floculo, sino que también aumenta su peso. Este proceso puede ser mejorado por la adición de un reactivo de floculación, sea un polímero inorgánico o reactivo sintético.

➤ **SEDIMENTACIÓN**

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido.

La sedimentación es un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua basadas en su diámetro y peso específico. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. (Yactayo, 2001). En esta etapa se produce la primera corriente de lodos como residuo del proceso.

➤ **FILTRACIÓN**

Los procesos convencionales de filtración están precedidos por coagulación, floculación y sedimentación. Sin embargo, puede ser que el agua se someta a filtración directamente después de la coagulación y floculación y que los floculos sean removidos directamente por los filtros. (Ascencio, 2005)

El agua sobrenadante de la etapa de sedimentación se somete a filtración, la cual consiste en hacer pasar el agua, a través de un lecho filtrante que permite el paso del líquido pero no el de las partículas sólidas, las cuales quedan retenidas en el medio filtrante. (MARTÍNEZ, 2012). Es en esta parte del proceso se produce la segunda corriente de lodos como residuo del proceso.

Existen diversos sistemas de filtración, como son: filtros lentos de arena, filtros de tierras diatomáceas, filtros directos, filtros empacados, filtros de membrana y filtros de cartuchos.

➤ **DESINFECCIÓN**

La etapa final del proceso de potabilización de aguas de consumo humano es siempre la desinfección. Se trata de la etapa de mayor importancia ya que ha de garantizar la eliminación de microorganismos patógenos que son responsables de gran número de enfermedades como tifus, cólera, hepatitis, gastroenteritis, salmonelosis, etc. La desinfección puede conseguirse mediante tratamiento con productos químicos como el cloro (Cl_2), el hipoclorito de sodio (NaOCl), el hipoclorito de calcio (Ca(OCl)_2) y el dióxido de cloro (ClO_2) o mediante aplicación de radiación. (MARTÍNEZ, 2012).

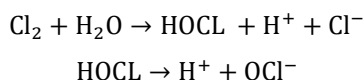
Una limitante de la utilización del cloro es la generación de subproductos halogenados que se producen cuando el cloro reacciona con la materia orgánica contenida en el agua, proveniente aquélla de las sustancias húmicas o fúlvicas del suelo. La formación de estas sustancias halogenadas depende del tipo y concentración de la materia orgánica presente cuando se añade el cloro, la dosis de cloro, la temperatura y pH del agua, así como el tiempo de reacción. Los productos generados pueden ser diversos pero los más importantes se conocen como trihalometanos, de comprobada toxicidad al ser humano. (Ascencio, 2005)

Aun así, la desinfección con cloro es el método más utilizado en las plantas potabilizadoras del país debido a su eficiencia, y que el efecto residual que deja en el agua puede medirse fácilmente en cualquier punto de la red de distribución.

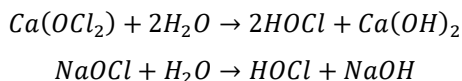
Al agregar cloro al agua, éste se hidroliza, luego se combina con el amoníaco presente y después con la materia orgánica y otras sustancias químicas.

1. Reacciones con el agua:

Cuando el cloro, en forma de gas, se añade al agua, tienen lugar dos reacciones: hidrólisis e ionización:



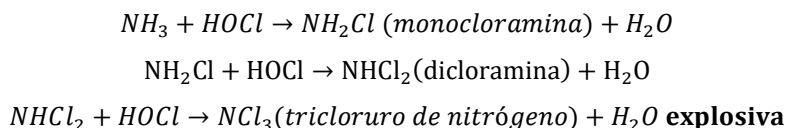
Cuando se añade cloro al agua en forma de sales de hipoclorito, las reacciones son:



La cantidad de HOCl y OCl⁻ que se halla presente en el agua se denomina cloro libre disponible.

2. Reacciones con el amoníaco.

Dado que el ácido hipocloroso es un agente oxidante muy activo, reaccionará rápidamente con el amoníaco presente en el agua residual y formará tres tipos de cloraminas en las reacciones sucesivas:



CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS

Las características de los lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable varían de una planta a otra, dependiendo de la calidad de agua cruda, del tratamiento recibido y de la época del año, sin embargo, poseen características básicas similares. (MARTÍNEZ, 2012).

Los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y el 70% de los sólidos totales y en los filtros entre el 30 y el 40%. El volumen de lodos que producen los sedimentadores es entre el 2 y el 4% del caudal que se procesa y los filtros entre el 1 y el 2% del mismo. (Valencia, 2000). Estos lodos tienen un gran volumen, el cual está compuesto principalmente por agua, y son tixotrópicos, es decir, tienen características gelatinosas en reposo, pero líquidas en movimiento. Además, son compresibles y resistentes al espesamiento y deshidratación, especialmente aquellos generados con aguas de baja turbiedad. (Garcés Arancibia , Díaz Aguirre , & Dellepiane Navarro , 1996).

Los lodos están constituidos principalmente de:

- Materias finas o coloidales en suspensión como partículas de arena, arcilla y limo, sedimento, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, algas, plancton y otros organismos microscópicos, como bacterias y virus, causantes de la turbiedad.
- Los residuos de los productos químicos utilizados para el proceso de tratamiento. (Garcés Arancibia , Díaz Aguirre , & Dellepiane Navarro , 1996)
- Un contenido bajo de sólidos en el rango de 3000 a 15000 mg/L. Los sólidos suspendidos del 75 al 90% de los sólidos totales, con una cantidad de sólidos volátiles del 20 al 35% de los sólidos totales. La demanda bioquímica de oxígeno generalmente es de 30 a 100 mg/L. El pH del lodo está en un rango de 5 a 7 unidades. (Sandoval, Martín, Piña, & Montellano, 2005)

TRATAMIENTO DE LOS LODOS

Para su correcta disposición y para cumplir con las directrices normativas colombianas existen una línea convencional de tratamiento compuesto así:


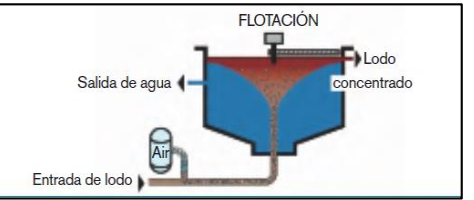
➤ HOMOGENIZACIÓN

Dado que los lodos se extraen de forma intermitente y las concentraciones son bastantes diferentes, es aconsejable enviarlos a un depósito de mezcla y almacenamiento, donde se homogenice la concentración y a la vez se disponga de un volumen tal que permita el funcionamiento continuado de la planta de lodos. (Ramirez, 2008). Si se obtiene una concentración de lodos lo más estable posible, el rendimiento o eficacia del tratamiento a los lodos también es estable. (Grado en Tecnología de la Ingeniería Civil, 2014)

➤ **ESPESAMIENTO**

Los lodos originados pueden considerarse como lodos poco concentrados. Por lo tanto, conviene quitarles agua, espesándolos previo a su deshidratación final. El espesamiento se puede hacer por gravedad o mediante flotación con aire disuelto (proceso FAD). Teóricamente se considera un incremento de la concentración del orden de 8 veces la concentración inicial, con un valor final de 40 g/L (4%) de materia seca. (Grado en Tecnología de la Ingeniería Civil, 2014). Según la naturaleza de los lodos es necesario previamente el acondicionamiento con polímeros, en los casos de plantas de tratamiento que tienen un lodo de sulfato de aluminio es decir con carga positiva, se hace necesario la adición de un polímero no iónico o aniónico (Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007).

Tabla 4. Tipos de espesadores

<p>Espesamiento por gravedad</p> <p>Suele realizarse en decantadores estáticos circulares o rectangulares provistos de raquetas que arrastran el lodo precipitado hacia las arquetas de recogida. El agua decantada clarificada se extrae por los vertederos situados en la parte superior.</p>	
<p>Espesamiento por flotación</p> <p>Se presuriza directamente la mezcla de lodos con aire o agua clarificada, a una presión de 6 bares y descomprimir después a la entrada del flotador. Las partículas pesadas se sedimentan son extraídos. El agua pasa a una compuerta rebosadero y entrará en el compartimiento de separación, desde donde es enviada a los decantadores – concentradores en cabecera del tratamiento, mientras el pago espesado y flotante es enviado a la siguiente fase de deshidratación.</p>	

(Ramirez, 2008).


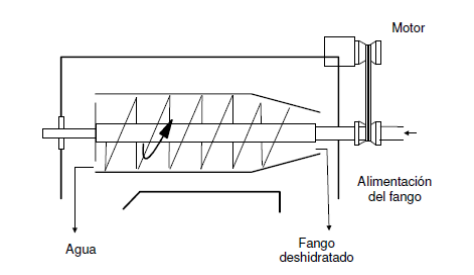
➤ **DESHIDRATACIÓN**

Los objetivos de la deshidratación son reducir costes de transporte, mayor facilidad de manipulación, y en casos particulares facilitar la incineración. (Grado en Tecnología de la Ingeniería Civil, 2014). Se recurre a sistemas de secado mecánico para conseguir grados de sequedad de un 20% o mayores, tienen como ventajas principales el necesitar áreas menores, independencia de las condiciones

meteorológicas y minimización de ciertos impactos ambientales. Entre sus desventajas se encuentran el mayor consumo de energía, la necesidad de utilizar acondicionadores químicos (polímeros) adecuados, una alta sensibilidad a las variaciones cualitativas y cuantitativas del lodo, la necesidad de un lavado frecuente de las telas filtrantes y otros equipos en contacto directo con los lodos y los eventuales problemas de ruido y vibraciones excesivas provocadas por el funcionamiento de las bombas y motores. (Garcés Arancibia , Díaz Aguirre , & Dellepiane Navarro , 1996).

Los sistemas de secado natural tienen como principal ventaja el costo de su implementación, siempre que disponga del área suficiente a bajo precio. Tienen un bajo consumo de energía y de productos químicos, una baja sensibilidad a las variaciones cuantitativas y cualitativas del lodo y simplicidad de operación. Las desventajas que presenta, es una alta dependencia de las condiciones climáticas y un alto requerimiento de mano de obra para la remoción del lodo. (Garcés Arancibia , Díaz Aguirre , & Dellepiane Navarro , 1996).

Tabla 5. Tipos de secado mecánico

<p>Filtros prensa</p> <p>Constan de una serie de placas de fundición o de algún material moldeado, con caras acanaladas sobre las que se intercalan unas telas filtrantes. El lodo se introduce en las cámaras y se somete a una elevada presión del orden de 300 kg/cm², por medio de un dispositivo hidráulico. El funcionamiento es discontinuo, y muy laborioso, obteniéndose un fango bastante seco, próximo al 30% en materia seca.</p>	
<p>Centrifugación</p> <p>El fango se introduce por el eje y debido a la fuerza centrífuga la parte sólida se recoge de las paredes de la cubeta de forma separada al agua. El fango deshidratado alcanza habitualmente una sequedad entre el 20 y el 25% y con grandes dosis de polielectrolito puede llegar a valores 30-40%. Las centrifugas son compactas, cerradas (la salida de olores al exterior se reduce en comparación con otras alternativas) y necesitan poco espacio. (Grado en Tecnología de la Ingeniería Civil, 2014)</p>	

ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN DE LODOS

El significativo impacto negativo de la descarga de lodos de las plantas potabilizadoras a los cuerpos receptores, junto a las limitaciones ambientales en materia de descarga de lodos y el alza de los costos por el transporte y manejo de los mismos a los sitios de disposición, han obligado a las empresas de servicios públicos a buscar alternativas técnica y económicamente viables para el aprovechamiento de los lodos de modo que representen un beneficio económico y ambiental. (Cerón, Millán, Espejel, Rodríguez, & Ramirez, 2007)

Se conocen estudios sobre las aplicaciones de los lodos en diversos sectores económicos, existen experiencias de aplicación en suelos para uso en actividades agrícolas (Zhao & Bache, 2001) (Franco & Salvador , 2004), donde no se consideran un material óptimo por su bajo nivel de nutrientes, siendo su uso circunscrito básicamente a actividades silvícolas (Scambillis, 1997) y recuperación de suelos degradados y de minas o canteras abandonadas (Geertsema, Knocke, Novak, & Dove, 1994). También se conoce su uso potencial en la recuperación de aluminio donde reduciendo el pH con ácido sulfúrico se alcanza una recuperación del orden del 65 al 75% (Bishop , Rolan , Bailey , & Cornwell , 1987) (Franco & Salvador , 2004). En el sector de la construcción el lodo es aprovechado en la fabricación de cementos Portland (Wang , Chiang , Perng, & Sun , 1998) y clinker (Geertsema, Knocke, Novak, & Dove, 1994) y en la producción de ladrillos cerámicos (Andreoli, 2005) (Hernández D. , 2006) usándose como reemplazo parcial de uno de los materiales, lo que puede traer beneficios como la disposición ambiental segura para residuos potencialmente peligrosos, reducción de la contaminación hídrica causada por su vertimiento, menores gastos de energía, transporte y fabricación, y menor utilización de recursos naturales. (Torres, Hernández, & Paredes, 2012).

APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Cuando los lodos presentan los cuatro óxidos principales contenidos en los materiales de construcción CaO , Al_2O_3 , SiO_2 y FeO_3 , se puede determinar que el lodo, de acuerdo a su composición, presenta un gran potencial para ser utilizado como materia prima para la elaboración de productos de la construcción, principalmente cuando los fangos producidos a partir del sulfato de aluminio y presenta una aceptable viabilidad técnica para fabricar concretos de relleno y morteros para mampostería. (Cerón, Millán, Espejel, Rodríguez, & Ramirez, 2007)

Según los estudios de Hernández et al. en el 2016 esta opción no es viable técnicamente ya que se halló una tendencia a la disminución de la resistencia a la compresión y al incremento de la absorción de humedad en las unidades experimentales, en la medida que se incrementa el porcentaje de lodo

aluminoso adicionado. (Hernández, Villegas, Castaño, & Paredes, Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistema de potabilización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción, 2006).

RECUPERACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO Y UTILIZACIÓN COMO COAGULANTE

Existen diferentes investigaciones que demuestran que se puede recuperar el sulfato de aluminio a partir de acidificación u otros métodos y su reutilización como coagulante en estos procesos, esta recuperación de aluminio y hierro se logra mediante la adición de ácido sulfúrico para solubilizar el metal de la sal iónica debido al carácter anfótero del aluminio (CHU, 1999) (WESTERHOFF, 1973). Puede esperarse una recuperación de alumbre del 80% a pH cercano a 2.5. El aluminio disuelto se separa de los residuos sólidos mediante un separador por gravedad y se retorna a la mezcla rápida mientras que el lodo residual se descarga a un basurero después de que se ajuste el pH (ROSERO, 1998).

Los primeros ensayos para recuperar alumbre de lodos fueron hechos por Jewell quien en 1903 patentó un proceso para tratamiento de agua y recuperación del coagulante por reacción de hidróxido de aluminio con ácido sulfúrico (NUÑEZ ZARUR & PEÑA CASTRO, 2011).

En Colombia, Rosero (1998) presentó resultados concluyendo que las condiciones a obtener la mejor separación de aluminio y características de manejo del lodo fueron: ST (1.2%), tiempo de mezcla (30 minutos) y pH (3.0 unidades). A estas condiciones se obtuvo una recuperación de aluminio del 60% y una reducción en el volumen del lodo del 30% aproximadamente.

