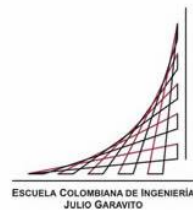


Maestría en Ingeniería Civil

Diagnóstico de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Colomba El Guabal

Juan Carlos Castañeda Sánchez

Bogotá, D.C., 12 de junio de 2018

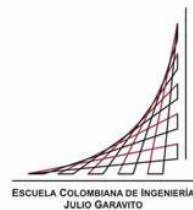


**Diagnóstico de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno
sanitario Colomba El Guabal**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Jairo Alberto Romero Rojas
Director**

Bogotá, D.C., 12 de junio de 2018



La tesis de maestría titulada “Diagnóstico de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Colomba El Guabal”, presentada por Juan Carlos Castañeda Sánchez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Ing. Jairo Alberto Romero Rojas

Jurado

Ing. Amalia Avendaño Sánchez

Jurado

Ing. Maria Carolina Romero Pereira

Bogotá, D.C., 12 de junio de 2018

Dedicatoria

Nada es posible sin la misericordia y el amor de Dios, por eso este trabajo lo dedico en primer lugar a ÉL. Mi sustento, mi apoyo y mis fuerzas vienen de ti Señor.

A mi esposa Camila, por ser mi apoyo incondicional, mi ayuda idónea, mi ejemplo de vida y mi motor. Te amo.

A mi hija Noelia, a quien amo con todo mi ser y por quien quiero ser cada día mejor.

A mis padres Sandra y Luis, quienes me enseñaron que para llegar a donde se quiere hay que luchar y trabajar arduamente.

Agradecimientos

A la Escuela Colombiana de Ingeniería, sus directivos y profesores, pues en sus aulas he crecido intelectual, profesional y personalmente. Sus esfuerzos han producido en mí, al igual que en muchos de mis colegas, la voluntad necesaria para llegar hasta el final.

A mi director de tesis, Jairo Romero, a quien admiro y respeto profundamente y quien dio las directrices precisas para alcanzar esta meta.

A Interaseo del Valle, por permitir el desarrollo de este proyecto y facilitar los recursos y la información requerida para su desarrollo.

A Hidrosuelos, especialmente a Juan José Velasco, por su apoyo durante mi etapa formativa y por impulsar mi crecimiento académico y personal.

Resumen

El relleno sanitario Colomba El Guabal, se encuentra localizado en el municipio de Yotoco, Valle del Cauca, a una distancia aproximada de 50 km de la capital departamental, Santiago de Cali. Este relleno es operado por la empresa Interaseo del Valle S.A.S ESP, y cuenta con licencia ambiental, por un periodo de 31,2 años y una capacidad de almacenamiento de 19.500.000 toneladas de residuos, atendiendo una población aproximada de 3 millones de habitantes.

Actualmente llegan al relleno sanitario un promedio de 2260 ton/día de residuos sólidos provenientes de 10 municipios del Valle del Cauca y 4 municipios del departamento del Cauca, siendo la ciudad de Santiago de Cali la mayor aportante de residuos. El relleno cuenta con una planta de tratamiento de lixiviados (PTL), la cual también es operada por Interaseo del Valle S.A.S. ESP.

Esta planta de tratamiento fue diseñada para tratar un caudal de 8L/s, pero durante la operación se evidenció que con caudales superiores a 5L/s, la planta no es capaz de remover los contaminantes presentes en el lixiviado por debajo de los valores establecidos en la norma de vertimiento. Lo que ha implicado que deba ser operada a caudales promedio de 3,5L/s y máximos de 5L/s, ocasionando un superávit en la relación caudal generado vs caudal tratado. Estos excesos de caudal son regulados por la capacidad de almacenamiento de la laguna de homogeneización, no obstante, esto representa que con la operación del relleno sanitario la diferencia entre el caudal generado y el caudal tratado sea cada vez mayor y, por ende, el pasivo ambiental también.

El trabajo realizado se centra en la evaluación de la planta de tratamiento de lixiviados a partir de unas visitas preliminares efectuadas, así como de la revisión y análisis de las caracterizaciones fisicoquímicas históricas existentes a los lixiviados antes, durante y después del tratamiento que se realiza, en comparación con las memorias del diseñador y los planos de las unidades, a fin de determinar las condiciones operativas de cada componente de la planta de tratamiento y de formular algunas recomendaciones que puedan ayudar a solucionar la problemática con la que cuenta el relleno sanitario.

A partir del análisis realizado se encontró que muchas unidades están sobrecargadas y no operan en las condiciones óptimas según los rangos propuestos en la bibliografía. Asimismo, se observa que se requiere mantenimientos a unidades trascendentales para la estabilidad de todo el sistema de tratamiento (laguna de homogeneización y laguna anaerobia). También se observó que las unidades de tratamiento fisicoquímico se pueden optimizar, modificando los productos químicos empleados o las dosificaciones.

Finalmente se concluye que el sistema requiere ser ampliado en capacidad hidráulica, ya que, con las condiciones actuales, la planta no podrá operar a caudales superiores de 5L/s sin poner en riesgo el cumplimiento de los parámetros de calidad del vertimiento. Esta ampliación podría desarrollarse incluyendo unidades de tratamiento convencional o unidades de tratamiento avanzado que ayuden a la remoción de los parámetros que hoy por hoy incumpliría el vertimiento. Con lo cual no solo se garantizaría el cumplimiento ambiental sino la disminución de los volúmenes de lixiviados almacenados en la laguna.

Tabla de contenido

Introducción	14
Objetivos.....	17
1. Objetivo general	17
2. Objetivos específicos	17
Capítulo I Descripción de la Planta de Tratamiento de Lixiviados	18
1. Localización	18
2. Componentes de la PTL.....	20
2.1. Parámetros de diseño	21
2.2. Operación	43
3. Generación de lixiviados	46
Capítulo II Caracterización de afluentes y efluentes	48
1. Lixiviado crudo	49
2. Laguna de homogeneización	54
3. Planta fisicoquímica	56
4. Tanque anaerobio	58
5. Tanques aireadores (lodos activados).....	59
6. Tanque sedimentador (lodos activados).....	60
7. Unidad compacta de clarificación	62
8. Tanque de contacto con cloro	63
9. Lixiviado tratado	64
10. Evaluación de eficiencias.....	70
10.1. Eficiencia general del sistema de tratamiento	70
10.2. Evaluación de las eficiencias de las unidades de la PTL	71
Capítulo III Norma de vertimiento	74

1. Parámetros y límites.....	74
1.1. Evaluación del cumplimiento de la normatividad	76
2. Régimen de transición.....	78
Capítulo IV Parámetros de operación	80
1. Laguna de homogeneización	80
1.1. Carga orgánica volumétrica (COV).....	81
1.2. Tiempo de retención hidráulica (TRH).....	81
1.3. Carga orgánica superficial (COS).....	82
2. Laguna anaerobia cubierta.....	82
2.1. Carga orgánica volumétrica (COV).....	83
2.2. Carga orgánica superficial (COS).....	83
3. Planta fisicoquímica	84
3.1. Dosificación de químicos.....	84
4. Tratamiento biológico anaerobio	84
4.1. Reactor UASB + FAFA.....	84
5. Tratamiento biológico aeróbico	85
5.1. Tanque de aireación	85
5.2. Tanque sedimentador	86
6. Unidad compacta de clarificación	87
7. Tanque de contacto con cloro	87
8. Filtración y adsorción	87
Capítulo V Diagnóstico del sistema de tratamiento	89
1. Laguna de homogeneización	89
2. Laguna anaerobia cubierta.....	89
3. Planta fisicoquímica	91
4. Reactor UASB.....	92

5. Lodos activados	94
6. Unidad compacta de clarificación	96
7. Tanque de contacto con cloro	98
8. Filtración y adsorción	98
Conclusiones y Recomendaciones	99
Bibliografía.....	101

Índice de figuras

Figura 1. Localización del municipio de Yotoco.....	18
Figura 2. Localización del relleno sanitario Colomba El Guabal.....	19
Figura 3. Diagrama de las etapas de tratamiento para el lixiviado	20
Figura 4. Esquema de diseño de la laguna anaerobia	22
Figura 5. Vista en planta del diseño del tanque fisicoquímico	24
Figura 6. Corte longitudinal del diseño del tanque fisicoquímico	24
Figura 7. Vista en planta del diseño del tanque anaerobio (UASB y FAFA)	26
Figura 8. Corte longitudinal del diseño del reactor UASB.....	28
Figura 9. Corte longitudinal del diseño del FAFA	29
Figura 10. Biopelículas de polipropileno empleadas como medio de soporte	30
Figura 11. Vista en planta del diseño del tanque de lodos activados	33
Figura 12. Corte longitudinal del diseño del tanque de lodos activados	33
Figura 13. Componentes de la Planta de Tratamiento de Lixiviados.....	43
Figura 14. Proyección de generación de lixiviados en el RS Colomba El Guabal	46

Índice de tablas

Tabla 1. Composición típica de los lixiviados	15
Tabla 2. Características y criterios de diseño de la laguna anaerobia.....	22
Tabla 3. Características y criterios de diseño de la planta fisicoquímica	25
Tabla 4. Características y criterios de diseño del reactor UASB	28
Tabla 5. Características y criterios de diseño del reactor FAFA	30
Tabla 6. Características y criterios de diseño del clarificador	32
Tabla 7. Características y criterios de diseño del tanque de aireación	35
Tabla 8. Características y criterios de diseño del tanque sedimentador.....	36
Tabla 9. Características y criterios de diseño del tanque de contacto con cloro.....	37
Tabla 10. Características y criterios de diseño del filtro de arena	38
Tabla 11. Características y criterios de diseño de los filtros de carbón activado	39
Tabla 12. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado crudo – Parte 1.....	50
Tabla 13. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado crudo – Parte 2.....	52
Tabla 14. Caracterización del agua superficial de la laguna de homogeneización	55
Tabla 15. Caracterización del efluente de la planta fisicoquímica	57
Tabla 16. Caracterización del efluente del tanque anaerobio.....	58
Tabla 17. Caracterización de los tanques aireadores (lodos activados).....	60
Tabla 18. Caracterización del efluente del tanque sedimentador (lodos activados)	60
Tabla 19. Caracterización del efluente de la unidad compacta de clarificación	62
Tabla 20. Caracterización del efluente del tanque de contacto con cloro.....	63
Tabla 21. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado tratado – Parte 1... 65	
Tabla 22. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado tratado – Parte 2... 67	
Tabla 23. Eficiencias en la remoción de contaminantes.....	70
Tabla 24. Caracterización de efluentes de las unidades	72
Tabla 25. Eficiencia individual de las unidades	72
Tabla 26. Eficiencia de remoción acumulada de las unidades	73
Tabla 27. Límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos superficiales de agua para actividades de tratamiento y disposición de residuos.....	74
Tabla 28. Evaluación del cumplimiento de los límites del vertimiento	76
Tabla 29. Factores de diseño de lagunas anaeróbicas	90

Tabla 30. Resultados de ensayos de jarras con dosificación actual de la planta fisicoquímica	91
Tabla 31. Ensayos de jarras con dosificación de Trafloc22 y cal viva para la planta fisicoquímica	92
Tabla 32. Características de diseño de reactores UASB.....	93
Tabla 33. Parámetros de diseño y operación de lodos activados.....	94
Tabla 34. Parámetros de diseño de sedimentadores secundarios	95
Tabla 35. Resultados de ensayos de jarras a dosificación actual.....	96
Tabla 36. Ensayos de jarras con dosificación de Trafloc22 y cal viva para la unidad compacta	97

Introducción

De acuerdo con los datos del Banco Mundial¹, la población mundial pasó de ser 3035 millones de personas en el año 1960, a 7347 millones de personas en el año 2015, lo cual representa un aumento del 242% en tan solo 55 años. En Colombia, específicamente, durante el mismo periodo casi se triplicó la población, se pasó de 16,48 millones a 48,23 millones de habitantes.

Según Agustiono K. (2011), el acelerado desarrollo económico mundial en las últimas décadas, no solo ha dejado como resultados ganancias económicas, sino también una rápida urbanización y un incontrolado crecimiento poblacional que puede generar graves degradaciones ambientales a largo plazo.

La producción de residuos sólidos es uno de los principales efectos del crecimiento poblacional, y con ellos uno de los principales subproductos de la descomposición de la materia orgánica, los lixiviados. Se puede definir el lixiviado como el líquido que se infiltra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión.

Estos lixiviados, se forman por la presencia de líquidos los cuales pueden provenir de fuentes externas (aguas lluvias, escorrentía superficial o aguas subterráneas), o de fuentes internas (líquido producido por la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos sólidos (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1998).

Los lixiviados en general tienen cargas contaminantes muy altas, en comparación con otras aguas residuales. La composición de los lixiviados varía de acuerdo a diversos factores, sin embargo, se destaca la antigüedad del relleno sanitario y el tipo de residuos sólidos que se disponen en él (Henry & Heinke, 1999). A continuación, en la Tabla 1, se presenta la composición típica de los lixiviados en función de la antigüedad de los residuos sólidos.

¹ Obtenidos del Portal de Datos del Banco Mundial: [<http://datos.bancomundial.org/indicador/>] – Consultado el 02 de enero de 2017

Tabla 1. Composición típica de los lixiviados

COMPONENTE	UNIDADES	RESIDUOS SÓLIDOS (< 2 AÑOS)		RESIDUOS SÓLIDOS (> 10 AÑOS)
		INTERVALO	VALOR TÍPICO	VALOR TÍPICO
DQO	mg/L	3.000-60.000	18.000	100-500
DBO ₅	mg/L	2.000-30.000	10.000	100-200
COT	mg/L	1.500-20.000	6.000	80-160
SST	mg/L	200-2.000	500	100-400
Nitrógeno total	mg/L	20-1.500	400	100-200
Fósforo total	mg/L	5-100	30	5-10
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/L	1.000-10.000	3.000	200-1.000
Sales solubles (Cl, SO ₄)	mg/L	200-4.000	800	100-500
Hierro	mg/L	50-1.200	60	20-200
Plomo	mg/L	1-10	2	0.01-0.5
Zinc	mg/L	25-250	50	0.1-1.0
pH	unidades	5-8	6	6.6-7.5

Fuente: (Henry & Heinke, 1999)

Para la Agencia de Protección de los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency - USEPA., 2000) la infiltración del agua de precipitación aumenta la movilidad de los contaminantes. A medida que el agua pasa a través de las capas de residuos, puede "lixiviar" los contaminantes presentes en los residuos sólidos dispuestos, moviéndolos más profundamente en el suelo. Esta movilidad puede presentar un riesgo potencial para la salud pública y el medio ambiente debido a la posible contaminación de las aguas subterráneas y otros medios.

Por esta razón, los lixiviados producidos en los rellenos sanitarios deben ser drenados desde los vasos de disposición de residuos y posteriormente tratados para su vertimiento, almacenamiento o reúso.

En materia normativa, para Colombia, mediante la Resolución 631 del 17 de marzo de 2015, se establecieron los parámetros y los límites máximos permisibles de los vertimientos a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, para todos los tipos de actividades, incluyendo, por supuesto, las actividades de tratamiento y disposición de residuos.

Con la entrada en vigencia de esta normatividad, todas las plantas de tratamiento de lixiviados, deberán acogerse a los límites fijados para efectuar los vertimientos o de lo contrario estarán sometidas a las sanciones que imponga la autoridad ambiental competente.

El presente trabajo se centra en la evaluación de la planta de tratamiento de lixiviados existente en el relleno sanitario Colomba El Guabal, del municipio de Yotoco, departamento del Valle del Cauca, la cual trata los lixiviados generados por las 2260 ton/día de residuos sólidos dispuestos, aproximadamente, provenientes de 10 municipios del departamento Valle del Cauca y 4 municipios del departamento del Cauca, siendo la ciudad de Santiago de Cali la mayor aportante.

El trabajo es abordado a partir de unas visitas preliminares efectuadas, así como de la revisión y análisis de las caracterizaciones fisicoquímicas históricas existentes a los lixiviados antes, durante y después del tratamiento que se realiza, en comparación con las memorias del diseñador y los planos de las unidades. En este sentido el documento se esboza de la siguiente forma: en el Capítulo I se presenta la descripción de la Planta de Tratamiento de Lixiviados, en el Capítulo II se realiza la caracterización de los afluentes y efluentes de los procesos, en el Capítulo III se hace el análisis de la norma de vertimiento (meta de tratamiento), en el Capítulo IV se presentan los parámetros con los cuales opera el sistema, en el Capítulo V se presentan los resultados del respectivo diagnóstico y finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

Objetivos

1. Objetivo general

Realizar un diagnóstico de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Colomba El Guabal del municipio de Yotoco, Valle del Cauca.

