

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LA PTAR TÚNEL DE LA LÍNEA

JOSE ALEXANDER VEGA ACERO

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y
MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ DC
2020**

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LA PTAR TÚNEL DE LA LÍNEA

**TESIS DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA
CIVIL, CON ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE**

**INGENIERO JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
DIRECTOR TESIS**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y
MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ DC
2020**

Nota de aceptación

Firma del Director de Proyecto

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C., 10 de Mayo de 2020

Dedicatoria

iv

A Dios por permitirme realizar este objetivo de vida, a mis padres por el apoyo y los buenos consejos para no dejarme desfallecer en el intento, a mi esposa e hija por ser el motor de mi vida y al Doctor Romero por su ayuda incondicional.

Agradecimiento

v

A mis padres, a mi esposa y mi hija, por darme el apoyo y convicción de lograr mis metas.

A mis profesores, que me instruyeron y me brindaron su conocimiento para culminar mis estudios y a mi director de tesis por su apoyo incondicional y orientación para cumplir con este trabajo

Al Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, por permitirme el acceso a toda la información relevante y requerida de la PTAR para cumplir con este proceso, así como de conocer esta obra tan importante como lo es el túnel de la Línea.

Resumen

Dentro de las obras de infraestructura vial para el “Cruce de la Cordillera Central”, se desarrollan las obras para la construcción del túnel de la línea, obras que trajeron consigo un aumento de caudal en la cuenca del Quindío por el caudal de Infiltración que se transporta a través del túnel.

Ante la necesidad de entregar este caudal a un cuerpo de agua, la Autoridad Ambiental del Quindío instruyó al Invias, mediante Resolución de Vertimiento 1469 de 2015 y la modificación 827 de 2017, para que realice un tratamiento de las aguas de infiltración; para ello el Invias construye y opera actualmente la PTAR Túnel de la Línea.

Una vez terminadas las obras dentro del túnel, surge la necesidad de evaluar y verificar las características fisicoquímicas del afluente para la continuidad de la PTAR y un posible reúso.

TABLA DE CONTENIDO

vii

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1 OBJETIVOS | 2 |
| 1.1 Objetivo General | 2 |
| 1.2 Objetivos específicos | 2 |
| 2 PROYECTO TÚNEL DE LA LÍNEA | 3 |
| 2.1 Descripción. | 3 |
| 2.2 Caudal de Infiltración - Afluente PTAR “TÚNEL DE LA LÍNEA” | 8 |
| 3 MARCO LEGAL PTAR | 12 |
| 4 ELEMENTOS DE LA PTAR. PARÁMETROS DE DISEÑO | 13 |
| 4.1 Antecedentes | 13 |
| 4.2 Localización | 14 |
| 4.3 Diagrama de flujo..... | 15 |
| 4.4 Cribado y Cámara de entrada y distribución. | 17 |
| 4.5 Desarenadores. | 18 |
| 4.6 Compuertas manuales para distribuir caudales. | 19 |
| 4.7 Mezcla Rápida. | 20 |
| 4.8 Floculación..... | 22 |
| 4.9 Sedimentación. | 24 |
| 4.10 Filtración. | 29 |
| 4.11 Manejo de sólidos. | 32 |
| 4.12 Vertimiento..... | 34 |
| 4.13 Diagnóstico de diseño..... | 35 |
| 5 CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE Y DEL EFLUENTE, Y DIAGNÓSTICO DE LA OPERACIÓN DE LA PTAR | 38 |
| 5.1 Caracterización del afluente y del efluente. | 40 |
| 5.2 Diagnóstico de la operación de la PTAR. | 44 |
| 5.3 Factibilidad de reúso del efluente para riego y como fuente de agua cruda para agua potable..... | 44 |
| 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 47 |
| 7 REFERENCIAS | 49 |

Lista de tablas

viii

| | |
|---|----|
| Tabla 3-1 Resumen norma vertimiento PTAR La Línea..... | 12 |
| Tabla 4-1 Dimensiones y gradientes de los orificios de las cámaras de floculación | 23 |
| Tabla 5-1 Técnicas empleadas para registros tomados IN SITU | 39 |
| Tabla 5-2 Métodos de laboratorio para Análisis de Agua..... | 40 |
| Tabla 5-3 Caracterización año 2018 | 40 |
| Tabla 5-4 Caracterización año 2019 | 42 |
| Tabla 5-5 Eficiencia de la PTAR año 2018..... | 44 |
| Tabla 5-6 Eficiencia de la PTAR año 2019..... | 44 |
| Tabla 5-7 Comparativo agua tratada con agua para uso agrícola | 44 |
| Tabla 5-8 Comparativo agua tratada con agua cruda para agua potable | 46 |

Lista de figuras

ix

| | |
|--|----|
| Figura 2-1 Localización del proyecto Cruce la Cordillera Central..... | 3 |
| Figura 2-2 Localización específica de los Túneles de la Línea | 4 |
| Figura 2-3 Proceso constructivo Túnel Centenario II | 5 |
| Figura 2-4 Perfil Geológico túnel principal de la Línea..... | 6 |
| Figura 2-5 Sección transversal del Túnel Piloto que transporta el agua de infiltración a la PTAR..... | 7 |
| Figura 2-6 Planta del Túnel piloto transporte del caudal de Infiltración..... | 8 |
| Figura 2-7 Perfil geológico para el cruce de la Cordillera Central, después de la excavación del Túnel II Centenario..... | 9 |
| Figura 2-8 Flujo Regional en el macizo rocoso después de la construcción del Túnel . | 10 |
| Figura 2-9 Agua subterránea infiltrada en el Túnel Piloto | 10 |
| Figura 4-1 Ubicación planta de tratamiento Túnel de la Línea | 14 |
| Figura 4-2 Línea de aducción de descarga desde la PTAR hasta el punto de vertimiento | 15 |
| Figura 4-3 Foto aérea planta de tratamiento de Aguas Residuales Túnel de la Línea. | 15 |
| Figura 4-4 Diagrama de flujo de planta de tratamiento de Aguas Residuales de la construcción..... | 16 |
| Figura 4-5 Esquema planta de tratamiento de aguas residuales de la construcción Túnel de la Línea | 16 |
| Figura 4-6 Cribado | 17 |
| Figura 4-7 Corte longitudinal y transversal cámara de llegada y distribución..... | 17 |
| Figura 4-8 Cámara de entrada aguas residuales y distribución | 18 |
| Figura 4-9 Corte longitudinal desarenadores | 18 |
| Figura 4-10 Corte en planta cámaras desarenadoras | 19 |
| Figura 4-11 Cámaras desarenadoras antes de mezcla rápida..... | 19 |
| Figura 4-12 Cámaras desarenadoras antes de mezcla rápida..... | 20 |
| Figura 4-13 Detalle cámara de mezcla rápida..... | 21 |
| Figura 4-14 Planta de cámara de mezcla rápida..... | 21 |
| Figura 4-15 Cámara de mezcla rápida | 22 |
| Figura 4-16 Planta de cámara de mezcla rápida..... | 23 |
| Figura 4-17 Sección de los orificios..... | 23 |
| Figura 4-18 Floculación..... | 24 |
| Figura 4-19 Corte longitudinal sedimentador | 26 |
| Figura 4-20 Corte en planta de sedimentador..... | 26 |
| Figura 4-21 Corte en transversal de sedimentador | 27 |
| Figura 4-22 Detalle del vertedero | 27 |
| Figura 4-23 Buitrones, tubería de recolección de 8”y canaleta de agua clarificada | 28 |
| Figura 4-24 Interior de los sedimentadores en etapa de construcción, buitrones, fondo del sedimentador, tubería de distribución de agua floculada de 20” | 28 |
| Figura 4-25 Interior de los sedimentadores en etapa de construcción, paneles de sedimentación de alta tasa, tubería de distribución de agua floculada de 20” | 28 |
| Figura 4-26 Sedimentadores..... | 29 |
| Figura 4-27 Planta filtros – red de tubería a presión perforada de 8” y 6”, para recolección | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-28 Planta filtros – red de tubería Novafort de 10”, para distribución de agua clarificada y recolección de agua de retro lavado | 31 |
| Figura 4-29 Corte unidades de filtro y su lecho filtrante | 31 |
| Figura 4-30 Fondo de filtros - red de tubería a presión de recolección 6” y 8” también usada para retrolavado, adicional tubería de 10” perforada para salida de agua clarificada y recolección de agua del lavado | 32 |
| Figura 4-31 Filtro en operación, tubería novafort de 10” perforada para distribuir el caudal a filtrar y el canal de agua clarificada y retrolavado | 32 |
| Figura 4-32 Espesador y filtro de prensa | 33 |
| Figura 4-33 Recolección de lodos deshidratados y Área de lodos..... | 34 |
| Figura 4-34 Caseta de operación de bombeo y medidor de pH..... | 34 |
| Figura 4-35 Vertimiento de la PTARC Quebrada la Gata y Vertimiento Rio Santo Domingo..... | 34 |

INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta la evaluación de la Planta de Tratamiento de las Aguas Residuales de la construcción del Túnel de la Línea y la verificación para un posible reúso del efluente; con base en la información disponible en los registros de operación de la PTAR del año 2018 y 2019.

En el capítulo 2 se presenta una breve descripción del Proyecto “Túnel de la Línea”, y del origen del caudal afluente de la PTAR.

En el capítulo 3 se muestra el resumen del marco legal vigente para control del vertimiento para descarga sobre el cuerpo de agua superficial establecido

En el capítulo 4 se incluye la evaluación de los parámetros de diseño de los componentes de la PTAR.

En el capítulo 5 se presenta la caracterización del afluente y del efluente de la PTAR, el diagnóstico de su operación y la aptitud del efluente para su reúso.

Por último, en el capítulo 6, se formulan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Realizar el diagnóstico de la “PTAR” Túnel de la Línea y la evaluación de la calidad de agua tratada para reúso.

1.2 Objetivos específicos

- a) Cuantificar los parámetros de diseño de cada componente de la PTAR.
- b) Calificar el diseño de conformidad con los requerimientos del RAS.
- c) Evaluar la operación de la planta de tratamiento del Túnel de la Línea.
- d) Determinar el cumplimiento de la norma de vertimiento exigida por la Autoridad Ambiental: Resolución 1469 de 2015 y su modificación 827 de 2007.
- e) Formular las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

2 PROYECTO TÚNEL DE LA LÍNEA

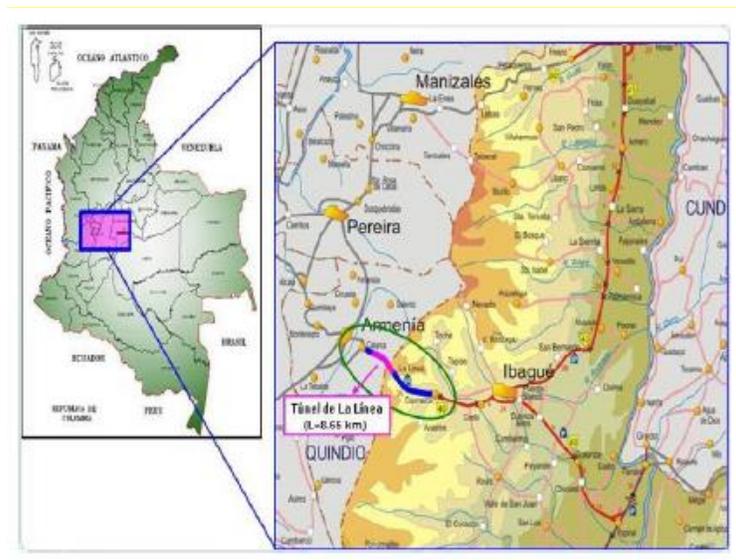
2.1 Descripción.

El Proyecto cruce de la “Cordillera Central”, conocido coloquialmente como túnel de la Línea, debido a que comunicará los departamentos del Tolima y Quindío, atravesando el macizo de la Línea a la altura de los municipios de Cajamarca y Calarcá, hace parte integral del corredor vial Bogotá – Buenaventura. Con su ejecución, se pretende reducir significativamente los tiempos de viaje entre el centro del país y el principal puerto colombiano en el océano Pacífico – puerto de Buenaventura.

El proyecto Túnel La Línea se lleva a cabo en la cordillera central, en el departamento del Quindío (Figura 2.1); la entrada occidental del túnel se encuentra a 11 km de Calarcá, 19 km de Armenia; y su entrada oriental a 16 km de Cajamarca.

El proyecto cruce de la Cordillera Central contempla dos objetivos principales: a) Construcción de obras anexas (25 túneles menores con longitud acumulada de 4,3 km; 23 viaductos, ampliación a doble calzada de 23,73 km de la vía actual, construcción de 18,57 km de vía nueva para formar un par vial con la vía existente); y b) El cruce de la cordillera central mediante la construcción y puesta en marcha de tres túneles con longitud mayor a los 8 km.

Figura 2-1 Localización del proyecto Cruce la Cordillera Central



Fuente: Informe técnico de construcción. Enero 2012. INVIAS

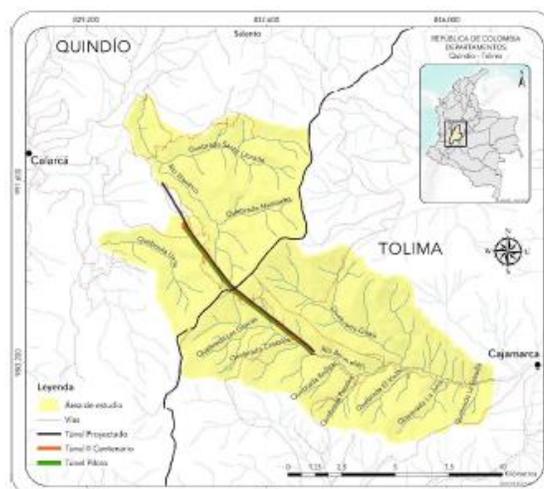
Actualmente este proyecto de infraestructura vial, consta de dos túneles construidos, el primero de exploración denominado “Túnel Piloto”, de aproximadamente 18 m² de sección transversal; 8,6 km de longitud, el cual terminó su construcción en el año 2008, y permite:

- Obtener información detallada del régimen Geológico e hidrológico del macizo rocoso,
- Contribuir a la disminución del nivel freático de todo el macizo, para facilitar la construcción del túnel principal al funcionar como galería de drenaje del túnel principal.
- El túnel principal y el piloto se encuentran interconectados en su recorrido por dieciséis (16) galerías, que en su etapa inicial sirvieron para contar con varios frentes de excavación y evacuación del material del túnel principal.
- Posteriormente, y una vez entre en operación el túnel principal del proyecto, este pequeño túnel será utilizado como escape de emergencia del túnel principal.