Villegas et al. (2005), presentó un análisis preliminar de la viabilidad económica de recuperar aluminio vía ácida a partir de lodos aluminosos generados en la empresa Aguas y Aguas de Pereira, concluyeron que, debido al costo del ácido sulfúrico, la reincorporación del coagulante recuperado no resulta económicamente viable bajo las condiciones evaluadas, haciéndose necesaria la reducción del volumen del lodo para reducir costos de acidificación.

RECIRCULACIÓN

Debido a las características tóxicas y de difícil tratamiento de los lodos ha llevado a las Empresas Prestadoras de Servicios Públicos a investigar alternativas de reducción de costos a través de la reducción de caudales de aguas desechadas, no solo en las redes de distribución, sino también en la propia planta de potabilización y la recirculación del agua de lavado de las unidades dispuestas para el tratamiento. (Martinez, 2010) (Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007)

Como plantea Federico Martínez, en el análisis de la recirculación del agua de lavado de filtros, la recirculación del agua se basa en utilizar el agua para la misma aplicación que fue utilizada previamente, para esto se debe considerar algunos factores: Las oportunidades de uso del agua, la calidad mínima requerida en el punto de recirculación, la calidad resultante del uso inicial y el tratamiento para llevar a cabo su reuso.

Disponer de un sistema de recirculación de los lodos producidos es importante por las siguientes consideraciones:

1. Para evitar el vertimiento y consecuente contaminación de las fuentes superficiales, que conducen a problemas de salud y paisajísticos aguas abajo. (Martinez, 2010)
2. Para reducir la captación de agua cruda que puede ser fundamental en zonas desérticas y de pocas fuentes aptas para consumo humano. (Ramirez, 2008)
3. Reducir el gasto de coagulante adicionado por efecto del aumento de la turbiedad al recircular las aguas al inicio del tratamiento. (Córdova López, 1998)

6. ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE

El requerimiento de agua potable es fundamental para todas las poblaciones y como se dijo anteriormente, el proceso más utilizado es el tratamiento convencional y el cual es el utilizado en la planta de tratamiento del municipio de Mariquita, que está compuesto por cinco unidades dos de reacción y tres de separación.

Los reactores son los encargados de la primera y última etapa del proceso: la coagulación y la desinfección, mientras las unidades de separación realizan las tareas de floculación, sedimentación y filtración.

Como se observó en la , la materia prima es el agua cruda y se utilizan dos aditivos el coagulante y el desinfectante y se produce un residuo que son los lodos del sedimentador y de los filtros. En este proceso no se presentan variaciones energéticas ya que no hay cambios de temperatura considerables ni existe bombeos.

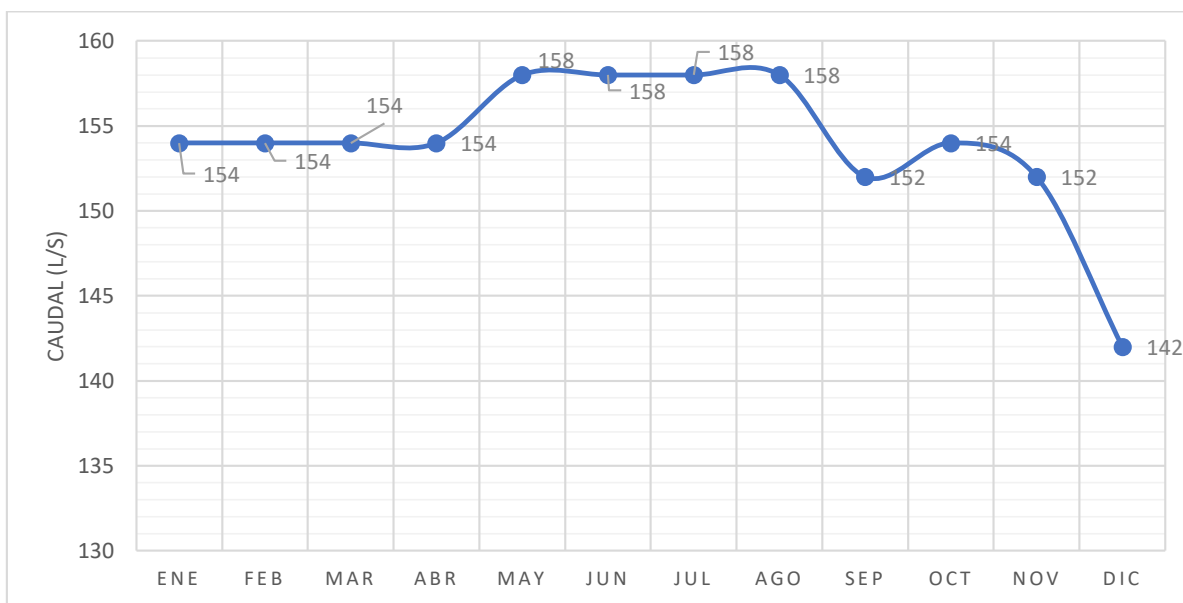
El diseño y desempeño de los procesos productivos en la industria en general dependen de la calidad de la materia prima, y la producción de agua potable no es la excepción, ya que de acuerdo con las condiciones de calidad del agua cruda es como se diseña la planta potabilizadora.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA CRUDA

La calidad de agua que tiene la fuente superficial de donde se capta el agua para los diferentes acueductos, tienen incidencia directa no sólo en el agua tratada sino en la cantidad y calidad del residuo que produce el proceso de potabilización, ya que estos lodos de potabilización dependen directamente de las características del agua cruda captada principalmente de la turbiedad y el caudal de ingreso a la planta.

El volumen de agua captado en el 2013 para la planta de potabilización de Mariquita se presenta en la Figura 4., donde se observan variaciones en el caudal de entrada debido a cambios climáticos, alteraciones en la fuente hídrica y a mantenimientos en las redes.

Figura 4. Caudal mensual promedio del agua cruda, año 2013



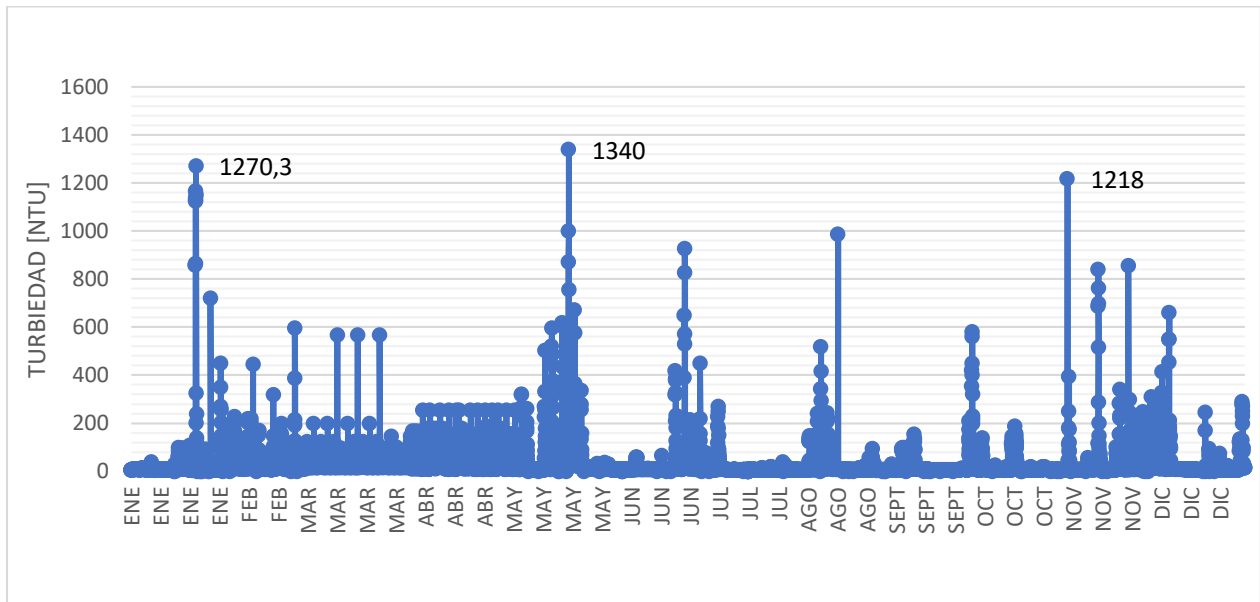
(Propia)

En la planta de tratamiento se lleva un registro diario del caudal de entrada, la turbiedad, el color y el pH del agua cruda hora a hora, de donde se extrajeron las características de caudal y turbiedad del año 2013 con el fin de observar el comportamiento de estos parámetros antes las diferentes variaciones climáticas que presentadas en un año.

En la Figura 6 se observa la variación de la turbiedad promedio diaria durante en el año 2013, donde el valor de turbiedad que más se presentó fue de 8 NTU, que es el valor característico de turbiedad que se maneja para la fuente superficial Río Sucio; también se tienen el valor máximo de 1340 NTU en el mes de mayo y 1270 NTU en enero, y la menor turbiedad presentada en el mes de julio con 0,09 NTU 2013, valores que dan una idea de las condiciones que se presentan en temporada de lluvias fuertes y tiempo seco. En la Figura 5 se presenta el valor promedio de turbiedad para cada mes del año 2013.

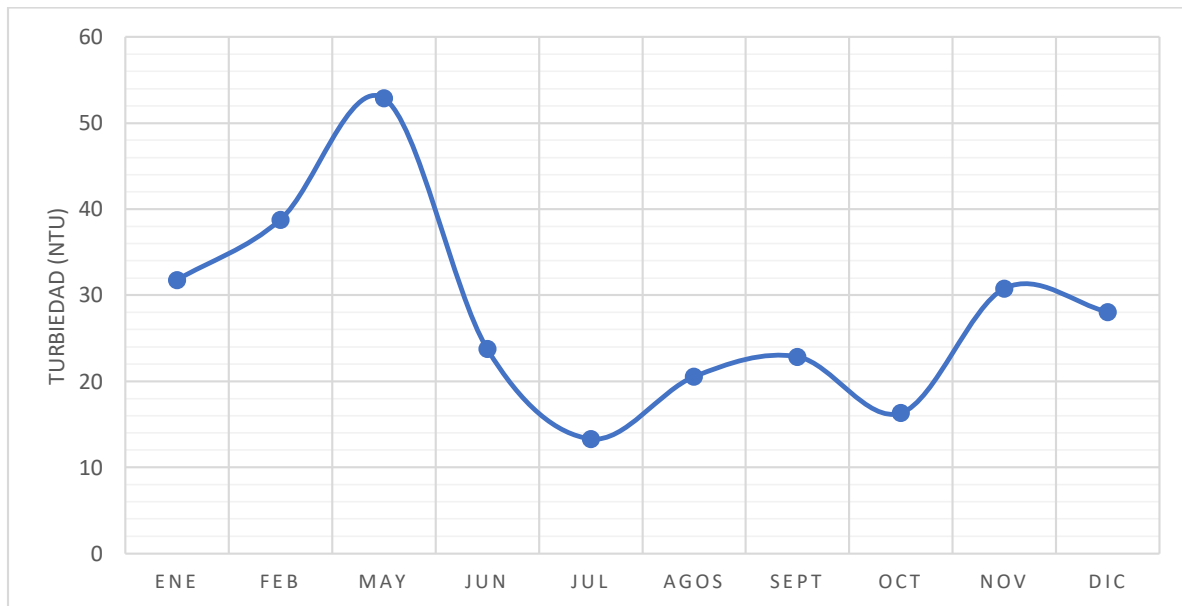
A partir de un estudio de noviembre de 2013 en la bocatoma sobre el Río Sucio se obtienen valores de coliformes totales y fecales del río antes de la captación.

Figura 6. Promedio diario de la turbiedad agua cruda, año 2013



(Propia)

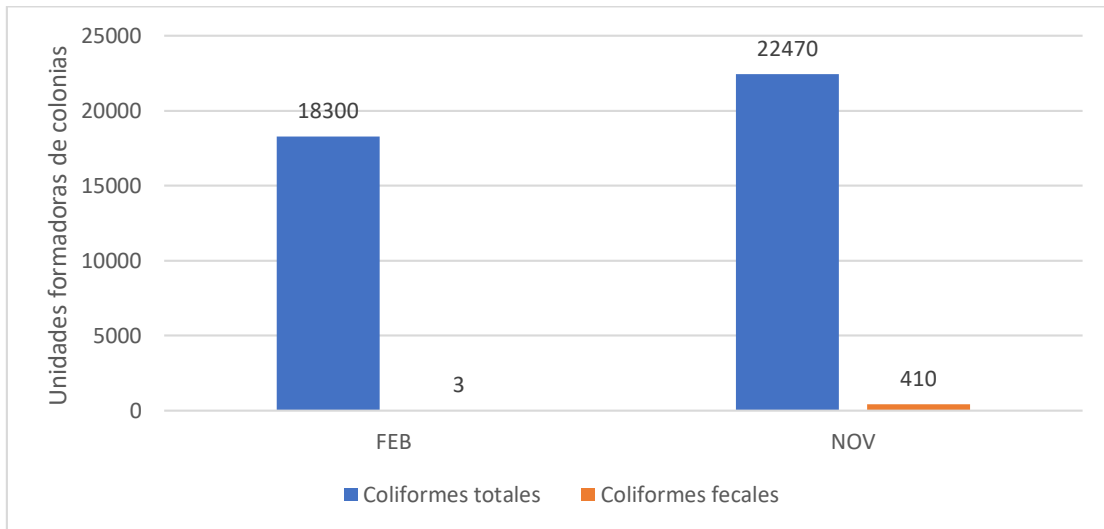
Figura 7. Turbiedad mensual promedio del agua cruda, año 2013



(Propia)

Dentro de las características de la fuente superficial es importante conocer su calidad microbiológica, para esto se tomó un estudio de noviembre de 2013 en la bocatoma sobre el Río Sucio y se obtuvieron valores de coliformes totales y fecales del río antes de la captación.