2. Objetivos específicos

- Identificar las características de los componentes del sistema de tratamiento de lixiviados.
- Elaborar un diagrama de flujo con las características de operación de cada componente del proceso de tratamiento: cargas de entrada y de salida de contaminantes de interés sanitario de cada etapa del proceso de tratamiento.
- Efectuar monitoreos fisicoquímicos y/o microbiológicos requeridos para la evaluación de las cargas afluente y efluente de cada etapa del proceso.
- Evaluar los parámetros de operación de cada etapa del proceso de tratamiento.
- Realizar el diagnóstico de la operación de la planta de tratamiento de lixiviados.
- Formular recomendaciones para la optimización del sistema de tratamiento de lixiviados.

Capítulo I Descripción de la Planta de Tratamiento de Lixiviados

1. Localización

El relleno sanitario Colomba El Guabal, se encuentra localizado en el municipio de Yotoco, Valle del Cauca, a los 3°46'13,50" de latitud norte y 76°25'8,70" de longitud oeste, en el sector central del departamento, a una distancia aproximada de 50km de la capital departamental, Santiago de Cali.

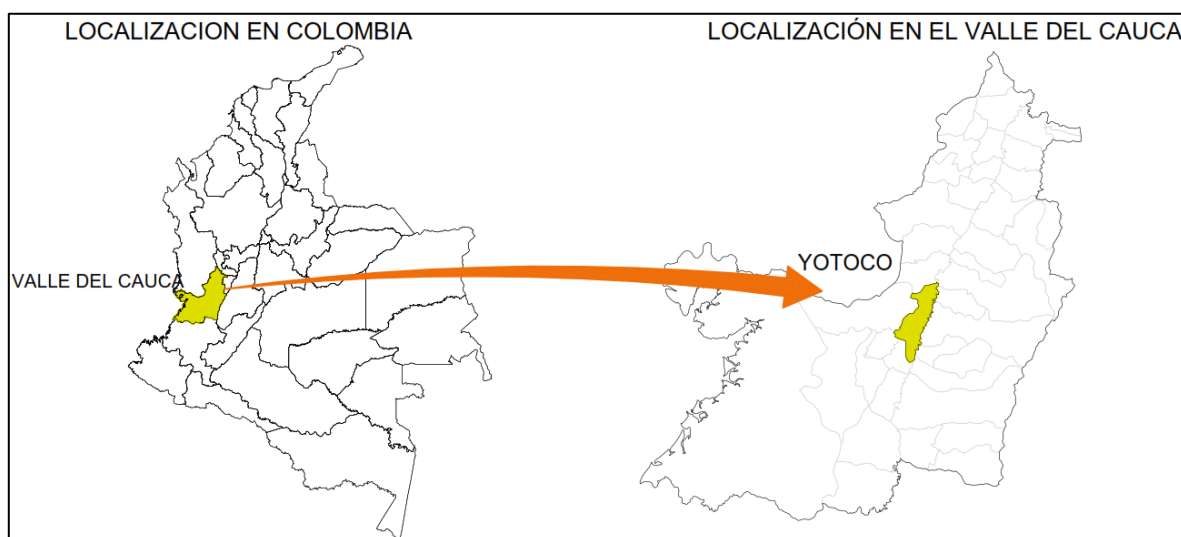


Figura 1. Localización del municipio de Yotoco

Fuente: El Autor

El relleno sanitario es operado por la empresa Interaseo del Valle S.A.S ESP, y cuenta con licencia ambiental otorgada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) mediante Resolución 0740-0377 del 09 de agosto de 2007, por un periodo de 31,2 años y una capacidad de almacenamiento de 19.500.000 toneladas de residuos, atendiendo una población aproximada de 3 millones de habitantes.



Figura 2. Localización del relleno sanitario Colomba El Guabal

Fuente: Google Earth

El relleno sanitario Colomba El Guabal recibe en la actualidad un promedio de 2260 ton/día de residuos sólidos provenientes de 10 municipios del Valle del Cauca (Santiago de Cali, Candelaria, Dagua, Florida, Jamundí, La Cumbre, Palmira, Restrepo, Yotoco y Yumbo) y 4 municipios del departamento del Cauca (Padilla, Caloto, Santander de Quilichao y Villa Rica), siendo la ciudad de Santiago de Cali la mayor aportante con un promedio de 1800 ton/día. Consecuentemente, los lixiviados generados por la disposición de estos residuos, son tratados en la planta de tratamiento de lixiviados (PTL), existente dentro del relleno sanitario, la cual también es operada por Interaseo del Valle S.A.S. ESP.

El relleno sanitario ha sido desarrollado por zonas, las cuales son Zona A, Zona B y Zona C, estas zonas están distribuidas espacialmente de sureste a noroeste y se han ocupado

de esta forma para facilitar la operación. De este modo, se inició operaciones en la Zona A, luego se operó la zona B y por último la zona C. Sin embargo, se han hecho adecuaciones para ampliar la capacidad de disposición de residuos sólidos en las zonas ya clausuradas.

2. Componentes de la PTL

La planta de tratamiento de lixiviados (PTL) del relleno sanitario Colomba El Guabal fue diseñada por la firma consultora HC Ingenieros SAS. Su concepción era efectuar una combinación de procesos biológicos y fisicoquímicos ya que esto *“permite mantener flexibilidad respecto a la carga aplicada y al caudal tratado, así como una capacidad de tratamiento constante a lo largo del tiempo, a medida que el lixiviado, por su antigüedad, va modificando su concentración”* (HC Ingenieros SAS, 2013). De acuerdo con las memorias de diseño, la PTL estaba compuesta conceptualmente por los siguientes elementos:

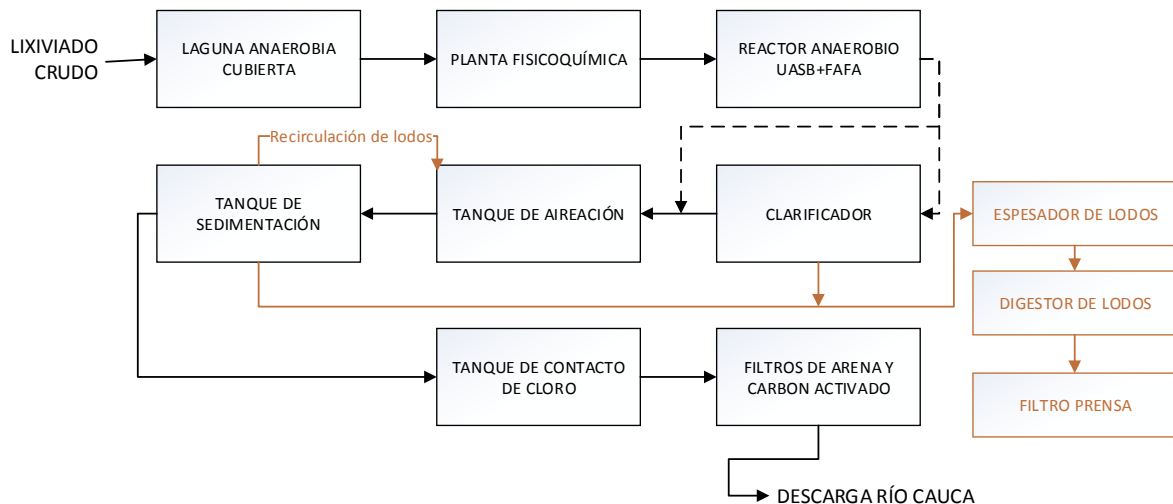


Figura 3. Diagrama de las etapas de tratamiento para el lixiviado
 Fuente: El Autor con base en Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013

2.1. Parámetros de diseño

2.1.1. Laguna anaerobia cubierta

De acuerdo con la memoria técnica del diseño, se estableció para el tratamiento anaerobio lo siguiente: “teniendo en cuenta las características de las aguas residuales que se tratan y los requerimientos ambientales de minimizar los malos olores, como tratamiento primario se proyectó una laguna anaerobia-digestor de lodos, con la cual se removerá del orden del 54% al 67% de la materia orgánica medida como DQO o DBO, disminuyendo la carga orgánica que debe tratar la planta” (HC Ingenieros SAS, 2013).



Foto 1. Laguna anaerobia

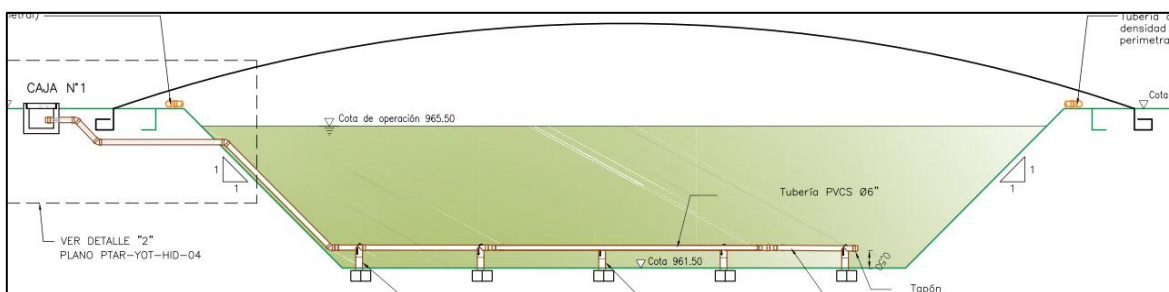


Figura 4. Esquema de diseño de la laguna anaerobia
 Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013

En la Tabla 2 se presentan los criterios tenidos en cuenta por el diseñador para la laguna anaerobia cubierta:

Tabla 2. Características y criterios de diseño de la laguna anaerobia

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
Número de lagunas	1
Caudal de diseño	8 L/s o 691 m ³ /d
Temperatura de operación	35 °C
Altura total	4,5 m
Altura de lámina de agua	4,0 m
Tiempo de retención	5,4 días
Longitud	50 m
Longitud del fondo	41 m
Ancho total	25
Ancho del fondo	16
Carga de entrada (Kg DBO/día)	21260
Carga de entrada (Kg SS/día)	1286
Eficiencia esperada de remoción DBO	58%
Eficiencia esperada de remoción DQO	58%
Eficiencia esperada de remoción SS	70%

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

2.1.2. Tratamiento fisicoquímico

De acuerdo con las memorias técnicas, este es el objetivo del tratamiento fisicoquímico diseñado: “se utiliza para remover sólidos suspendidos, precipitar metales pesados, DQO asociada con los sólidos suspendidos, además del color. También precipitará los compuestos de fósforo, por lo cual, se hace indispensable adicionar fósforo inorgánico como nutriente en las etapas de tratamiento biológico posteriores” (HC Ingenieros SAS, 2013).

El tratamiento se realiza en una unidad compacta de floculación-clarificación-filtración. Consta de un tanque rectangular en concreto con las siguientes dimensiones: 8.9m de largo; 3.90 m de ancho y 3.3 m de altura. Esta unidad no tiene mezcla rápida, solamente incluye un compartimiento de floculación hidráulica de flujo helicoidal con tres zonas de floculación definidas, un sedimentador de alta tasa con módulos plásticos tipo panel inclinados 60° con la horizontal y filtración a través de un lecho mixto de arena-antracita. Como agente coagulante emplea cloruro férrico (FeCl_3) en una dosificación promedio de 2000mg/L



Foto 2. Planta fisicoquímica

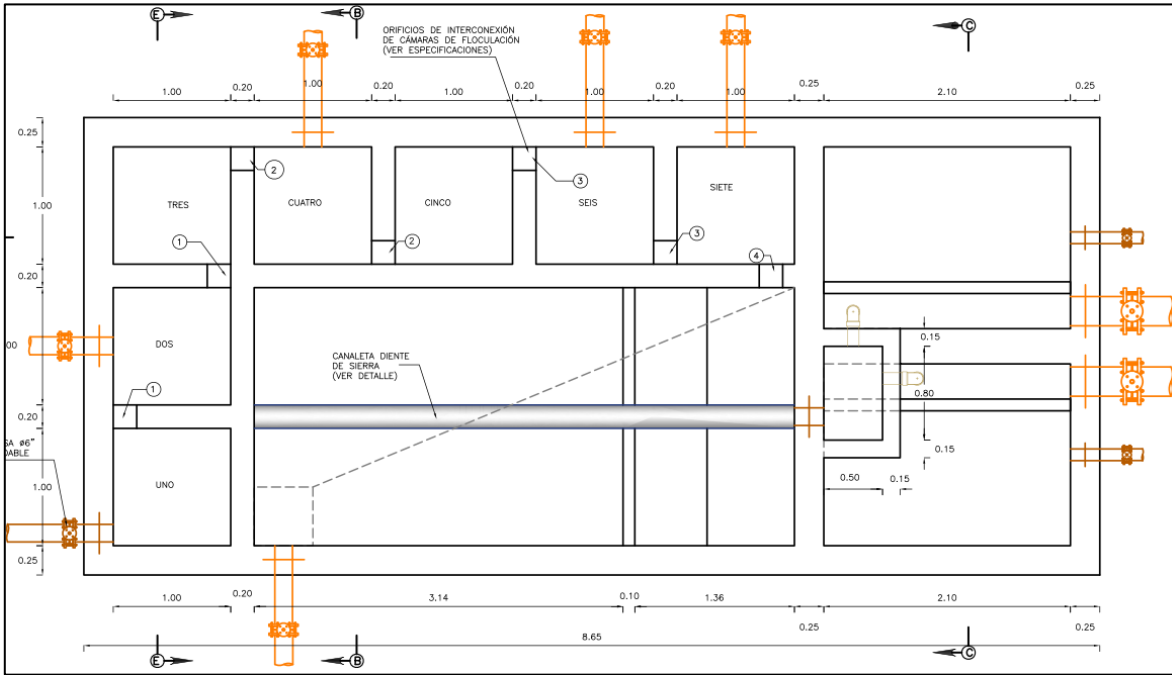


Figura 5. Vista en planta del diseño del tanque fisicoquímico
 Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013

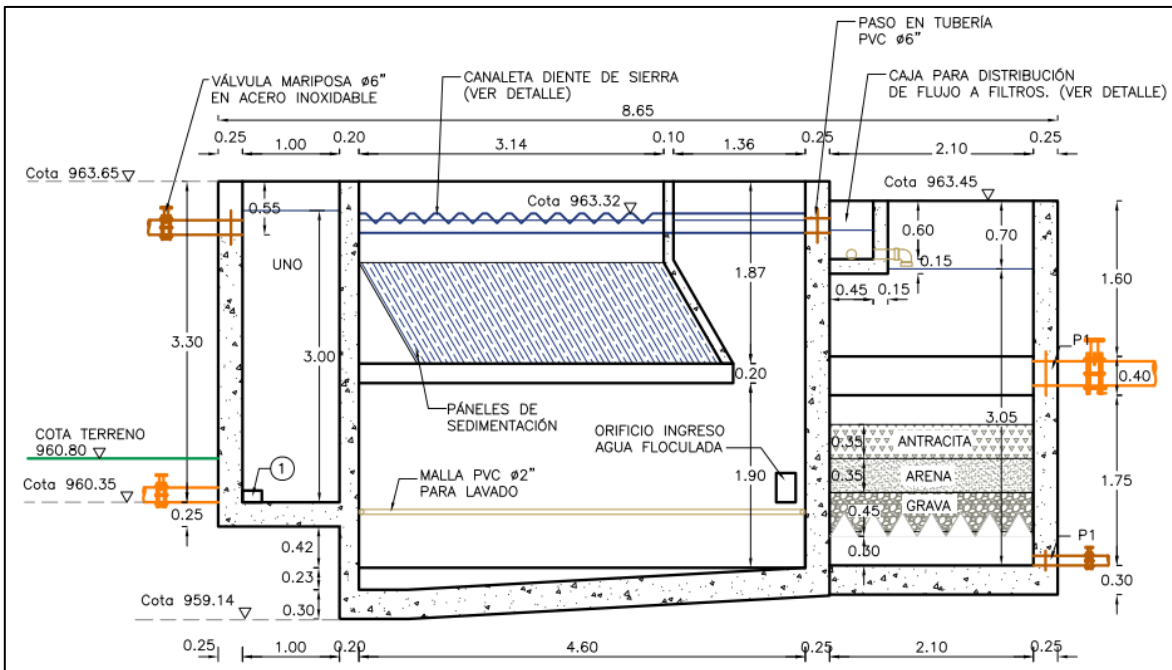


Figura 6. Corte longitudinal del diseño del tanque fisicoquímico
 Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013

Tabla 3. Características y criterios de diseño de la planta fisicoquímica

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
FLOCULADOR	
Número de floculadores	1
Caudal de diseño	8 L/s o 691 m ³ /d
Cámaras por floculador	7
Tiempo de retención	45 min
Profundidad de las cámaras	3 m
Ancho de las cámaras	1 m
Gradiente de velocidad	77,57 s ⁻¹
Pérdida de carga	5 cm
SEDIMENTADOR	
Número de sedimentadores	1
Caudal de diseño	8 L/s o 691 m ³ /d
Carga hidráulica superficial	80 m ³ /m ² -día
Dimensión de las placas	1,2 m x 2,2 m
Espesor de las placas	1 cm
Área de sedimentación	8,64 m ²
Velocidad de sedimentación	0,121 cm/s
Velocidad crítica de sedimentación	0,015cm/s
FILTRACIÓN	
Número de filtros	2
Caudal por filtro	4 L/s o 346 m ³ /d
Temperatura del agua	33 °C
Viscosidad cinemática	8,01 x10 ⁻⁷ m ² /s
Profundidad de los filtros	3,05 m
Dimensiones de los filtros	1,55 m x 2,10 m
Tasa de filtración	106 m ³ /m ² -día
Lecho filtrante	Arena, Antracita y Grava
Espesor arena	0,35 m
Espesor antracita	0,35 m
Espesor grava	0,40 m
Pérdida de carga	0,21 m
Carga de entrada de DBO	8929 Kg/día
Carga de entrada SS	386 Kg/día
Eficiencia de remoción de SS	70%
Eficiencia de remoción de DBO	30%

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

2.1.3. Tratamiento biológico anaerobio

El tratamiento biológico anaerobio es un proceso en serie-paralelo; consta de un tanque dividido en dos procesos anaerobios consecutivos, el primero asociado a crecimiento suspendido (reactor anaerobio de flujo acescente “RAFA” o UASB por sus siglas en inglés) y el segundo asociado a crecimiento adherido (filtro anaerobio de flujo ascendente “FAFA”). Adicionalmente el tanque presenta una división en la mitad a fin de trabajar con dos reactores en paralelo.