El segundo túnel llamado túnel principal ó túnel II Centenario – Túnel de la Línea, es construido de manera paralela al túnel piloto, con una sección de 100 m² y 8,6 km de longitud; sus obras se iniciaron en el año 2009, el Invias tiene programado su terminación y puesta en marcha en el año 2020.

Es importante resaltar que el Invias tiene previsto la construcción de un tercer túnel similar al túnel II Centenario, pero con una longitud de 10,5 km para garantizar que se supla la demanda de crecimiento estudiada.

Figura 2-2 Localización específica de los Túneles de la Línea



Fuente: Informe final Proyecto Interadministrativo No. 1226 de 217 - UNAD

Para la construcción del túnel II centenario, se utilizó un sistema de concreto lanzado, su acabado final es obtenido con el uso de formaleta móvil de sección cada 2,5 m, cuenta con una calzada de 10,5 m distribuida en dos carriles unidireccionales de 3,65 m cada uno, berma de 0,36 m en concreto hidráulico y dos andenes en ambos costados de un metro de ancho. El Gálibo de operación de los vehículos a transitar es de 4,90 m y un tránsito de operación diario (TPD) de 4.800 vehículos; la velocidad de operación será de 60 km/h, el túnel es totalmente automatizado, vigilado y operado por sistemas computacionales como el SCADA.

Figura 2-3 Proceso constructivo Túnel Centenario II



(Derecha) Excavación y obras para superar pasó de fallas (Izquierda) impermeabilización del Túnel II



(Derecha) Estado final concreto lanzado y (Izquierda) cunetas transversales recolectoras aguas de infiltración

Su construcción permite un ahorro en altura de aproximadamente 100 metros y una reducción de 22 kilómetros de recorrido sobre la carretera actual, que aumenta favorablemente la velocidad de operación a 60 km/h, casi 3 veces la

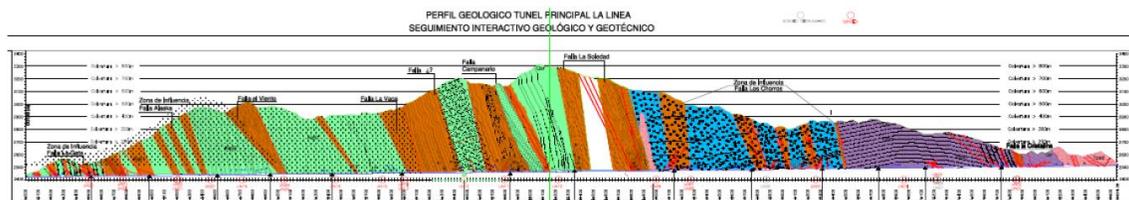
actual y de una reducción del 75% en la accidentalidad de esta importante vía. El portal Quindío se encuentra sobre la cota 2400 msnm, aproximadamente 100 msnm por debajo del portal Tolima que se encuentra sobre los 2500 msnm.

La pendiente del túnel es del uno por ciento (1%) descendente desde el portal del Tolima hasta el portal del Quindío, por esta razón y con el ánimo de que los gastos operacionales de los vehículos de carga se optimicen, el sentido de flujo de los vehículos que van a circular a través del túnel es contrario a la pendiente del túnel, lo que quiere decir que los vehículos ascienden desde el municipio de Calarcá, departamento del Quindío, (cota 2400 msnm) hacia el municipio de Cajamarca departamento del Tolima (cota 2500 msnm), y la vía actual va ser utilizada en doble calzada, para el sentido del flujo vehicular que va desde el Tolima al Quindío.

La construcción del túnel de la Línea o cruce de la Cordillera Central atravesó una serie de fallas complejas que generaron importantes inversiones de recursos, lo que convirtió el proyecto en un gran reto para la ingeniería colombiana y el Instituto Nacional de Vías, dichas fallas son las principales generadoras del caudal de infiltración que debe tratar la PTAR Túnel de la Línea, estas fallas se conocen con los siguientes nombres:

- La Gata
- Galicia.
- El Portal.
- El Viento.
- Alaska.
- La Vaca.
- La Soledad.
- La Estación.
- Y la Cristalina.

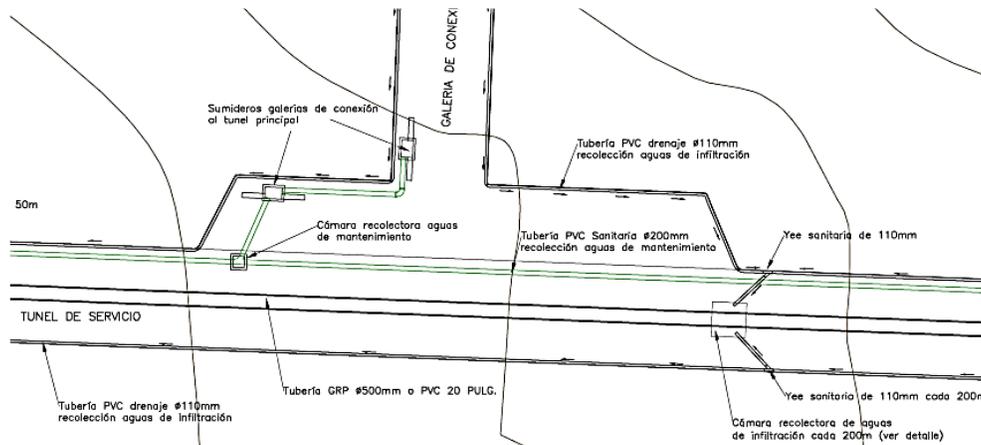
Figura 2-4 Perfil Geológico túnel principal de la Línea



Fuente: Informe final Proyecto Interadministrativo No. 1226 de 217 - UNAD

Todos estos procesos constructivos, transporte de personal, materiales y maquinaria, así como sus aguas de infiltración, dieron origen a la construcción de la PTAR del Túnel de la Línea, en cumplimiento del permiso de vertimiento sobre

Figura 2-6 Planta del Túnel piloto transporte del caudal de Infiltración



Fuente: Informe final Proyecto Interadministrativo No. 1226 de 217 – UNAD

2.2 Caudal de Infiltración - Afluente PTAR “TÚNEL DE LA LÍNEA”.

El Invías durante el desarrollo del proyecto ha realizado varios estudios y actualizaciones del régimen hidrogeológico y geomorfológico del área aferente del túnel con el fin de contar con un patrón y establecer el caudal de Infiltración que debe manejarse durante el desarrollo de los túneles. A continuación se muestra el resultado de dichos estudios que indican la principal causa - origen de los caudales del afluente a tratar.

2.2.1 Componente Geológico

El macizo fracturado de La Línea en la cordillera Central, está compuesto a partir de series de rocas ígneo – metamórficas fracturadas y de diferentes edades que fueron identificadas durante la excavación del túnel piloto. Particularmente para el portal Quindío, situado al NW del proyecto, se ubica una secuencia metamórfica paleozoica volcánico - sedimentaria que se pone en contacto mediante una zona amplia de fracturamiento denominada falla Campanario; por otra parte, en el Portal Tolima, situado al SE, la serie finaliza con una intrusión terciaria de pórfido andesítico (Roca ígnea) .

En superficie, estos materiales se encuentran parcialmente cubiertos por depósitos no consolidados de ceniza volcánica (Lapilli), la cual cubre más del 35% del área de influencia de la obra. Con el cruce se identificaron seis sectores en los que el comportamiento mecánico de la roca, litología de los materiales, características estructurales del macizo (rumbo, buzamiento de diaclasas o zonas de influencia de falla) y cobertura rocosa sobre la clave del túnel, definen las características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del macizo.

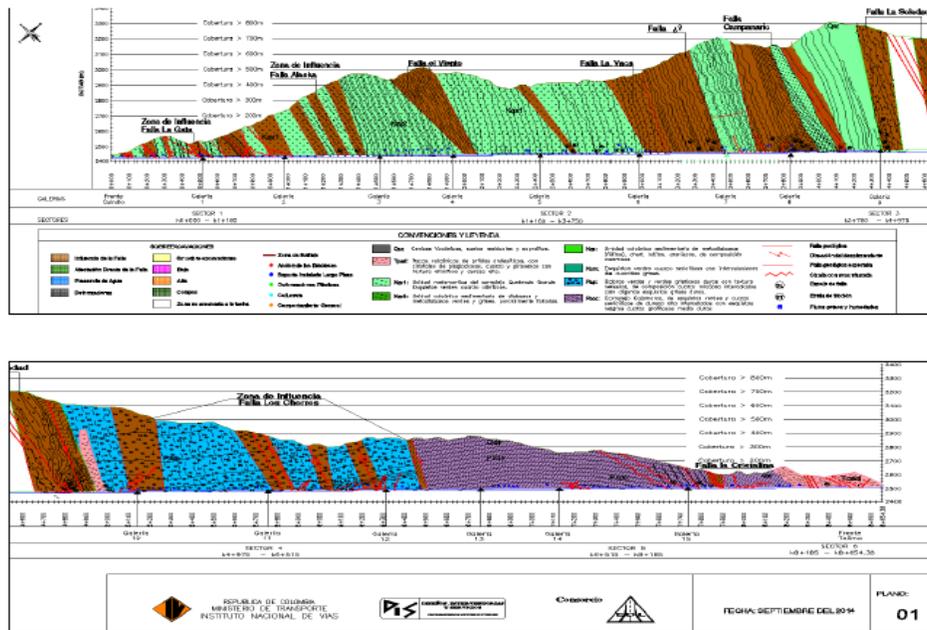
El esquema general de las estructuras encontradas en la zona de influencia del proyecto del Túnel de La Línea, es característico de un ambiente geológico de esfuerzos compresivos relacionados con el Sistema de Fallas del Romeral. Estructuralmente, el área se encuentra altamente fracturada con numerosas zonas de falla que se agrupan en 2 familias: un primer grupo, con dirección N-S – de mayor relevancia para este documento por sus condiciones hidráulicas – y un segundo grupo, de carácter secundario, de dirección E-W.

Por su importancia estructural, se tienen las zonas de influencia a las fallas: La Gata, Galicia, El Portal, El Viento, Alaska, La Vaca, La Soledad, La Estación y La Cristalina. Sin embargo, con la inclusión y construcción del Túnel Principal, se identificaron durante su excavación, zonas adicionales, no previstas en los estudios de referencia y excavación del túnel piloto (Figura B - 3) con alto diaclasamiento, deformación apreciable y zonas de falla, las cuales fueron denominadas como: Falla el Campanario, La Chinita, del Alto de la Línea y Los Chorros

La complejidad geológica de esta zona ha sido muy discutida en la literatura; y está en función de múltiples eventos tectónicos ocurridos en la cordillera central.

Estos esfuerzos reflejan un macizo rocoso fuertemente afectado por fallas y fracturas. En la figura 2-7 se indican las fallas encontradas en el túnel, proyectando, su rumbo en superficie.

Figura 2-7 Perfil geológico para el cruce de la Cordillera Central, después de la excavación del Túnel II Centenario

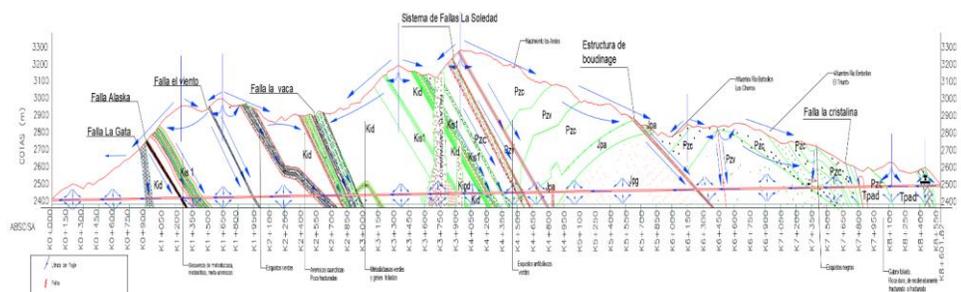


Fuente: Informe final estudios Hidráulicos Túnel de la Línea

2.2.2 Componente hidrológico

Particularmente para el proyecto del “Cruce de la Cordillera Central”, el comportamiento del flujo que presenta el macizo cristalino, el cual diverge de las divisorias de agua, está condicionado por la interconexión de las redes de fracturas locales y regionales, con las zonas de recarga y descarga en superficie de las vertientes que se encuentran en las cuencas hidrográficas de los Departamentos del Tolima y Quindío

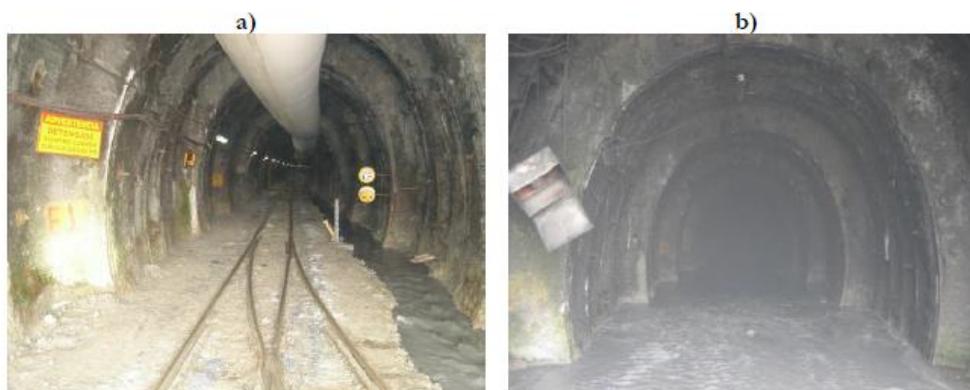
Figura 2-8 Flujo Regional en el macizo rocoso después de la construcción del Túnel



Fuente: Informe final estudios Hidráulicos

Se destacan como zonas potenciales de recarga los lugares topográficos altos, en los que la precipitación y la red de fracturas se encuentran interconectadas entre la superficie y parte subterránea de la cordillera, definiendo sectores o unidades hidrogeológicas. Estos sistemas fracturados se encuentran contiguos al sistema de fallas de Romeral y por lo estudios realizados se concluye que las aguas de superficie e infiltradas se encuentran debidamente conectadas, y que el principal medio de recarga del macizo cristalino, es dado por el sistema de fallas a la zona de influencia del proyecto

Figura 2-9 Agua subterránea infiltrada en el Túnel Piloto



(Imagen Derecha) Agua subterránea de infiltración $Q= 40$ l/s (año 2007 inicio del Proyecto) y (Imagen Izquierda) Agua subterránea de infiltración $Q= 140$ l/s (año 2014 Año de terminación del Túnel Piloto)

Los estudios realizados por el INVÍAS concluyen que el caudal de Infiltración es generado por la cantidad de fallas en el macizo rocoso y por las múltiples interconexiones entre las fracturas de las rocas, desde la superficie hasta el túnel.