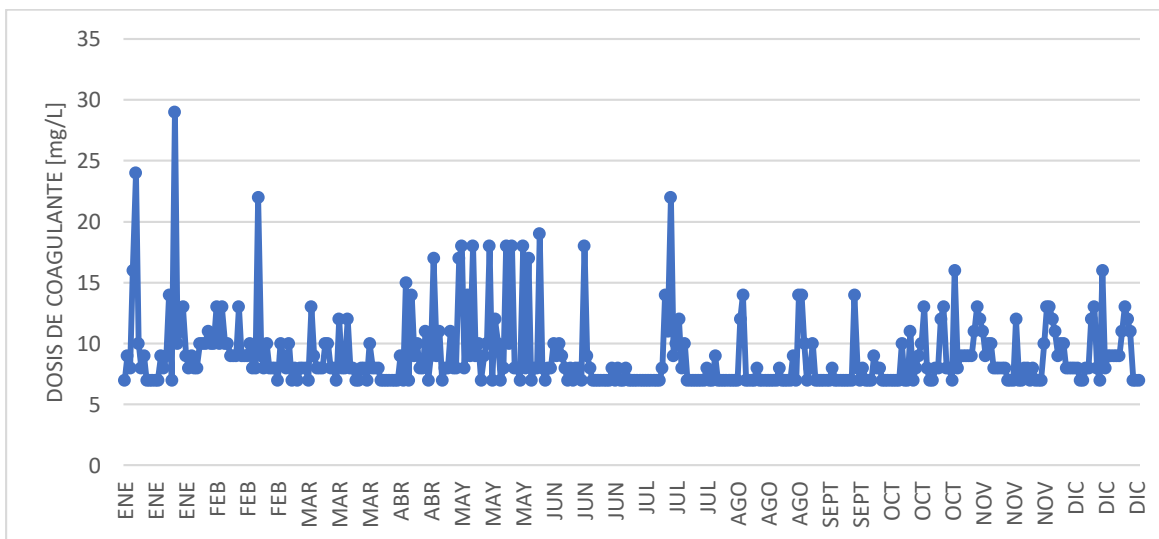
Figura 8. Coliformes totales y fecales Ríosucio – año 2013



(Propia)

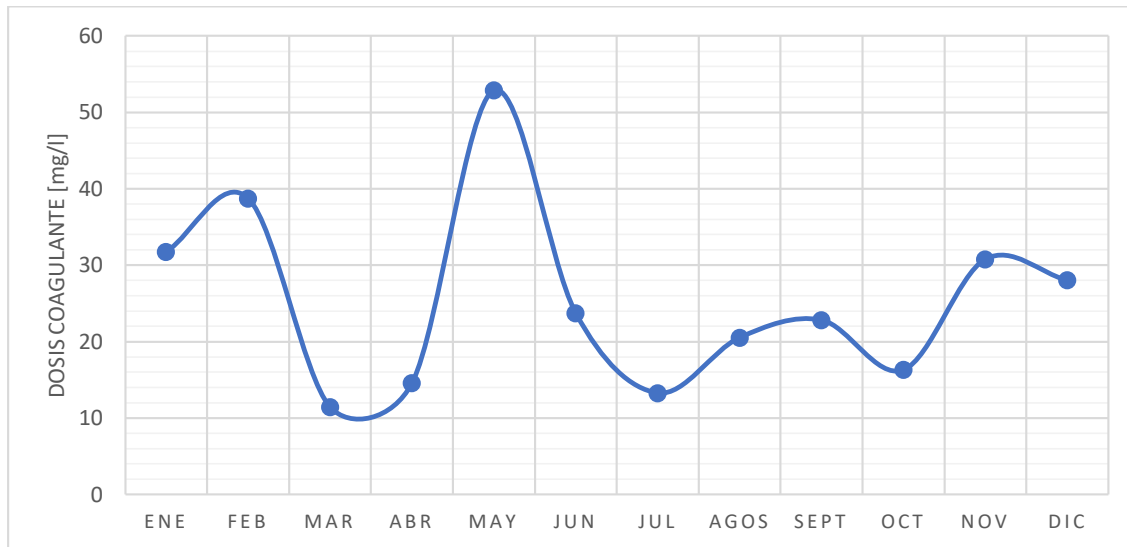
Del registro de planta también se extrajo la dosis óptima obtenida por medio en la prueba de jarras. La dosis óptima hallada con la prueba de jarras también fue tabulada y se obtuvo la Figura 9., donde se observa la dosis de coagulante aplicada en el proceso de potabilización en el año 2013, en esta se observa que la dosis máxima de sulfato de aluminio fue 29 mg/L en el mes de enero y la dosis más usada y también la mínima es de 7 mg/L, mientras en la Figura 11 se observa el valor promedio de la dosis de coagulante utilizado en cada mes.

Figura 10. Dosis de coagulante utilizado, año 2013



(Propia)

Figura 11. Dosificación de coagulante promedio año 2013



(Propia)

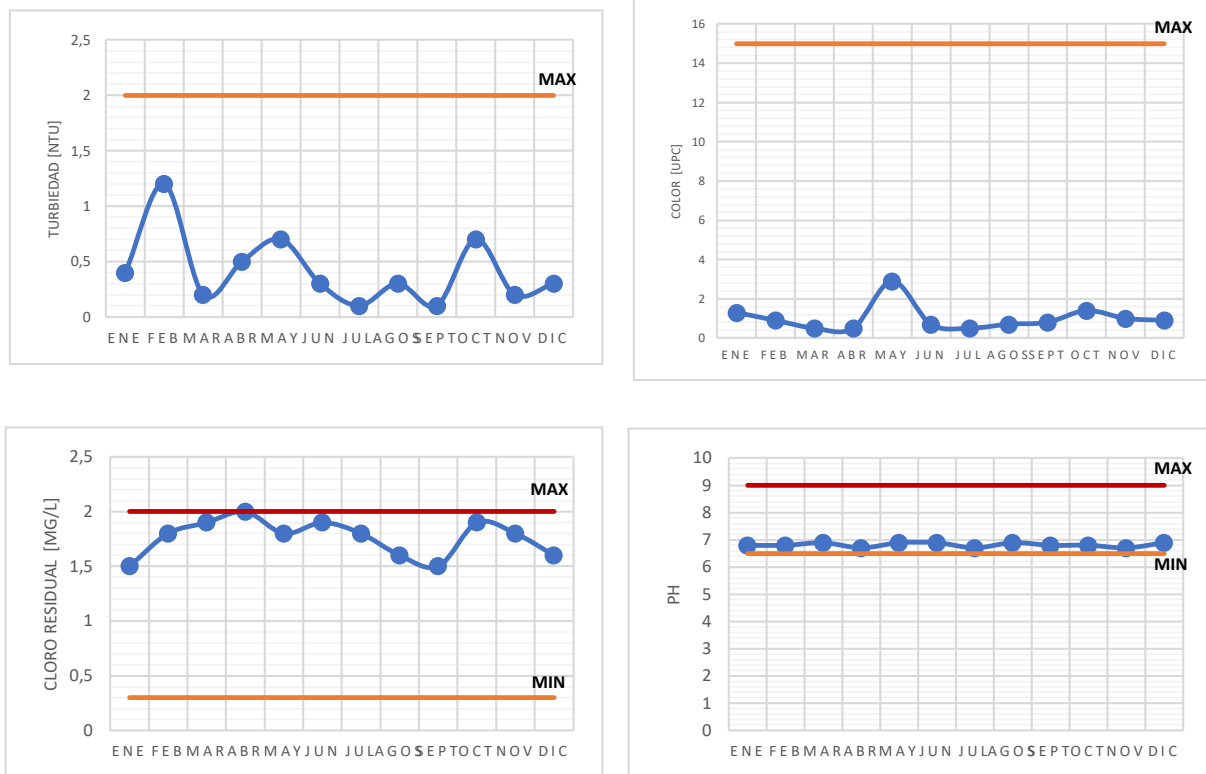
CARACTERÍSTICAS DEL AGUA POTABLE

En el registro diario de planta se plasman los análisis que se realizan en la planta de tratamiento al agua tratada en la red de distribución, para hacer seguimiento al cumplimiento de la resolución 2115 de 2007, donde se estipulan los valores máximos y mínimos permitidos para el agua potable distribuida en el país.

Se recopiló la información del punto de muestreo sobre la red de distribución más cercano a la planta de tratamiento para asemejar estas características a las de salida de la ptap. El resultado de los análisis realizados durante el año 2013 a los parámetros turbiedad, color, cloro residual y pH se observa en la Figura 12 y su comparación con respecto a la norma, que establece que la turbiedad en agua potable que debe ser inferior a 2 NTU y el valor máximo en el año fue de 1.2 NTU, similar con el parámetro color donde el valor máximo alcanzado fue de 2.9 UPC y se permiten valores hasta 15 UPC; así mismo observamos que la concentración de cloro residual se mantiene entre 1.5 y 2 mg/L que es consecuente con la ausencia de coliformes totales y fecales.

Estos valores son consecuentes con el IRCA – Índice de Riesgo de Calidad de Agua que presenta la Superintendencia de Servicios Públicos donde la Empresa de Servicios Públicos de Mariquita registra un valor inferior al 1%, y de acuerdo con la Resolución 2115 de 2007 los valores de IRCA entre 0 y 5% se considera agua apta para consumo humano sin ningún tipo de riesgo.

Figura 13. Características del agua potable distribuida en el municipio de Mariquita año 2013



CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL RIO GUALI

La cuenca mayor del río Gualí es una cuenca compartida con el Parque Nacional Natural Los Nevados; el río nace a los 4.850 m.s.n.m en la vereda Agua Caliente del municipio Casabianca, sobre jurisdicción del PNNN, sus aguas desembocan a la cuenca del río grande de La Magdalena, sobre los 600 m.s.n.m en el municipio de Honda, cabecera municipal.

La cuenca hidrográfica del río Gualí se encuentra ubicada al norte del departamento del Tolima sobre los municipios de: Herveo, Fresno, Falan, Palocabildo, Casabianca, Mariquita y una parte muy pequeña del municipio de Honda. Tiene un área de 78.669,99 hectáreas. (CORTOLIMA, Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2018).

En el Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca del río Gualí, se divide la cuenta en cinco tramos, donde el tramo 5 es el que recorre el municipio de Mariquita, y está destinado para el uso recreativo de contacto primario. Para este tramo se tienen siete objetivos de calidad establecidos, de los cuales no se cumplen los referentes a los contaminantes grasas y aceites, coliformes fecales y coliformes totales. Como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 6. Objetivos de Calidad tramo 5 – Cuenca del río Gualí

MUNICIPIO	TRAMO	USO DEFINIDO	PARÁMETRO	OBJETIVO DE CALIDAD CUMPLIMIENTO		RESULTADO
MARIQUITA	Río Sucio bocatoma acueducto – Desembocadura río Sucio T-5	Uso recreativo, contacto primario	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Mantener nivel de oxígeno disuelto	>5.0	6,1
			Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	Mantener carga orgánica	<10.0	<2,0 mg/l
			Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	Mantener el nivel de sólidos suspendidos	<200	10,0 mg/l
			Grasas y Aceites(mg/l)	Reducir grasas y aceites	Ausentes	3,4 mg/l
			Coliformes totales (NMP)	Reducir presencia coliformes totales	<20000	Sin información
			Coliformes fecales (NMP)	Reducir presencia coliformes fecales	<2000	210X10 ² NMP/100 ml

Fuente: (CORTOLIMA, POMCA Rio Gualí, Departamento del Tolima, 2014)

Por lo que se considera que el vertimiento de los lodos de la planta de tratamiento de agua potable tiene un aporte de patógenos lo que afecta los objetivos de calidad de la cuenca.

7. METODOLOGÍA

Para el caso de estudio se hizo una revisión de los datos técnicos sobre el proceso de producción de agua potable y sus residuos, y los requerimientos legislativos actuales en el país sobre la materia. Así mismo, se recopiló información del sistema de acueducto del municipio de San Sebastián de Mariquita, incluyendo datos históricos de operación de la ptap encontrados en la bitácora, y la normatividad colombiana.

Para trabajar en el primer objetivo: Caracterizar y cuantificar el agua de lavado de los sedimentadores y filtros, de la planta de tratamiento de agua potable de San Sebastián de Mariquita.

Se debe tener la información histórica de la fuente superficial de la cual se abastece el municipio de San Sebastián de Mariquita y también los valores actuales que presenta este el recurso, así como la

caracterización de agua potable producida, con el fin de establecer el cumplimiento de la legislación vigente durante este proceso.

El residuo de este proceso son los lodos, que son difíciles de cuantificar dada la forma como se evacúan en la planta de tratamiento. Pero este subproducto no deseado, dependen directamente de las características de la materia prima y del coagulante que se utilice en su tratamiento, por lo cual se pueden estimar muchas de sus características.

CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA (AGUA CRUDA):

Las muestras de agua cruda se tomaron a la entrada del agua a la planta de tratamiento antes de la dosificación de sulfato. La muestra se tomó cada hora en un recipiente plástico de 1 L durante 24 horas, y se mantuvieron refrigeradas hasta el momento en que se completó la muestra compuesta. Luego se homogenizó y se llevó inmediatamente al laboratorio ubicado en la misma planta de tratamiento, donde se analizaron los parámetros de turbiedad, color aparente, pH, conductividad y sólidos totales.

Se tomaron muestras durante ocho días y los valores obtenidos del análisis se promediaron para obtener una caracterización actual del agua cruda procesada en la planta.

CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO (AGUA POTABLE)

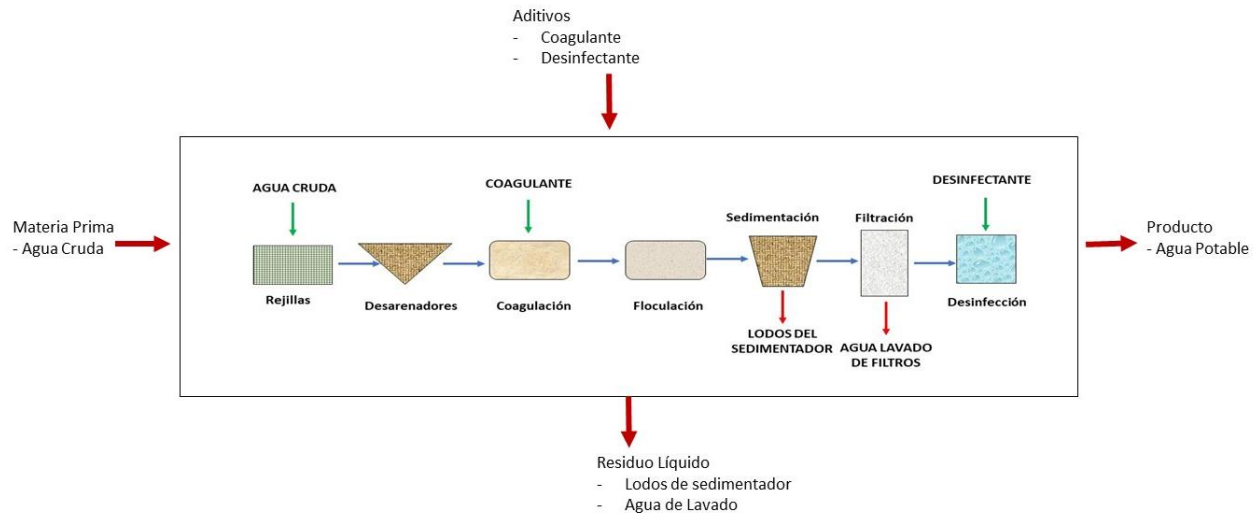
El producto obtenido en este proceso es el agua apta para consumo humano y estas muestras se tomaron del punto de muestra concertado con la Secretaría de Salud más cercano a la salida de la planta de tratamiento, que es el primer punto de muestra en la red de distribución y está denominado como La Paz. Antes de realizar la toma, se limpió el orificio de salida de la llave con una gasa solución de hipoclorito dado que la llave es plástica. Luego se abrió la llave dejando fluir el agua aproximadamente un minuto, para quitar la estanciedad del tubo asegurando que el agua contenida en las tuberías ha sido renovada y la temperatura del agua se ha estabilizado para tomar las muestras definitivas.

Se recolectó una muestra diaria durante 8 días, en frascos esterilizados de 1000 ml y se almacenó en una nevera portátil para mantener la cadena de frío y se transportó hasta la planta de tratamiento donde fueron analizados los parámetros de Color, Turbiedad, Alcalinidad, Coliformes totales y fecales. In situ se analizó cloro residual y pH.

BALANCES DE MATERIA

El proceso de producción de agua potable como se había indicado anteriormente tiene una entrada que es la materia prima, un producto deseado que es el agua apta para consumo humano. Los residuos o productos no deseados que se generan en este proceso son los lodos y el agua de lavado.