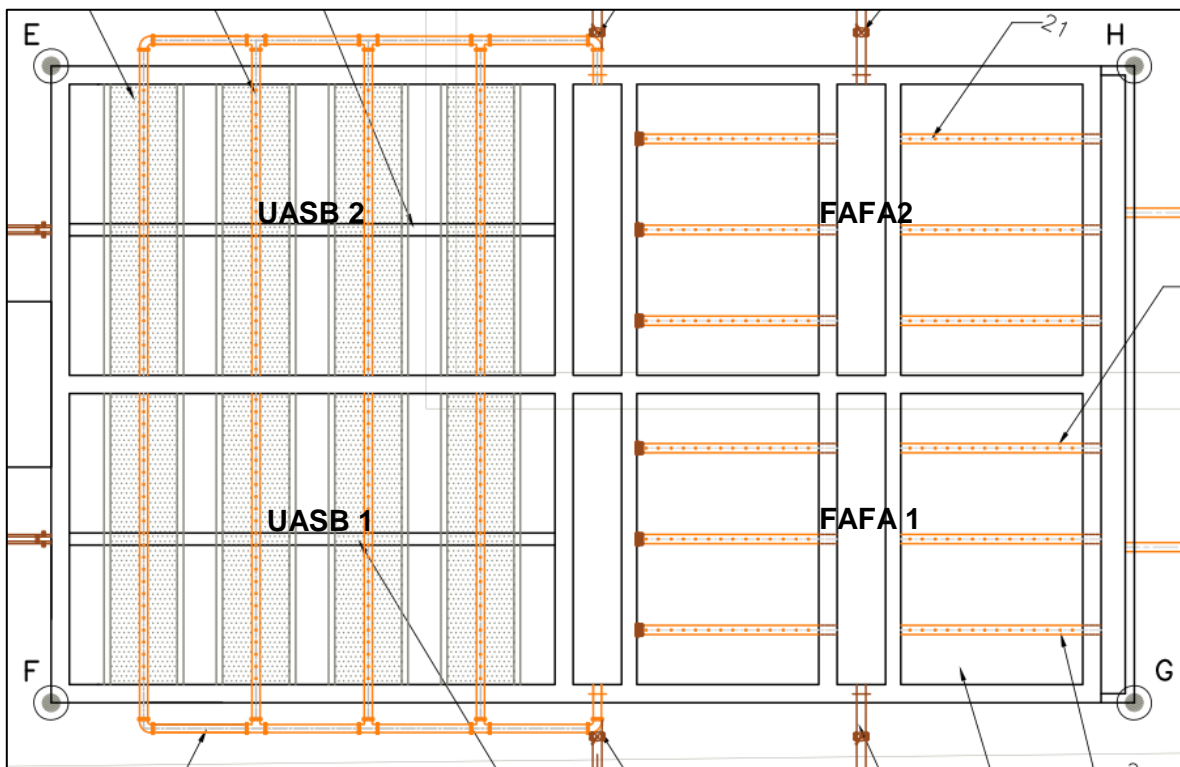


Figura 7. Vista en planta del diseño del tanque anaerobio (UASB y FAFA)

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013



Foto 3. Reactor anaerobio en serie

2.1.3.1. Reactor UASB

El reactor UASB, por sus siglas en inglés (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), tiene como objetivo “remover materia orgánica soluble y disminuir la carga orgánica que debe llegar al tratamiento biológico aerobio, con lo cual se minimiza el consumo de potencia por transferencia de oxígeno” (HC Ingenieros SAS, 2013). Este tratamiento se compone de 2 reactores en paralelo, cada uno de los cuales trata la mitad del caudal diario, es decir 346 m³/día en cada reactor.

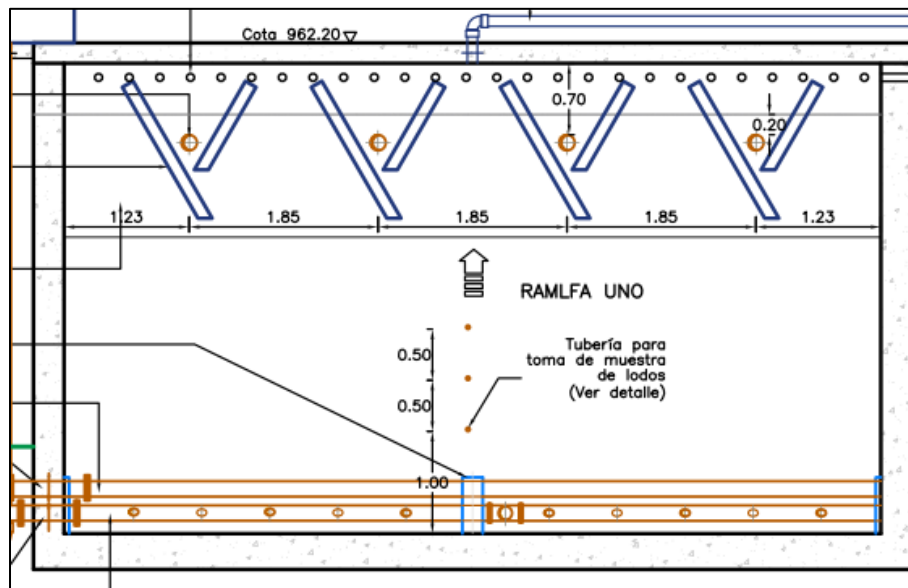


Figura 8. Corte longitudinal del diseño del reactor UASB
 Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013

De acuerdo con las memorias técnicas del diseñador los parámetros tenidos en cuenta para el reactor anaerobio de manto de lodos (UASB) son:

Tabla 4. Características y criterios de diseño del reactor UASB

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
Número de reactores en paralelo	2
Caudal de diseño por reactor	4 L/s o 346 m ³ /d
Temperatura de operación	30 °C
Carga hidráulica superficial máxima	9 m ³ /m ² -día
Velocidad ascensional crítica	0,625 cm/min
Tiempo de retención hidráulica	6,0 horas
Tiempo de retención hidráulica total	11 horas
Altura total del reactor	4,6 m
Altura lámina de agua	4,1 m
Longitud del reactor	8,0 m
Ancho del reactor	4,8 m
Carga de entrada DBO	3125 Kg/día
Carga de entrada de SS	58 Kg/día
Número de sedimentadores por reactor	8

Tabla 4. Características y criterios de diseño del reactor UASB (continuación)

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
Eficiencia esperada de remoción DBO	50%
Eficiencia esperada de remoción SS	70%
Eficiencia esperada de remoción DQO	50%

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

2.1.3.2. Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

El objetivo de los filtros anaerobios de flujo ascendente es “remover la DBO y DQO soluble que escapa del RAFA, además de remover cantidades adicionales de SS” (HC Ingenieros SAS, 2013), estos filtros dispuestos en pantallas tienen como medio de soporte para el crecimiento adherido biopelículas de polipropileno. El filtro está dividido en dos tanques para trabajo en paralelo, de la misma forma que en el reactor UASB.

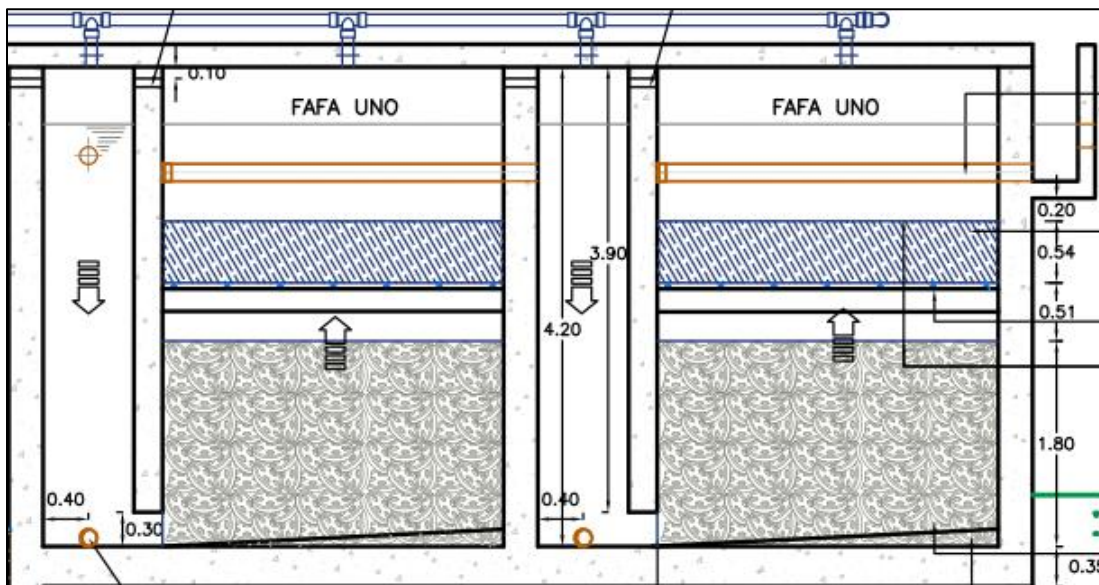


Figura 9. Corte longitudinal del diseño del FAFA

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013



Figura 10. Biopelículas de polipropileno empleadas como medio de soporte
Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

De acuerdo con las memorias técnicas del diseñador los parámetros tenidos en cuenta para el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) son:

Tabla 5. Características y criterios de diseño del reactor FAFA

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
Número de reactores en paralelo	2
Número de reactores en serie por línea	2
Caudal de diseño por reactor	4 L/s o 346 m ³ /d
Temperatura de operación	30 °C
Carga hidráulica superficial	24 m ³ /m ² -día
Velocidad ascensional	1,67 cm/min
Caudal por metro lineal de vertedero	0,33 L/s-m
Número de vertederos de orificios de 1"	42
Caudal por orificio de vertedero	0,09 L/s o 7,85 m ³ /d
Tiempo de retención hidráulica	5,4 horas
Carga de entrada DBO	1563 Kg/día
Carga de entrada de SS	17 Kg/día
Número de sedimentadores por reactor	8
Eficiencia esperada de remoción DBO	50%
Eficiencia esperada de remoción SS	70%
Eficiencia esperada de remoción DQO	50%
Altura total del reactor	3,9 m
Altura del medio de soporte	1,8 m

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

2.1.4. Unidad compacta de clarificación

Según el diseñador, esta unidad tiene como objetivo “remover compuestos que escapan al tratamiento biológico anaerobio de los lixiviados. Entre estos podemos citar el nitrógeno, metales pesados, DBO y DQO soluble, además del color, sólidos en suspensión y los microorganismos que son arrastrados por en el efluente de los FAFA” (HC Ingenieros SAS, 2013).

Esta unidad consiste en un tanque circular troncocónico en fibra de vidrio de 3.0 m de diámetro y 3.30 m de altura. Incluye una zona de floculación de manto de lodos y una zona de sedimentación de alta tasa con módulos plásticos tipo panel inclinados 60° con respecto a la horizontal.



Foto 4. Unidad compacta de clarificación

De acuerdo con las memorias técnicas del diseñador los parámetros tenidos en cuenta, para la unidad compacta de clarificación, son:

Tabla 6. Características y criterios de diseño del clarificador

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
Caudal de diseño	8 L/s o 691 m ³ /d
Temperatura de operación	30 °C
Forma	Circular-troncocónica
Diámetro	3 m
Volumen total	18 m ³
Tiempo de retención hidráulica	36 min
Carga hidráulica superficial	98 m ³ /m ² -día
Caudal por metro lineal de vertedero	1,17 L/s-m
Altura total	3,3 m
Eficiencia esperada de remoción DBO	10%
Eficiencia esperada de remoción SS	70%
Eficiencia esperada de remoción DQO	10%
Eficiencia esperada de remoción NH ₃	5%

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

2.1.5. Tratamiento biológico aerobio

El reactor aerobio, se concibió en el diseño para lograr la remoción de nitrógeno amoniacal y de materia orgánica biodegradable, por la acción de bacterias aerobias, por lo cual se requiere la adición de oxígeno al proceso, el cual es suministrado mediante aireación mecánica por medio de un aireador y difusores.

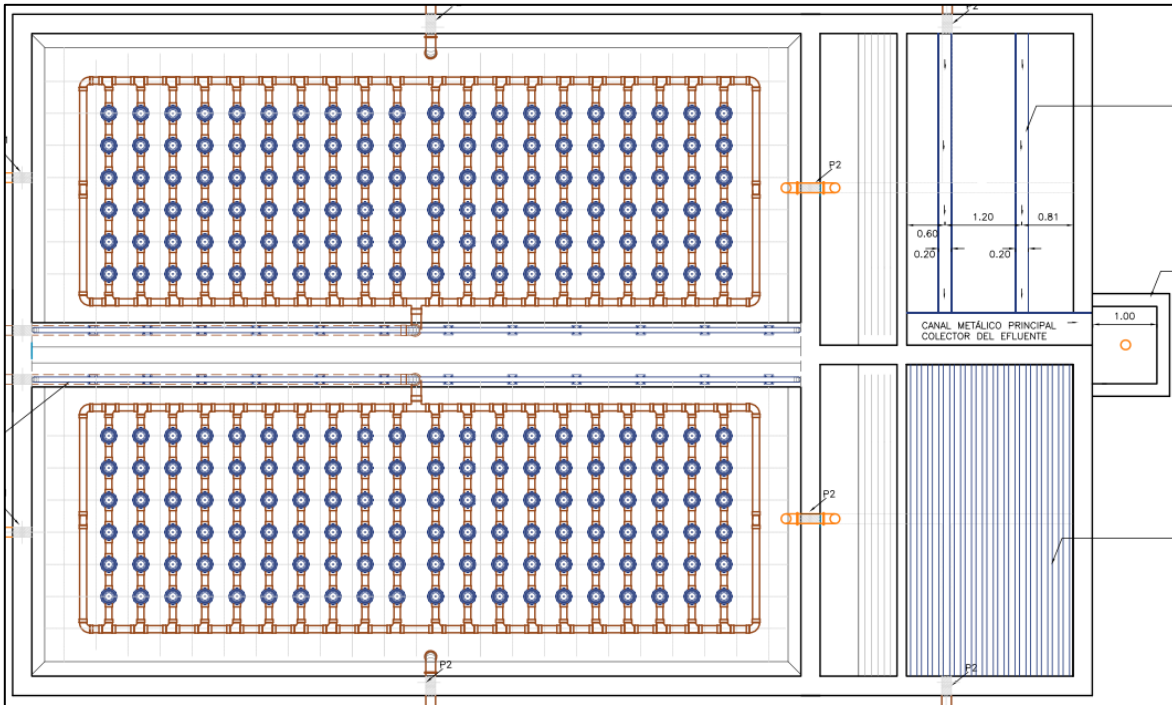


Figura 11. Vista en planta del diseño del tanque de lodos activados
Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013

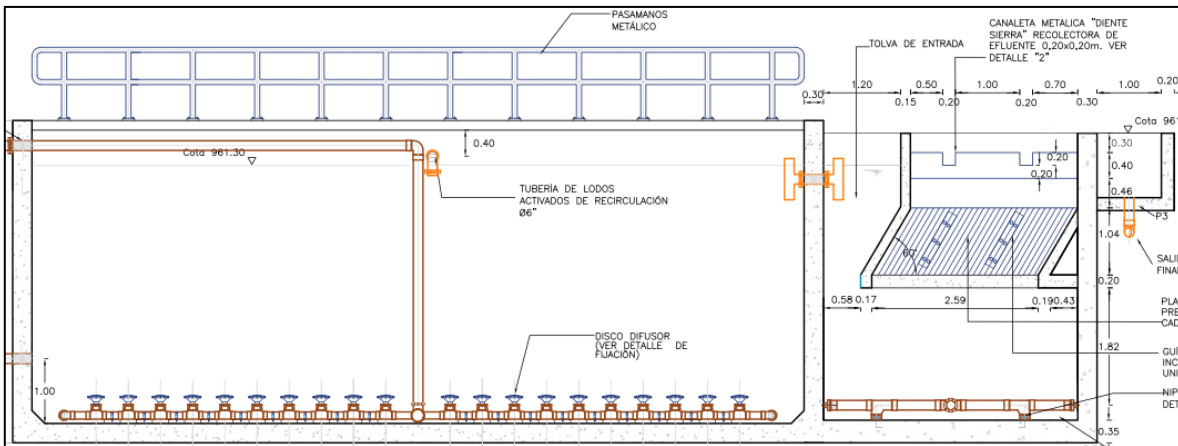


Figura 12. Corte longitudinal del diseño del tanque de lodos activados
Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013