El caudal de infiltración a tratar en la planta de tratamiento del túnel de la Línea se encuentra entre los 40 L/s y los 120 L/s, de los cuales, aproximadamente el 30% del caudal proviene de la cuenca del Tolima y un 70 % de la cuenca del Quindío; sin embargo, todo el caudal es transportado hacia el portal Quindío donde entrega directamente a la PTAR con el fin de realizar el tratamiento de las aguas industriales y las de infiltración, para posteriormente conducir las al río Santo Domingo y a la Quebrada la Gata.

Mediante la Resolución 1469 de 2015 y su modificación 827 de 2017, la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) otorga permiso de vertimiento de las aguas provenientes de la construcción del túnel de la Línea e imparte las siguientes medidas técnicas:

1. Se debe garantizar un caudal constante de 30 L/s, directamente a la salida de la PTAR, a la quebrada la Gata.
2. El caudal restante, aproximadamente 90 L/s, al río Santo Domingo mediante conducción de 12", hasta un punto aguas abajo de la bocatoma del acueducto del municipio de Calarcá.
3. La línea de aducción, de 5,8 km de longitud, se localiza desde la PTAR hasta el punto de vertimiento en el Río Santo Domingo.
4. El caudal a tratar, determinado de acuerdo con los promedios registrados durante la operación del sistema, es de **120 L/s**.

3 MARCO LEGAL PTAR

En la tabla 3.1 se presenta el resumen de las principales normas relacionadas con el diseño y control de la PTAR La Línea.

Tabla 3-1 Resumen norma vertimiento PTAR La Línea

| NORMA | RESUMEN | ENTIDAD |
|--|--|------------|
| Res. 330 de 2017 | Señala los requisitos técnicos que deben cumplir las etapas de planeación, diseños, construcción, puesta en parcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo. Deroga las Resolución 1096 de 2000. | MAVDT |
| Decreto 1600 de 1994 | Reglamenta el sistema nacional ambiental, SINA, señala que "los laboratorios que produzcan información cuantitativa física, química y biótica para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes, y los demás que produzcan información de carácter oficial, relacionada con la calidad del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, deberán poseer el certificado de acreditación correspondiente otorgado por los laboratorios nacionales públicos de referencia del IDEAM, con lo cual quedaran inscritos en la red" | MAVDT |
| NTC-ISO/IEC COLOMBIANA 17025 de 2005 | Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración | ICONTEC |
| Decreto 2570 de 2006 | Adiciona el decreto 1600 de 1994 y se dictan otras disposiciones sobre el análisis de características físicas, químicas y biológicas en laboratorios acreditados por el IDEAM o en proceso de acreditación. | MAVDT |
| D.U.R. 1076 DE 2015 | Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Reglamenta usos del agua y residuos Líquidos | MAVDT |
| Decreto 4728 de 2010 | Modifica parcialmente el decreto 3930 de 2010, frente a la norma de vertimientos, protocolos de monitoreo de vertimientos y planes de cumplimiento | PDTE-MAVDT |
| D.U.R. 1076 DE 2015 | Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Tasa retributiva por vertimientos puntuales. | MADS |
| Resolución 292 de 2013 | Establece criterios de aceptación de la información cuantitativa, física, química o biótica para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes. | IDEAM |
| Decreto 1287 de 2014 | Uso de biosólidos de PTARM | MVCT |
| Resolución 1207 de 2014 | Uso de AR tratadas | MADS |
| Resolución 0631 de 2015 | Establece los parámetros y valores límite permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua y a los sistemas de alcantarillado público | MADS |
| Resolución 1035 de 2008 | Establece los objetivos de calidad para las fuentes hídricas del dpto. de Quindío: objetivos calidad del Río Santo Domingo. | CRQ |
| Resolución 1633 del 9 de noviembre de 2011 | Permiso de vertimiento de aguas residuales industriales, generadas por el proceso constructivo del proyecto Túnel de la Línea - Río Santo domingo y Quebrada la Gata | CRQ |
| Resolución 239 del 2 de abril de 2012 | Modificación y medidas preventivas al Invias por vertimientos | CRQ |
| Resolución 1469 de 2015 | Por medio del cual se otorga un nuevo permiso de vertimiento de aguas industriales, provenientes del proyecto cruce de la cordillera central y se adoptan otras disposiciones, dejar sin efecto las resoluciones 1633 de 2011 por la cual se otorga permiso de vertimiento de aguas residuales y 1038 de 2015 pro medio de la cual se autoriza una cesión total de un permiso de vertimiento de aguas residuales industriales de manera temporal. | CRQ |
| Resolución 0827 de 2017 | Modificación permiso de vertimiento resolución 1469 de 2015, aumentar caudal de descarga en la quebrada la Gata y el restante conducirlo al Río Santo Domingo. | CRQ |

4 ELEMENTOS DE LA PTAR. PARÁMETROS DE DISEÑO

4.1 Antecedentes

La planta de tratamiento de aguas residuales del Túnel de la Línea tiene su origen en cumplimiento del permiso de vertimiento otorgado al Invías mediante Resolución 1633 de 2011 de la Corporación Autónoma del Quindío (CRQ). Sin embargo, la PTAR inicialmente construida no fue suficiente para satisfacer el tratamiento requerido.

Mediante resolución 239 de 2012 la CRQ impartió medidas preventivas al Invías, y ordenó la suspensión inmediata de todas las actividades que generen vertimientos sobre la quebrada La Gata. Además, debido a la pérdida de los caudales de infiltración hacia el túnel, el caudal de la quebrada La Gata disminuyó considerablemente hasta ser casi nulo, lo que obligó a la empresa de servicios públicos de Calarcá (Multipropósitos SA ESP) a cerrar la bocatoma del acueducto.

Posteriormente se propuso, ante la CRQ, el diseño de un sistema de conducción para el vertimiento de las aguas residuales, de escorrentía y de infiltración resultantes de la operación, directamente hacia el Río Santo Domingo, aguas abajo de la bocatoma de la empresa de Multipropósito SA, y la optimización del sistema de tratamiento, garantizando que se reduzcan al mínimo los impactos generados sobre la comunidad y sobre el recurso hídrico del municipio de Calarcá. Con lo anterior, aceptada la modificación y optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales y del punto de la descarga del efluente, la CRQ otorgó nuevo permiso de vertimiento mediante la resolución No. 1469 de 2015 y la resolución 0827 de 2015.

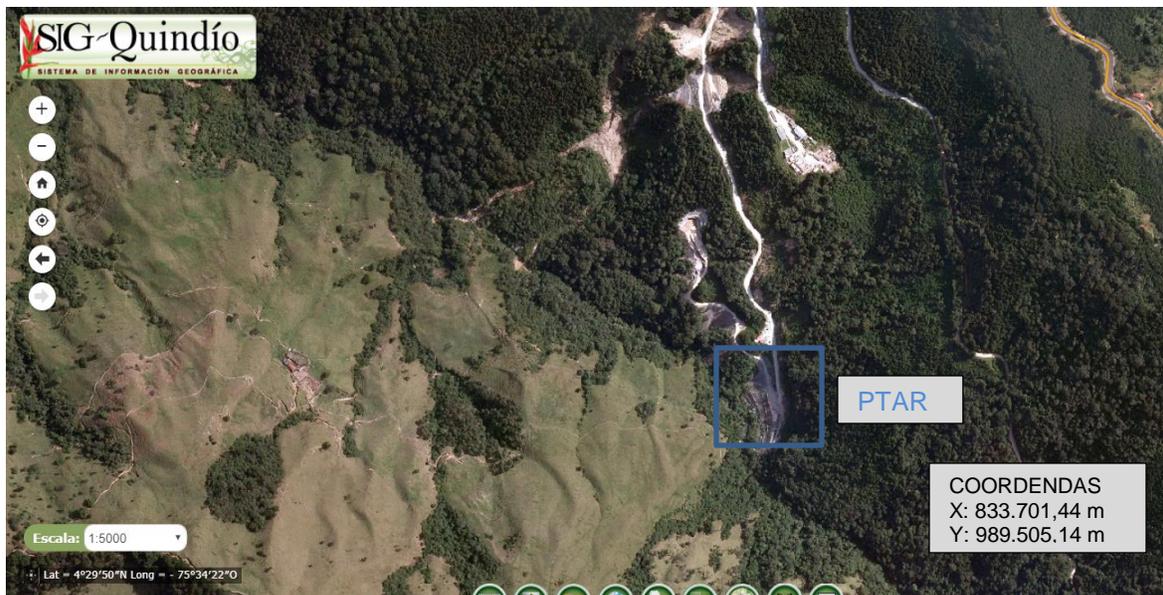
Finalmente, en cumplimiento del permiso de vertimiento, se instruyó al Invías realizar descarga del efluente así: de manera constante un caudal de 30 l/s sobre la quebrada La Gata, con el fin de garantizar el caudal mínimo en ella y el caudal restante, aproximadamente 90 l/s, a través de la línea de conducción de 12" al río Santo Domingo, aguas abajo de la bocatoma de la Empresa Multipropósito SA ESP.

La optimización consistió en la construcción de un sistema de cribado y unidades desarenadoras, adecuación de la unidad de floculación a una unidad helicoidal de flujo vertical, adecuaciones de los tanques de sedimentación y mejoras del sistema de filtración como se incluye más adelante.

4.2 Localización

La PTAR del proyecto Túnel de La Línea, se encuentra localizada en inmediaciones del área rural del municipio de Calarcá, Quindío. La ubicación del sistema de tratamiento y sus respectivas coordenadas, se ilustra en la figura 4.1

Figura 4-1 Ubicación planta de tratamiento Túnel de la Línea



Fuente: Informe solicitud de permiso de vertimientos Túnel de la Línea – Invias – actualización visor geográfico SIG Quindío <http://190.255.42.26/visor/>

La línea de aducción, consta de 5,8 km de longitud y se localiza desde la PTAR hasta el punto de vertimiento en el Río Santo Domingo, aguas abajo de la bocatoma de la empresa Multipropósito S.A, figura 4.2.

Figura 4-2 Línea de aducción de descarga desde la PTAR hasta el punto de vertimiento



Fuente: Informe solicitud de permiso de vertimientos Túnel de la Línea – Invias – actualización visor geográfico SIG Quindío <http://190.255.42.26/visor/>

Figura 4-3 Foto aérea planta de tratamiento de Aguas Residuales Túnel de la Línea

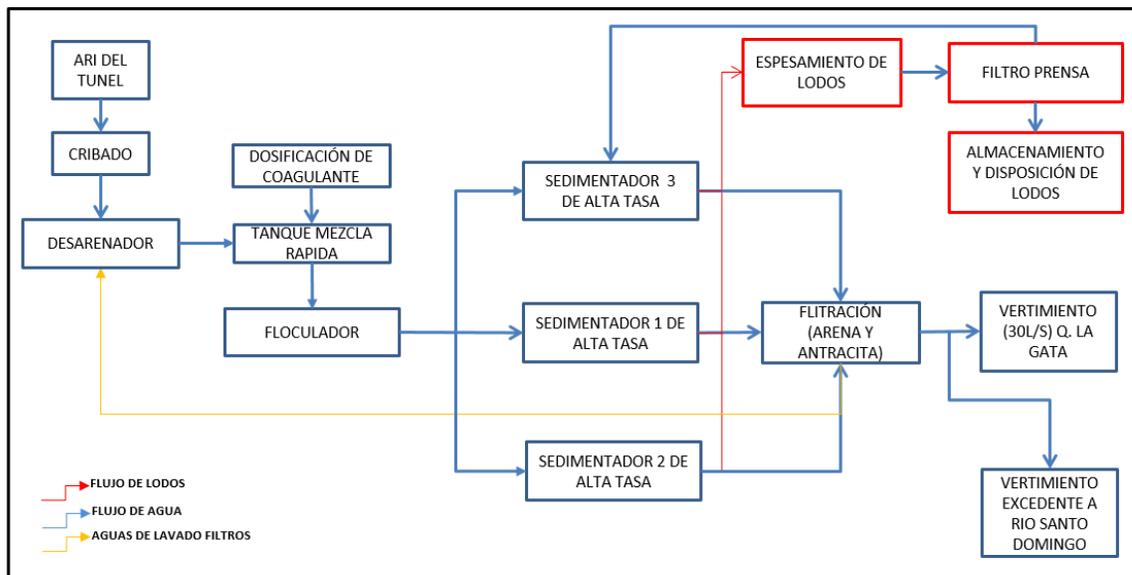


Fuente: Invias

4.3 Diagrama de flujo.

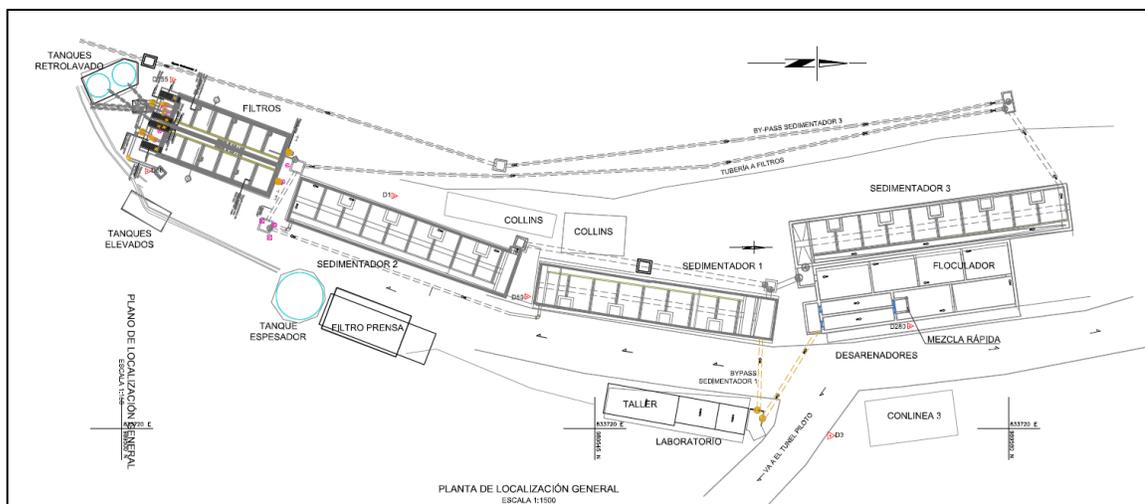
En la figura 4.4 se presenta el diagrama de flujo de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales de la construcción del proyecto “Túnel de Línea”.