Figura 14. Esquema general del proceso

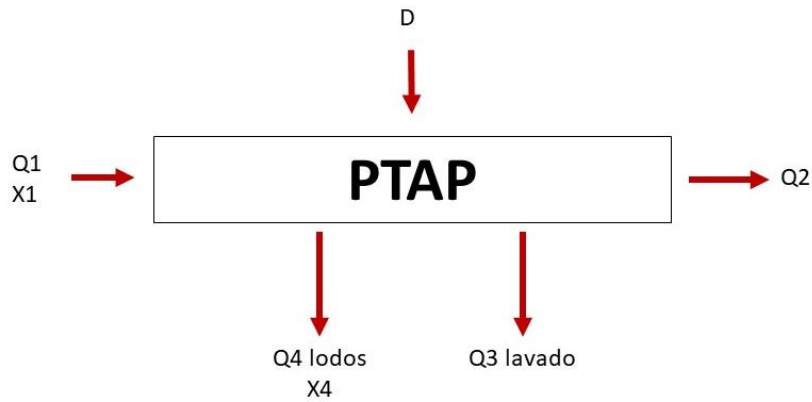


El esquema de la Figura 14 representa el diagrama del proceso de potabilización de agua y el volumen de control del mismo, donde se indican los puntos de entrada de aditivos que afectan la calidad y cantidad de los lodos que se producen en el proceso, e indica los puntos de salida de estos lodos lo que permite plantear los balances de materia del proceso.

BALANCE DE MATERIA PARA CONCENTRACIÓN DE LODOS

En la siguiente figura está el volumen del control con base en las concentraciones de lodos y sólidos suspendidos totales conocidos de la planta, con base en esto se plantean los balances que permitirán hallar los demás caudales y concentraciones importante en este trabajo.

Figura 15. Volumen de control del proceso de potabilización – balance lodos



- Donde:
- D: Dosis de sulfato de aluminio
 - Q1: Caudal de entrada a la planta
 - X1: Concentración de SST en el agua cruda
 - Q2: Caudal de agua tratada
 - Q3: Caudal de agua de lavado de filtros
 - Q4: Caudal de lodos producidos
 - X4: Concentración sólidos en los lodos

Balace general del sistema: $Q1 + D = Q4 + Q3 + Q2$ Ecuación 1

Se calcula la producción de lodo de acuerdo con planteado por la Comisión Nacional del Agua en México (Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007)

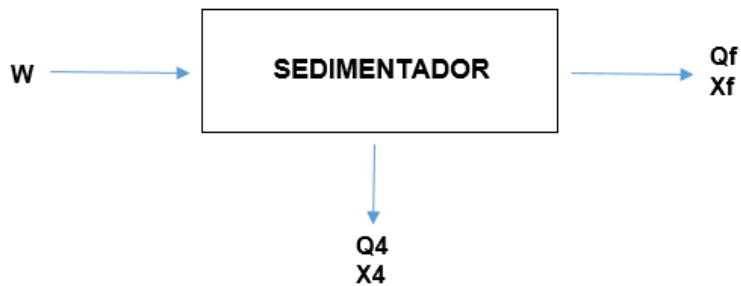
:

$W = 86,4 * Q1(0,44 * D + X1 + A)$ Ecuación 2

donde:

- W = lodo producido, kg/día, base seca
- Q1 = Agua captada, m³/s
- D = Dosis de sulfato de aluminio, mg/l
- X1 = Concentración de sólidos suspendidos del agua cruda, mg/l
- A = Productos químicos adicionales agregados tales como polímero, arcilla carbón activado, mg/l

Figura 16. Volumen de control del sedimentador



El balance de materia en el sedimentador es el siguiente:

$$W = Q4 * X4 + Qf * Xf \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

W = lodo producido, kg/día, base seca

Q4: Caudal de lodos producidos

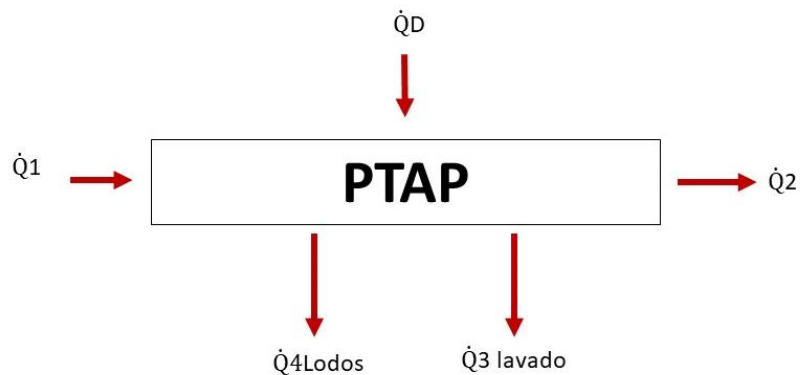
X4: Concentración sólidos en los lodos

Qf: Caudal de entrada a filtros

Xf: Concentración de SST de entrada a filtros

BALANCE DE MATERIA PARA CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO

Figura 17. Volumen de control del proceso de potabilización – balance de aluminio



Donde:

$\dot{Q}D$: Flujo másico Aluminio en el coagulante aplicado

$\dot{Q}1$: Flujo másico de Aluminio en el agua cruda de entrada a la planta

$\dot{Q}2$: Flujo másico de aluminio en el agua tratada

Q̇3: Flujo másico de aluminio en el agua de lavado de filtros

Q̇4: Flujo másico de aluminio en los lodos producidos en el sedimentador

Balance general del sistema: $\dot{Q}1 + \dot{Q}D = \dot{Q}4 + \dot{Q}3 + \dot{Q}2$ Ecuación 4

Para esto se calculará el flujo másico de coagulante (sulfato de aluminio) con las siguientes fórmulas:

$$F_{Al} = \frac{PM_{Al}}{PM_{Al_2O_3}} * \%Al_2O_3 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde: F Al: La fracción molar de aluminio en el coagulante

PM Al: Peso molecular de aluminio

PM Al₂O₃: Peso molecular del óxido de aluminio

%Al₂O₃: Porcentaje de óxido de aluminio en el coagulante

$$QD = Q1 * dosisopt * FAl \quad \dots \text{Ecuación 6}$$

Donde: Q1: Caudal de agua cruda de entrada

Dosisop: Dosis óptima promedio

CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ESPERADOS

El residuo esperado en el proceso de potabilización de agua son los lodos y el agua de lavado como se ha mencionado en varias ocasiones; y como sus características son tan variables debemos caracterizarlos para conocer sus ventajas y desventajas al momento de buscar una alternativa de disposición adecuada de los mismos.

Caracterización agua de lavado de filtros

La muestra se tomó en el momento del retrolavado de los filtros, que se realiza cada 24, se lavan de a dos filtros en tres momentos del día hasta completar el lavado de los 6 filtros, o en horas de la madrugada cuando se reduce el consumo se lavan los 6 filtros de manera simultánea utilizando todo el volumen de agua tratada del tanque de almacenamiento, por lo cual se estima que el caudal de lavado de cada filtro es de aproximadamente 136 L/s

Las muestras se tomaron en las canaletas de cada filtro donde llega el agua de retrolavado después de pasar a través del lecho filtrante. El tiempo de lavado depende del criterio del operador, quién por su experiencia determina cuando el filtro está limpio y suspende el flujo del agua, este tiempo es en promedio de 20 minutos. Durante el tiempo de lavado se tomaron alícuotas de 1L cada 5 minutos, para un total de 4 litros de muestra por cada filtro. De la muestra en cada filtro se tomó una alícuota 1L para componer

un volumen total de 6L de muestra de agua de lavado de filtros. Se tomaron muestras diarias del agua de lavado, hasta recolectar ocho muestras.

Por la estructura de la canaleta no se logró medir caudal de agua de lavado, por lo tanto, la muestra de cada filtro como la final se compuso con alícuotas de igual volumen.

Una vez recolectada la muestra del agua de lavado de filtros se caracterizó de manera inmediata, los análisis de laboratorio que se efectuaron fueron Color, Turbiedad, pH, Sulfatos, Aluminio y Sólidos Sedimentables.

Del sobrenadante obtenido tras realizar la prueba de sólidos sedimentables se midió nuevamente el aluminio.

Caracterización lodos de sedimentación

La toma de muestra se realizó en el momento del lavado de los sedimentadores. Estos se lavan uno a la vez cada 15 días, por lo cual se esperó al momento del lavado para realizar la toma de muestra.

Se recolectaron muestras en cada lavado durante dos meses para así lograr la cantidad de ocho muestras.

Las muestras se tomaron del pozo de descarga del agua de lavado, donde debido a la profundidad del pozo se debió tomar la muestra por medio de un balde que se hizo descender por medio de una cuerda.

El lavado dura aproximadamente 20 minutos por lo cual se tomaron alícuotas cada 5 minutos por medio del balde. Del agua que se recogió en el balde, se mezcló muy bien y se trasvasó a un recipiente de 1 L hasta que estuviera completamente lleno, así para cada alícuota.

Debido al gran volumen de agua de lavado que llega al pozo y a que la estructura de llegada es sobre el fondo del mismo, no fue posible medir caudal de manera volumétrica, así que para conformar la muestra compuesta se tomaron volúmenes iguales de cada alícuota y se compusieron 4 litros de muestra de agua de lavado del sedimentador y se homogenizó completamente.

Una vez recolectada la muestra de lodos se procedió a su caracterización de manera inmediata, los análisis de laboratorio que se efectuaron fueron Color, Turbiedad, pH, Sulfatos, Aluminio y Sólidos Sedimentables.

Del sobrenadante obtenido tras realizar la prueba de sólidos sedimentables se midió nuevamente el aluminio.

Segundo objetivo: Realizar pruebas de tratabilidad simulando la recirculación de los lodos y evaluar su viabilidad.

PRUEBAS DE TRATABILIDAD

Con el fin de simular la recirculación de los lodos del sedimentador y/o agua de lavado de filtros, se realizó la prueba de jarras utilizando los tiempos de operación de la planta.

Se utilizaron 6 jarras de 1L, cada una con agua cruda caracterizada previamente. En el primer ensayo se utilizó como coagulante el agua de lavado de los filtros y en el segundo los lodos del lavado del sedimentador.

Con base en la turbiedad se escogieron los volúmenes de coagulante a aplicar en mililitros, y se dosificaron procurando que fuera simultáneo, mientras la agitación del equipo estaba a su valor máximo simulando la mezcla rápida durante un minuto. Luego se redujo la velocidad de agitación a 40 rpm para simular la floculación durante 20 minutos y se retiraron las paletas. Se observó el floc formado en cada jarra y se esperó durante 30 minutos el proceso de sedimentación

Pasado el tiempo se tomaron muestras del clarificado obtenido en cada jarra y se les midió turbiedad y color, y así con el fin de evaluar con cual dosis se obtuvo mayor remoción de estos parámetros.

Tercer objetivo: Proponer la mejor alternativa para el manejo de los lodos

ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN

Se encuentran varias alternativas para la reutilización de los lodos luminosos, producidos en las plantas de tratamiento de agua potable, tales como las siguientes:

1. Aprovechamiento de los lodos para la fabricación de materiales de construcción
2. Recuperación del sulfato de aluminio y utilización como coagulante
3. Recirculación de los lodos

Se analizaron las fortalezas y debilidades de las anteriores opciones para ser implementadas en la ptap del municipio de Mariquita, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Comparación opciones de reutilización de los lodos

OPCIONES DE REUTILIZACIÓN	FORTALEZAS	DEBILIDADES
Aprovechamiento de los lodos para la fabricación materiales de construcción	1. Minimizar el impacto ambiental derivado de las descargas de estos residuos	1. Los lodos deben tener unas características químicas determinadas para que los ladrillos cumplan con los requerimientos de resistencia a la compresión y absorción de humedad.
	2. Recibir un ingreso por la venta de los ladrillos fabricados	2. Requiere inicialmente análisis mineralógico y granulométrico, con los que no se cuentan en el laboratorio de la ptap ni en la región.
	3. El uso productivo de lodos puede ayudar en la recuperación de los recursos naturales.	3. Los ladrillos son realizados en mezclas lodo-cemento, lodos-mortero, lo que incluye un gasto adicional en los materiales para las pruebas.
		4. Requiere un acondicionamiento previo en lechos de secado para deshidratar los lodos antes de realizar las mezclas y conformar los ladrillos.
Recuperación del sulfato de aluminio y utilización como coagulante	1. Minimizar el impacto ambiental derivado de las descargas de estos residuos	1. Requiere reactivos para realizar la recuperación - Ácido sulfúrico.
	2. Reducir los costos de materia prima	2. Necesita un tanque de homogenización, de reacción y la estructura de recirculación del coagulante recuperado.
	3. La efectividad del coagulante recuperado es similar al coagulante comercial (NUÑEZ ZARUR & PEÑA CASTRO, 2011).	3. Se debe buscar una disposición y/o tratamiento para el remanente o residuo que queda tras separar y recircular la solución de aluminio recuperado.

OPCIONES DE REUTILIZACIÓN	FORTALEZAS	DEBILIDADES
Recirculación de agua de lavado con lodos.	1. Minimizar el impacto ambiental derivado de las descargas de estos residuos.	1. Implementación de obra civil para la recirculación.
	2. Disminuir la captación sobre la fuente superficial.	
	3. Reducir el consumo de coagulante	
	5. Los análisis requeridos para evaluar la viabilidad se pueden realizar en el laboratorio de la ptap	

8. RESULTADOS OBTENIDOS

Al desarrollar la metodología planteada se obtuvieron una serie de datos de los análisis realizados, al agua cruda, al agua potable y a los lodos obtenidos del proceso de potabilización.

CARACTERIZACIÓN DEL AGUA CRUDA

El análisis del agua cruda proveniente de Río Sucio, realizada durante ocho días en el mes de agosto del 2014, se presenta en la Tabla 8. El lapso en que fueron tomadas las muestras fue tiempo seco por lo cual no se presentaron valores altos de turbiedad.

Tabla 8. Caracterización agua cruda Ríosucio

CARACTERÍSTICA	VALOR PROMEDIO EN TIEMPO SECO
Turbiedad (NTU)	7.3
Color (UPC)	57
Dureza (mg/L)	15
Alcalinidad (mg/L)	60
pH	7,2
Aluminio (mg/L)	1,01

CARACTERIZACIÓN DEL AGUA POTABLE

Las muestras de agua potable fueron tomadas en el primer punto de la red de distribución en las mismas fechas que se tomaron las muestras de agua cruda, durante 8 días durante el mes de agosto de 2014. Las mediciones realizadas en estos 8 días se promediaron y los valores hallados se encuentran en la Tabla 9.

Tabla 9. Caracterización agua potable PTAP Mariquita

CARACTERÍSTICA	VALOR PROMEDIO
Turbiedad (NTU)	0,2
Color (UPC)	2,5
pH	7,2
Cloro residual (mg/L)	1,9
Alcalinidad (mg/L)	7
pH	7,1
Aluminio (mg/L)	0,11

Coliformes Totales (UFC)	0
Coliformes Fecales (UFC)	0

CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS

Para poder analizar las alternativas de disposición de los residuos se caracterizaron los dos residuos (los lodos del sedimentador y el agua de lavado de filtros) cada uno por separado. Los análisis realizados fueron Turbiedad, Color, pH, Sulfatos, Aluminio y sólidos sedimentables.

Caracterización agua de lavado de filtros:

En la Tabla 10 se encuentra la caracterización del agua de lavado de filtros obtenida al promediar los valores registrados de las ocho muestras, y la caracterización que se presenta en la literatura como típica para el agua de lavado de filtros en una PTAP que utiliza sulfato de aluminio como coagulante. Se presenta una turbiedad de 32,5 NTU y concentración de aluminio 0,97 mg/L, que son concentraciones bajas con respecto a los valores típicos en este tipo de agua, lo cual puede indicar que el tiempo de lavado está siendo superior al necesario.

Tabla 10. Caracterización agua lavado de filtros

ANÁLISIS	AGUA DE LAVADO DE FILTROS - MARIQUITA	VALOR TÍPICO AGUA DE LAVADO DE FILTROS
Turbiedad (NTU)	32,5	60 – 400
Color (UPC)	60	
pH	6,7	6.7 - 7.5
Sulfatos (mg/L)	14	
Aluminio (mg/L)	0,97	30 – 80

De la muestra diaria que se tomó del agua de filtros, se destinó un litro para analizar sólidos sedimentables y al sobrenadante del cono imhoff se le midió nuevamente aluminio.