Foto 5. Tanque de aireación



Foto 6. Tanque de sedimentación

Según el diseñador, el reactor aerobio se diseñó para manejar condiciones de mezcla completa y con un volumen suficiente para proveer un tiempo de retención hidráulico adecuado para el crecimiento de organismos nitrificantes, los cuales reciben el oxígeno aportado por el equipo de aireación. Posteriormente, el licor se pasa a un tanque de sedimentación o clarificador secundario para separar los sólidos del licor mezclado y producir un efluente clarificado, y mediante un sistema de bombeo se recirculan los lodos desde el clarificador secundario hasta el tanque de aireación. En síntesis, este reactor aerobio se comporta como un proceso de lodos activados. Los parámetros de diseño tenidos en cuenta para esta unidad, según las memorias técnicas del diseño, son:

Tabla 7. Características y criterios de diseño del tanque de aireación

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
DBO ₅ del afluente	1950 mg/L
DBO ₅ del efluente	200 mg/L
Eficiencia	90%
Número de unidades	2
Caudal de diseño por unidad	4 L/s o 346 m ³ /d
Coefficiente de crecimiento	0,5 mg/mg
Coefficiente endógeno	0,05 días ⁻¹
Tiempo de retención de lodos	2 días
Concentración de SSVLM	3500 mg/L
Relación SSVLM/SSLM	0,75
Volumen del tanque de aireación	208,5 m ³
Tiempo de retención hidráulica	14,5 horas
Relación alimento/microorganismos F/M	1,3
Caudal de recirculación	6 L/s
Caudal de purga	0,7 L/s
Concentración de lodos de recirculación	8000 mg/L
Lodo de purga	292 Kg SST/día
Oxígeno requerido	5490 KgO ₂ /día
Aire requerido	190 m ³ /min
Potencia total	134 HP
Consumo de energía	103 KW/h
Número de domos difusores	240

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

Tabla 8. Características y criterios de diseño del tanque sedimentador

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
Número de unidades	2
Caudal de diseño por unidad	4 L/s o 346 m ³ /d
Volumen de la unidad	46,08 m ³
Área de sedimentación de alta tasa por unidad	11,52 m ²
Tasa de escurrimiento superficial	30 m ³ / m ² d
Separación entre placas inclinadas a 60°	7,5 cm

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

2.1.6. Tanque de contacto con cloro

Para el diseñador esta unidad fue contemplada como un tratamiento de oxidación química. El tanque de contacto con cloro es en realidad un floculador de flujo horizontal dividido por tabiques, en los cuales el lixiviado luego de haber reaccionado por la adición de cloruro férrico y peróxido de hidrógeno a la salida del tanque sedimentador del proceso de lodos activados, forma flocs, que van siendo retenidos en las pantallas a medida que el flujo avanza.



Foto 7. Tanque de contacto con cloro

Las características de esta unidad, de acuerdo con las memorias técnicas de diseño son:

Tabla 9. Características y criterios de diseño del tanque de contacto con cloro

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
Caudal de diseño por unidad	8 L/s o 691 m ³ /d
Temperatura de operación	30 °C
Forma	Rectangular
Longitud	8,0 m
Ancho	2,0 m
Altura de la lámina de agua	2,3 m
Tipo de flujo	Pistón
Tiempo de retención hidráulica	65 min
Eficiencia esperada de remoción DBO	20%
Eficiencia esperada de remoción SS	70%
Eficiencia esperada de remoción DQO	20%
Eficiencia esperada de remoción NH ₃	30%

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

2.1.7. Filtración



Foto 8. Batería de filtración

Estos procesos complementarios permiten remover sólidos suspendidos que no hayan sido removidos en los procesos anteriores, son muy efectivos para remover las partículas que están asociadas al color del agua residual. Sin embargo, requieren procesos de retrolavado periódicamente debido al taponamiento de los poros.

2.1.7.1. Filtro de arena

El efluente del proceso de oxidación química se filtra a través de una unidad de filtración a presión de lecho de arena. El objetivo base de la filtración es separar las partículas que no han quedado retenidas en el proceso anteriores. Las características de esta unidad, de acuerdo con las memorias técnicas de diseño son:

Tabla 10. Características y criterios de diseño del filtro de arena

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
Caudal de diseño	8 L/s o 691 m ³ /d
Temperatura de operación	30 °C
Forma	Circular
Diámetro	2,1 m
Altura del lecho filtrante (arena)	60 cm
Caudal de bombeo	12 L/s
Tasa de filtración	290 m ³ /m ² -día
Eficiencia esperada de remoción DBO	10%
Eficiencia esperada de remoción SS	70%
Eficiencia esperada de remoción DQO	10%
Eficiencia esperada de remoción NH ₃	1%

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

2.1.7.2. Filtros de carbón activado

Como pulimento final en el tratamiento de los lixiviados se emplea un sistema de filtración mixto de arena y carbón activado compuesto por dos unidades en serie de filtración a presión, aprovechando la alta capacidad de adsorción del lecho filtrante.

Tabla 11. Características y criterios de diseño de los filtros de carbón activado

PARÁMETRO O CRITERIO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO O CALCULADO
Caudal de diseño	8 L/s o 691 m ³ /d
Temperatura de operación	30 °C
Número de unidades en serie	2
Forma	Circular
Diámetro	2,1 m
Ancho	2,0 m
Altura del lecho filtrante (arena/carbón activado)	20 cm / 50 cm
Caudal de bombeo	12 L/s
Tasa de filtración por etapa	193 m ³ /m ² -día
Eficiencia esperada de remoción DBO	5%
Eficiencia esperada de remoción SS	70%
Eficiencia esperada de remoción DQO	5%
Eficiencia esperada de remoción NH ₃	1%

Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros, 2013

2.1.8. Tratamiento y disposición de lodos

2.1.8.1. Espesamiento

Según lo reporta el diseñador se espera obtener lodos con concentración de sólidos de un 0,9 a 1%, y con el espesamiento se espera concentrarlos hasta un contenido de 3% de sólidos. Para el espesamiento de los lodos se emplea una operación física, mediante la sedimentación por gravedad en un tanque de forma circular con fondo troncocónico invertido.

Estas son las características generales del espesador de acuerdo con el diseñador:

- Diámetro interior: 4 m
- Altura parte recta: 2 m
- Altura parte cónica: 2 m
- Número de unidades: 3



Foto 9. Espesadores de lodos

2.1.8.2. Estabilización



Foto 10. Digestores de lodos

Para la estabilización de los lodos se diseñó un digestor anaerobio de alta carga. Según el diseñador consiste en un tanque circular, con volumen suficiente para mantener un tiempo de retención adecuado que permita un grado de estabilización de los lodos del orden del 50%. Estas son las características generales del digestor de acuerdo con el diseñador:

- Diámetro interior: 5,50 m
- Altura: 6 m
- Volumen digestor: 170 m
- Número de unidades: 2

2.1.8.3. Acondicionamiento



Foto 11. Tanque de acondicionamiento de lodos

El acondicionamiento de los lodos digeridos se realiza fundamentalmente para mejorar las características de filtrabilidad del lodo digerido anaeróbicamente antes de su deshidratación, utilizando productos químicos, generalmente polímeros orgánicos. El acondicionamiento químico da como resultado la coagulación de los sólidos y la liberación de agua absorbida. El diseñador propuso la instalación de un taque en fibra de vidrio con bomba dosificadora para la aplicación del polímero.

2.1.8.4. *Deshidratación*

El diseñador propuso la deshidratación mecánica de los lodos acondicionados, mediante la utilización de un filtro prensa, en el cual la deshidratación se realiza forzando la extracción del agua presente en el lodo por la aplicación de una presión elevada.



Foto 12. Filtro prensa

Estas son las características del filtro prensa, de acuerdo con el diseñador:

- Filtro prensa NEZSCH
- Tipo de placas de 630mm
- Presión de máxima de trabajo del filtro prensa 15 bar
- Presión de inflado 12 bar
- Caudal de producto 4 m³/d
- Sistema de cierre hidráulico
- Bomba de alimentación NEMO NETZSCH de 1,8 m³/h y tanque de presión
- Paquete de placas en material poliuretano rígido y juego de lonas

2.2. Operación

De acuerdo con las apreciaciones hechas en las visitas realizadas, en la Figura 13 se esquematiza la forma en la que opera la PTL del relleno sanitario Colomba El Guabal.

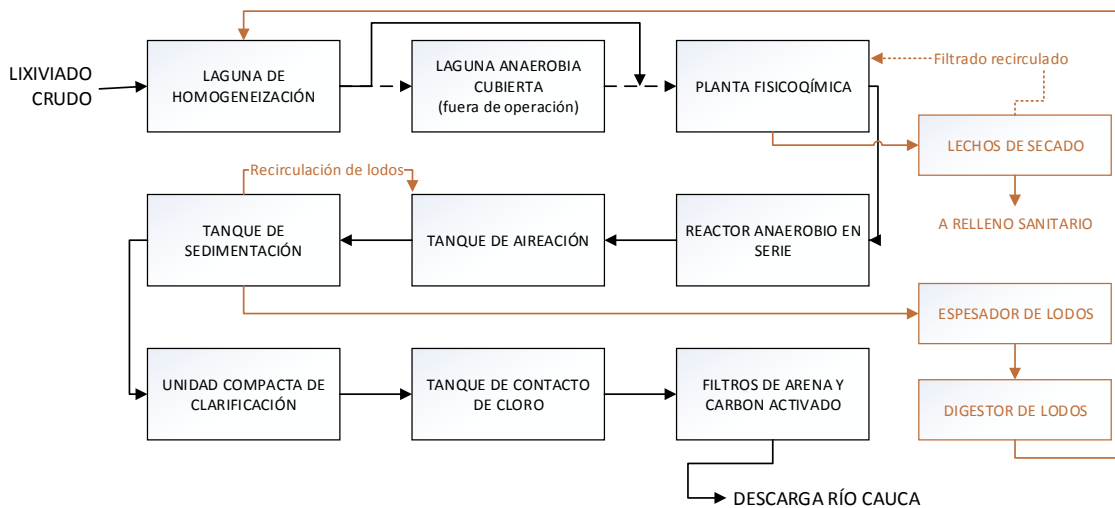


Figura 13. Componentes de la Planta de Tratamiento de Lixiviados

Tal como se observa en la Figura 13, en comparación con el esquema del tratamiento propuesto por el diseñador (Figura 3), el sistema de operación actual incluye la laguna de

homogeneización como componente inicial (Foto 13), desde la cual los lixiviados pueden ser enviados a la laguna anaerobia o hacia la planta fisicoquímica.

En la actualidad el sistema opera sin la laguna anaerobia, ya que el operador manifiesta que esta unidad no ha funcionado adecuadamente pues se satura de lodo fácilmente y no permite tiempos de retención suficientes para disminuir las cargas de contaminantes, sin embargo, esta unidad aún no ha sido descartada como componente del sistema de tratamiento, pues el operador espera obtener las mejores condiciones para la re-inclusión de esta unidad dentro del tratamiento.

Otra diferencia encontrada es que el clarificador (o unidad compacta de clarificación), fue reubicado después del tratamiento biológico aerobio. Asimismo, el tratamiento de lodos fue modificado ya que el filtro prensa fue deshabilitado, así como el tanque de acondicionamiento de lodos, por lo cual los lodos obtenidos durante el proceso de tratamiento son sometidos a espesamiento y digestión y llevados nuevamente hacia la laguna de homogeneización, y los lodos obtenidos en el tanque de tratamiento fisicoquímico, son llevados directamente hacia lechos de secado (Foto 14), desde los cuales los lodos secos son posteriormente llevados hacia la celda de operación en el relleno sanitario y el filtrado es recirculado al tanque de tratamiento fisicoquímico.



Foto 13. Laguna de homogeneización



Foto 14. Lechos de secado

3. Generación de lixiviados

La proyección de generación de lixiviados es un factor fundamental para la operación de un relleno sanitario, pues constituye la estimación de los caudales esperados durante el periodo de funcionamiento del relleno. Asimismo, a partir de dicha estimación, la cual debe efectuarse antes de poner en operación el relleno sanitario, se establece el caudal de diseño del sistema de tratamiento de los lixiviados.

De acuerdo con las proyecciones de generación de lixiviados presentadas por el diseñador en el año 2013 de la planta de tratamiento de lixiviados, se tiene un horizonte de generación de lixiviados para 30 años, tal como se muestra a continuación:

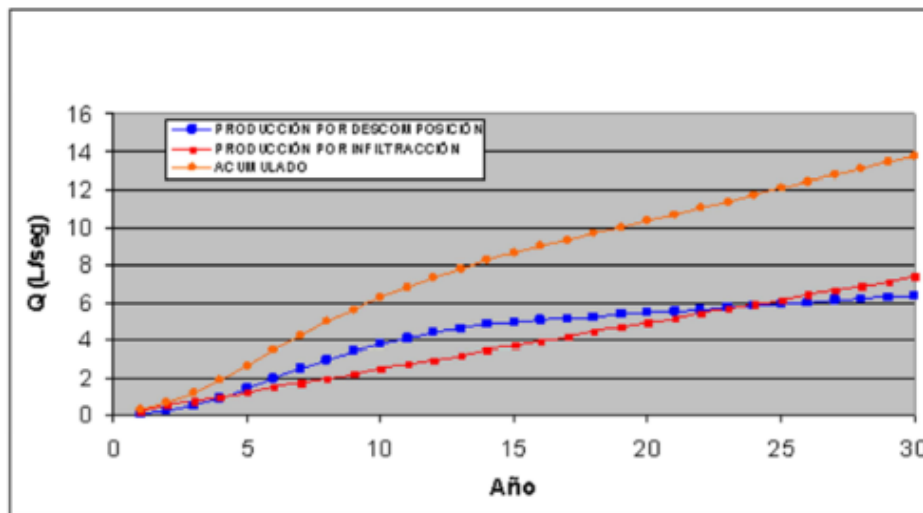


Figura 14. Proyección de generación de lixiviados en el RS Colomba El Guabal
Fuente: Memorias técnicas PTL, HC Ingenieros SAS, 2013

Las memorias del diseñador establecen que: “De la curva de proyección del caudal total de lixiviados se observa que a periodo de diseño del relleno se presentará un caudal máximo de aproximadamente 14 L/s, y en la mitad de la vida útil estará cercano a los 8 L/s, es decir a los 15 años. Por lo anterior, se consideró práctico asumir como caudal de diseño para los primeros 15 años el valor de 8 L/s” (HC Ingenieros SAS, 2013). Esto quiere

decir que desde el comienzo la PTL no fue concebida para tratar la totalidad del caudal de lixiviados durante toda la vida útil del relleno sanitario, sino únicamente para los primeros 15 años.

La entrada en operación del relleno sanitario fue en el año 2008, y de acuerdo con las estimaciones del diseñador, para el año 2017 el caudal de generación debería oscilar entre 5 a 6 L/s. No obstante, según mediciones del operador (Interaseo del Valle SA, ESP), la generación actual de lixiviados es en promedio de 8 L/s, lo cual podría deberse a dos razones: la primera es que las proyecciones iniciales de generación de lixiviados puedan estar subestimadas, o la segunda es que el manejo de las aguas lluvias dentro de las celdas de operación de residuos sólidos no ha sido adecuado, por lo cual se han superado los valores de caudal de lixiviado esperado. Independientemente de las razones que dan origen a esta diferencia, es importante resaltar que las cargas de diseño de los componentes de cualquier sistema de tratamiento dependen directamente del caudal de diseño considerado.

De acuerdo con lo anterior, se puede sintetizar que la PTL fue diseñada para tratar un caudal de 8L/s, valor que esperaba obtenerse en el año 2023, pero que en la actualidad de la operación ya ha sido alcanzado. Lo anterior indica que el sistema de tratamiento existente debería estar balanceado y que por ende sería suficiente para tratar el lixiviado. Sin embargo, el operador ha manifestado que la planta de tratamiento no cuenta con la capacidad manifestada por el diseñador, ya que a caudales superiores de 5L/s no es capaz de remover los contaminantes presentes en el lixiviado por debajo de los valores establecidos en la norma de vertimiento.

Esta situación ha obligado a que la PTL sea operada a caudales máximos de 5 L/s, y promedio de 3,5 L/s, lo cual implica un superávit en la relación caudal generado vs caudal tratado. Estos excesos de caudal son regulados por la capacidad de almacenamiento de la laguna de homogeneización, no obstante, esto representa que con la operación del relleno sanitario la diferencia entre el caudal generado y el caudal tratado será cada vez mayor y, por ende, el pasivo ambiental también.