Figura 4-4 Diagrama de flujo de planta de tratamiento de Aguas Residuales de la construcción



Fuente: Solicitud modificación de permiso de vertimientos Invias

Figura 4-5 Esquema planta de tratamiento de aguas residuales de la construcción Túnel de la Línea

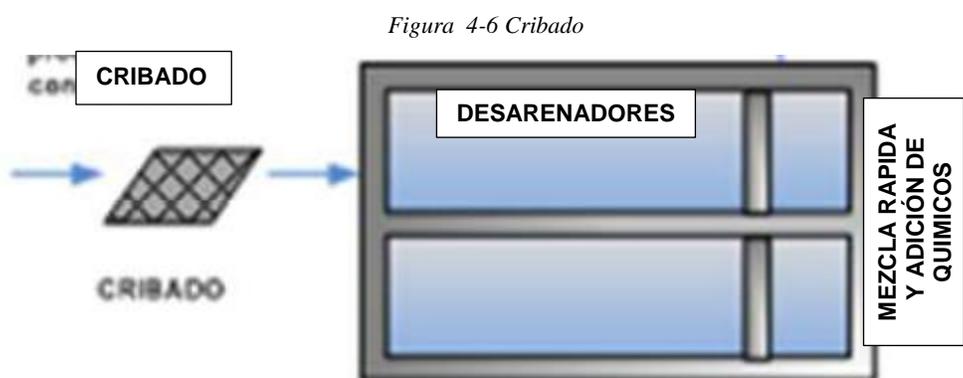


Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización PTAR Túnel de la Línea - Invias

4.4 Cribado y Cámara de entrada y distribución.

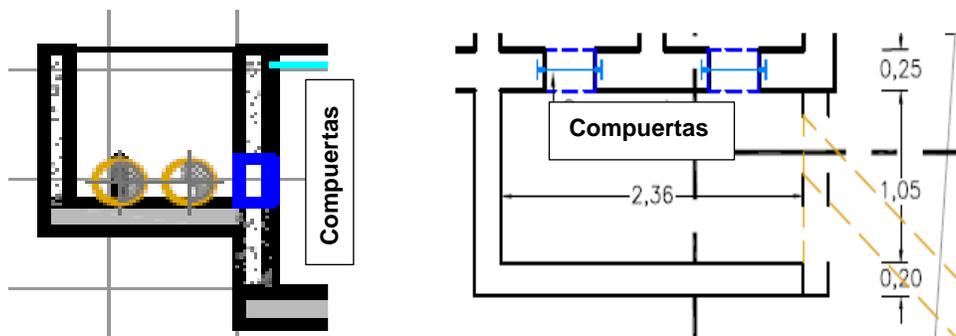
Las aguas residuales ingresan al sistema de tratamiento por gravedad; al ingresar pasarán por un sistema de cribado que permitirá retener físicamente el material discreto de mayor diámetro. Posteriormente, el agua atravesará las unidades desarenadoras.

La cámara de llegada se utiliza para distribuir el caudal a los desarenadores. Permite aislar una unidad cuando se requiere de mantenimiento o limpieza, mediante apertura o cierre de compuertas manuales a la entrada de los desarenadores.



Fuente: Solicitud de Vertimiento PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-7 Corte longitudinal y transversal cámara de llegada y distribución



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-8 Cámara de entrada aguas residuales y distribución



Fuente: Informe final de construcción - INVIAS

Las dimensiones de la cámara de llegada son: 2,36 m de ancho, 1,05 m de largo y una profundidad de 1,50 m.

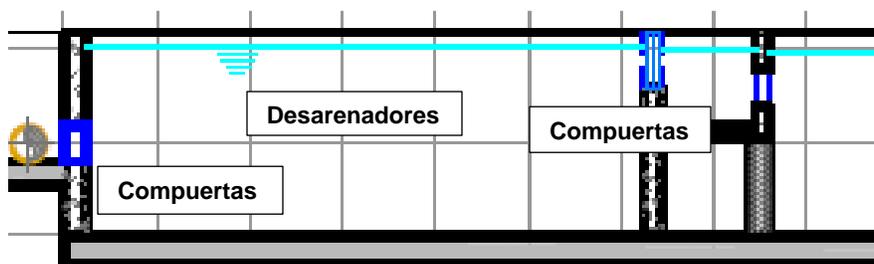
4.5 Desarenadores.

Los desarenadores son estructuras destinadas a retener principalmente arena y evitar la formación de un excesivo depósito de material inerte en el floculador y en los sedimentadores. El tamaño de las partículas de arena a remover es 0,1 mm con densidad relativa de 2,64.

Se cuenta con dos (2) unidades desarenadoras, rectangulares, de flujo horizontal de modo que el retiro de una unidad para limpieza o mantenimiento, no impide que el sistema continúe trabajando y garantizando el tratamiento.

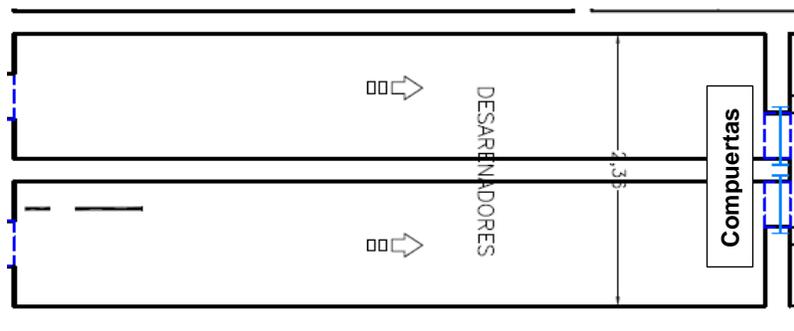
Los desarenadores cuentan con bombas sumergibles para la succión de la arena sedimentada tipo Draqlfow EL 7.5S 10HP

Figura 4-9 Corte longitudinal desarenadores



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-10 Corte en planta cámaras desarenadoras



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-11 Cámaras desarenadoras antes de mezcla rápida



Fuente: Informe final de construcción – INVIAS

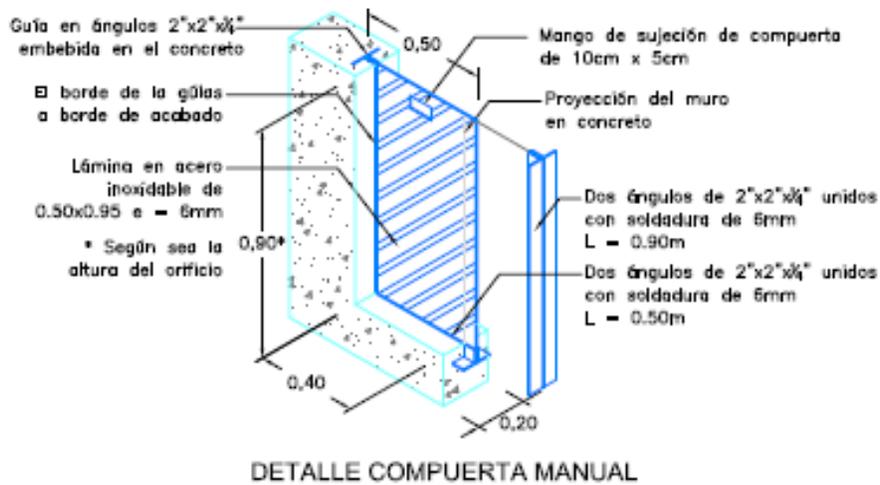
Cada una de las unidades desarenadoras tiene las siguientes dimensiones: 1,10 m de ancho, un largo de 6 m y una profundidad de 2,20 m.

De acuerdo con el manual de operación de la planta, las arenas y partículas retenidas en los desarenadores deben ser removidas antes de que la capacidad de esta unidad se reduzca en un 50%.

4.6 Compuertas manuales para distribuir caudales.

Antes de la entrada y salida de las cámaras desarenadoras, se encuentran instaladas unas compuertas rectangulares de operación manual, las compuertas están dispuestas para controlar el caudal de entrada y salida de cada unidad desarenadora, así como para aislar alguna de las dos (2) unidades en caso de mantenimiento o limpieza.

Figura 4-12 Cámaras desarenadoras antes de mezcla rápida



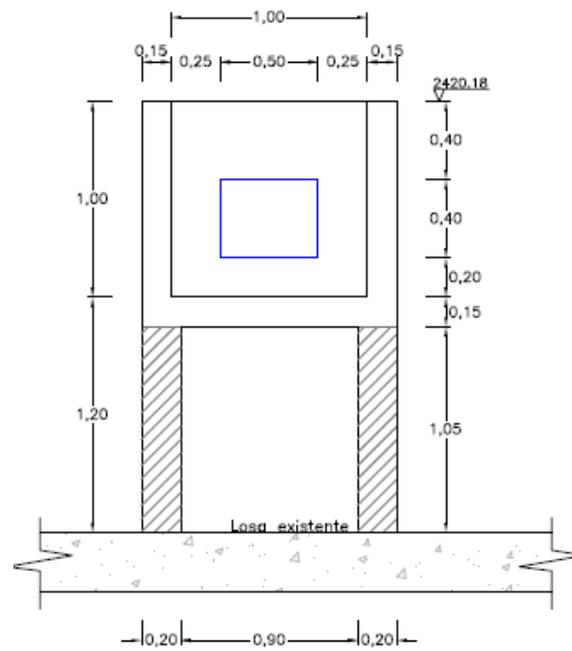
Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

4.7 Mezcla Rápida.

Como unidad de mezcla rápida se utiliza una cámara de agitación a la salida de los desarenadores. En su interior esta cámara tiene un sistema de aireación de burbuja fina, mediante un compresor para inyección de aire de 2 HP con presión a 30 psi, que genera alta turbulencia, creándose un gradiente suficiente para lograr el contacto de coagulante con el caudal de agua que ingresa a la planta. En el punto de agitación se aplica el coagulante, y en la salida de la cuarta cámara de floculador se aplica el ayudante de coagulación.

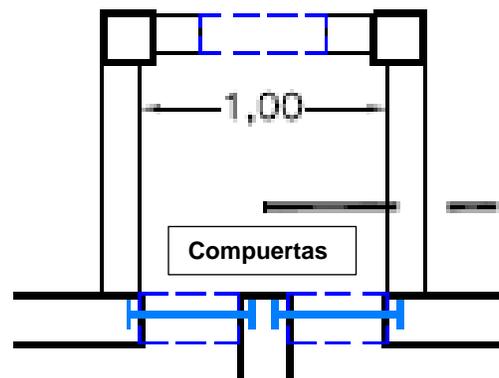
El agua residual es homogeneizada en el tanque de mezcla rápida, en donde se realiza una adición de polímero y coagulante. El polímero utilizado es Clarex 1045 y el coagulante Clarex 3000. La dosificación se obtiene experimentalmente mediante ensayo de jarras efectuadas diariamente por el operario de la PTAR. La dosificación de químicos y ayudantes de floculación se realizan con bombas dosificadoras de tipo diafragma.

Figura 4-13 Detalle cámara de mezcla rápida



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-14 Planta de cámara de mezcla rápida



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-15 Cámara de mezcla rápida



Fuente: Informe final de construcción - INVIAS

La cámara de mezcla rápida tiene las siguientes dimensiones: 1 m de ancho, 1 m de largo y una profundidad de 1m.

4.8 Floculación.

Los objetivos básicos son:

- Reunir los micro-flocs para formar partículas mayores con peso específico superior al agua.
- Compactar el floc para producir una baja concentración volumétrica que permita una alta eficiencia en la fase de separación.

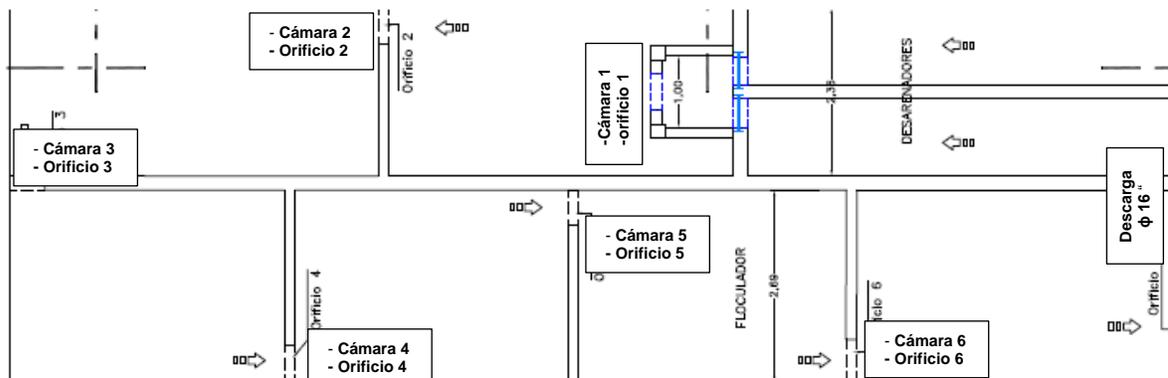
El sistema de floculación de la PTAR Túnel de la Línea, está conformado por una sola unidad de floculación, ya que el espacio físico de la PTAR no permitió construir una segunda unidad, esta unidad cuenta con seis (6) cámaras de flujo vertical que facilitan el control del gradiente de mayor a menor. Para cada una de las cámaras de flujo se cuenta con un orificio (superior o inferior) para el tránsito del flujo y manejo del gradiente, en la tabla 4.1 se muestran las características de los orificios con su ubicación.