El registro de valores se encuentra en las figuras siguientes y se observa que los sólidos capaces de sedimentarse en una hora fueron menores 15 ml/L en todas las mediciones y la concentración de aluminio medido en el sobrenadante tuvo valores entre 0,05 y 0,25 mg/L, ambos valores inferiores a los que se esperan para este tipo de residuo.

Figura 18. Sólidos sedimentables – Agua lavado de filtros

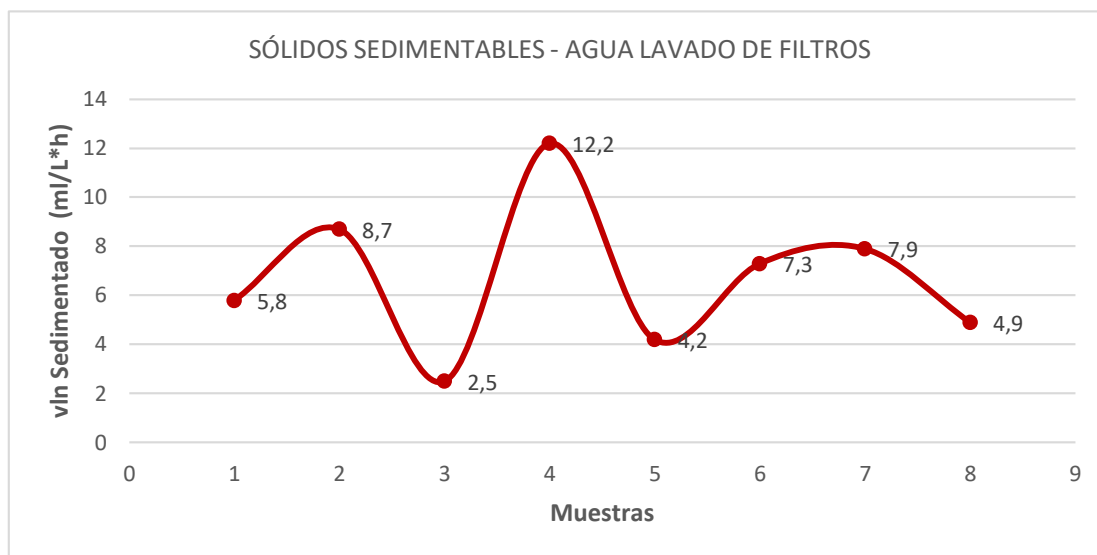
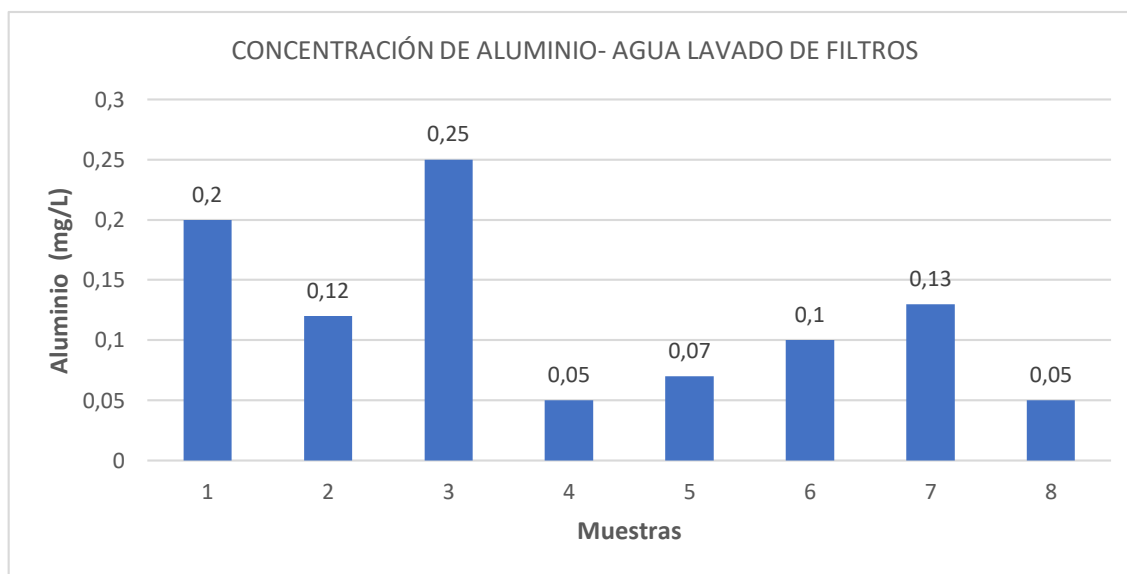


Figura 19. Concentración de aluminio sobrenadante – Agua lavado de filtros



Los sólidos capaces de sedimentarse en una hora fueron menores 15 ml/L en todas las mediciones y la concentración de aluminio medido en el sobrenadante tuvo valores entre 0,05 y 0,25 mg/L, ambos valores inferiores a los que se esperan para este tipo de residuo.

Debido a estos resultados se descartó la recirculación del agua de lavado de filtros con el fin de recuperar el aluminio presente ya que en la primera caracterización la concentración de aluminio fue de 0,97 mg/L y del sobrenadante el valor más alto fue de 0,25 mg/L, es decir su potencial como coagulante es bajo.

Caracterización de los lodos del sedimentador:

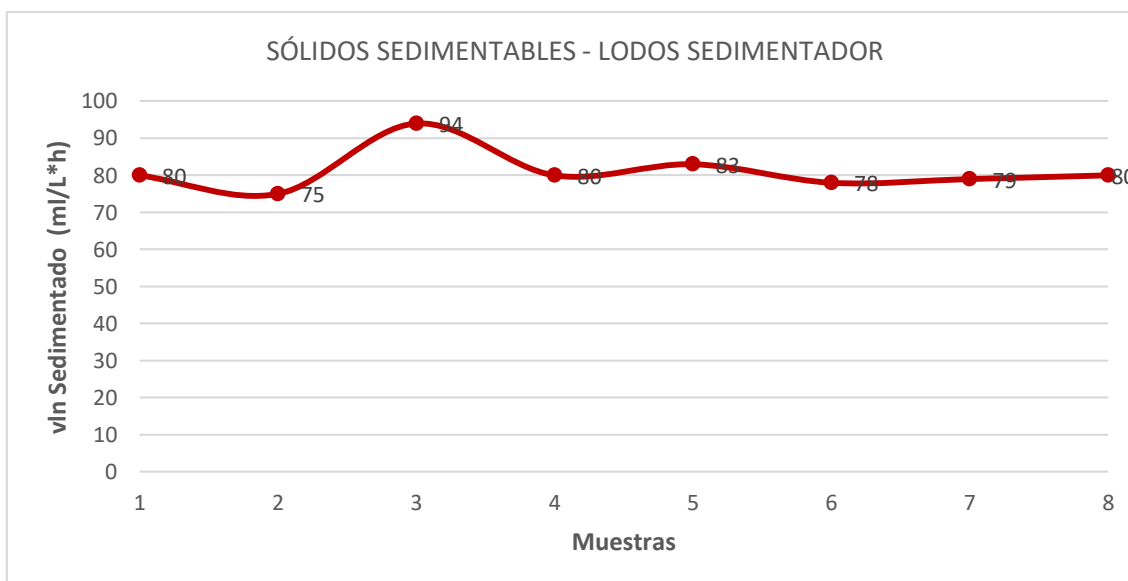
El segundo residuo que se obtiene en el proceso de potabilización como ya se ha dicho son los lodos del sedimentador, lo cual es tienen características muy diferentes al agua de lavado de filtros, debido a la etapa del proceso en el que se producen.

Se realizó la toma de muestras y caracterización de acuerdo a la metodología planteada anteriormente; los valores obtenidos en cada análisis se promediaron y se observan en la Tabla 11. El valor de sólidos sedimentables en cada muestra y la concentración de aluminio del sobrenadante se presentan a continuación:

Tabla 11 Caracterización lodos del sedimentador

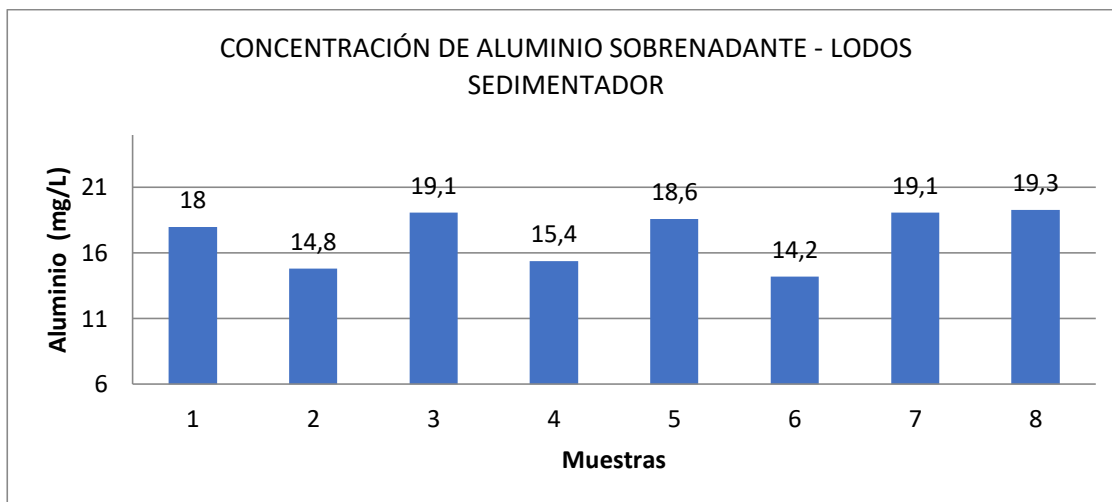
ANÁLISIS	LODOS SEDIMENTADOR
Turbiedad (NTU)	1050
Color (UPC)	7200
pH	8,9
Sulfatos (mg/L)	300
Aluminio (mg/L)	15

Figura 20. Sólidos sedimentables - Lodos de sedimentador



Los sólidos sedimentables en una hora estuvieron entre 80 y 94 ml/ L y la concentración de aluminio máxima obtenida al sobrenadante fue de 19,3 mg/L y la mínima de 14,2 mg/L.

Figura 21. Concentración de aluminio sobrenadante - Lodos de sedimentador



En las caracterizaciones realizadas a los lodos procedentes de los sedimentadores (Tabla 11), se encontró que la concentración de aluminio y de sulfatos era baja con respecto a los valores de referencia encontrados en la literatura.

Ya que la turbiedad y el color tenían valores altos, se supuso altas impurezas disueltas y suspendidas, por eso se realizó el análisis de aluminio al líquido sobrenadante del ensayo de sólidos sedimentables, ya que permitiría obtener la concentración de aluminio disuelto en el agua y sin interferencias.

Por lo anterior se filtraron los lodos de los sedimentadores a través de papel de filtro de 0,45µm de marca Merk compuesto de membrana de celulosa; y se caracterizó el filtrado, obteniéndose una disminución en la turbiedad de 1050 a 67,9 NTU y el color de 7200 a 4050 NTU, pero también se redujo la concentración de aluminio a 9,7 mg/L, es decir que el filtro al tener un poro pequeño retuvo buena parte del aluminio suspendido.

Tabla 12. Caracterización lodos filtrados del sedimentador

ANÁLISIS	LODOS DEL SEDIMENTADOR FILTRADOS
Turbiedad (NTU)	67,9
Color (UPC)	4050
pH (UND)	5,9
Sulfatos (mg/L)	186,9
Aluminio (mg/L)	9,7

El filtrado obtenido se analizó para sólidos sedimentables que dieron valores entre 53 y 63 ml/L*h, y se midió la concentración de aluminio al sobrenadante, los resultados de ambos análisis se observan en la Figura 22 y Figura 23.

Figura 22. Sólidos sedimentables - Lodos de sedimentador filtrados

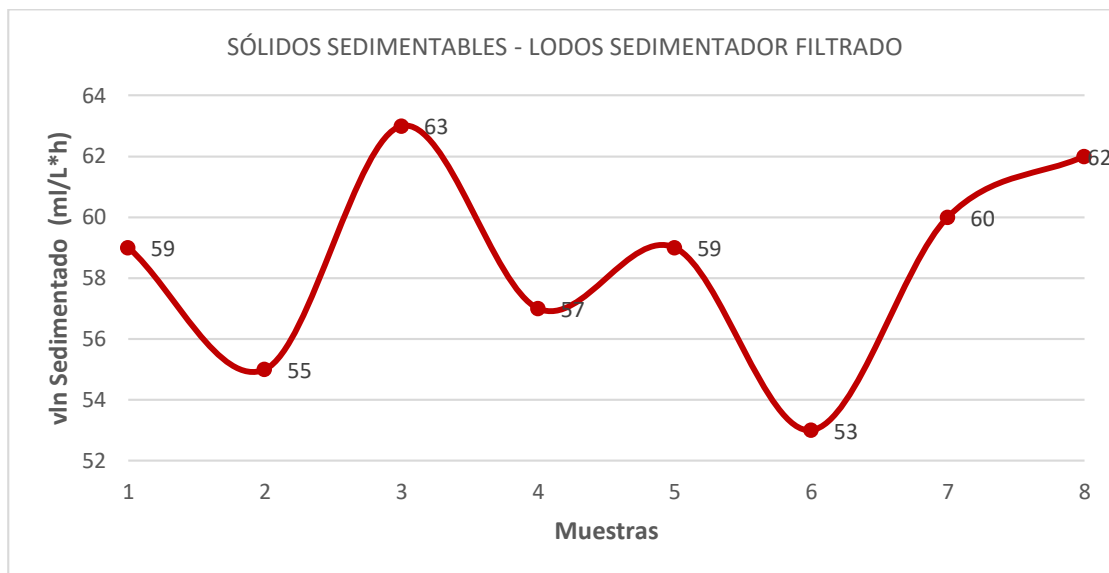
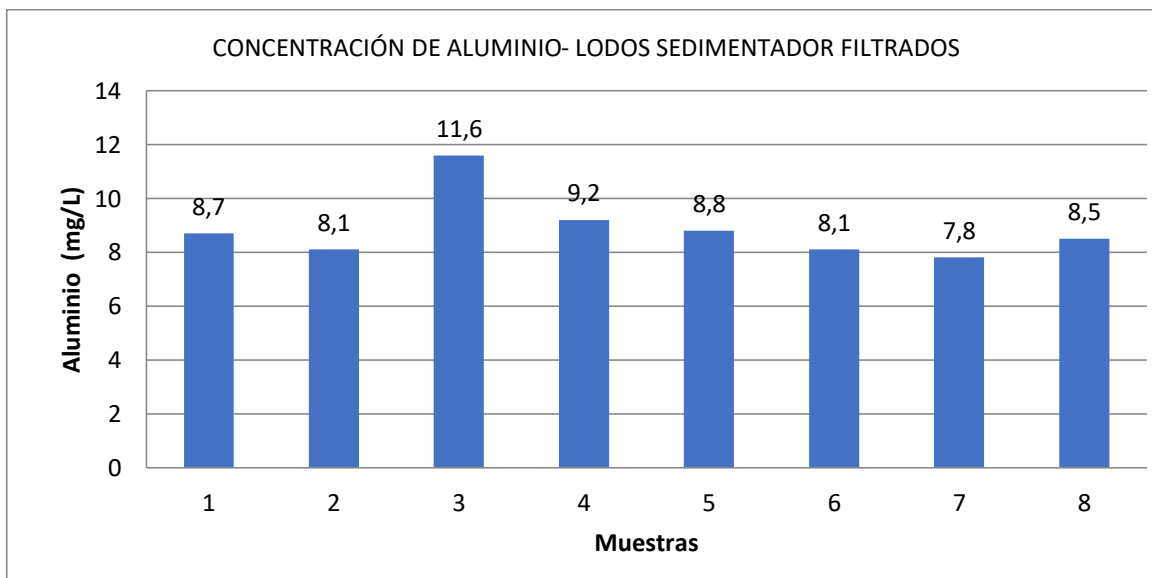


Figura 23. Concentración de aluminio en el recuperado - Lodos de sedimentador filtrados



PRUEBAS DE TRATABILIDAD

Como se dijo en la metodología se realizaron las pruebas de tratabilidad, con la ayuda de test de jarras para evaluar el desempeño de los diferentes residuos del proceso de potabilización, al ser utilizados como coagulante en el mismo proceso, por lo cual se hicieron dos pruebas, una con lodos del sedimentador y la otra con agua de lavado de filtros.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las caracterizaciones se decidió realizar las pruebas de tratabilidad con los lodos producto del lavado de los sedimentadores y con el sobrenadante obtenido de los sólidos sedimentables de los mismos lodos, que son los de mayor concentración de aluminio y por ende su capacidad como agente coagulante debe ser mejor, con respecto al agua de lavado de filtros y a los lodos filtrados.