Capítulo II Caracterización de afluentes y efluentes

Para la caracterización de afluentes y efluentes, se toma la información histórica reportada por el operador de la planta de tratamiento (Interaseo del Valle S.A.S. ESP), del lixiviado antes y después del tratamiento. Los parámetros monitoreados inicialmente, a la entrada de operación de la PTL, eran mínimos, pero a medida que la normatividad se ha vuelto más exigente, se han incluido dentro de los análisis más parámetros para su control y monitoreo. A continuación, se listan los parámetros que en la actualidad se caracterizan:

- pH
- Temperatura
- DBO₅
- DQO
- SST
- NTK
- Nitrógeno amoniacal
- Mercurio
- Cadmio
- Fenoles
- Grasas y Aceites
- Cromo hexavalente
- Aluminio
- Plomo
- Cobre
- Hierro
- Bario
- Arsénico
- Fósforo total
- Plata
- Níquel
- Zinc
- Sulfatos
- Cianuro
- Cloruros
- Sólidos totales

Con el objetivo de determinar la remoción de los contaminantes a medida que se avanza por el sistema, se efectuaron caracterizaciones de los efluentes de los componentes de la planta de tratamiento. Estas caracterizaciones fueron limitadas y únicas, por lo cual, si bien no se cuenta con la misma cantidad de información como sí lo tienen las caracterizaciones de lixiviado crudo y tratado, sirven para examinar tentativamente las remociones que se están alcanzando y para evaluar posteriormente el comportamiento de las unidades de la PTL. Los puntos de muestreo fueron: la laguna de homogeneización, la salida de la planta fisicoquímica, la salida del tanque anaerobio, la salida del tanque sedimentador de lodos activados, la salida del clarificador secundario y la salida del tanque de contacto con cloro.

1. Lixiviado crudo

Dentro de la información suministrada por el operador, se cuenta con registros históricos de lixiviado crudo, desde julio de 2010 hasta junio de 2016. Estos monitoreos han sido efectuados por laboratorios acreditados por el IDEAM para el análisis de los parámetros fisicoquímicos, la frecuencia del monitoreo es generalmente mensual, aunque durante los primeros meses de operación se tomaron registros semanales y en los últimos años, según el operador, se han reducido los monitoreos al lixiviado crudo, por lo cual el último registro disponible es de junio de 2016. Los monitoreos de lixiviado crudo se han hecho históricamente en la caja de inspección del vaso que se encuentra en operación al momento del muestreo.

En la Tabla 12 se muestran los registros históricos consolidados disponibles del lixiviado crudo, junto con los valores máximos, mínimos y promedio.

Tabla 12. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado crudo – Parte 1

Fecha	pH	T(°C)	DBO mg/L	DQO mg/L	SST mg/L	NTK mg/L	N-NH3 mg/L	Hg mg/L	Cd mg/L	Fenoles mg/L	G y A mg/L	Cr+6 mg/L
30/7/10	6,4	NR	18900	20635	1265	NR	NR	NR	NR	NR	77	NR
6/8/10	6,2	NR	40650	77261	773	NR	NR	NR	NR	NR	55	NR
17/8/10	7,0	NR	34163	54598	900	1739	NR	0,001	<0,020	NR	30	<0,035
23/8/10	8,0	NR	5707	10214	580	1338	NR	0,001	<0,020	NR	19	<0,035
30/8/10	7,9	NR	6314	12119	300	1243	NR	0,001	<0,020	NR	19	<0,035
6/9/10	8,2	NR	6360	10867	450	1278	NR	0,003	0,034	NR	26	<0,035
13/9/10	7,9	NR	6125	10887	500	1365	NR	0,001	0,074	NR	68	<0,035
20/9/10	7,7	NR	9613	16040	833	1415	NR	0,005	0,060	NR	32	<0,035
27/9/10	8,0	NR	8237	16646	680	1438	NR	0,0004	0,045	NR	73	<0,035
5/10/10	7,7	NR	11867	18521	132	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
12/10/10	7,6	NR	16570	34922	720	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
25/10/10	7,8	NR	9080	16875	436	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
2/11/10	7,8	NR	12176	22032	456	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
9/11/10	7,7	NR	15133	30856	535	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
16/11/10	7,4	NR	19693	25712	650	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
23/2/11	7,8	38,6	9000	20402	1300	1948	1644	0,003	<0,008	4,25	41,6	NR
7/3/11	7,95	39,5	3888	15079,7	1200	1966	1587	0,006	<0,008	3,43	19,44	NR
7/4/11	8,1	38,0	3840	10098	477	2155	1981	0,002	<0,008	2,92	86,49	NR
3/5/11	9	37,1	12552	22281	NR	NR	1745	NR	NR	NR	NR	NR
12/5/11	9	39	14319	22154	NR	NR	2043	NR	NR	NR	NR	NR
23/6/11	7,5	37	12131	27598	NR	NR	1969	NR	NR	NR	NR	NR
16/7/11	8,3	36	9599	15780	NR	NR	1781	NR	NR	NR	NR	NR
20/8/11	8,46	37	6198	13876	NR	NR	2006	NR	NR	NR	NR	NR
12/9/11	7,9	38	2936	13060	1520	2946	2408	0,142	<0,006	NR	63	NR
25/10/11	8,34	33,5	10100	17666	280	2696	2044	0,010	<0,006	NR	145	NR

Tabla 12. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado crudo – Parte 1 (continuación)

Fecha	pH	T(°C)	DBO mg/L	DQO mg/L	SST mg/L	NTK mg/L	N-NH3 mg/L	Hg mg/L	Cd mg/L	Fenoles mg/L	G y A mg/L	Cr+6 mg/L
26/11/11	7,88	32,1	13091	26183	468	2780	2209	0,060	<0,006	NR	224	NR
10/12/11	7,56	35	20362	29799	630	1852	1604	0,001	<0,006	NR	160	NR
6/1/12	7,1	35,1	16900	42387	11400	2338	1960	0,022	0,063	8,24	37	NR
16/1/12	7,4	37,5	43542	69295	269	1749	1599	0,080	<0,01	NR	1821	NR
25/1/12	6,41	32,9	31700	55975	1975	1962,4	1503	NR	NR	NR	NR	NR
10/2/12	7,6	31,6	4707	9674	2412	2369,2	2072	0,012	NR	NR	26	NR
1/3/12	6,1	42,3	20345	55414	5725	2660	1596	0,014	0,1	NR	451	NR
11/4/12	6,1	40,3	30614	67830	5977	2132	1618	0,010	<0,01	NR	306	NR
9/5/12	6,2	38	32925	61051	7390	1452	1405	0,012	<0,01	75,65	227	NR
6/6/12	6,91	40,1	42086	46889	6200	2467	2040	0,015	<0,05	14,44	83	NR
9/7/12	7,2	37,3	33728	61721	4628	2405	2086	0,014	<0,05	14,14	58	NR
14/8/12	8,13	36,5	19801	33715	5940	3026	2471	0,010	0,12	12,96	38	NR
13/9/12	6,65	40	23369	57648	4220	2778	2319	0,008	0,08	30,74	58	NR
11/10/12	7,02	37,5	44154	64871	4566	3249	2493	0,009	0,08	26,17	77	NR
14/11/12	7,12	39,8	31877	58958	3356	2889	2290	0,012	NR	17,34	132	NR
5/12/12	6,41	38,2	35008	54758	2744	2763	2398	0,012	0,09	18,7	250	NR
22/3/13	6,70	34	38753	63245	4670	2140	1314	0,012	0,113	0,37	253	NR
17/4/13	6,80	35,1	20460	40097	4674	2889	2297	0,011	0,07	7,48	239	NR
24/9/15	6,25	40,6	22380	32936	1100	3605	2786	0,004	0,006	17,53	44	1
31/3/16	6,87	43,1	17775	21673	140	1946	1498	0,004	0,07	39,5	44	NR
22/6/16	7,10	39,7	17700	24696	718	1470	1127	0,005	0,035	15,46	33	<0,02
Mínimo	6,1	31,6	2936	9674	132	1242,7	1127	0,0004	<0,006	0,37	19	<0,02
Máximo	9	43,1	44154	77261	11400	3605	2786	0,142	0,12	75,65	1821	1
Promedio	7,4	37,4	18835	33369	2273	2195	1932	0,016	0,07	18,2	156	1,0

NR: No Reportado

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S. ESP

Tabla 13. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado crudo – Parte 2

Fecha	Al mg/L	Pb mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ba mg/L	As mg/L	P total mg/L	Ag mg/L	Ni mg/L	Zn mg/L	Sulfatos mg/L	Cianuro mg/L	Cloruros mg/L	ST mg/L
30/7/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
6/8/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
17/8/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
23/8/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
30/8/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
6/9/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
13/9/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	23225
20/9/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	27105
27/9/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	23365
5/10/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
12/10/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
25/10/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
2/11/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
9/11/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
16/11/10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
23/2/11	9,4	0,41	0,39	129,94	1,1	0,15	14,08	NR	NR	3,25	NR	0,02	2733	29946
7/3/11	3,36	0,16	0,14	27,41	0,67	0,3	27,12	NR	NR	1,68	NR	<0,01	3167,6	29716
7/4/11	3,23	0,05	0,066	13,95	0,62	0,29	35,99	NR	NR	0,86	NR	<0,01	3691,4	23596
3/5/11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	39,88	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
12/5/11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	38,2	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
23/6/11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	57,6	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
16/7/11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	49,26	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
20/8/11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	39,9	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
12/9/11	3,868	0,112	0,112	3,03	0,828	0,5	69,7	NR	NR	1,22	NR	0,6	3555	27450
25/10/11	1,9	0,08	0,08	10,4	0,7	2,3	75,23	NR	NR	0,8	NR	0,4	556,2	32290

Tabla 13. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado crudo – Parte 2 (continuación)

Fecha	Al mg/L	Pb mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ba mg/L	As mg/L	P total mg/L	Ag mg/L	Ni mg/L	Zn mg/L	Sulfatos mg/L	Cianuro mg/L	Cloruros mg/L	ST mg/L
26/11/11	2,95	0,14	0,065	70,95	1,1	39,91	48,4	NR	NR	2,7	NR	0,22	1984	43760
10/12/11	1,85	0,055	0,1	68,15	1,025	9,7	39,9	NR	NR	1,83	NR	0,56	2997	48230
6/1/12	0,25	0,56	0,21	173	<0,2	0,96	29,06	NR	1,42	2,7	NR	<0,02	2600	28320
16/1/12	1,45	0,075	0,082	423	2,02	4,7	43,2	NR	NR	0,6	NR	0,21	2744	53390
25/1/12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	24,01	NR	NR	NR	NR	NR	NR	5509
10/2/12	6	0,076	<0,01	72,5	NR	0,3	19,53	NR	NR	2,1	NR	1,5	2357	27744
1/3/12	3,68	0,067	0,3	474,5	NR	0,062	26,04	NR	NR	5,6	NR	<0,8	2772	57992
11/4/12	6,6	0,067	0,2	559,7	NR	0,54	163,86	NR	NR	1,4	NR	<0,8	1870	49698
9/5/12	3,09	<0,053	<0,01	28,5	NR	0,35	15,27	NR	NR	1,1	NR	<0,8	1971	44567
6/6/12	8,5	<0,1	0,2	319,2	NR	0,57	15,52	NR	NR	1,8	NR	<0,8	2882	47920
9/7/12	14	0,12	0,2	263,3	NR	0,8	16,31	NR	NR	2,5	NR	<0,8	3111	37302
14/8/12	6	0,5	0,2	121,5	NR	NR	34,71	NR	NR	2,2	NR	2	3931	38787
13/9/12	4	0,44	0,2	222,9	NR	0,98	21,62	NR	NR	1,49	NR	<0,80	4829	47731
11/10/12	2	0,53	0,2	324,6	NR	0,6	16,39	NR	NR	2,08	NR	<0,8	3481	54032
14/11/12	5,3	0,61	0,2	298,1	NR	0,59	19,64	NR	NR	1,45	NR	<0,02	3047	44665
5/12/12	4,5	0,6	0,26	258,5	NR	0,57	12,35	NR	NR	0,13	NR	<0,02	3196	47583
22/3/13	7,3	0,693	0,428	85,4	NR	0,20	16,88	NR	NR	14,6	NR	<0,02	3081	98099
17/4/13	4,5	0,616	0,27	248,14	NR	0,76	30,59	NR	NR	6,45	NR	7,34	3797	34960
24/9/15	2,49	0,04	0,17	353	<0,05	0,01	14,742	0,13	1,85	9,24	1426,1	4,37	3403,7	61300
31/3/16	2,89	0,6	0,23	169	<0,141	0,04	0,298	0,1	1,09	9,02	1801,1	0,62	4605,1	52750
22/6/16	<0,05	0,67	0,17	51	0,967	<0,005	6,45	<0,05	0,79	2,44	1406,3	0,02	4104,5	40233
Mínimo	<0,05	0,04	<0,01	3,03	<0,05	<0,005	0,298	<0,05	0,79	0,13	1406,3	<0,02	556,2	5509
Máximo	14	0,693	0,428	559,7	2,02	39,91	163,86	0,13	1,85	14,6	1801,1	7,34	4829	98099
Promedio	4,5	0,3	0,2	191	1,0	2,8	34,2	0,1	1,3	3,2	1544	1,5	3059	40733

NR: No Reportado

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S. ESP

2. Laguna de homogeneización



Foto 15. Monitoreo de la laguna de homogeneización

Los parámetros monitoreados para la laguna de homogeneización fueron carga orgánica, carga inorgánica, sólidos y metales pesados, estas muestras fueron tomadas el 05 de abril de 2016. En la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 14. Caracterización del agua superficial de la laguna de homogeneización

ENSAYO	RESULTADO
pH	8,00
Temperatura (°C)	14,8
DBO (mg/L)	3870
DQO (mg/L)	4672
Solidos suspendidos totales (mg/L)	1008
Magnesio (mg/L)	325,0
Potasio (mg/L)	2000
Nitratos (mg/L)	0,14
Ortofosfatos-fosfatos (mg/L)	15,68
Sulfatos (mg/L)	35,4
Arsénico (mg/L)	<0,010
Bario (mg/L)	0,38
Mercurio (mg/L)	0,002
Níquel (mg/L)	0,61
Plata (mg/L)	<0,05
Plomo (mg/L)	0,11
Selenio (mg/L)	<0,005
Zinc (mg/L)	0,75

Fuente: Laboratorio Analquim Ltda

En general se observa que, en comparación con los valores promedio del lixiviado crudo, en la laguna de homogeneización las concentraciones de los contaminantes son inferiores, debido a la sedimentación ocurrida dentro de la laguna. Es importante resaltar que la muestra de lixiviado para la caracterización de la laguna de homogeneización, fue tomada superficialmente y no representa la del afluente a la PTL, ya que el lixiviado no sale superficialmente desde la laguna hacia la planta fisicoquímica

3. Planta fisicoquímica

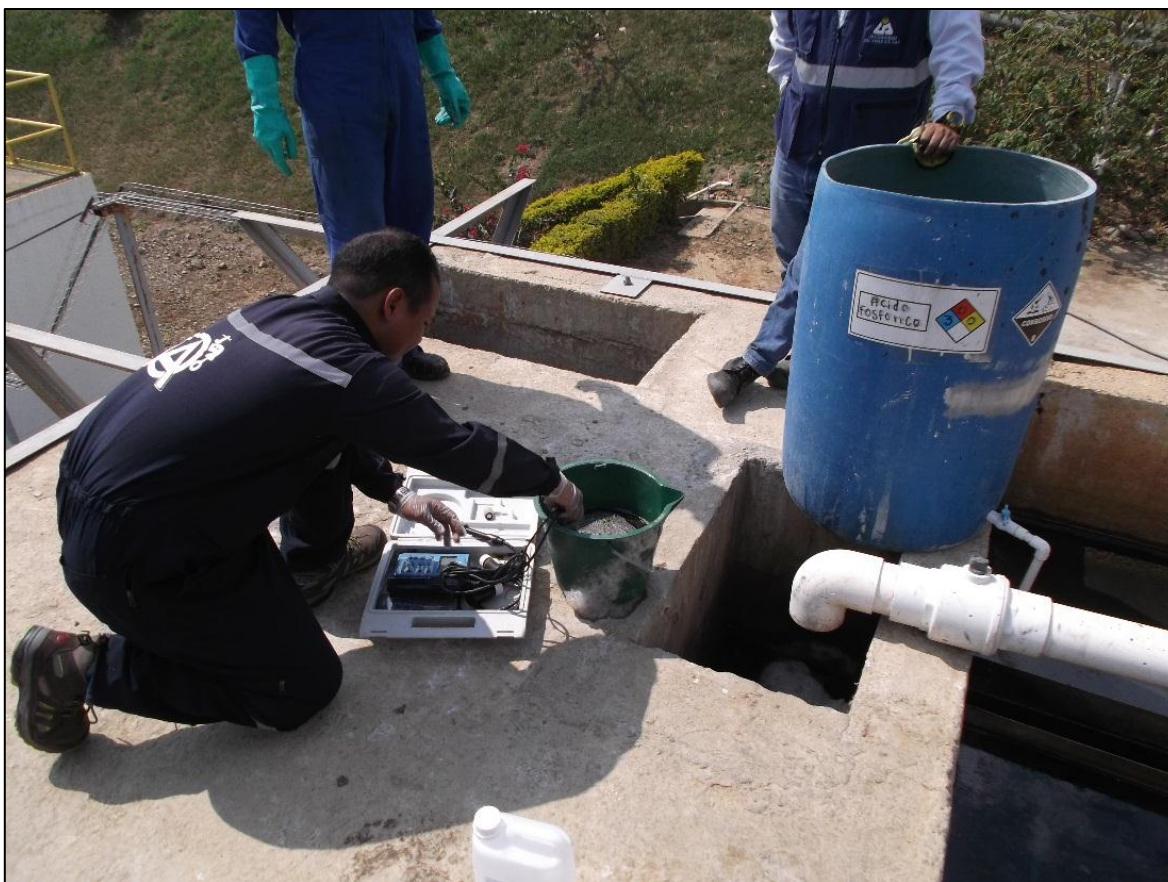


Foto 16. Monitoreo del efluente de la planta fisicoquímica

En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del efluente de la planta fisicoquímica. Estas muestras fueron tomadas el 05 de abril de 2016.