Tabla 4-1 Dimensiones y gradientes de los orificios de las cámaras de floculación

| ORIFICIO | UBICACIÓN | DIMENSIONES | GRADIENTE | PERDIDAS |
|----------|-----------|-------------------------|-----------------------|----------|
| 1 | SUPERIOR | H: 0.40 m B = 0.5 m | 74,66 s ⁻¹ | 0.034 m |
| 2 | INFERIOR | H: 0.40 m B = 0.50 m | 74,66 s ⁻¹ | 0.034 m |
| 3 | SUPERIOR | H: 0.50 m B = 0.50 m | 50,36 s ⁻¹ | 0.021 m |
| 4 | INFERIOR | H: 0.50 m B = 0.50 m | 50,36 s ⁻¹ | 0.021 m |
| 5 | SUPERIOR | H: 0.60 m B = 0.50 m | 36,68 s ⁻¹ | 0.015 m |
| 6 | INFERIOR | H: 0.60 m B = 0.50 m | 3668 s ⁻¹ | 0.015 m |
| Φ 16" | | | | 0.012 m |

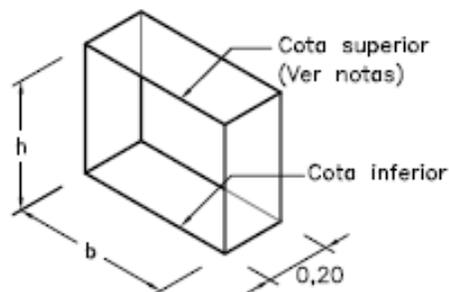
Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-16 Planta de cámara de mezcla rápida



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-17 Sección de los orificios



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

Los orificios que se ubican en la parte superior están 40 cm por debajo del nivel de acabado del borde de muros, y los orificios ubicados en la parte inferior, están ubicados en la placa de fondo.

Figura 4-18 Floculación



Fuente: Informe final de construcción - INVIAS

Las Cámaras de floculación tienen las siguientes dimensiones:

- Cámara 1: 2,36 m de ancho, largo de 4,83 m y profundidad de 2,20 m.
- Cámara 2: 2.36 m de ancho, largo de 4,83 m y profundidad de 2,20 m.
- Cámara 3: 2,36 m de ancho, largo de 3,83 m y profundidad de 2,20 m.
- Cámara 4: 2,36 m de ancho, largo de 3,85 m y profundidad de 2,20 m.
- Cámara 5: 2,36 m de ancho, largo de 3,85 m y profundidad de 2,20 m.
- Cámara 6: 2,36 m de ancho, largo de 4,06 m y profundidad de 2,20 m.

Posterior al sistema de floculación se encuentra una caja denominada “caja de reparto”, ubicada a la salida de los floculadores, consiste en una estructura de válvulas de distribución, para distribuir el caudal floculado entre las diferentes unidades de sedimentación.

De acuerdo con el manual de operación, como la PTAR solo cuenta con una unidad de floculación, el mantenimiento se debe realizar mientras la unidad de floculación esta en operación.

Aunque los gradientes y velocidad del flujo fueron diseñados para evitar la sedimentación del floc dentro de la unidad, las variaciones de caudal y de las características del agua residual; alto contenido de sólidos y de calcio (residuos cementosos) de fácil precipitación, hace necesario mantenimiento diario, extrayendo lodos de las cámaras de floculación.

4.9 Sedimentación.

La optimización del sistema consistió en incrementar el área superficial de sedimentación mediante la adecuación de paneles de tasa alta.

Una vez el tiempo de retención ha permitido la remoción del floc químico formado, el agua es conducida hacia la etapa de filtración, y el material acumulado en el fondo removido para su tratamiento.

La planta cuenta con tres (3) líneas de sedimentación que trabajan en paralelo, acondicionadas con “paneles de sedimentación” de alta tasa, de tal forma que dos unidades funcionan mientras la tercera está en mantenimiento en el momento que se requiera.

Las unidades de sedimentación cuentan con una bomba sumergible para la succión de los lodos sedimentados tipo KRS-B4 7.5 HP/3 fases V/1800rpm.

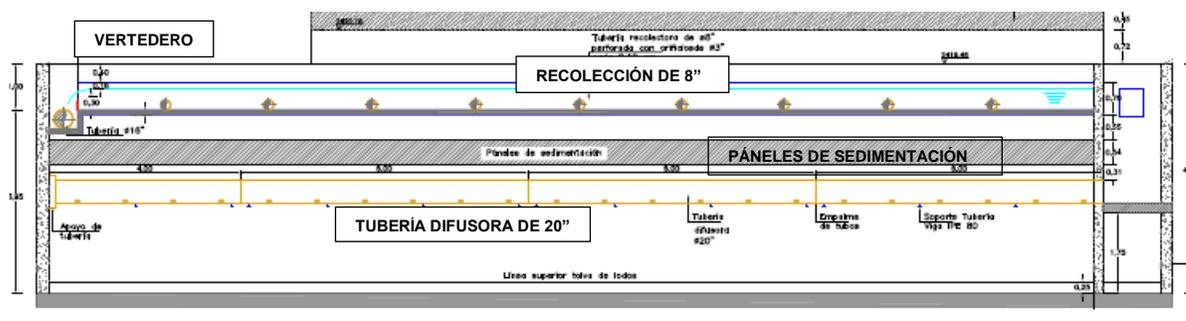
Las estructuras de optimización de los sedimentadores incluyeron:

1. Una serie de cajones huecos rectangulares en concreto llamados buitrones apoyados en columnetas hasta el fondo de la loza del sedimentador, estos buitrones sirven para ingreso del personal en caso de mantenimiento, para ubicar la bomba sumergible de succión, para realizar la limpieza de lodos cuando se requiera, y para anclaje de los perfiles metálicos en los que se apoyan los rieles y el polipasto que permite el traslado de las bombas. (Figura 4.24).
2. Una canaleta de recolección de agua clarificada ubicada en paralelo a la longitud de desarrollo de los sedimentadores. La canaleta es alimentada por el caudal clarificado a través de tubería Novafort de 8” perforada en la parte superior con orificios de 3” distribuidos cada 14 cm, ubicadas transversales al vertedero (Figura 4.24). Al final de la canaleta está el vertedero en acero inoxidable de pared delgada para la medición del caudal tratado.
3. Se construyó la tolva de lodos en el fondo del sedimentador, de 22 m de longitud con pendiente de 7% hacia el costado, donde se ubican los buitrones para recolección de lodos.
4. Tubería de 20” a lo largo de los sedimentadores; su altura es de dos metros con respecto al nivel del suelo y funciona como elemento difusor del agua floculada. La tubería es perforada cada 25 cm en su batea, para evacuar el agua, para un total de 44 orificios por tubería; está apoyada en un extremo en la caja de entrada del sedimentador y en el otro extremo en un dado de concreto de 0,6m x 0,60m. Para evitar las deflexiones, la tubería reposa longitudinalmente en vigas IP80 que están distribuidas cada dos metros en la longitud del sedimentador. En las uniones la tubería tiene doble viga de soporte, una cada lado de la unión (Figura 4.25).
5. Los paneles sedimentadores de alta tasa, son de polipropileno, de figura hexagonal, ubicados por encima de la tubería difusora de 20”, se apoyan

sobre una serie de soportes metálicos anclados en las paredes de los sedimentadores cada metro, y cubren toda el área (Figura 4.26).

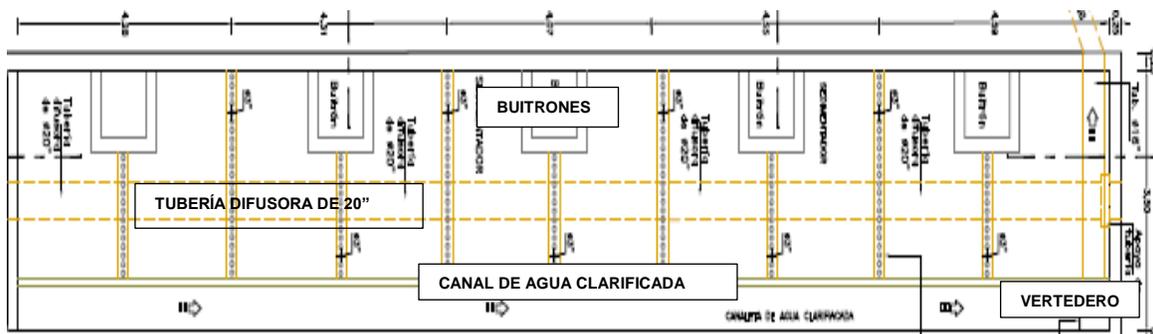
6. Por último se realizó el montaje de las estructuras que facilitan la operación y desplazamiento de los equipos de extracción de lodos en los diferentes compartimientos: dos puentes grúa con IP 160, columnas, vigas y riel de soporte para transportar la bomba sumergible de extracción.

Figura 4-19 Corte longitudinal sedimentador



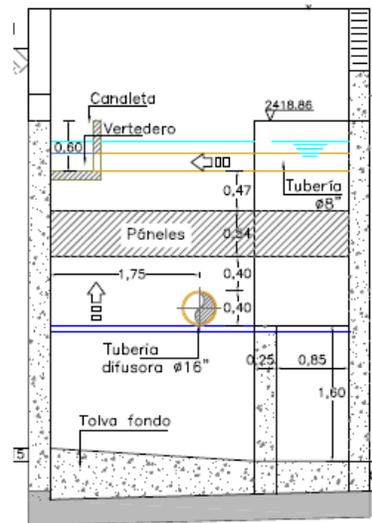
Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-20 Corte en planta de sedimentador



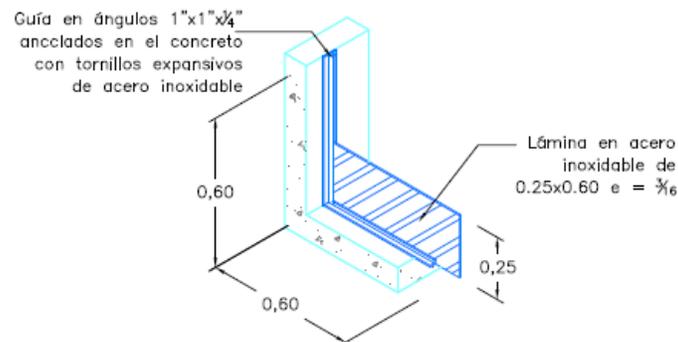
Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-21 Corte en transversal de sedimentador



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-22 Detalle del vertedero



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización PTAR Túnel de la Línea - Invias

Dimensiones de las cámaras de sedimentación:

- Sedimentador No 1: 4,00 m de ancho, largo de 20,2 m y profundidad de 4,50 m.
- Sedimentador No 2: 4,00 m de ancho, largo de 19,83 m y profundidad de 4,74 m.
- Sedimentador No 3: 4,00 m de ancho, largo de 23,70 m y profundidad de 4,95 m.

Figura 4-23 Buitrones, tubería de recolección de 8" y canaleta de agua clarificada



Fuente: Informe final de construcción – INVIAS

Figura 4-24 Interior de los sedimentadores en etapa de construcción, buitrones, fondo del sedimentador, tubería de distribución de agua floculada de 20".



Fuente: Informe final de construcción – INVIAS

Figura 4-25 Interior de los sedimentadores en etapa de construcción, paneles de sedimentación de alta tasa, tubería de distribución de agua floculada de 20"



Fuente: Informe final de construcción – INVIAS

Figura 4-26 Sedimentadores



Fuente: Informe final de construcción – INVIAS

De acuerdo con el manual de operación se deben hacer extracciones diarias de lodos a cada unidad, tomar muestras del agua clarificada y medir la turbiedad. Para que la calidad del agua que entra a los filtros sea aceptable, la planta tiene como indicador un límite de 30 UNT. Si el límite se excede se debe revisar la dosis de coagulante y la acumulación de sólidos sedimentados.

4.10 Filtración.

Los filtros de la planta de tratamiento son de flujo descendente y tasa declinante cuentan con una capa de antracita sobre una capa de arena, que a su vez se apoya sobre una capa de grava. La optimización realizada a los filtros consistió en mejorar el falso fondo de la red de tubería de recolección, mejorar la estratificación del medio de soporte y de la arena filtrante, así como mejorar el sistema de retrolavado del lecho filtrante.

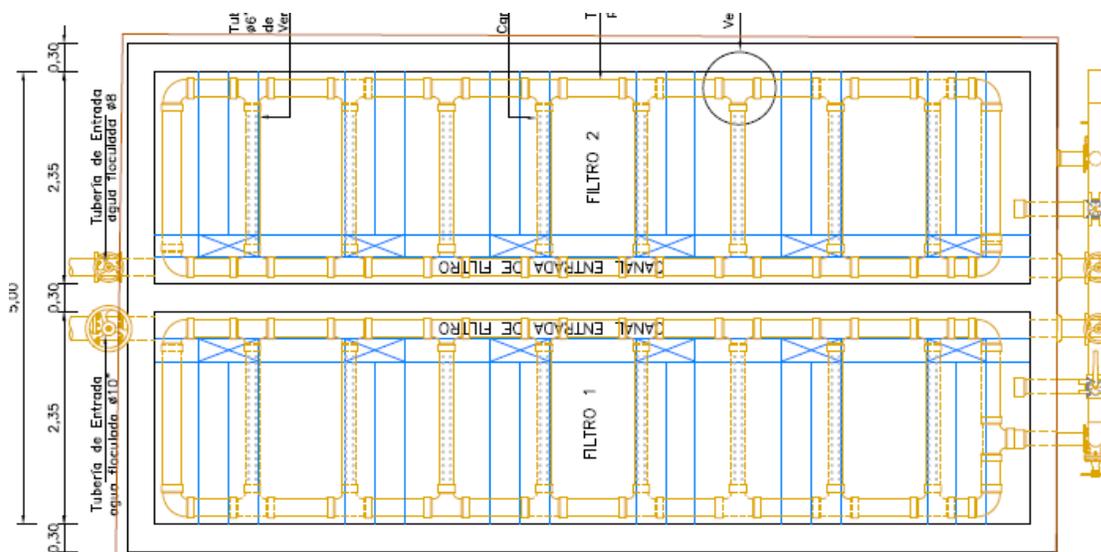
La planta cuenta con dos unidades de filtración, la tubería de recolección de agua filtrada está ubicada en la losa de fondo del filtro, se trata de una red con tubería de 8" y 6". La tubería de 6" esta perforada con orificios de 1/2" cada 10 cm, con inclinación de 60°, ubicados uno frente al otro para la recolección del agua, el lecho de soporte está conformado por canto rodado desde el mayor tamaño (1 1/2" – 2") al menor (1/8") ascendiendo verticalmente, y el medio filtrante de lecho dual conformado por arena de cuarzo y antracita.