En este análisis se utilizaron jarras de 1L que fueron llenadas con agua cruda proveniente de Río sucio que tenía una turbiedad de 7,1 NTU, color 52 UPC y pH de 7,2 unidades. No se utilizan en la operación ningún acondicionador de pH, ya que según las pruebas de tratabilidad de la planta el pH óptimo de coagulación en el rango de 7,1 y 7,5.

Para hallar la dosis de sobrenadante que se debe dosificar, se calculó el volumen necesario de cada una de estas sustancias para obtener una concentración de 7 mg/L en el agua cruda, ya que esta concentración es la dosis óptima de sulfato de aluminio hallada para un agua cruda con turbiedad de 7,1 NTU de acuerdo a los datos de operación recopilados. Con base en la dosis encontrada se tomaron valores por encima y por debajo para un total de seis dosis.

Dado que en el proceso de potabilización las principales variables de control son la turbiedad y el color, son éstas a las que se le hicieron seguimiento, midiendo su valor final y calculando la remoción obtenida con cada dosis.

El primer ensayo realizado fue con los lodos del sedimentador, y las dosis utilizadas y los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 13 donde se utilizaron dosis entre los 250 y 500 ml, donde la mayor remoción se obtuvo con una dosis de 400 ml de lodos del sedimentador, con remociones del 47,9% de turbiedad y 43,3%.de color.

Tabla 13. Prueba de jarras con lodos del sedimentador

CONDICIONES INICIALES DEL AGUA CRUDA				
Turbiedad: 7,1 NTU				
Color: 52 UPC				
pH: 7,2				
DOSIS	TURBIEDAD		COLOR	
Lodos sedimentador (ml)	Valor final (NTU)	Remoción (%)	Valor final (UPC)	Remoción (%)
250	9,3	-30,9	51	1,9
300	10	-40,8	38,1	26
350	5,8	18,3	55,6	-6,9
400	3,7	47,9	29,5	43,3
450	7,3	-2,8	59,8	-15
500	14,2	-100	93,1	-79

La variación de la turbiedad y el color con respecto a los valores iniciales, se encuentra en la Figura 24 y Figura 25.

Figura 24. Variación turbiedad – Prueba de jarras con lodos sedimentador

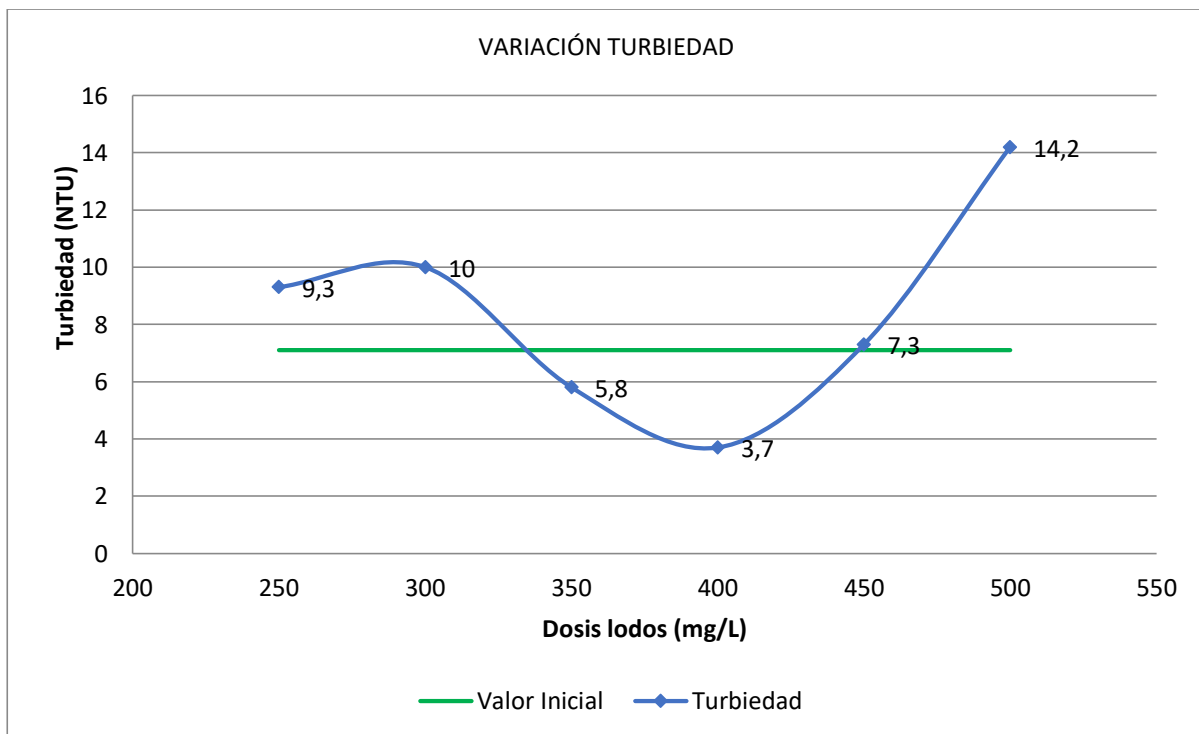
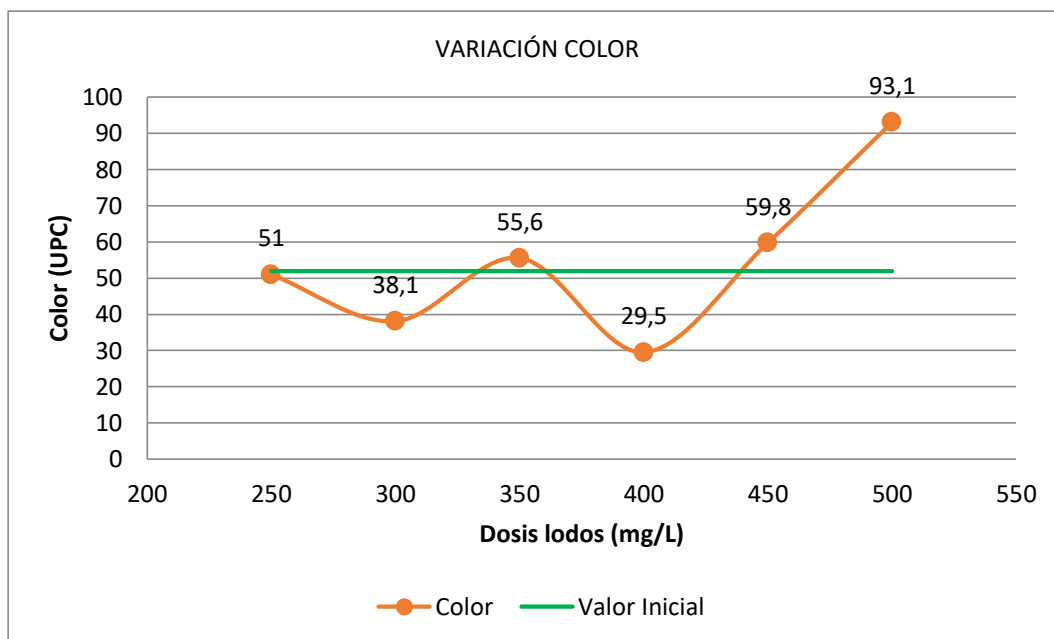


Figura 25. Variación Color – Prueba de jarras con lodos sedimentador



La segunda prueba de jarras se realizó con el sobrenadante obtenido de los lodos del sedimentador, las dosis utilizadas fueron entre los 550 y 750 ml, las remociones logradas fueron de 66% en turbiedad y 73% en color siendo más altas que en el ensayo anterior.

Tabla 14. Prueba de jarras con sobrenadante

CONDICIONES INICIALES DEL AGUA CRUDA				
Turbiedad: 7,1 NTU				
Color: 52 UPC				
pH:7,2				
DOSIS	TURBIEDAD		COLOR	
Lodos sedimentador (ml)	Valor final (NTU)	Remoción (%)	Valor final (UPC)	Remoción (%)
550	20,1	-183,1	67	-28
600	7,6	-7	54,8	-5,4
700	4,1	42,3	43,9	15,5
730	1,8	76,6	14	73,1
750	6,3	11,3	58,8	-13,1

Figura 26. Variación turbiedad – Prueba de jarras con sobrenadante

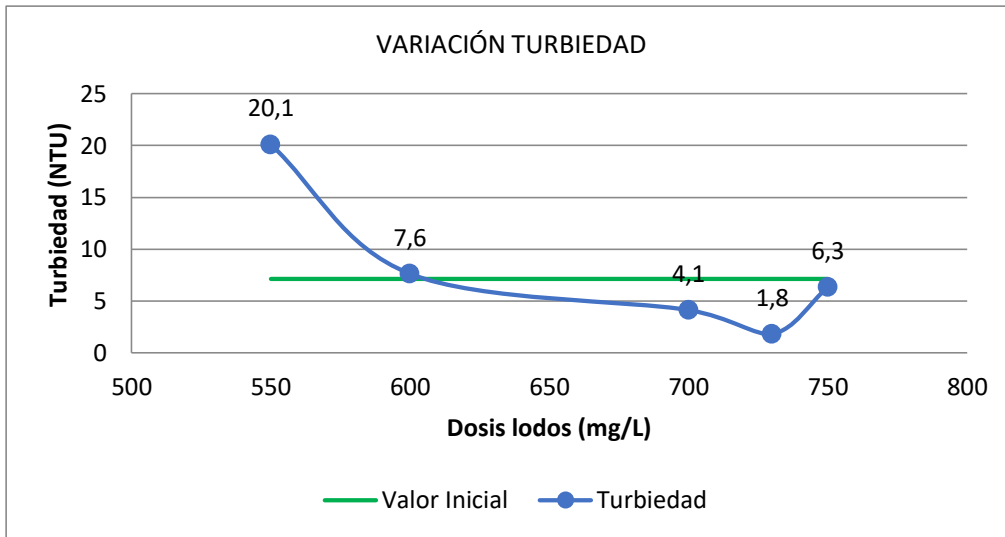
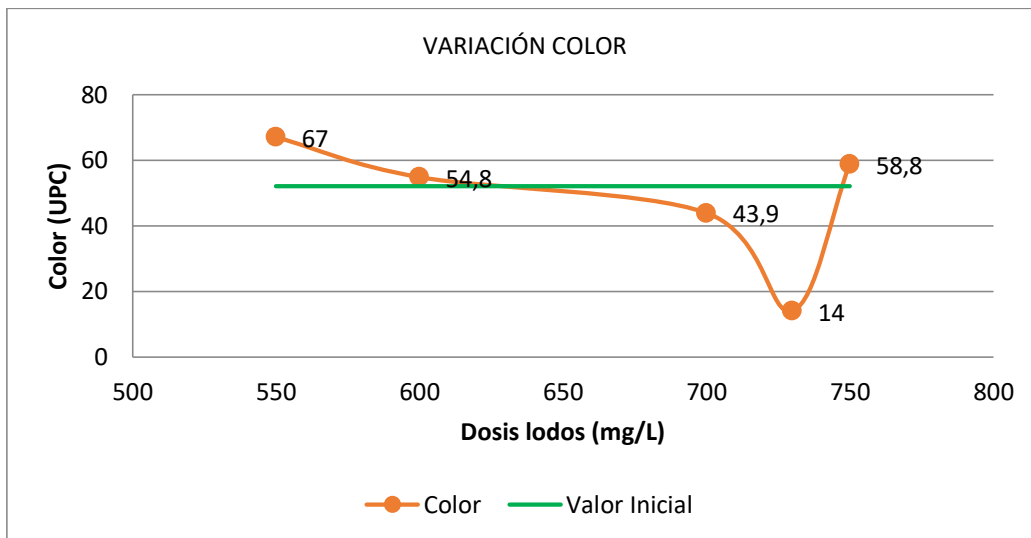


Figura 27. Variación Color – Prueba de jarras con lodos sobrenadante



La dosis óptima hallada a través de la prueba de jarras, para un litro de muestra se debe escalar al caudal de operación de la planta, así:

$$\text{Dosis de coagulante} = \frac{Q_{\text{operación}} * \text{Dosis óptima}}{\text{Densidad del coagulante}}$$

Así se conoce que las dosis óptimas de 400 ml y 730 ml, para que tengan la misma eficiencia al ser aplicada al caudal de 158 L/s, deben ser de 63,2 y 115, 3 L/s, respectivamente.

Tabla 15. Resumen prueba de jarras

	Lodos Sedimentador	Sobrenadante - Lodos sedimentador
Dosis	400 ml	730 ml
Turbiedad	3,7 NTU	1,8 NTU
Remoción turbiedad	48%	76%
Color	29,5 UPC	14 UPC
Remoción color	43%	73%

La dosis óptima fue de 730 ml de sobrenadante de los lodos del sedimentador, para 1 litros de agua cruda, para lograr remociones que permitan cumplir con las características de agua potable establecidas en la resolución 2115 de 2007.

Así para el caudal que maneja la planta de 158 L/s, el caudal de coagulante (sobrenadante) que se debe dosificar es de 115,3 L/s.

9. ANÁLISIS

Se descartó la recirculación del agua de lavado de filtros para usarla como coagulante ya que en la primera caracterización la concentración de aluminio fue de 0,97 mg/L y del sobrenadante el valor más alto fue de 0,25 mg/L; por lo que se consideró que el aporte de este residuo como coagulante es bajo.

A través de la prueba de sólidos sedimentables se considera que el aluminio presente en los lodos del sedimentador está principalmente disuelto en el agua. Debido a que la técnica disponible en el laboratorio para medir aluminio fue la colorimétrica, hubo interferencia por la turbiedad y el color en la lectura del espectrofotómetro. Para mejores resultados se debe medir en estos casos por medio de absorción atómica.

Cuando se filtraron los lodos, se removieron las impurezas de mayor tamaño con lo cual se redujo la turbiedad y el color de la muestra; pero con ello también se removió parte del aluminio lo que disminuyó las propiedades como coagulante al filtrado.