Tabla 15. Caracterización del efluente de la planta fisicoquímica

ENSAYO	RESULTADO
pH	7,31
Temperatura (°C)	26,0
DBO (mg/L)	4125
DQO (mg/L)	5097
Solidos suspendidos totales (mg/L)	653
Magnesio (mg/L)	338
Potasio (mg/L)	1670
Nitratos (mg/L)	0,15
Ortofosfatos-fosfatos (mg/L)	33,29
Sulfatos (mg/L)	39,9
Arsénico (mg/L)	<0,010
Bario (mg/L)	< 0,14
Mercurio (mg/L)	0,002
Níquel (mg/L)	0,57
Plata (mg/L)	<0,05
Plomo (mg/L)	0,09
Selenio (mg/L)	<0,005
Zinc (mg/L)	0,55

Fuente: Laboratorio Analquim Ltda

La caracterización del efluente de la planta fisicoquímica muestra que las cargas orgánicas e inorgánicas son superiores a las de la caracterización superficial de la laguna de homogeneización. Esta situación probablemente se presenta porque el tubo de salida del lixiviado desde la laguna de homogeneización no se encuentra en superficie, sino sumergido a una profundidad que no pudo establecerse en las visitas efectuadas; lo cual indica que es recomendable obtener el efluente de la laguna de homogeneización superficialmente.

4. Tanque anaerobio

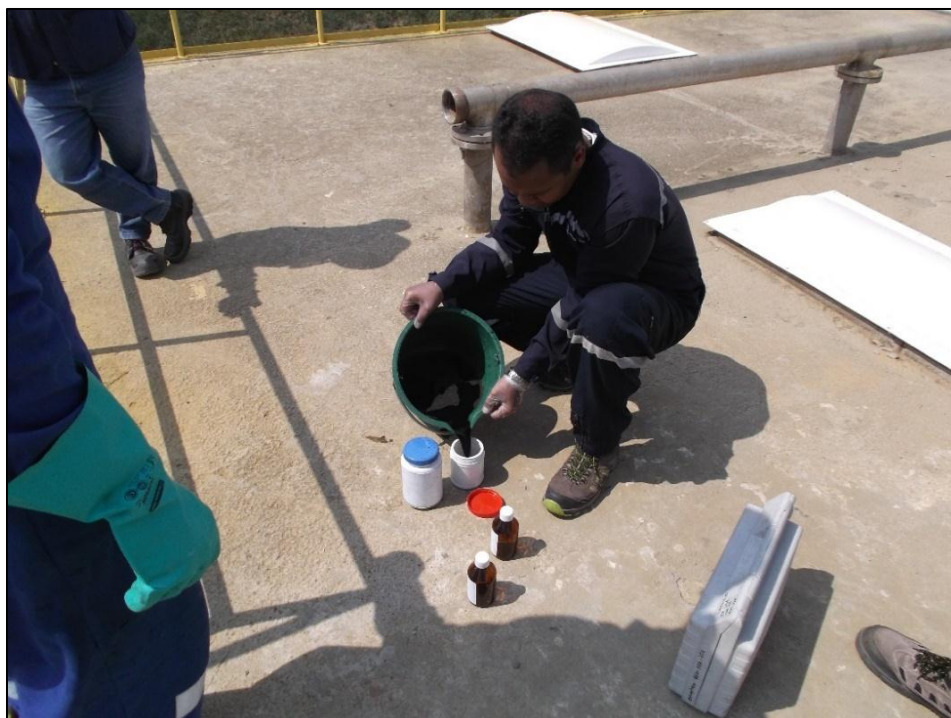


Foto 17. Monitoreo del efluente del tanque anaerobio

En la Tabla 16 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del efluente del tanque anaerobio. Estas muestras fueron tomadas el 05 de abril de 2016.

Tabla 16. Caracterización del efluente del tanque anaerobio

ENSAYO	RESULTADO
pH	7,73
Temperatura (°C)	27,7
DBO (mg/L)	2182
DQO (mg/L)	4143
Solidos suspendidos totales (mg/L)	1015
Nitratos (mg/L)	0,12
Ortofosfatos-fosfatos (mg/L)	16,7
Sulfatos (mg/L)	<5

Fuente: Laboratorio Analquim Ltda

La muestra del efluente del tanque anaerobio evidencia la reducción de carga orgánica principalmente y también de las concentraciones de carga inorgánica.

5. Tanques aireadores (lodos activados)



Foto 18. Monitoreo de los tanques aireadores (lodos activados)

Con el objeto de evaluar las condiciones del proceso de lodos activados, se caracterizaron algunos parámetros de los tanques aireadores. Esta caracterización no va enfocada a determinar la remoción de contaminantes, sino a evaluar que las condiciones del proceso de aireación son adecuadas para la remoción posterior de los contaminantes. En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de los tanques de aireación. Estas muestras fueron tomadas el 05 de abril de 2016.

Tabla 17. Caracterización de los tanques aireadores (lodos activados)

ENSAYO	TANQUE AIREADOR 1	TANQUE AIREADOR 2
pH	8,35	8,32
Temperatura (°C)	33,1	33,1
Solidos suspendidos totales (mg/L)	11170	12180
Solidos suspendidos volátiles (mg/L)	775	375
Nitratos (mg/L)	0,15	0,16
Ortofosfatos-fosfatos (mg/L)	1,87	1,96
Sulfatos (mg/L)	<5	<5

Fuente: Laboratorio Analquim Ltda

6. Tanque sedimentador (lodos activados)

En la Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del efluente del tanque sedimentador del proceso de lodos activados. Estas muestras fueron tomadas el 05 de abril de 2016.

Tabla 18. Caracterización del efluente del tanque sedimentador (lodos activados)

ENSAYO	RESULTADO
pH	8,35
Temperatura (°C)	34,1
DBO (mg/L)	62
DQO (mg/L)	2167
Solidos suspendidos totales (mg/L)	617
Nitratos (mg/L)	0,15
Ortofosfatos-fosfatos (mg/L)	1,47
Sulfatos (mg/L)	<5

Fuente: Laboratorio Analquim Ltda



Foto 19. Monitoreo del efluente del tanque sedimentador (lodos activados)

Se observa que el proceso de lodos activados permite reducir notablemente la carga orgánica, inorgánica y de sólidos en comparación con el afluente (el lixiviado proveniente del tanque anaerobio). Es importante mencionar que, a la salida de este tanque en la canaleta de recolección, el operador adiciona peróxido de hidrógeno y cloruro férrico al lixiviado con el objetivo de realizar una reacción fenton².

² La reacción Fenton consiste en la oxidación de la carga contaminante con una combinación de peróxido de hidrógeno y un compuesto de hierro, típicamente a presión atmosférica y temperaturas entre 20°C y 40°C. Las condiciones óptimas del reactivo Fenton se obtienen a valores ácidos de pH y con ellas se pueden alcanzar altas remociones de los contaminantes orgánicos. (Mendez, García, Castillo, & Sauri, 2010)

7. Unidad compacta de clarificación



Foto 20. Monitoreo del efluente de la unidad compacta de clarificación

En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del efluente de la unidad compacta de clarificación. Estas muestras fueron tomadas el 05 de abril de 2016.

Tabla 19. Caracterización del efluente de la unidad compacta de clarificación

ENSAYO	RESULTADO
pH	8,63
Temperatura (°C)	16,9
DBO (mg/L)	237
DQO (mg/L)	3439
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	523
Nitratos (mg/L)	0,16
Ortofosfatos-fosfatos (mg/L)	3,68
Sulfatos (mg/L)	34,7

Fuente: Laboratorio Analquim Ltda

El operador manifiesta que se emplea cloruro férrico (FeCl_3) como agente coagulante en una dosificación promedio de 550mg/L con peróxido de hidrógeno en una concentración promedio de 160mg/L, se observa que luego de la aplicación de estos químicos, las cargas orgánicas e inorgánicas, tienden a aumentar su concentración. Probablemente, esta situación se deba a que el tiempo de retención hidráulica en esta unidad (que es tan sólo de 36 minutos) sea muy corto, a que no se tengan las dosificaciones apropiadas y a que el pH no es el recomendado para la reacción con peróxido de hidrógeno (de 2 a 5 unidades de pH). Además el catalizador de hierro debe ser preferiblemente Fe^{++} y no Fe^{+++} . Por otra parte, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) debe ser consumido totalmente en la reacción, de lo contrario contribuye con un aumento de DQO en el efluente.

8. Tanque de contacto con cloro

En la Tabla 20 presentan los resultados obtenidos de la caracterización del efluente del tanque de contacto con cloro. Estas muestras fueron tomadas el 05 de abril de 2016.

Tabla 20. Caracterización del efluente del tanque de contacto con cloro

ENSAYO	RESULTADO
pH	8,66
Temperatura (°C)	16,5
DBO (mg/L)	279
DQO (mg/L)	2123
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	208
Nitratos (mg/L)	0,15
Ortofosfatos-fosfatos (mg/L)	3,72
Sulfatos (mg/L)	41,5

Fuente: Laboratorio Analquim Ltda

Se observa que, en el tanque de contacto con cloro, no hay remoción de carga orgánica, ni inorgánica, ni de sólidos.



Foto 21. Monitoreo del efluente del tanque de contacto con cloro

9. Lixiviado tratado

El monitoreo del lixiviado tratado se ha efectuado de forma continua mensualmente, desde abril de 2013 (mes en el que comenzó a efectuarse el vertimiento) hasta la actualidad. La información disponible suministrada por el operador, tiene registros hasta julio de 2017. Estos monitoreos son efectuados en la caja de inspección a la salida de la planta de tratamiento.

En la Tabla 21 se muestran los registros históricos consolidados disponibles del lixiviado tratado, junto con los valores máximos, mínimos y promedio.

Tabla 21. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado tratado – Parte 1

Fecha	Q L/s	pH	T (°C)	DBO mg/L	DQO mg/L	SST mg/L	NTK mg/L	N-NH3 mg/L	Hg mg/L	Cd mg/L	Fenoles mg/L	G y A mg/L	Cr+6 mg/L
17/4/13	2,10	8,8	28,5	23	738	62	296	249	0,005	<0,020	<0,05	12	NR
23/5/13	1,07	8,1	27,5	47	1224	181	80	19	<0,02	<0,02	<0,05	4	NR
27/6/13	3,40	8,8	28,5	154	3068	330	1045	93	<0,02	0,07	0,08	13	NR
25/7/13	3,41	8,25	29,5	75	2966	180	144	29	<0,02	<0,02	NR	8	NR
15/8/13	4,22	8,2	28,5	<3	2034	217	142	37	<0,02	0,02	<0,05	751	NR
23/9/13	7,50	8,3	32,0	17	4115	855	344,4	26	0,009	0,02	0,14	48	NR
21/10/13	5,15	8,5	30,0	28	3600	480	140	109,7	<0,002	0,038	0,07	50	NR
13/11/13	0,92	8,2	26,0	57	961	56	168	131,6	<0,002	0,016	<0,07	41	NR
11/12/13	4,10	8,2	27,0	252	3173	576	632,8	442,4	0,004	0,020	<0,07	90	NR
29/1/14	2,10	8,25	30,0	109	1960	235	197,4	152,6	0,003	0,034	<0,07	11	NR
20/2/14	1,66	8,5	29,0	179	2667	250	112	87,92	<0,002	0,022	<0,07	<6	NR
6/3/14	3,56	8,35	26,0	250	2163	243	1,09	0,84	<0,002	0,026	<0,07	23	NR
25/4/14	2,09	8,2	28,0	471	1628	240	140	109,2	<0,002	0,007	<0,07	29	NR
2/5/14	2,26	8,5	28,0	103	4031	447	37,24	28,56	<0,002	0,015	<0,07	21	NR
6/6/14	3,78	8,17	30,2	NR	1216	171	16,2	12,6	<0,010	0,021	<0,07	40	NR
23/7/14	1,36	8,25	26,8	190	840	67	9,24	7,28	<0,002	0,013	<0,07	43	NR
15/8/14	1,56	8,19	27,8	57	1307	152	73,92	57,12	0,016	0,023	<0,07	40	NR
16/9/14	4,37	8,01	26,8	118	2436	296	109,2	84,0	<0,002	<0,003	<0,07	174	NR
23/10/14	3,42	7,89	27,3	88	2222	286	56	43,1	0,005	0,014	<0,07	61	NR
12/11/14	7,03	7,2	23,5	59	996	208	59,9	46,7	0,008	0,006	<0,07	8	NR
26/12/14	3,40	8,55	27,4	62	827	49	25,8	1939	0,002	0,011	<0,07	14	NR
20/1/15	2,61	8,05	26,5	44	939	98	183,4	141,4	<0,002	0,008	<0,07	<6	NR
24/2/15	3,60	8,2	25,2	163	1835	101	22,1	16,8	0,007	0,009	<0,07	7	NR
18/3/15	4,48	8,37	23,6	88	1547	108	3,4	2,6	0,011	0,018	<0,07	25	NR

Tabla 21. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado tratado – Parte 1 (continuación)

Fecha	Q L/s	pH	T (°C)	DBO mg/L	DQO mg/L	SST mg/L	NTK mg/L	N-NH3 mg/L	Hg mg/L	Cd mg/L	Fenoles mg/L	G y A mg/L	Cr+6 mg/L
21/4/15	4,14	7,45	26,2	203	2081	111	4,5	3,6	0,004	0,009	<0,07	19	NR
20/5/15	4,27	8,25	27,5	153	2571	1385	38,9	30	0,005	0,022	<0,07	11	NR
23/6/15	3,48	8,42	28,0	155	2353	64	90,2	70	<0,002	0,013	<0,07	<6	NR
28/7/15	2,80	8,19	27,6	265	1328	236	173,6	133	0,01	0,016	<0,07	18	NR
18/8/15	4,06	8,25	26,2	39	1285	137	141,4	109,2	0,004	<0,003	<0,07	60	NR
8/9/15	4,40	8,14	26,2	91	1255	108	71,7	55,4	<0,002	0,007	<0,07	16	NR
6/10/15	3,32	8,62	27,0	18	713	101	9,2	7	0,003	0,004	<0,07	9	NR
10/11/15	2,00	8,56	25,7	35	790	59	18,2	14	0,005	<0,003	<0,07	9	NR
14/12/15	4,35	8,55	27,8	35	4337	156	20,7	16	0,003	0,014	<0,07	10	NR
19/1/16	3,84	8,5	27,0	8	915	69	16,2	12,3	<0,002	<0,003	<0,07	27	0,228
2/2/16	3,80	8,75	16,0	94	1111	108	233,8	179,2	0,002	<0,003	<0,07	11	NR
1/3/16	2,40	8,64	31,0	315	1439	168	10,4	7,8	0,004	0,013	<0,07	<6	0,187
5/4/16	2,80	8,5	29,9	25	986	116	25,8	19,9	0,01	0,014	<0,07	<6	NR
3/5/16	3,09	8,38	30,9	136	1460	117	71,1	54,9	0,003	0,019	<0,07	<6	NR
2/6/16	3,43	8,7	29,4	64	472	40	116,2	89,6	<0,002	<0,003	<0,07	15	NR
7/7/16	4,20	8,46	30,0	124	1825	92	35	26,9	0,006	<0,0048	<0,07	48	<0,02
2/8/16	4,62	8,14	26,5	45	868	64	40,3	30,8	0,004	<0,0048	<0,07	10	<0,02
23/8/16	4,65	8,3	28,6	99	1549	42	18,8	14,3	<0,002	<0,0048	<0,07	<6	<0,02
6/9/16	4,28	8,38	27,4	164	2430	88	39,8	30,5	<0,002	<0,0048	<0,07	13	<0,02
4/10/16	4,84	8,81	29,0	88	1703	125	155,4	119	0,005	<0,0048	<0,07	<6	<0,02
9/11/16	3,33	8,31	28,5	208	1224	115	130,2	99,1	<0,002	<0,0048	<0,07	17	<0,02
6/12/16	5,35	8,62	31,2	41	1820	294	NR	NR	0,004	<0,0048	<0,07	19	<0,02
11/1/17	3,94	8,71	26,9	90,9	1144	74	68,3	52,4	<0,002	<0,01	<0,07	16	<0,02
7/2/17	2,90	8,42	26,5	72,9	907	77	63,8	49	<0,002	<0,0048	<0,07	10	<0,02
7/3/17	3,41	8,48	26,5	23	1911	127	128,8	98,6	<0,002	<0,01	<0,07	9	<0,02