Su lavado se realiza con equipo de bombeo utilizando una mezcla de agua filtrada y agua clarificada con el fin de obtener el caudal requerido para una velocidad de retro-lavado adecuada. El agua sucia se regresa a la entrada de la planta utilizando una motobomba de igual capacidad y características que la empleada

para el retrolavado. Se instalaron tres bombas centrifugas de eje horizontal de 15 HP cada una, en el proceso de lavado una de las bombas es usada para retrolavado de los filtros con agua limpia de los tanques, la segunda para la recirculación de las aguas del retrolavado hasta la entrada de la planta y la tercera en stand by para entrar en funcionamiento cuando falle alguna de las otras, el caudal que suministra cada bomba es de 225 m³/hr.

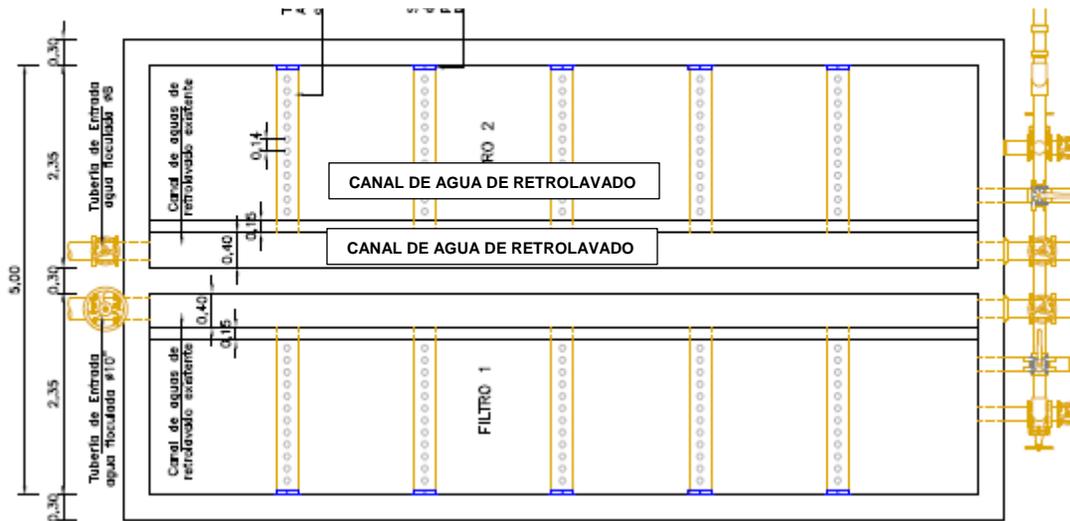
Para el lavado del sistema se cuenta con cuatro tanques de almacenamiento con capacidad de 5000 litros cada uno, estos proveen el caudal a las bombas para el lavado de filtros.

Figura 4-27 Planta filtros – red de tubería a presión perforada de 8” y 6”, para recolección



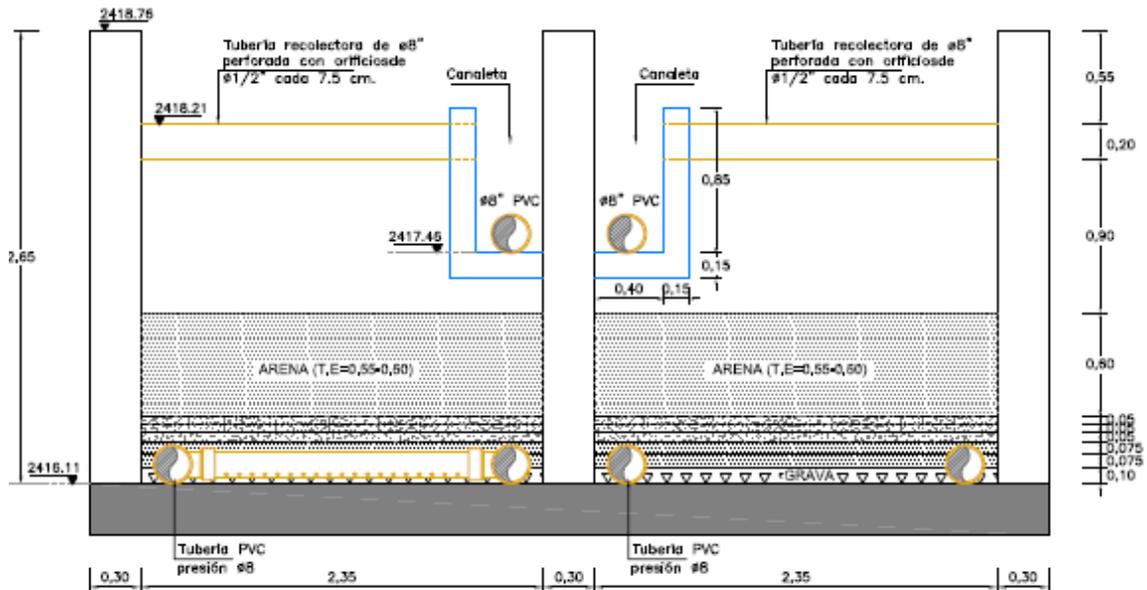
Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización
PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-28 Planta filtros – red de tubería Novafort de 10”, para distribución de agua clarificada y recolección de agua de retro lavado



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización PTAR Túnel de la Línea - Invias

Figura 4-29 Corte unidades de filtro y su lecho filtrante



Fuente: Planos de reajustes, diseño y construcción de la optimización PTAR Túnel de la Línea - Invias

Cada una de las cámaras de filtrantes tiene 2,75 m de ancho, un largo de 10,22 m y una profundidad de 2,64 m.

Figura 4-30 Fondo de filtros - red de tubería a presión de recolección 6" y 8" también usada para retrolavado, adicional tubería de 10" perforada para salida de agua clarificada y recolección de agua del lavado



Fuente: Informe final de construcción – INVIAS

Figura 4-31 Filtro en operación, tubería novafort de 10" perforada para distribuir el caudal a filtrar y el canal de agua clarificada y retrolavado



Fuente: Informe final de construcción – INVIAS

De acuerdo con el manual de operación, la parada o lavado de un filtro se da cuando el agua filtrada presenta un contenido de turbiedad por encima de la norma, o cuando se haya alcanzado la máxima pérdida de carga permitida en el material filtrante.

4.11 Manejo de sólidos.

La operación para su extracción, concentración, deshidratación y disposición final, incluye:

- Extracción y bombeo
- Concentración y espesamiento (Tanque espesador)
- Bombeo de lodos espesados (Del tanque espesador al filtro prensa)
- Deshidratación mecánica (Operación del filtro prensa)
- Almacenamiento y disposición final

Los lodos sedimentados se envían al espesador mediante bombeo (Bomba de los sedimentadores KRS-B4 7.5 HP/3 fases V/1800rpm) donde se aplica un polímero para su agrupamiento y espesamiento, antes de pasar a la fase de deshidratación mecánica en filtro prensa. El espesador por gravedad tiene un diámetro de 3 m, de forma circular con una profundidad de 3,5 m.

Los lodos se espesan hasta un contenido de 5 a 7% de sólidos, consiguiéndose de esta manera una reducción de volumen aproximadamente a 1/5 parte del volumen original, para después ser bombeados al filtro prensa. Para la impulsión de los lodos espesados hasta el filtro de prensa se utiliza una Bomba centrífuga no atascante Ginordi.

En promedio según la planta, el volumen de lodos deshidratados en el filtro prensa es de 37 m³/día

Figura 4-32 Espesador y filtro de prensa



Figura 4-33 Recolección de lodos deshidratados y Área de lodos



Fuente: Informe final de construcción – INVIAS

4.12 Vertimiento.

En cumplimiento del permiso de vertimientos, se garantiza un caudal mínimo de 30 L/s a la Quebrada la Gata y el excedente se vierte directamente por la línea de aducción de 12" sobre el río Santo Domingo. Antes de la descarga en la Quebrada La Gata, se dosifica agente regulador Clarex 3000 para garantizar el cumplimiento del pH.

Figura 4-34 Caseta de operación de bombeo y medidor de pH



Figura 4-35 Vertimiento de la PTARC Quebrada la Gata y Vertimiento Rio Santo Domingo





Fuente: Informe final de construcción – INVÍAS

4.13 Diagnóstico de diseño

4.13.1 Cribado

| CRIBADO | | |
|---------------------------|-------|--|
| Parámetro | Datos | Verificación |
| Espaciamiento (cm) | 1/2 | Cumple RAS |
| Rejilla (in) | 1/2 | Tomado de informe de Construcción PTAR |
| Vel de aproximación (m/s) | 1,17 | No cumple RAS 0,3 - 0,6 m/s |
| Perdida de carga (m) | 0,06 | < 0,75 m Cumple con RAS |

4.13.2 Desarenador

| Área y carga superficial | | | Verificación |
|--------------------------|------|----------------|-------------------------------|
| As | 6,6 | m ² | NA |
| Cs | 1571 | m/d | Cumple RAS 700-1600 m/d |
| Velocidad de diseño | 0,05 | m/s | SEGÚN RAS ENTRE 0,2 - 0,4 m/s |
| Tiempo de retención | 120 | s | Cumple con RAS 20 s – 3 min |

4.13.3 Mezcla rápida

| Mezcla Rápida | | Verificación |
|-------------------------|--|--|
| Entrada y salida | Entrada por la parte inferior mediante compuerta operada manualmente; salida por orificio parte superior | Cumple RAS |
| Número de unidades | 1 | No cumple RAS: mínimo dos unidades |
| G (s ⁻¹) | 1000 | Cumple RAS: 500 - 2000 s ⁻¹ |
| Potencia requerida (W) | 1170 | 1170 W = 1,56 HP Cumple con bomba de aire de burbuja fina de 2HP. |
| Tiempo de retención (s) | 8 | Cumple RAS < 60 s |
| Punto de aplicación | Se aplica mediante bomba dosificadora en la parte inferior | Cumple RAS |

4.13.4 Floculador

| FLOCULADOR | | |
|---|-------------------------|--|
| Parámetro | Datos | Verificación |
| UNIDADES | 1 | No Cumple RAS mínimo 2 unidades para mantenimiento |
| Caudal (L/s) | 120 | Caudal de diseño |
| VOLUMEN TOTAL 6 CAMARAS (m ³) | 136 | Tomado de planos de construcción de PTAR |
| Tiempo de retención (min) | 19 | Cumple con RAS Tiempo de detención 20 - 30 min |
| Gradiente de velocidad, s ⁻¹ | 37 – 75 s ⁻¹ | Cumple RAS gradiente entre 20 y 70 s ⁻¹ |

4.13.5 Sedimentadores

| Área y carga superficial | | Verificación |
|---|-------|--|
| Cs (m/d) | 128 | Cumple RAS 120-300 m/d - Para dos unidades de sedimentadores trabajando en paralelo. |
| Velocidad de diseño y tiempo de retención | | Verificación |
| Velocidad de diseño (m/s) | 0,045 | SEGÚN RAS ENTRE 0,05 - 0,13 m/s |
| T retención (min) | 25 | Cumple con RAS 15 - 25 min |

4.13.6 Filtración

| FILTRACIÓN | | |
|--|--|--|
| Parámetro | Datos | Verificación |
| Espesor lecho filtrante Arena y antracita | 0,6 m | Cumple con RAS, profundidad lecho filtrante convencional entre 0,6 - 0,9 m |
| Características lecho filtrante (según datos planos de construcción) | <ul style="list-style-type: none"> * Dureza 7 en la escala de Mohs * Solubilidad al 40% durante 24 hr. * CU < 1,7 * TE=0,55 mm * Densidad Ss= 2,64 | Cumple RAS Tabla C, Fi, 1, 1 Propiedad Físicas generales y granulométricas de los medios utilizados en filtros rápidos |
| Soporte del medio filtrante (según plano de construcción) | 40 cm de espesor en 6 capas que van decreciendo, así: <ul style="list-style-type: none"> * Segunda capa con 5 cm de espesor tamaño 1/8" a Malla No10. * Tercera capa con 5 cm de espesor, tamaño 1/4" a 1/8". * Cuarta capa con 5 cm de espesor 1/2" - 1/4" * Quinta capa con 7,5 cm de espesor 3/4" - 1/2" * Sexta capa con 7,5 cm de espesor 1" - 3/4" * Séptima capa con 10 cm de espesor 2" - 1/2" | Cumple RAS soporte sobre capa de grava |
| Altura del agua sobre el lecho (m) | 1,1 | Cumple RAS altura fija superior a 0,5 m |
| Perdida de carga (m) | 2 | Cumple RAS Perdida de carga por lo menos 2m |
| UNIDADES CONSTRUIDAS | 2 | No Cumple, RAS Mínimo 3 unidades con tanque de lavado |

| Tasa de filtración | | Verificación |
|---------------------------------------|--------|---|
| Tasa de filtración, m/d | 185 | 120 – 360 (Romero J.A. Tratamiento de AR) |
| Caudal (m ³ /d) | 10.368 | Dato Calculado |
| Área de filtros (m ²) | 56,2 | Dato Calculado |
| Tasa de lavado | | Verificación |
| Caudal de lavado (m ³ /hr) | 250 | Dato del manual de operación |
| Velocidad de lavado (m/min) | 0,15 | No cumple RAS 0,6 - 1 m/min |

4.13.7 Lodos

| Espesador | | Verificación |
|---|-------|--|
| Área, m ² | 7,07 | Dato |
| Volumen, m ³ | 24,7 | Dato |
| Q _{lodos} (m ³ /hr) | 10,8 | Manual de operación de la PTAR (Ensayo de sedimentación) |
| Q _{LODOS} , m ³ /d | 259 | Dato |
| Concentración de sólidos, % | 1 | Valor supuesto |
| Carga de sólidos, kgST/d | 2.590 | Dato de cálculo |
| Tasa de desbordamiento | | Verificación |
| Diámetro (m) | 3 | Tomado de información de campo |
| As, m ² | 7,07 | Dato calculado |
| Tasa (m/d) | 36,67 | No cumple RAS 15 - 31 m/d |
| Tasa de carga de sólidos | | Verificación |
| Tasa (kg/m ² d) | 366 | No cumple RAS , tratamiento primario 100-150 (kg/m ² d) |

5 CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE Y DEL EFLUENTE, Y DIAGNÓSTICO DE LA OPERACIÓN DE LA PTAR

La caracterización del afluente y del efluente se hace con los informes de caracterización del año 2018 y 2019, suministrados por el INVIAS.