En las pruebas de jarras se obtuvo una dosis óptima de 730 ml que logró una remoción adecuada para agua potable, que equivale a 115 L/s respectivamente, estas dosis y por ende caudales son tan elevados a causa de la baja concentración de aluminio en los residuos producidos en la ptap.

La opción de recirculación del agua de lavado de filtros se puede realizar devolviendo el agua de lavado a la entrada de la planta, y regulando el caudal de agua cruda proveniente del Río Sucio; de esta manera se eliminaría el vertimiento producido por el lavado de filtros sin afectar las condiciones de operación, pero sí mejorando la eficiencia de la planta.

Por los resultados obtenidos de los lodos del sedimentador se consideran las opciones convencionales para el tratamiento de los lodos y disponerlos como residuo sólido, para así dar solución a las dos corrientes de subproductos producidas durante el proceso de potabilización.

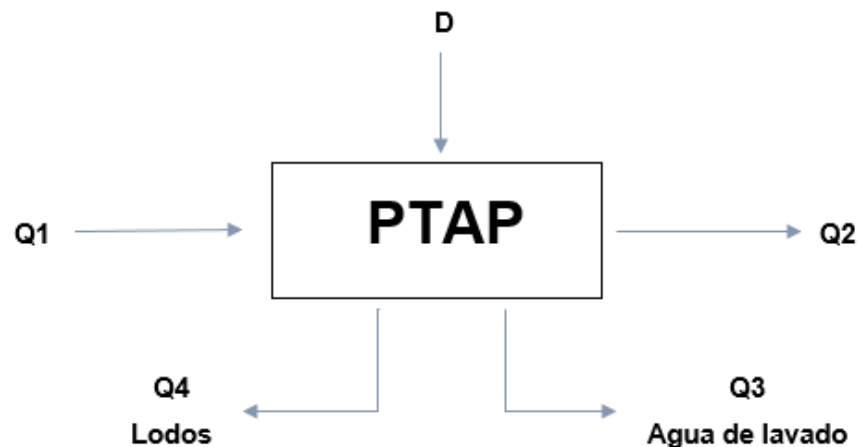
10. DISPOSICIÓN Y MANEJO DE LODOS

BALANCE DE MATERIA DE LODOS

Antes de analizar las diferentes opciones para manejo y disposición de lodos, se debe conocer el volumen de residuo producido; para esto se realizó el esquema general de las entradas y salidas de la planta de tratamiento para encontrar los aportes de sólidos y el volumen de lodos producidos.

En relación a los sólidos presentes en el sistema existen dos entradas una a través del agua cruda y la otra de coagulante utilizado en la potabilización, éstos salen en la gran mayoría en los lodos del sedimentador, en menor cantidad en el agua de lavado de los filtros y se espera que una mínima parte en el agua tratada.

Figura 28. Esquema general de la planta de tratamiento



Donde:

D: Dosis de sulfato de aluminio

Q1: Caudal de entrada a la planta

Q2: Caudal de agua tratada

Q3: Caudal de agua de lavado de filtros

Q4: Caudal de lodos producidos

Con base en lo anterior se realiza un balance en el sedimentador para hallar el volumen de lodo que se produce en el sistema y que será recirculado.

Tabla 16. Datos requeridos para el balance de lodos

DATOS DE LA PLANTA		
Caudal de entrada	Q1	158 L/s
Dosis de coagulante	D	7,1 mg/L
Turbiedad agua cruda	T1	7 NTU
Turbiedad entrada de filtros	Tf	1,5 NTU

VALORES ASUMIDOS	
Relación SS/T Se recomienda entre 0,7 – 2,2	1,5
Concentración de sólidos en los lodos Para turbiedades bajas se encuentra entre 0,1-1%. Para turbiedades altas entre 2-4%	1%

(Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007)

Con el fin de desarrollar la ecuación 2 se analiza lo siguiente:

En la planta que se está analizando, no se utilizan reactivos adicionales al sulfato de aluminio en el proceso de coagulación por lo cual el término A se anula.

La concentración de sólidos suspendidos totales en el agua cruda, asumiendo que son 1,5 veces el valor de la turbiedad es:

$$X1 = 1,5 * T1$$

$$X1 = 1,5 * 7,1 = 10,65 \text{ mg/L}$$

Reemplazando X1 en la ecuación 2: $W = 86,4 * Q1(0,44 * D + X1 + A)$ **Ecuación 2**, la cantidad de sólidos que entran al sedimentador es:

$$W = 186,07 \text{ kg/d}$$

La concentración de sólidos a la entrada del sedimentador está dada por la siguiente ecuación:

$$Xw = (0,44 * D) + X1 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$Xw = (0,44 * 7) + 10,65$$

$$Xw = 13,73 \text{ mg/L}$$

La concentración de sólidos a entrada a filtros se calcula con base en la turbiedad a la entrada de la unidad que es de 1,5 NTU:

$$\begin{aligned}X_f &= 1,5 * T_f \\X_f &= 1,5 * 1,5 \\X_f &= 2,25 \text{ mg/L}\end{aligned}$$

La concentración de sólidos en los lodos se estableció del 1% por lo cual:

$$\begin{aligned}X_f &= 2,25 \text{ mg/L} \\X_4 &= 1148 \text{ mg/L}\end{aligned}$$

Como se había explicado anteriormente, el caudal de lodos que se produce en el sedimentador se obtiene a raíz del balance en el sedimentador de donde se obtiene la ecuación 3:

$$W = Q_4 * X_4 + Q_f * X_f \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde al despejar el Q4 es que la variable de interés obtenemos:

$$\begin{aligned}Q_4 &= \frac{W - (Q_1 * X_f)}{X_4} \\Q_4 &= 135,3 \text{ m}^3/\text{d}\end{aligned}$$

El lodo de los sedimentadores no debe superar 0,1 al 3% del agua captada (Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007), por lo cual se confirma que $135,3 \text{ m}^3/\text{d}$ corresponde al 1% del agua cruda.

Como se explicó los sedimentadores son lavados uno cada quince días, el Q4 hallado es el caudal que se producen en los dos sedimentadores en un día, por lo cual un solo sedimentador produce $67,65 \text{ m}^3/\text{d}$ y en quince días $1015 \text{ m}^3/\text{d}$, este último es el volumen de lodos que se debe tratar cada quince días y disponer.

BALANCE DE MATERIA DE ALUMINIO

El balance general del sistema para aluminio es:

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_D = \dot{Q}_4 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_2 \quad \text{Ecuación 8}$$

Para obtener el flujo másico de aluminio en el coagulante se recopiló la siguiente información:

Tabla 17. Datos requeridos para el balance de aluminio

DATOS DEL COAGULANTE OBTENIDA EN PLANTA Y POR EL PROVEEDOR	
Dosis óptima $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	7,1 mg/L
Concentración Al_2O_3 en el coagulante	7,7%
Densidad de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	1,31 g/L

El porcentaje de óxido de aluminio es del 7,7% en el sulfato de aluminio, por lo tanto, se tiene que la fracción de aluminio (F) en el coagulante es:

$$\text{Fracción Al} = \frac{\text{PM Al}}{\text{PM Al}_2\text{O}_3} * 7,7\%$$

$$\text{FAI} = \frac{26,98}{101,96} * 7,7\% = 0,0204$$

Así el flujo másico de aluminio en el coagulante es:

$$\dot{Q}D = Q1 * \dot{\text{dosisopt}} * \text{FAI}$$

$$\dot{Q}D = 158 \text{ L/s} * 7,1 \text{ mg/L} * 0,0204 = 22,88 \text{ mg/s}$$

Así con la información obtenida de la bitácora de la planta de tratamiento, los análisis de laboratorio y los balances de materia se tiene:

VARIABLES	VALOR
Q1	158 L/s
X1	1,08 mg/L
Q2	140 L/s
X2	0,11 mg/L
Q3	136 L/s
Q4	1,56 L/s
X4	15 mg/L
$\dot{Q}D$	22,88 mg/s

Con base en la información hallada mediante análisis de laboratorio y con el balance de lodos, se verifica el balance de materia de aluminio en el sistema de acuerdo con:

Balance general del sistema: Entra = Sale + Genera + Acumula

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_D = \dot{Q}_4 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_2 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\text{Reemplazando: } 158 \frac{L}{s} * 1,08 \frac{mg}{L} + 22,88 \frac{mg}{s} = 1,56 \frac{L}{s} * 15 \frac{mg}{L} + 136 \frac{L}{s} * 0,97 \frac{mg}{s} + 140 \frac{L}{s} * 0,11 \frac{mg}{s}$$

$$\text{Así: } 182,46 \frac{mg}{L} = 170,72 \frac{mg}{L}$$

Con un porcentaje de error del 6% se puede entender que se cumple en balance aluminio en el sistema. El %E entre la entrada y salida es adjudicable a la incertidumbre de los equipos en la medición de la concentración de aluminio y a los valores asumidos en el balance de lodos.

ESPEADOR POR GRAVEDAD

Se ha planteado disponer como residuo sólidos los lodos provenientes de los sedimentadores que son los de mayor carga contaminante, para esto se llevarán a un espesador con el fin de aumentar el grado de sólidos concentrados y dar una mayor consistencia (MINDESARROLLO, 2000), donde el lodo que se aglomera en el fondo del concentrador es el que se llevara por gravedad al proceso de secado en lechos y el clarificado será vertido a la fuente receptora una vez se haya cumplido el tiempo de retención.

El volumen de lodos producido por un solo sedimentador es de 1148 m³ y se propone construir un espesador con forma de tanque tronco cónico con un factor de sobredimensionamiento de 1.1. A continuación, se especifican las fórmulas utilizadas y los datos del diseño del espesador.

$$V_{\text{espesador}} = 1.1 * \text{Volumen total de lodos generados en el lavado de un sedimentador}$$

$$V_{\text{cilindro}} = \frac{\pi}{4} * D^2 * \text{Altura}_{\text{cilindro}}$$

$$V_{\text{tronco}} = \frac{\pi * \text{Altura}_{\text{tronco}}}{3} * (R^2 + R * r + r^2)$$

Los lodos obtenidos a la salida del espesador se desean con una concentración del 3%, por lo cual el volumen de lodos a la salida del espesador se obtiene así:

$$V_{\text{lodos salida espesador}} = V_{\text{lodos entrada espesador}} \frac{\text{Concentración entrada}}{\text{Concentración salida}}$$

Tabla 18. Parámetros diseño espesador de lodos

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Volumen total de lodos generados total	2030	m ³
Volumen total de lodos generados por un sedimentador	1015	m ³
Factor de sobredimensionamiento	1,1	
Volumen total espesador	1116	m ³
D sup (Dsup)	3	m
Diámetro inferior (Dinf)	0,6	m
Altura cilindro (hc)	3	m
Altura tronco (ht)	1,2	m
Volumen cilindro	21	m ³
Volumen tronco	11	m ³
No. Unidades que se deben construir	32	
Volumen por unidad	32	m ³
Volumen de lodos a la salida del espesador	10,69	m ³

Para el diseño de la bomba que llevará los lodos desde la cámara hasta la entrada del espesador, se asume una velocidad en la tubería de 0,6 m/s de acuerdo a las recomendaciones para el bombeo de aguas turbias o residuales. La tubería que se utilizará tendrá una longitud de 100 m y será en PVC, ya que este flujo no es corrosivo y no requiere transporte especial.

El lodo proveniente de los sedimentadores será bombeado hasta cada espesador. Como se desea bombear todo el volumen de lodos en una hora el caudal que debe manejar la bomba es de 423 L/s, con base en el tiempo de vaciado de un sedimentador es de 40 minutos, así se propone utilizar 5 bombas donde cada una alimente 7 espesadores.

A continuación, se especifican las fórmulas utilizadas y los datos del cálculo de la bomba.

$$D_{\text{tubería}} = \left(\frac{Q_{\text{transportado}} * 4}{\text{Velocidad} * \pi} \right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$$

$$\text{Potencia (HP)} = \frac{Q_{\text{transportado}} * h_{\text{ft}}}{75 * n}$$

Tabla 19. Cálculo de la bomba para llevar los lodos del lavado de sedimentadores al espesador

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal a transferir	422,9	L/s
Caudal a transferir	0,4	m ³ /s
Diámetro tubería	0,9	m
Número de bombas	5	

Caudal a transferir por bomba	84,6	L/s
Pérdida de carga total	30	m
Eficiencia	60%	
Potencia real	0,1	HP

De los datos anteriores se determina que se necesitan 5 bombas para un caudal de 422,9 L/s y cada una con una potencia de 0,1 HP, para asegurar que el agua llegue hasta el punto de entrada del espesador.

LECHOS DE SECADO

El volumen de lodos concentrados en el espesador se determinó asumiendo que los lodos del sedimentador tienen una concentración de 1% de lodo y se concentraron hasta el 3% en la unidad de espesamiento, por lo cual el volumen de lodos a disponer en lechos es de 338,3 m³, donde cada espesador produce un volumen de lodos de 10,7 m³. Se propone construir los lechos de secado con un factor de sobredimensionamiento de 1.1 y un espesor de 0,3 m. A continuación, se especifican las fórmulas utilizadas y los datos del diseño de los lechos.

$$V_{lechos} = 1.1 * \text{Volumen total de lodos concentrados en el espesador}$$

$$A_{lechos} = \frac{V_{lechos}}{\text{Espesor}}$$

$$\text{Ancho} = \frac{A_{lechos}}{\text{Largo}}$$

Tabla 20. Diseño de los lechos de secado

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen de lodos a la salida del espesador	10,7	m ³
Área	53,6	m ²
No. Unidades	2,00	
Área x unidad	26,7	m ²
Largo	4	m
Ancho	6,7	m
Espesor de lodo	0,2	m
Borde libre	0,2	m
Espesor Grava	430	mm
Espesor Arena	530	mm
Tiempo de secado	23	Días

Se deben tener dos lechos de secado de 4m de largo por 6,7 m de ancho por cada espesador. El espesor de grava y arena se tomó el valor promedio estipulado en el RAS 2000.

Adicionalmente para el diseño de lechos de secado, se tienen en cuenta las siguientes recomendaciones del RAS 2000 en el título E:

- Los muros laterales deben tener un borde libre entre 0.5 y 0.9 m por encima de la arena. Debe asegurarse que no existan filtraciones laterales a través de los muros separadores.
- Se recomienda utilizar como medios de drenaje capas de grava y de arena.
- Las partículas de grava deben presentar un diámetro entre 3 y 25 mm.
- El tamaño efectivo de los granos de arena debe estar entre 0.3 y 0.75 mm.
- La recolección de percolados se efectuará a través de tuberías de drenaje de plástico o de teja de arcilla vitrificada con junta abierta. La tubería de drenaje principal debe tener no menos de 100 mm de diámetro y una pendiente no menor a 1%; deben espaciarse entre 2.5 y 6 m y debe tenerse en cuenta el tipo de remoción de lodo que se emplee. Se localizarán por debajo de la capa de grava con no menos de 150 mm de este material por encima de ellas.

11. ANÁLISIS ECONÓMICO

El diseño que se plantea tiene un valor aproximado de \$188.112.954, donde los valores de excavación, suministro e instalación de tubería fueron extraídos del Análisis de Precios Unitarios vigente de la Empresa de Servicios Públicos de Ibagué, donde existen un valor estándar por unidad de volumen y unidad de longitud.

Esta opción se presenta como viable dado que la Empresa de Servicios Públicos de Mariquita cuenta con el terreno para este construir la Planta de Tratamiento de Lodos aproximadamente 500 m², a una distancia de 200 m lineales en descenso de la Planta de Agua Potable.