Tabla 21. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado tratado – Parte 1 (continuación)

Fecha	Q L/s	pH	T (°C)	DBO mg/L	DQO mg/L	SST mg/L	NTK mg/L	N-NH3 mg/L	Hg mg/L	Cd mg/L	Fenoles mg/L	G y A mg/L	Cr+6 mg/L
4/4/17	3,63	8,63	27,9	22	1863	267	49,8	38,4	<0,002	<0,01	<0,07	16	<0,02
9/5/17	1,88	8,7	26,4	160	1440	199	84	65	<0,002	<0,01	<0,07	15	<0,02
6/6/17	3,67	8,31	27,3	95	792	29	75,3	57,7	<0,002	<0,01	<0,07	<6	<0,02
18/7/17	3,19	8,35	27,0	77	879	38	25,5	19,6	<0,002	<0,01	<0,07	15	<0,02
Mínimo	0,92	7,20	16	8	472	29	1,09	0,84	<0,002	<0,0048	<0,07	4	<0,02
Máximo	7,50	8,81	32	471	4337	1385	1045	1939	0,02	0,07	0,14	751	0,23
Promedio	3,5	8,4	27,5	109	1735	198	115	103	0,01	0,01	0,07	37	0,04

NR: No Reportado

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S. ESP

Tabla 22. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado tratado – Parte 2

Fecha	Al mg/L	Pb mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ba mg/L	As mg/L	P total mg/L	Ag mg/L	Ni mg/L	Zn mg/L	Sulfatos mg/L	Cianuros mg/L	Cloruros mg/L	ST mg/L
17/4/13	<1	0,123	<0,1	3,44	NR	0,07	4,35	NR	NR	0,36	NR	0,44	1237	5273
23/5/13	<1	0,312	<0,1	8,13	NR	0,11	3,26	NR	NR	0,36	NR	0,98	1559	7501
27/6/13	<1	0,2	<0,1	18,94	NR	0,46	9,83	NR	0,47	0,53	482	0,88	3309	15051
25/7/13	<0,5	<0,05	<0,1	5,1	NR	NR	10,45	NR	0,55	0,22	8	NR	3964	18044
15/8/13	<0,5	NR	<0,1	7,5	NR	NR	NR	NR	0,4	0,37	8	0,18	2795	15138
23/9/13	0,51	0,27	0,06	12,5	<0,102	0,6	12,9	NR	0,6	0,94	<5,0	4,5	3153,5	12960
21/10/13	0,48	0,39	0,1	10,5	0,06	0,477	9,67	NR	0,52	0,62	49	<0,02	2953,2	17514
13/11/13	0,54	0,14	0,05	1,69	<0,01	0,094	5,13	NR	0,18	0,21	150,2	<0,02	815,9	4137
11/12/13	0,52	0,25	<0,05	7,1	0,06	0,358	76,72	NR	0,51	0,27	52,2	2,4	3704,1	12288
29/1/14	0,54	0,32	0,11	1,74	<0,01	0,427	17,19	NR	0,51	0,27	<5,0	0,39	2402,6	12000
20/2/14	0,52	0,19	0,05	2,11	0,017	0,465	14,61	NR	0,43	0,29	45,9	<0,02	3153,5	15330

Tabla 22. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado tratado – Parte 2 (continuación)

Fecha	Al mg/L	Pb mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ba mg/L	As mg/L	P total mg/L	Ag mg/L	Ni mg/L	Zn mg/L	Sulfatos mg/L	Cianuros mg/L	Cloruros mg/L	ST mg/L
6/3/14	<0,05	0,09	<0,05	1,74	0,014	0,322	17,12	NR	0,36	0,34	44,4	<0,02	3453,8	12150
25/4/14	0,49	0,15	0,08	3,14	<0,01	0,333	35,7	NR	0,33	0,56	29,7	<0,02	1902	12080
2/5/14	0,48	0,17	0,05	1,77	<0,01	0,447	37,7	NR	0,33	0,49	7,2	<0,02	2703	12135
6/6/14	0,49	0,16	0,06	4,89	NR	0,17	18,9	NR	0,28	0,23	<5,0	<0,02	1752	6150
23/7/14	<0,05	<0,02	0,06	1,03	NR	0,1	19,8	NR	0,24	42	<5,0	<0,02	961	4250
15/8/14	<0,05	0,07	0,06	2,07	NR	0,19	20,6	NR	0,3	0,43	<5,0	<0,02	2302,5	8050
16/9/14	<0,05	0,05	<0,05	2,61	NR	0,54	40,9	<0,05	0,31	0,25	<5,0	<0,02	2928	12115
23/10/14	<0,05	0,05	<0,05	2,31	NR	0,19	34,4	NR	0,28	0,2	<5,0	<0,02	3203,5	11020
12/11/14	<0,05	0,08	<0,05	2,02	NR	NR	29,66	NR	0,12	0,26	<5,0	<0,02	911,0	3895
26/12/14	<0,05	0,1	<0,05	1,04	<0,0855	0,015	21,09	NR	0,16	0,21	<0,05	<0,02	1451	6440
20/1/15	<0,05	0,09	<0,05	2,23	<0,0855	NR	7,5	NR	0,14	0,12	<0,05	<0,02	1251,4	5280
24/2/15	0,22	0,12	0,05	3,57	<0,0855	0,04	18,03	NR	0,29	0,23	<5,0	<0,02	3103,4	9556
18/3/15	<0,06	0,12	<0,05	1,7	<0,0855	0,014	7,63	NR	0,31	0,1	<5,0	<0,02	2277,5	20960
21/4/15	0,31	0,11	<0,05	1,98	<0,0855	0,051	11,76	NR	0,35	0,15	<5,0	<0,02	2753	12540
20/5/15	<0,05	0,1	0,05	2,25	<0,0855	0,053	9,79	NR	0,39	0,22	<5,0	<0,02	2552	12370
23/6/15	0,99	0,04	0,06	2,74	<0,0855	0,008	10,4	NR	0,34	0,28	13,2	<0,02	2953,2	12260
28/7/15	<0,05	0,14	0,08	3,18	<0,09	0,023	7,94	NR	0,39	0,31	<5,0	<0,02	2327,6	12950
18/8/15	<0,05	<0,02	<0,05	2,73	<0,09	0,021	6,14	NR	0,09	0,31	<5,0	<0,02	1101,2	5010
8/9/15	0,05	<0,02	<0,05	4,56	<0,09	0,014	6,07	NR	0,17	2,82	10,3	<0,02	1701,9	6490
6/10/15	<0,05	<0,02	<0,05	2,6	<0,09	0,067	7,26	NR	0,09	0,14	<5,0	<0,02	821	3785
10/11/15	<0,05	0,04	0,13	1,67	<0,09	<0,0010	2,15	NR	0,14	0,18	<5,0	<0,02	916	3630
14/12/15	2,45	0,14	<0,05	4,48	<0,14	<0,010	7,6	NR	0,5	0,28	<5,0	0,04	1952	9295
19/1/16	1,15	0,07	<0,05	2,68	<0,14	0,014	4,92	<0,05	0,14	0,69	<5,0	<0,02	2152	5096
2/2/16	0,62	0,07	0,15	3,16	0,27	<0,010	4,76	<0,05	0,17	0,21	<5,0	<0,02	1564	7620
1/3/16	1,11	0,14	<0,05	4,66	<0,141	0,024	12,4	<0,05	0,27	0,15	5,1	<0,02	1889,6	8660

Tabla 22. Registros históricos de análisis fisicoquímicos del lixiviado tratado – Parte 2 (continuación)

Fecha	Al mg/L	Pb mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ba mg/L	As mg/L	P total mg/L	Ag mg/L	Ni mg/L	Zn mg/L	Sulfatos mg/L	Cianuros mg/L	Cloruros mg/L	ST mg/L
5/4/16	8,81	0,12	<0,05	4,13	<0,141	0,069	10,3	<0,05	0,31	0,22	<5,0	<0,02	2903,2	9150
3/5/16	<0,05	<0,02	0,07	2,47	<0,141	0,087	306	<0,05	0,22	0,23	<5,0	<0,02	1701,9	6600
2/6/16	0,06	<0,02	<0,05	0,87	<0,141	<0,010	1,86	<0,05	0,09	0,13	<5,0	0,4	1001,1	4060
7/7/16	<0,05	0,05	<0,05	2,72	<0,141	<0,005	11,26	<0,05	0,25	0,23	34	<0,02	2452,7	8396
2/8/16	<0,05	0,06	<0,05	5,24	<0,141	0,006	5,32	<0,05	0,19	0,16	NR	<0,02	1541	5260
23/8/16	<0,05	<0,02	<0,05	2,53	<0,141	0,143	1,77	<0,05	0,33	0,22	19,33	0,07	2236,5	7900
6/9/16	<0,05	<0,02	<0,05	3,92	<0,141	<0,005	2,2	<0,05	0,29	0,22	NR	<0,02	2792,4	7580
4/10/16	<0,05	0,11	<0,05	6,23	<0,141	0,006	1,93	<0,05	0,32	0,26	215,96	<0,02	2155,6	7705
9/11/16	<0,05	<0,02	<0,05	5,02	0,178	0,044	2,49	<0,05	<0,05	0,16	<5,0	<0,02	1616,7	5420
6/12/16	<0,05	0,21	0,08	15,6	<0,141	0,275	12,21	<0,05	0,73	0,36	38,1	<0,02	4304,7	14940
11/1/17	<0,05	<0,02	<0,05	5,34	<0,5	0,032	6	<0,05	<0,05	0,19	15,1	<0,02	1351,5	5775
7/2/17	<0,05	<0,02	<0,05	4,77	<0,141	<0,005	5,27	<0,05	0,24	0,19	<5,0	<0,02	1626,8	6293
7/3/17	<0,05	0,1	0,18	17,1	<0,5	1,991	6,17	<0,05	0,68	1,45	<10,0	<0,02	3303,6	6733
4/4/17	<0,05	0,1	<0,05	<0,1	<0,5	<0,005	8,96	<0,05	<0,05	0,05	<10	<0,02	1751,9	6193
9/5/17	<0,05	0,11	<0,05	6,48	<0,500	<0,005	24,7	<0,05	0,28	0,3	<10,0	<0,02	2953,2	6780
6/6/17	<0,05	<0,02	<0,05	3,31	<0,500	<0,005	9,4	<0,05	0,14	0,29	<10,0	<0,02	1902,1	4395
18/7/17	<0,05	0,06	<0,05	1,8	<0,500	<0,005	56,1	<0,05	<0,05	0,3	<10,0	<0,02	860,9	3364
Mínimo	<0,05	<0,02	<0,05	0,87	<0,01	<0,005	1,77	<0,05	<0,05	0,05	<5,0	<0,02	816	3364
Máximo	8,81	0,39	0,18	18,94	0,27	1,99	306	<0,05	0,73	42	482	4,50	4305	20960
Promedio	0,5	0,11	0,07	4,40	0,16	0,17	20	<0,05	0,29	1,14	28,53	0,21	2196	8973

NR: No Reportado

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S. ESP

10. Evaluación de eficiencias

10.1. Eficiencia general del sistema de tratamiento

Para la determinación de la eficiencia general del sistema de tratamiento, se comparan los datos promedio del lixiviado crudo (afluente a la laguna de homogeneización) como del lixiviado tratado. Es importante resaltar que los datos de lixiviado crudo no tienen la misma cantidad de información que los datos del lixiviado tratado sobre todo para el periodo 2015 a 2017.

Para la evaluación de la eficiencia se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final}}{\text{Concentración inicial}} \times 100$$

Tabla 23. Eficiencias en la remoción de contaminantes

Parámetro	Promedio Lixiviado crudo	Promedio Lixiviado Tratado	Eficiencia
pH	7,42	8,35	NA
T(°C)	37,4	27,5	NA
DBO mg/L	18835	109	99%
DQO mg/L	33369	1735	95%
SST mg/L	2273	198	91%
NTK mg/L	2195	115	95%
N-NH3 mg/L	1932	103	95%
Hg mg/L	0,02	0,01	50%
Cd mg/L	0,07	0,01	81%
Fenoles mg/L	18,2	0,07	99%
G y A mg/L	156	37	76%
Cr+6 mg/L	1,00	0,04	96%
Al mg/L	4,55	0,49	89%
Pb mg/L	0,32	0,11	67%
Cu mg/L	0,19	0,07	66%
Fe mg/L	191	4,40	98%
Ba mg/L	1,00	0,16	84%

Tabla 23. Eficiencias en la remoción de contaminantes (continuación)

Parámetro	Vr Promedio Lixiviado crudo	Vr Promedio Lixiviado Tratado	Eficiencia
As mg/L	2,83	0,17	94%
P total mg/L	34	20	42%
Ag mg/L	0,12	0,05	57%
Ni mg/L	1,29	0,29	77%
Zn mg/L	3,17	1,14	64%
Sulfatos mg/L	1545	29	98%
Cianuros mg/L	1,49	0,21	87%
Cloruros mg/L	3059	2196	28%
ST mg/L	40733	8973	78%

NA: No Aplica

Fuente: El Autor con base en los datos de Interaseo del Valle S.A.S. ESP

En general se observan buenas eficiencias de remoción global de contaminantes.

10.2. Evaluación de las eficiencias de las unidades de la PTL

Como no se conocen las cargas contaminantes del efluente de la laguna de homogeneización hacia el tanque de tratamiento fisicoquímico se supone una eficiencia de remoción del 50% en carga orgánica (DBO), en carga inorgánica (DQO) y en sólidos suspendidos totales (SST). Bajo este supuesto, los valores esperados de DBO, DQO y SST para el efluente de la laguna de homogeneización serían 9415 mg/L, 16685 mg/L y 1137mg/L, respectivamente.

En la Tabla 24 se presenta un resumen de las concentraciones de DBO, DQO y SST para todas las unidades del sistema de tratamiento.

Tabla 24. Caracterización de efluentes de las unidades

Punto de muestreo	pH	T (°C)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
Lixiviado crudo ¹	7,42	37,4	18835	33369	2273
Laguna de homogeneización ²	8,00	14,8	9415	16685	1137
Planta fisicoquímica	7,31	26,0	4125	5097	653
Tanque anaerobio (UASB + FAFA)	7,73	27,7	2182	4143	1015
Lodos activados	8,35	34,1	62	2167	617
Unidad compacta de clarificación	8,63	16,9	237	3439	523
Tanque de contacto con cloro	8,66	16,5	279	2123	208
Filtros de carbón y arena ³	8,35	27,5	109,49	1734,79	198

1. Valores promedio de lixiviado crudo

2. Los valores de DBO, DQO y SST fueron estimados suponiendo un 50% de los valores promedio del lixiviado crudo

3. Valores promedio del efluente de la PTL, el cual es enviado hacia el río Cauca para su vertimiento.

Fuente: El Autor con base en los datos de Interaseo del Valle S.A.S. ESP

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla anterior, las eficiencias serían las mostradas en las tablas Tabla 25 y Tabla 26:

Tabla 25. Eficiencia individual de las unidades

Punto de muestreo	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
Laguna de homogeneización	50%	50%	50%
Planta fisicoquímica	56%	70%	43%
Tanque anaerobio	47%	19%	-55%
Lodos activados	97%	48%	39%
Unidad compacta de clarificación	-282%	-59%	15%
Tanque de contacto con cloro	-18%	38%	60%
Filtros de carbón y arena	61%	18%	5%

Fuente: El Autor con base en los datos de Interaseo del Valle S.A.S. ESP

Tabla 26. Eficiencia de remoción acumulada de las unidades

Punto de muestreo	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
Laguna de homogeneización	50%	50%	50%
Planta fisicoquímica	78%	85%	71%
Tanque anaerobio	88%	88%	55%
Lodos activados	99%	94%	73%
Unidad compacta de clarificación	99%	90%	77%
Tanque de contacto con cloro	99%	94%	91%
Filtros de carbón y arena	99%	95%	91%

Fuente: El Autor con base en los datos de Interaseo del Valle S.A.S. ESP

La planta de tratamiento tiene una remoción total de DBO del 99%, de DQO del 95% y de sólidos suspendidos totales del 91%. La unidad compacta de clarificación es el componente con mayor ineficiencia dentro del sistema de tratamiento no contribuye con la remoción de carga de contaminantes y la remoción de sólidos es muy precaria (tan sólo del 15%), el operador debe ajustar la operación de esta unidad para lograr su funcionamiento apropiado.