Las muestras analizadas son compuestas, durante ocho horas, en una jornada laboral normal, con muestras simples de cada hora.

Las muestras del afluente se toman en la cámara de entrada de la PTAR, y las del efluente en el vertimiento sobre la quebrada La Gata.

Se realizan in situ, los análisis de pH, Conductividad, Oxígeno Disuelto, Temperatura, y Sólidos Sedimentables como se indica en la tabla 5.1

Tabla 5-1 Técnicas empleadas para registros tomados IN SITU

| Parámetro | Técnica | Equipo | Unidades | Método* |
|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------|-------------|
| pH | Potenciométrico | Multiparametro Código E-TB 1569 | Unidades | SM 4500-B+H |
| Conductividad | Electrométrica | | µS/cm | SM 2510-B |
| Oxígeno Disuelto | Electrodo de membrana | | mg O ₂ /L | SM 4500 O-G |
| Temperatura | Termométrica | | °C | SM 2550B |
| Sólidos Sedimentables | Volumétrica | Conos Imhoff | mL/L-H | SM 2540 F |

Fuente: Informe Caracterización Agua Residual Industrial Túnel Piloto Enero 2018 – INVIAS

Las variables determinadas en el laboratorio son: Acidez total, Aceites y Grasas, Alcalinidad, Aluminio, Arsénico, Boro, Carbono Orgánico Total, Cobre, Coliformes Fecales, Coliformes Totales, Color, DBO₅, DQO, Dureza Total, Fenoles, Fluoruros, Fosforo Total, Hierro, Níquel, Nitrógeno Nitratos, Nitrógeno Nitritos, Nitrógeno Total Kjeldahl, Olor Cualitativo, Plata, Plomo, Potasio, Sólidos Disueltos, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Totales, Turbiedad. Los métodos utilizados se exhiben en la tabla 5.2

Tabla 5-2 Métodos de laboratorio para Análisis de Agua

| Parámetro | Técnica | Unidades | Método |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Acidez Total | Titulometría | mg CaCO ₃ /L | SM 2310 B |
| Aceites y Grasas | Infrarrojo | mg/L | SM 5520 C |
| Alcalinidad | Titulometría | mg CaCO ₃ /L | SM 2320 B |
| Aluminio | Absorción Atómica | mg Al/L | S.M 3111 D |
| Arsénico | Absorción Atómica | µg As/L | S.M 3500-As B |
| Boro | Espectrofotometría | mg B/L | ES ISO 9390:2001 |
| Carbono Orgánico Total | Combustión infrarroja | mg C/L | SM 5220 C – Cal |
| Cobre | Absorción Atómica | mg CU/L | SM 3111-B |
| Coliformes Fecales | Sustrato Definido | NMP/100 mL | S.M 9223B |
| Coliformes Totales | Sustrato Definido | NMP/100 mL | S.M 9223 B |
| Color | Físico | CU | S.M 2120 C |
| DBO ₅ | Incubación | mg O ₂ /L | SM 5210 B Modif |
| DQO | Reflujo cerrado | mg O ₂ /L | SM 5220 C |
| Dureza Total | Titulometría | mg CaCO ₃ /L | SM 2340 C |
| Fenoles | Espectrofotometría | mg Fenol/L | S.M 5530 D |
| Fluoruros | Electrometría | mg F/L | SM 4500 F-C |
| Fosforo Total | Espectrofotometría | mg P/L | S.M 4500 P B,E |
| Hierro | Absorción Atómica | mg Fe/L | SM 3111 B |
| Niquel | Absorción Atómica | mg Ni/L | SM 3111 B |
| Nitrógeno Nitratos | Ion selectivo | mg N-NO ₃ /L | SM 4500-NO ₃ D |
| Nitrógeno Nitritos | Espectrofotometría | mg N-NO ₂ /L | SM 4500-NO ₂ B |
| Nitrógeno Total Kjeldahl | Espectrofotometría | mg N/L | S.M 4500 N _{org} C |
| Olor cualitativo | Físico | Aceptable | Cualitativo |
| Plata | Absorción Atómica | mg Ag/L | SM 3111 B |
| Plomo | Absorción Atómica | mg/L | SM 3111 B |
| Potasio | Absorción Atómica | mg K/L | SM 3111 B |
| Sólidos Disueltos | Electrometría | mg/L | SM 2510 B |
| Sólidos Suspendidos Totales | Gravimetría | mg/L | SM 2540 D |
| Sólidos Totales | Gravimetría | mg/L | SM 2540 B |
| Turbiedad | Nefelometría | NTU | SM 2130 B |

Fuente: Informe Caracterización Agua Residual Industrial Túnel Piloto Enero 2018 – INVIAS

5.1 Caracterización del afluente y del efluente.

En las tablas 5.3 y 5.4 se presentan la caracterización con los valores promedio observados en el año 2018 y 2019.

Tabla 5-3 Caracterización año 2018

| CARACTERIZACIÓN AÑO 2018 | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|---------------|---------------|----------------------------|--------------|
| Parámetro | Unidades | AFLUENTE | EFLUENTE | Límite Res.0631/15 Art. 15 | CUMPLIMIENTO |
| pH | Unidades | 10,59 | 8,14 | 6 - 9 | CUMPLE |
| Conductividad | µS/cm | 357,95 | 305,70 | - | N.A |
| Oxígeno Disuelto | mg O₂/L | 5,60 | 6,86 | - | N.A |
| Temperatura | °C | 16,65 | 16,56 | < 40°C | CUMPLE |
| Solidos Sedimentables | mL/L - Hora | 10,23 | 0,07 | 1 | CUMPLE |
| Acidez total | mg/L | 4,34 | 4,36 | A y R | N.A |

Tabla 5 – 3 Caracterización año 2018 (continuación)

| | | | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|-------|------------------|
| Aceites y Grasas | mg/L | 2,24 | 3,73 | 10 | CUMPLE |
| Alcalinidad | mg CaCO₃/L | 94,99 | 44,57 | A y R | N.A |
| Aluminio | mg Al/L | 10,89 | 1,49 | A y R | N.A |
| Arsénico | µg As/L | 0,01 | 0,01 | 0,1 | CUMPLE |
| Boro | mg B/L | 0,29 | 0,20 | A y R | N.A |
| Carbono Orgánico Total | mg C/L | 10,11 | 5,03 | - | N.A |
| Cobre | mg Cu/L | 0,17 | 0,17 | 1 | CUMPLE |
| Coliformes Fecales | NMP/100 mL | 33,73 | 39,00 | - | N.A |
| Coliformes Totales | NMP/100 mL | 2255,55 | 540,09 | - | N.A |
| Color | UPC | 12,00 | 5,00 | - | N.A |
| DBO₅ | mg O₂/L | 22,36 | 5,22 | 50 | CUMPLE |
| DQO | mg O₂/L | 62,00 | 17,27 | 150 | CUMPLE |
| Dureza Total | mg CaCO₃/L | 349,64 | 139,58 | A y R | N.A |
| Fenoles | mg Fenol/L | 0,13 | 0,09 | 0,2 | CUMPLE |
| Fluoruros | mg F/L | 0,18 | 0,17 | 5 | CUMPLE |
| Fosforo Total | mg P/L | 0,19 | 0,06 | A Y R | N.A |
| Hierro | mg Fe/L | 20,07 | 0,27 | 1 | CUMPLE |
| Níquel | mg Ni/L | 0,10 | 0,09 | 0,1 | CUMPLE |
| Nitratos | mg/L | 0,66 | 0,73 | A y R | N.A |
| Nitritos | mg NO₂-N/L | 0,06 | 0,05 | A y R | N.A |
| NTK | mg N/L | 2,14 | 0,95 | A y R | N.A |
| Olor Cualitativo | Aceptable / No Aceptable | ACEPTABLE | ACEPTABLE | - | N.A |
| Plata | mg Ag/L | 0,03 | 0,03 | 0,2 | CUMPLE |
| Plomo | mg Pb/L | 0,26 | 0,29 | 0,1 | NO CUMPLE |
| Potasio | mg K/L | 3,82 | 2,88 | - | N.A |
| Sólidos Disueltos | mg/L | 242,36 | 226,64 | - | N.A |
| Solidos Suspendidos Totales | mg/L | 857,36 | 14,00 | 50 | CUMPLE |
| Solidos Totales | mg/L | 1094,27 | 247,00 | - | N.A |
| Turbiedad | NTU | 920,82 | 6,41 | - | N.A |

A y R = Análisis y reporte

N.A. = No aplica

En todos los parámetros, con excepción de Plomo, las concentraciones promedio cumplen con lo requerido en el RAS. En la figura 5-1 se incluyen las concentraciones de Plomo para 2018. Se observa que entre junio y diciembre de 2018, se cumple el criterio para Plomo logrando valores por debajo de 0,1 mg Pb/L. De acuerdo con lo anterior se puede recomendar la evaluación del tratamiento con cal del agua residual para garantizar la remoción permanente del plomo a pH alto.¹

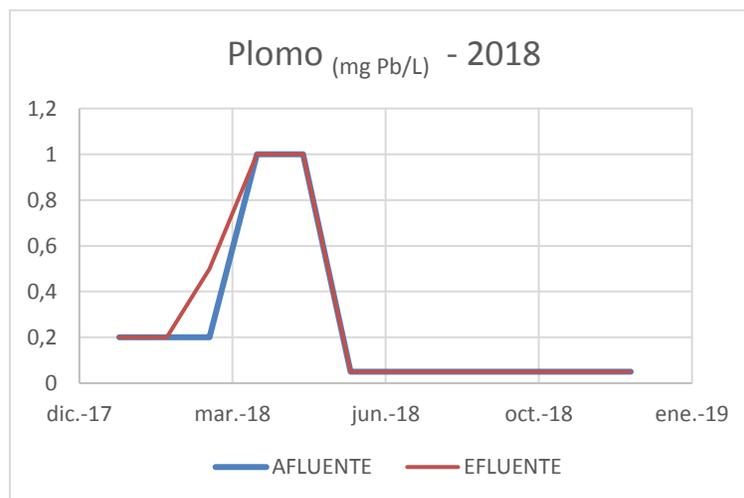


Tabla 5-4 Caracterización año 2019

| CARACTERIZACIÓN AÑO 2019 | | | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------|----------|-----------------------------|--------------|
| Parámetro | Unidades | AFLUENTE | EFLUENTE | Limite Res 0631/15 - Art 15 | CUMPLIMIENTO |
| pH | Unidades | 8,37 | 7,69 | 6 - 9 | CUMPE |
| Conductividad | μS/cm | 294,35 | 303,02 | - | N.A |
| Oxígeno Disuelto | mg O ₂ /L | 5,49 | 7,05 | - | N.A |
| Temperatura | °C | 16,06 | 16,05 | < 40°C | CUMPLE |
| Solidos Sedimentables | mL/L - Hora | 0,43 | 0,10 | 1 | CUMPLE |
| Acidez total | mg/L | 12,30 | 12,95 | A y R | N.A |
| Aceites y Grasas | mg/L | 5,51 | 5,38 | 10 | CUMPLE |
| Alcalinidad | mg CaCO ₃ /L | 135,91 | 128,20 | A y R | N.A |

¹ Tomado del libro Plantas de tratamiento de Aguas Residuales – Jairo Alberto Romero Rojas

TABLA 5 – 4 CARACTERIZACIÓN AÑO 2019 (CONTINUACIÓN)

| | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Aluminio | mg Al/L | 1,38 | 1,38 | A y R | N.A |
| Arsénico | µg As/L | 0,01 | 0,00 | 0,1 | CUMPLE |
| Boro | mg B/L | 0,12 | 0,11 | A y R | N.A |
| Carbono Orgánico Total | mg C/L | 19,36 | 3,80 | - | N.A |
| Cobre | mg Cu/L | 0,13 | 0,13 | 1 | CUMPLE |
| Coliformes Fecales | NMP/100 mL | 2177,65 | 590,80 | - | N.A |
| Coliformes Totales | NMP/100 mL | 3807,38 | 3024,13 | - | N.A |
| Color | CU | 13,00 | 5,00 | - | N.A |
| DBO ₅ | mg O ₂ /L | 14,17 | 4,59 | 50 | CUMPLE |
| DQO | mg O ₂ /L | 26,21 | 18,75 | 150 | CUMPLE |
| Dureza Total | mg CaCO ₃ /L | 254,04 | 206,42 | A y R | N.A |
| Fenoles | mg Fenol/L | 0,11 | 0,11 | 0,2 | CUMPLE |
| Fluoruros | mg F/L | 0,12 | 0,12 | 5 | CUMPLE |
| Fosforo Total | mg P/L | 0,17 | 0,17 | A Y R | N.A |
| Hierro | mg Fe/L | 1,52 | 0,23 | 1 | CUMPLE |
| Níquel | mg Ni/L | <0,2 | 0,16 | 0,1 | NO CUMPLE |
| Nitratos | mg/L | 1,05 | 1,25 | A y R | N.A |
| Nitritos | mg NO ₂ -N/L | 0,10 | 0,04 | A y R | N.A |
| NTK | mg N/L | 2,41 | 2,36 | A y R | N.A |
| Olor Cualitativo | Aceptable / No Aceptable | ACEPTABLE | ACEPTABLE | - | N.A |
| Plata | mg Ag/L | 0,04 | 0,04 | 0,2 | CUMPLE |
| Plomo | mg Pb/L | 0,09 | 0,09 | 0,1 | CUMPLE |
| Potasio | mg K/L | 1,54 | 1,35 | - | N.A |
| Sólidos Disueltos | mg/L | 213,75 | 191,38 | - | N.A |
| Solidos Suspendidos Totales | mg/L | 108,83 | 10,18 | 50 | CUMPLE |
| Solidos Totales | mg/L | 266,25 | 208,50 | - | N.A |
| Turbiedad | NTU | 86,33 | 3,11 | - | N.A |

A y R = Análisis y reporte

N.A. = No aplica

En todos los parámetros se da cumplimiento a lo requerido en el RAS, sin embargo la concentración de Níquel. 0,16 mg/L, excede la norma exigida de 0,1 mg Ni/L.