La empresa Agumarket cotizó el servicio suministro de los espesadores y las bombas para lodos húmedos y espesados, con envío e instalación en el municipio de Mariquita; y los lechos de secado fueron cotizados con el maestro de obra de la empresa de servicios públicos del Mariquita.

Se presupuestó \$50.000.000 para otros gastos como estudios estructurales, de suelos, adecuación del terreno y/o accesorios.

Tabla 21. Inversión planta de tratamiento de lodos propuesta

ELEMENTOS	CANTIDADES	UNIDAD	V/R UNITARIO	TOTAL
Excavación, suministro e instalación de tubería de 36"	200	ML	\$ 128.669	\$ 26.112.954
Espesador	32	Unid	\$ 5.000.000	\$ 160.000.000
Bomba de lodos húmedos	8	Unid	\$ 4.000.000	\$ 32.000.000
Bomba lodos espesados	8	Unid	\$ 800.000	\$ 6.400.000
Lechos de secado	64	Unid	\$ 1.250.000	\$ 80.000.000
Otros			\$ 50.000.000	\$ 50.000.000
TOTAL				\$ 188.112.954

Adicionalmente hay que tener en cuenta que, de acuerdo a lo establecido por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, dentro del valor por consumo que pagan los usuarios de las facturas de acueducto que emite la ESP está incluido el costo para inversión en el sistema, quiere decir que lo usuarios paga un porcentaje de todo este tipo de mejoras al sistema, de acuerdo a los estudios tarifarios y su aprobación por parte de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

Igualmente, al realizar una planta de tratamiento de lodos, todo entra como activo de la empresa, este incremento en los activos según la metodología establecida en la Resolución CRA 688 de 2014 se aumenta la tarifa para lograr cubrir el mantenimiento y los costos energéticos de una nueva instalación.

Por lo cual se analiza el incremento en los costos de operación al implementar la planta de tratamiento de lodos, para lo cual se evalúa el consumo energético de las bombas.

Tabla 22. Gastos operativos del sistema de tratamiento de lodos propuesto

ELEMENTO	CONSUMO (KW)	UNIDADES	HORAS DE TRABAJO	CONSUMO TOTAL/MES (kWh/mes)	VALOR kWh	TOTAL VALOR ENERGIA
Bomba de lodos húmedos	4,2	8	2	134,4	\$542	\$72.800
Bomba lodos espesados	2,7	8	4	172,8	\$542	\$93.600
Total mes						\$166.400
Total trimestre						\$499.200

Ya que hoy en día la Corporación Autónoma Regional no ha cobrado tasa retributiva por el vertimiento directo de estos lodos, se hizo un estimado de este pago, que es lo que hipotéticamente la Empresa de Servicios Públicos tras la implementación del tratamiento de lodos dejaría de pagar a la CAR y estos recursos pueden suplir los gastos operativos de dicho tratamiento.

Tabla 23. Pago tasa retributiva

PARÁMETROS DE VERTIMIENTO	Q (m ³ /día)	CONCEN. (mg/l)	CARGA CONTAMIN. (Kg/mes)	VR. UNIT (\$/kg)	VR. TRIMESTRAL
LODOS DE PLANTA DE TRATAMIENTO	135,32				
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)		300	1.217,88	131,17	\$479.248
Sólidos Suspendidos Totales (SST)		1.148	4.660,42	56,09	\$9.438
TOTAL					\$488.686

Los valores de caudal de lodos y la concentración de sólidos suspendidos se calcularon anteriormente con base en las características del agua cruda y el coagulante, el valor de DBO₅ se tomó de los valores típicos considerados para el lodo de sedimentador. (Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007).

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Existen varias opciones de recirculación de los subproductos del proceso de potabilización de agua, pero su viabilidad depende de las características del proceso principalmente de la calidad y cantidad de las materias primas (agua cruda y coagulante).

En la planta de potabilización del municipio de Mariquita por captar el agua de una fuente de buena calidad, las dosis de coagulante son bajas, por lo cual las características de los lodos y agua de lavado de filtros están por debajo de las típicas para este tipo de residuo. Así mismo el buen manejo de las pruebas de tratabilidad permiten que la dosis óptima de coagulante aplicada sea la adecuada y el aluminio residual sea bajo tanto en los lodos como agua de lavado de filtros, como se confirma con el balance de aluminio en el sistema.

Para el residuo producto de los lodos de los sedimentadores se propone un tratamiento compuesto por espesamiento por gravedad y posterior disposición en lechos de secado ya que la disponibilidad del terreno lo permite y el clima del municipio de San Sebastián de Mariquita es predominantemente seco con temperaturas promedio de 27°C lo que hace favorable la propuesta.

El agua de lavado de las unidades de filtración puede ser recirculada a la entrada de la planta, regulando el caudal de entrada de agua cruda a la planta para así mantener las condiciones de diseño de la PTAP, y de esta forma reducir la captación sobre la fuente superficial.

De esta forma se da solución a las dos corrientes de subproductos que se producen en la planta de tratamiento, ya que la reducción de éstos beneficia no sólo la calidad del río Gualí que es donde desemboca el canal Rada que recibe los vertimientos, sino que disminuye el impacto paisajístico que generan el canal, al no estar colmatado, ni generando malos olores a la comunidad aledaña.

Debido a la naturaleza de los lodos, que son provenientes del sulfato de aluminio, se requiere de algún tipo de acondicionamiento químico para producir una efectiva separación líquido / sólido, debido a que permite la coagulación de los sólidos facilitando la liberación del agua absorbida, ya que existe agua intersticial que se encuentra entre los flocs debido a fuerzas capilares, que no permite ser removida por gravedad fácilmente. Por lo cual se deben hacer estudios a escala de laboratorio que permitan determinar qué tan eficiente es un polímero como acondicionador y determinar la dosis aproximada necesaria para mejorar la deshidratación del lodo en los lechos de secado.

Por la dificultad que presentan los lodos aluminosos se considera que la opción más viable técnica y económicamente es recircularlos a un punto antes de la coagulación con el fin de elevar el nivel de sólidos

con material desestabilizado como lo son los lodos, lo que ayuda en la etapa de nucleación durante la floculación, mejorando la eficiencia de la planta.

Se recomienda evaluar la viabilidad técnica y económica para optimizar el ciclo de lavado de filtro y reducir al mínimo la cantidad de agua potable que se utiliza en esta actividad, ya que es posible que el tiempo de lavado se esté extendiendo más de lo necesario.

13. BIBLIOGRAFÍA

- Raigosa Restrepo, M. (2012). EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE LODOS PROVENIENTES DE LAS PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA DE LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDA MEDIANTE EL ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO. *Tesis para optar al título de Administrador Ambiental*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Albrecht, A. E. (1972). Disposal of Alum Sludges. *Journal American Water Works Association No.1*, 46-72.
- Alcaldía de San Sebastián de Mariquita*. (s.f.). Obtenido de <http://www.sansebastiandemariquita-tolima.gov.co>
- Ambiental.com, I. (s.f.). Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/andia.pdf>
- Andreoli, V. (2005). Utilización de Lodos Aluminosos como Materia Prima en la Industria Cerámica. *Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB*. Brasil: Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR.
- Ascencio, M. T. (2005). Tecnologías convencionales de tratamientos de agua y sus limitaciones. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1*, Capítulo 4.
- Bishop, M., Rolan, A., Bailey, T., & Cornwell, D. (1987). Testing of alum sludge for solids reduction and reuse Works Association. *Journal of the American Water, 79 (6)*, 76-83.
- CARDENAS, Y. A. (2000). TRATAMIENTO DE AGUA COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN. SEDAPAL.
- Cárdenas, Z., Pavón, S., & Garrido, H. (2000). TRATAMIENTO DE LODOS DE UNA POTABILIZADORA PARA LA RECUPERACIÓN DE COAGULANTES. Facultad de Química, Universidad Autónoma del estado de México.
- Cerón, O., Millán, S., Espejel, F., Rodríguez, A., & Ramirez, R. (2007). Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar materiales de construcción. Instituto de Ingeniería, UNAM. Coordinación de Ingeniería Ambiental, Edif, 5.
- CHU, W. (1999). Lead Metal Removal by Recycled Alum Sludge. *Water Research, Vol 44, No.13*, 3019-3025.
- Córdova López, L. (1998). Obtención de dosis de coagulante mínimo mediante la tecnología de recirculación de lodos en plantas potabilizadoras. *In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 (AIDIS 98)*, 1-10.
- CORTOLIMA. (Agosto de 2014). POMCA Rio Gualí, Departamento del Tolima. ASOCARS - MINAMBIENTE.
- CORTOLIMA. (2018). *Corporación Autónoma Regional del Tolima*. Obtenido de <https://www.cortolima.gov.co/boletines-prensa/plan-ordenaci-n-cuenca-r-o-gual-m-s-completo-tiene-pa-s>
- Decreto 1076. (2015).
- Decreto 2667. (2012).

- Franco , P., & Salvador , J. (2004). Caracterización, Acondicionamiento y Aprovechamiento de Lodos Generados en Plantas de Potabilización de. *Tesis de Tecnología Química*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira,.
- Gallo, J., & Uribe, J. (2003). Reutilización de lodos de planta de potabilización en el tratamietnno de aguas residuales. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Garcés Arancibia , F., Díaz Aguirre , J. C., & Dellepiane Navarro , O. M. (1996). Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 25, 1-8.
- García, C. D. (2014). TRATAMIENTO DE EFLUENTES PARA LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA LOS CUERVOS EN EL MUNICIPIO DE CHINCHINÁ. Universidad Nacional de Colombia.
- Geertsema, W. S., Knocke, W., Novak, J. T., & Dove, D. (1994). Long-term effects of sludge application to land. *Journal of the American Water Works Association*, 86 (11), 64-74.
- Geocities. (s.f.). Obtenido de <http://www.geocities.ws/edrochac/sanitaria/desinfeccion5.pdf>
- Grado en Tecnología de la Ingeniería Civil. (2014).
- Greenpeace. (s.f.). *Greenpeace Colombia*. Obtenido de <http://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/contaminacion/agua/>
- Hernández, D. (2006). Aprovechamiento de Lodos Aluminosos (de la Etapa de Sedimentación) de Sistemas de Potabilización como Agregado en la Fabricación de Ladrillos Cerámicos. *Tesis Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. 2006, Colombia: Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.
- Hernández, D., Villegas, J., Castaño, J., & Paredes, D. (2006). Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistema de potablización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- Hernández, D., Villegas, J., Castaño, J., & Paredes, D. (2016). Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistema de potablización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- Hull, J., Jao, M., Wang, M., Dempsey, B., D.A. Cornwell, & Cornwell, D. (1992). Engineering behavior of water treatment sluge. *Journal of Environmental Engineering*, 118(6), 848-864.
- IDEAM. (11 de Agosto de 2015). *IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/96oXgZAhHrhJ/content/estudio-nacional-del-agua-informacion-para-la-toma-de-decisiones
- IDEAM, & MINAMBIENTE. (2014). *Estudio Nacional del agua - ENA*.
- Ingeniero Ambiental.com*. (s.f.). Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/diez.pdf>
- Kaggwa , R., Mulalelo, C., Denny , P., & Okurut, T. (2001). The Impact Of Alum Discharges On A Natural Tropical Wetland In Uganda. *Elsevier Science Ltd*.
- Ley 9. (1979).

- Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. (Diciembre de 2007). *Guía para el manejo, estabilización y disposición de lodos químicos*. Mexico: Comisión Nacional del Agua.
- Martinez, F. D. (2010). Evaluación económica de la recirculación de aguas de lavado provenientes de las unidades de filtración rápida de la planta de potabilización de la planta de potabilización Manantiales. Manizales: Universidad Nacional de Manizales.
- MARTÍNEZ, M. V. (2012). ESTUDIO PARA EL TRATAMIENTO, MANEJO Y DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE. *Bachelor's thesis*. QUITO: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA NACIONAL.
- McCabe, W., Smith, J. C., & Harriott, P. (2009). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Mc Graw Hill.
- MINAMBIENTE. (2017). Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1434-plantilla-negocios-verdes-y-sostenibles-51>
- MINDESARROLLO. (2000). RAS - Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. *Título E. Tratamiento de aguas residuales*.
- Nuñez Zarur, J. R., & Peña Castro, M. (2011). RECUPERACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO A PARTIR DE LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE LA EMPRESA AGUAS DE CARTAGENA S.A E.S.P Y ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE SU REUTILIZACIÓN COMO COAGULANTE. CARTAGENA D. T y C: UNIVERSIDAD DE CARTAGENA, FACULTAD DE INGENIERÍA, PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA.
- NUÑEZ ZARUR, J. R., & PEÑA CASTRO, M. (2011). RECUPERACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO A PARTIR DE LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE LA EMPRESA AGUAS DE CARTAGENA S.A E.S.P Y ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE SU REUTILIZACIÓN COMO COAGULANTE. *Trabajo de grado Ingeniería Química*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- OYARZO, M. J. (2007). PRECIPITACIÓN QUÍMICA DEL FÓSFORO MEDIANTE LA ADICIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS. UNIVERSIDAD DE MAGALLANES.
- Pérez P., J. A. (1997). TRATAMIENTO DE AGUAS. UNIVERSIDAD NACIONAL, FACULTAD DE MINAS.
- Plan de Ordenamiento Territorial de Mariquita. (2011).
- Raigosa Restrepo, M. A. (2012). EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE LODOS PROVENIENTES DE LAS PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA DE LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDA MEDIANTE EL ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO. *Tesis para optar al título de Administrador Ambiental*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Ramirez, F. (2008). Lodos producidos en el planta de tratamiento de agua potable.
- Resolución 0330. (2017). Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Resolución 2115. (2007).

- ROSERO, M. (1998). Recuperación De Sulfato De Aluminio De Lodos Generados Durante El Proceso De Potabilización Del Agua. *Tesis pregrado*. Cali: Universidad del Valle. .
- Sandoval, L., Martín, A., Piña, M., & Montellano, L. (2005). ESTUDIO PILOTO PARA REDUCIR EL VOLUMEN DE LODOS DE PLANTA POTABILIZADORAS. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua .
- Scambillis, N. (1997). Effect of Chemical Sludge on Soils. *Tesis de doctorado*. Estados Unidos: Universidad de Missouri.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima*. (s.f.). Obtenido de <http://www.sedapal.com.pe/inicio>
- Sostenible, M. d., & IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. ENA.
- SUPERSERVICIOS. (2014). EVALUACIÓN INTEGRAL DE PRESTADORES EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE MARIQUITA S.A E.S.P.
- Taylor, G. J. (1989). Aluminium toxicity and tolerance in plants. Acidic precipitation; biological and ecological effects. *In Advances in Environmental Science, Vol 2*, 327-361.
- Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. Colombia: Universidad del Valle, Universidad Tecnológica de Pereira.
- Valencia, J. A. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. McGrawHill.
- Wang , K., Chiang , K., Perng, J., & Sun , C. (1998). The characteristics study on sintering of municipal solid waste incinerator ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 59 (2-3), 201-210.
- WESTERHOFF, G. P. (1973). Alum Recycling: An Idea Whose Time Has Come? *Water and Wastes Engineering. No. 12*, 28-31 y 48.
- Willy, F., & Escobar, C. (2002). http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/cristobal_ef/cap02.pdf. Obtenido de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/cristobal_ef/cap02.pdf
- Yactayo, V. M. (2001). SEDIMENTACIÓN.
- Yao, K. M. (2000). *Sedimentadores de Alta Rata*. Boston, Massachusetts.
- Zhao, Y., & Bache, D. (2001). Conditioning of alum sludge with polymer and gypsum, *Colloids and Surfaces. Physicochemical and Engineering Aspects*, 194(1), 213-220.