5.2 Diagnóstico de la operación de la PTAR.

En la Tabla 5-5 y 5-6 se presentan los porcentajes de remoción obtenidos en la PTAR.

Tabla 5-5 Eficiencia de la PTAR año 2018

| EFICIENCIA PTAR TÚNEL DE LA LINEA | | | | |
|------------------------------------|----------|----------|------------------------|------------------------------|
| PARÁMETRO | Afluente | Efluente | Porcentaje de remoción | % según decreto 1594 de 1984 |
| Aceites y Grasas (mg/L) | 2,24 | 3,73 | 0 % | >80% |
| DBO ₅ (mg/L) | 22,36 | 5,22 | 77 % | >80% |
| Solidos Suspendidos Totales (mg/L) | 857,36 | 14,00 | 98 % | >80% |

Tabla 5-6 Eficiencia de la PTAR año 2019

| EFICIENCIA PTAR TÚNEL DE LA LINEA | | | | |
|------------------------------------|----------|----------|------------------------|------------------------------|
| PARÁMETRO | Afluente | Efluente | Porcentaje de remoción | % según decreto 1594 de 1984 |
| Aceites y Grasas (mg/L) | 5,51 | 5,38 | 2 % | >80% |
| DBO ₅ (mg/L) | 14,17 | 4,59 | 68 % | >80% |
| Solidos Suspendidos Totales (mg/L) | 108,83 | 10,18 | 91 % | >80% |

5.3 Factibilidad de reúso del efluente para riego y como fuente de agua cruda para agua potable.

Tabla 5-7 Comparativo agua tratada con agua para uso agrícola

| PARAMETROS REUSO | | | | |
|----------------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| Referencia | Unidad | Unidad Valor Resolución 1207 de 2014 | Valor del afluente en la PTAR 2019 | Cumplimiento |
| pH | Unidades de pH | 6,0 – 9,0 | 7,69 | Cumple |
| Conductividad | µS/cm | 1.500,00 | 303,02 | Cumple |
| Microbiológicos | | | | |
| Coliformes termotolerantes | NMP/100 mL | 1,0*E(+5) | 3024,13 | Cumple |
| Enterococos fecales | NMP/100 mL | 1,0*E(2) | Sin registro | N.A. |

| TABLA 5-7 COMPARATIVO AGUA TRATADA CON AGUA PARA USO AGRICOLA (CONTINUACIÓN) | | | | |
|--|-------------------------------------|-------|------------------|--------|
| Helminfos parásitos humanos | Huevos y Larvas/L | 1 | Sin registro | N.A. |
| Protozoos parásitos humanos | Quistes/L | 1 | Sin registro | N.A. |
| Salmonella sp | NMP/100 mL | 1 | Sin registro | N.A. |
| Químicos | | | | |
| Fenoles totales | mg/L | 1,5 | 0,11 | Cumple |
| Hidrocarburos Totales | mg/L | 1 | Sin registro | N.A. |
| Iones | | | | |
| Cianuro libre | mg CN-/L | 0,2 | < 0,10 mg CN-/L | Cumple |
| Cloruros | mg Cl-/L | 300 | Sin registro | N.A. |
| Fluoruros | mg F-/L | 1 | 0,12 | Cumple |
| Sulfatos | mg SO ₄ ²⁻ /L | 500 | Sin registro | N.A. |
| Metales | | | | |
| Aluminio | mg Al/L | 5 | 1,38 | Cumple |
| Berilio | mg Be/L | 0,1 | Sin registro | N.A. |
| Cadmio | mg Cd/L | 0,01 | Sin registro | N.A. |
| Cinc | mg Zn/L | 3 | Sin registro | N.A. |
| Cobalto | mg Co/L | 0,05 | Sin registro | N.A. |
| Cobre | mg Cu/L | 1 | 0,13 | Cumple |
| Cromo | mg Cr/L | 0,1 | Sin registro | N.A. |
| Hierro | mg Fe/L | 5 | 0,23 | Cumple |
| Mercurio | mg Hg/L | 0,002 | < 0,0010 mg Hg/L | Cumple |
| Litio | mg Li/L | 2,5 | Sin registro | N.A. |
| Manganeso | mg Mn/L | 0,2 | Sin registro | N.A. |
| Molibdeno | mg Mo/L | 0,07 | Sin registro | N.A. |
| Níquel | mg Ni/L | 0,2 | 0,16 | Cumple |
| Plomo | mg Pb/L | 5 | 0,09 | Cumple |

| TABLA 5-7 COMPARATIVO AGUA TRATADA CON AGUA PARA USO AGRICOLA (CONTINUACIÓN) | | | | |
|--|-----------------------|-------------|----------------|--------|
| Sodio | mg Na/L | 200 | Sin registro | N.A. |
| Vanadio | mg V/L | 0,1 | Sin registro | N.A. |
| Metales | | | | |
| Arsénico | mg As/L | 0,1 | 0,00425 | Cumple |
| Boro | mg B/L | 0,4 | 0,11 | Cumple |
| No metales | | | | |
| Selenio | mg Se/L | 0,02 | Sin registro | N.A. |
| Otros parámetros | | | | |
| Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto) | mg Cl ₂ /L | Menor a 1,0 | Sin registro | N.A. |
| Nitratos (NO ₃ --N) | mg/L | 5 | 2,6 | Cumple |

N.A. (No se tiene registro en las muestras realizadas en la planta de tratamiento de aguas residuales Túnel de la Línea.) = 19 N.A.

Tabla 5-8 Comparativo agua tratada con agua cruda para agua potable

| PARÁMETROS REÚSO | | | | |
|----------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|--------------|
| Referencia | Unidad | Valor Decreto 1594 de 1984 | Valor efluente PTAR 2019 | Cumplimiento |
| Amoniaco | n | 1 | Sin registro | N.A |
| Arsénico | As | 0,05 | 0,00425 µg As/L | CUMPLE |
| Bario | Ba | 1 | Sin registro | N.A |
| Cadmio | Cd | 0,01 | Sin registro | N.A |
| Cianuro | CN- | 0,2 | < 0,10 mg CN-/L | CUMPLE |
| Cinc | Zn | 15 | Sin registro | N.A |
| Cloruros | Cl- | 250 | Sin registro | N.A |
| Cobre | Cu | 1 | 0,13 mg Cu/L | CUMPLE |
| Color | Color Real | 75 | 13 CU | CUMPLE |
| Compuestos Fenólicos | Fenol | 0,002 | 0,11 mg Fenol/L | NO CUMPLE |
| Cromo | CR+ ⁶ | 0,05 | Sin registro | N.A |
| Difenil Policlorados | Concentración | No detectable | Sin registro | N.A |
| Mercurio | Hg | 0,02 | < 0,0010 mg Hg/L | CUMPLE |

| Parámetro | Unidad | Norma | Resultado | Estado |
|--------------------|--|-------------------------------|------------------------------|-----------|
| Nitratos | N | 10 | 1,25 mg NO ₃ -N/L | CUMPLE |
| Nitritos | N | 10 | 0,04 mg NO ₂ -N/L | CUMPLE |
| pH | Unidades | 5,0 - 90 | 7,69 | CUMPLE |
| Plata | Ag | 0,05 | 0,04 mg Ag/L | CUMPLE |
| Plomo | Pb | 0,05 | 0,09 mg Pb/L | NO CUMPLE |
| Selenio | Se | 0,01 | Sin registro | N.A |
| Sulfatos | SO ₄ | 400 | Sin registro | N.A |
| Tenso activos | Sustancias activas al azul de metileno | 0,5 | Sin registro | N.A |
| Coliformes Totales | NMP | 1000 microorganismos / 100 ml | 3024,13 NMP/100 mL | NO CUMPLE |
| Turbiedad | UJT | 10 | 3,11 NTU | CUMPLE |

Fuente: Informe Caracterización Agua Residual Industrial Túnel Piloto Enero 2018 – INVIAS

N.A. (No se tiene registro en las muestras realizadas en la planta de tratamiento de aguas residuales Túnel de la Línea.) = 10 N.A.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se recomienda mejorar la estructura de cribado disminuyendo la velocidad de aproximación, mediante la inclusión de una cámara de aquietamiento con dos compartimientos.
- Se recomienda realizar mantenimiento del borde de las guías y de la lámina de acero inoxidable, de la cámara de entrada y de los desarenadores.
- Se recomienda la construcción de una unidad adicional de mezcla rápida igual a la existente, que sirva de respaldo a la actual, y permita satisfacer el requerimiento del RAS.
- Se recomienda construir una segunda unidad de floculación igual a la existente para respaldo y mantenimiento cuando se requiera.
- Se recomienda la construcción de un tercer filtro, para dar cumplimiento al RAS (mínimo tres unidades).

- Se recomienda mejorar la capacidad del sistema de lavado de los filtros para cumplir con la velocidad mínima de 0,6 m/min requerida en el RAS.
- Se recomienda incrementar el diámetro del espesador de lodos, a por lo menos 3,5 m; para cumplir con los criterios para tasa de desbordamiento y para carga másica del RAS.
- La PTAR cumple, en general, con la norma de vertimiento requerida. Durante el año 2018 solamente se incumplió el criterio para plomo – 0,29 mg/L > 0,1 mg/L y durante el año 2019 solamente el criterio para Níquel – 0,16 mg/L > 0,1 mg/L.
- Los parámetros de calidad de agua analizados en el efluente, son aceptables, de acuerdo con la resolución 1207 de 2014, para reúso del agua en riego agrícola.
- Los parámetros de calidad de agua analizados en el efluente, son aceptables, de acuerdo con el artículo 38 del decreto 1594 de 1984, para reúso del agua para potabilización con tratamiento convencional

7 REFERENCIAS

1. CONSORCIO CONLINEA 3 – INVIAS, Plan de gestión del Riesgo para el manejo de vertimientos de las aguas residuales industriales generadas por la construcción del proyecto “Túnel de la Línea; Túnel Piloto”.
2. CONSORCIO CONLINEA 3 – INVIAS, Solicitud de modificación permiso de vertimientos “Túnel de la Línea; Túnel Piloto”.
3. CONSORCIO CONLINEA 3 – INVIAS, Informe de construcción de adecuación y optimización de la planta de tratamiento de las aguas residuales que se generan en las obras de construcción del Túnel de la Línea.
4. CONSORCIO CONLINEA 3 – INVIAS, Manual de operación, mantenimiento y control de la planta de tratamiento de aguas residuales del Túnel de la Línea
5. CONSORCIO CONLINEA 3 - INVIAS, Informes de caracterización agua industrial túnel piloto –. Periodo 2018.
6. CONSORCIO LA LINEA - INVIAS, Informes técnicos - caracterización fisicoquímica, planta de tratamiento aguas residuales túnel principal–. Periodo 2019.
7. CONSORCIO CONLINEA 3 – INVIAS, Planos Record optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de construcción del Túnel de la Línea.
8. MINISTERIO DE VIVIENDA Y AGUA, reglamento de agua potable y saneamiento básico Bogotá RAS 2000., obtenido de: <http://www.minvivienda.gov.co/lists/reglamentoaguasaneamiento/allitems.aspx>
9. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2016
10. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto, Calidad del agua, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009
11. SOTELO ÁVILA GILBERTO, Hidráulica General Volumen 1. Editorial Noriega Editores, 2007

12. SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS, Informe 2017, Evaluación integral de prestadores Empresa Multipropósito de Calarcá – Obtenido de: <https://www.superservicios.gov.co/servicios-vigilados/acueducto-alcantarillado-y-aseo/empresa-multiproposito-de-calarca-sa-esp>
13. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - INVIAS, Informe Final - Proyecto de Investigación Contrato interadministrativo 01226 de 2017, Objeto: Diseñar e implementar un programa de modelación matemática que permita consolidar y analizar la información obtenida de los monitores a las estaciones hidrometeorológicas según requerimientos de los autos administrativos por la Construcción del Proyecto Cruce de la Cordillera Central.
14. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - INVIAS, Anexo B Ensayos hidráulicos en el Túnel de la Línea Convenio Interadministrativo 659 de 2013, Objeto: Aunar esfuerzos para el monitoreo de aguas subterráneas dentro del Túnel de la Línea, con el fin de conocer las variables hidrogeológicas que permitan determinar el balance hídrico del sistema en el proyecto “Cruce de la Cordillera Central: Túneles del Segundo Centenario – Túnel de la Línea y segunda calzada Calarcá – Cajamarca, dentro del plan acción ambiental social PAAS-CAP y los requerimientos establecidos dentro de la licencia ambiental 780 de 2001, obtenido de: <http://bdigital.unal.edu.co/55471/13/Anexo%20B.%20Ensayos%20Hidr%C3%A1ulicos%20en%20el%20T%C3%BAnel%20de%20La%20L%C3%ADnea.pdf>
15. VEN TE CHOW, Hidráulica de Canales Abierto. Editorial Mc Graw Hill, 1994.
16. ZAMORA MARTINEZ, Rita Alexandra, Tesis de Grado Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente - Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales la Marina – Armenia.