Capítulo III Norma de vertimiento

1. Parámetros y límites

Con la expedición del Decreto 3930 de 2010, el Presidente de la República ordenó al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS), fijar los parámetros y los límites máximos permisibles de los vertimientos a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, dichos límites fueron impuestos por la Resolución 631 del 17 de marzo de 2015.

En esta norma, el MADS diferenció los límites de acuerdo con el tipo de actividad que da origen al vertimiento (sea doméstica, industrial, comercial o de servicios). Para los vertimientos de las aguas residuales obtenidas en los rellenos sanitarios (lixiviados), se aplican los límites definidos en el artículo 14 de la norma, los cuales se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos superficiales de agua para actividades de tratamiento y disposición de residuos

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Generales		
pH	Unidades	6 a 9
DQO	mg/L O ₂	2000
DBO ₅	mg/L O ₂	800
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	400
Sólidos sedimentables	mL/L	5
Grasas y aceites	mg/L	50
Compuestos semivolátiles fenólicos	mg/L	Análisis y reporte
Fenoles	mg/L	0,2
Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	Análisis y reporte
Hidrocarburos		
Hidrocarburos totales	mg/L	10
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	mg/L	Análisis y reporte
BTEX	mg/L	Análisis y reporte
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles	mg/L	Análisis y reporte

Tabla 27. Límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos superficiales de agua para actividades de tratamiento y disposición de residuos (continuación)

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Compuestos de fósforo		
Fósforo total	mg/L	Análisis y reporte
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte
Compuestos de nitrógeno		
Nitratos	mg/L	Análisis y reporte
Nitritos	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno amoniacal	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno total	mg/L	Análisis y reporte
Iones		
Cianuro total	mg/L	0,5
Cloruros	mg/L	500
Sulfatos	mg/L	600
Sulfuros	mg/L	Análisis y reporte
Metales y metaloides		
Aluminio	mg/L	3
Arsénico	mg/L	0,1
Bario	mg/L	2
Berilio	mg/L	Análisis y reporte
Boro	mg/L	Análisis y reporte
Cadmio	mg/L	0,05
Cinc	mg/L	3
Cobalto	mg/L	Análisis y reporte
Cobre	mg/L	1
Cromo	mg/L	0,5
Estaño	mg/L	Análisis y reporte
Litio	mg/L	Análisis y reporte
Manganeso	mg/L	Análisis y reporte
Mercurio	mg/L	0,01
Molibdeno	mg/L	Análisis y reporte
Níquel	mg/L	0,5
Plomo	mg/L	0,2
Selenio	mg/L	0,2
Vanadio	mg/L	1
Otros parámetros para análisis y reporte		
Acidez total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte

Tabla 27. Límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos superficiales de agua para actividades de tratamiento y disposición de residuos (continuación)

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Otros parámetros para análisis y reporte		
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Color real	m ⁻¹	Análisis y reporte

Fuente: MADS, Resolución 631 de 2015 (art. 14).

De los 47 parámetros reglamentados, tan solo 23 establecen un valor límite, los restantes sólo requieren análisis y reporte. No obstante, el artículo 17 de la Resolución 631 de 2015 también establece que se podrá solicitar la exclusión de algún o algunos parámetros siempre y cuando se demuestre mediante balances de masa que el agua residual no contiene dichos contaminantes.

1.1. Evaluación del cumplimiento de la normatividad

A partir de la caracterización de afluentes y efluentes y considerando los rangos estipulados por la normatividad, en la Tabla 28 se presenta la comparación entre los valores promedio del lixiviado tratado y los límites establecidos por la norma de vertimiento:

Tabla 28. Evaluación del cumplimiento de los límites del vertimiento

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR	LIXIVIADO TRATADO	CUMPLIMIENTO
Generales				
pH	Unidades	6 a 9	8,4	Cumple
DQO	mg/L O ₂	2000	1735	Cumple
DBO ₅	mg/L O ₂	800	109	Cumple
SST	mg/L	400	198	Cumple
Sólidos sedimentables	mL/L	5	NE	NE
Grasas y aceites	mg/L	50	37	Cumple
Compuestos semivolátiles fenólicos	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Fenoles	mg/L	0,2	0,07	Cumple
Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE

Tabla 28. Evaluación del cumplimiento de los límites del vertimiento (continuación)

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR	LIXIVIADO TRATADO	CUMPLIMIENTO
Hidrocarburos				
Hidrocarburos totales	mg/L	10	NE	NE
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
BTEX	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Compuestos de fósforo				
Fósforo total	mg/L	Análisis y reporte	20	NE
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Compuestos de nitrógeno				
Nitratos	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Nitritos	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Nitrógeno amoniacal	mg/L	Análisis y reporte	103	NE
Nitrógeno total	mg/L	Análisis y reporte	115	NE
Iones				
Cianuro total	mg/L	0,5	0,21	Cumple
Cloruros	mg/L	500	2196	No cumple
Sulfatos	mg/L	600	29	Cumple
Sulfuros	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Metales y metaloides				
Aluminio	mg/L	3	0,5	Cumple
Arsénico	mg/L	0,1	0,17	No cumple
Bario	mg/L	2	0,16	Cumple
Berilio	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Boro	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Cadmio	mg/L	0,05	0,01	Cumple
Cinc	mg/L	3	1,14	Cumple
Cobalto	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Cobre	mg/L	1	0,07	Cumple
Cromo	mg/L	0,5	0,04	Cumple
Estaño	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Litio	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Manganeso	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Mercurio	mg/L	0,01	0,006	Cumple
Molibdeno	mg/L	Análisis y reporte	NE	NE
Níquel	mg/L	0,5	0,29	Cumple
Plomo	mg/L	0,2	0,11	Cumple
Selenio	mg/L	0,2	NE	NE
Vanadio	mg/L	1	NE	NE

Tabla 28. Evaluación del cumplimiento de los límites del vertimiento (continuación)

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR	LIXIVIADO TRATADO	CUMPLIMIENTO
Otros parámetros para análisis y reporte				
Acidez total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	NE	NE
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	NE	NE
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	NE	NE
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	NE	NE
Color real	m ⁻¹	Análisis y reporte	NE	NE

NE: No establecido

Como se puede observar, todos los parámetros cuantificados cumplen con los límites establecidos en la normatividad de vertimiento, excepto cloruros y arsénico.

2. Régimen de transición

De acuerdo con el artículo 77 del Decreto 3930 de 2010, el cual fue modificado por el Decreto 4728 de 2010, el régimen de transición para la aplicación de las normas de vertimiento será de conformidad con las siguientes reglas:

1. Los generadores de vertimiento que a la entrada en vigencia del presente decreto tengan permiso de vertimiento vigente expedido con base en el Decreto 1594 de 1984 y estuvieren cumpliendo con los términos, condiciones y obligaciones establecidos en el mismo, deberán dar cumplimiento a las nuevas normas de vertimiento, dentro de los dos (2) años, contados a partir de la fecha de publicación de la respectiva resolución.

En caso de optar por un Plan de Reversión a Tecnología Limpia en Gestión de Vertimientos, el plazo de que trata el presente numeral se ampliará en tres (3) años.

2. Los generadores de vertimiento que a la entrada en vigencia del presente decreto tengan permiso de vertimiento vigente expedido con base en el Decreto 1594 de

1984 y no estuvieren cumpliendo con los términos, condiciones y obligaciones establecidos en el mismo, deberán dar cumplimiento a las nuevas normas de vertimiento, dentro de los dieciocho (18) meses, contados a partir de la fecha de publicación de la respectiva resolución.

En caso de optar por un Plan de Reversión a Tecnología Limpia en Gestión de Vertimientos, el plazo de que trata el presente numeral se ampliará en dos (2) años.

Antes de la expedición de la Resolución 631 de 2015, el relleno sanitario Colomba El Guabal, contaba con permiso de vertimiento expedido por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), mediante Resolución 0740-230 de 2013, por una vigencia de 3 años contados desde el 11 de abril de 2013 hasta el 10 de abril de 2016. Según el artículo 21 de la resolución 631 de 2015, la norma nacional de vertimientos entraba en vigencia desde el 1 de enero de 2016, por lo cual el régimen de transición cobija al relleno sanitario durante dos años, hasta el 31 de diciembre de 2017, fecha máxima en la cual ya deberá haber adelantado las gestiones al sistema de tratamiento para cumplir con los nuevos límites impuestos para el vertimiento en la mencionada resolución.

Capítulo IV Parámetros de operación

A partir de las caracterizaciones de los afluentes y efluentes de las unidades se determinan los parámetros de operación de las mismas, lo cual será la base para el diagnóstico posterior.

1. Laguna de homogeneización

Según los reportes de Interaseo del Valle, la laguna de homogeneización fue construida de la mayor capacidad disponible, pero sin un criterio de diseño específico para tratamiento del lixiviado.



Foto 22. Laguna de homogeneización

La laguna de homogeneización tiene un área superficial aproximada de 1,5 Ha, y una profundidad de 11 metros, para una capacidad de almacenamiento de 165.000 m³.

Debido a la profundidad de la laguna, a las altas cargas orgánicas presentes y a la ausencia de oxígeno disuelto en el agua residual, se prevé una descomposición anaeróbica dentro de la laguna.

De acuerdo con los datos promedio de caracterización del lixiviado crudo, presentados en el Capítulo II, se tendrían los siguientes parámetros de operación para la laguna de homogeneización, para un caudal de 8 L/s.

1.1. Carga orgánica volumétrica (COV)

La carga orgánica volumétrica se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$COV = \frac{DBO \times Q \times 86,4}{V_{Laguna}}$$

$$COV = \frac{18835 \times 8 \times 86,4}{165000}$$

$$COV = 79 \text{ g DBO/m}^3 \cdot \text{día}$$

1.2. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El tiempo de retención se determina a partir de la siguiente ecuación.

$$TRH = \frac{V_{Laguna}}{Q \times 86,4}$$

$$TRH = \frac{165000}{8 \times 86,4}$$

$$TRH = 239 \text{ días}$$

1.3. Carga orgánica superficial (COS)

La carga orgánica superficial se determina a partir de la siguiente ecuación.

$$COS = \frac{DBO \times Q \times 0,0864}{A_{Laguna}}$$

$$COS = \frac{18835 \times 8 \times 0,0864}{1,5}$$

$$COS = 8679 \text{ kg DBO/Ha. día}$$

2. Laguna anaerobia cubierta

La laguna anaerobia cubierta, actualmente no se encuentra habilitada para la operación. Se removió el material de cubierta y en el fondo se observa un encostramiento ocasionado por la presencia de lodos secos.



Foto 23. Encostramiento en el fondo de la laguna anaerobia

Según el diseñador, a esta unidad entraría el lixiviado crudo, pero como operaría con el efluente de la laguna de homogeneización se hace el cálculo con los valores de DBO suponiendo 50% de remoción en la laguna de homogeneización (Tabla 24), dicho porcentaje de remoción podría ser incluso superior de acuerdo con las referencias presentadas en la Tabla 29 por Romero (2015), sin embargo, se asume ese valor para evitar sobreestimaciones de la eficiencia de la unidad. Esta laguna tiene un área superficial de 1250 m² y una capacidad de almacenamiento de 4000 m³.

2.1. Carga orgánica volumétrica (COV)

$$COV = \frac{DBO \times Q \times 86,4}{V_{Laguna}}$$

$$COV = \frac{9415 \times 8 \times 86,4}{4000}$$

$$COV = 1627 \text{ g DBO/m}^3 \cdot \text{día}$$

2.2. Carga orgánica superficial (COS)

$$COS = \frac{DBO \times Q \times 0,0864}{A_{Laguna}}$$

$$COS = \frac{9415 \times 8 \times 0,0864}{0,125}$$

$$COS = 52061 \text{ kg DBO/Ha. día}$$

3. Planta fisicoquímica

3.1. Dosificación de químicos

El operador manifiesta que se emplea cloruro férrico (FeCl_3) como agente coagulante en una dosificación promedio de 2000 mg/L, con la cual se logran las remociones evidenciadas en las caracterizaciones presentadas anteriormente. Adicionalmente, se dosifica ácido clorhídrico diluido (HCl), para regular el pH a un rango promedio de 6,5 a 7,5 unidades a fin de que el tratamiento biológico posterior pueda desarrollarse en óptimas condiciones. Teniendo en cuenta los agentes y dosis de coagulación usados, la planta fisicoquímica requiere un estudio y evaluación detallada de su operación, propósito no incluido dentro de este informe.

4. Tratamiento biológico anaerobio

4.1. Reactor UASB + FAFA

Considerando que el efluente de la planta de tratamiento fisicoquímico alimenta al reactor anaerobio en serie, y no contando con la caracterización del efluente del UASB, se evalúan las cargas para el conjunto UASB-FAFA:

4.1.1. Carga orgánica volumétrica (COV)

$$COV = \frac{DQO \times Q \times 86,4}{V_{reactor} \times 1000}$$

$$COV = \frac{5097 \times 4 \times 86,4}{(157,44 + 77,8) \times 1000}$$

$$COV = 7,5 \text{ kg DQO/m}^3 \cdot \text{día}$$

4.1.2. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

$$TRH = \frac{V_{reactor}}{Q \times 3,6}$$

$$TRH = \frac{157,44 + 77,8}{4 \times 3,6}$$

$$TRH = 16,3 \text{ hrs}$$

5. Tratamiento biológico aeróbico

5.1. Tanque de aireación

Considerando que el efluente del tratamiento anaerobio es el que alimenta esta unidad, los parámetros de operación serían los siguientes:

5.1.1. Carga orgánica volumétrica (COV)

$$COV = \frac{DBO \times Q \times 86,4}{V_{reactor}}$$

$$COV = \frac{2182 \times 4 \times 86,4}{208,5}$$

$$COV = 3617 \text{ g DBO/m}^3 \cdot \text{día}$$

5.1.2. Periodo de aireación (θ)

$$\theta = \frac{V_{reactor}}{Q \times 3,6}$$

$$\theta = \frac{208,5}{4 \times 3,6}$$

$$\theta = 14,5 \text{ hr}$$

5.2. Tanque sedimentador

Los parámetros de operación de esta unidad son los siguientes:

5.2.1. Carga hidráulica superficial (CHS)

$$CHS = \frac{Q \times 86,4}{A_{sediment}}$$

$$CHS = \frac{4 \times 86,4}{11,52}$$

$$CHS = 30 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$$

5.2.2. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

$$TRH = \frac{V_{reactor}}{Q \times 3,6}$$

$$TRH = \frac{46,08}{4 \times 3,6}$$

$$TRH = 3,2 \text{ hr}$$

6. Unidad compacta de clarificación

Esta unidad trata el efluente del proceso de lodos activados (Figura 13) luego de la dosificación de peróxido de hidrógeno y cloruro férrico en la canaleta de salida del tanque sedimentador (reacción fenton).

El operador manifiesta que se emplea cloruro férrico (FeCl_3) como agente coagulante en una dosificación promedio de 550mg/L con peróxido de hidrógeno en una concentración promedio de 160mg/L, con la cual se logran las remociones indicadas en la Tabla 25, negativas para DBO y DQO y muy bajas para SST (15%).

7. Tanque de contacto con cloro

En esta unidad no se efectúa aplicación de cloro, el operador manifiesta que el único cloro que pueda tener esta unidad proviene directamente del cloruro férrico aplicado para la reacción fenton en el tanque sedimentador. Por esta razón para esta unidad no se contemplan parámetros operativos, ya que su función es principalmente de apoyo al tratamiento fisicoquímico efectuado en la unidad compacta de clarificación, desempeñándose como un floculador de flujo horizontal.

8. Filtración y adsorción

Los filtros existentes funcionan en serie con flujo a presión, son filtros cilíndricos construidos en acero al carbón con un diámetro de 2,1m y espesores de lecho de 60cm para el filtro de arena y de 70 cm para los filtros mixtos de arena y carbón activado (relación 20/50 respectivamente). El operador reporta que se efectúa un retrolavado diario de una duración promedio de 1 hora.

8.1.1. Tasa de filtración

$$Tasa\ de\ filtración = \frac{Q \times 86,4}{A_{filtro}}$$

$$Tasa\ de\ filtración = \frac{8 \times 86,4}{3,5}$$

$$Tasa\ de\ filtración = 200\ m^3/m^2 - día$$

Capítulo V Diagnóstico del sistema de tratamiento

1. Laguna de homogeneización

Esta unidad no fue contemplada inicialmente dentro del sistema de tratamiento de lixiviados. Se construyó con el objetivo de regular los caudales de generación de lixiviados. Debido a la profundidad que tiene esta laguna (superior a 11 metros), se espera que su operación sea de forma anaeróbica. En la Tabla 29 se presenta la comparación de los factores de diseño de lagunas anaeróbicas con los parámetros de operación calculados en el Capítulo IV.

Los resultados de los cálculos de los parámetros operativos evidencian que la laguna de homogeneización tiene valores ajustados a los rangos recomendados por la literatura, por lo cual se están presentando procesos de oxidación biológica anaerobia, los cuales incluso pueden alcanzar límites de remoción de cargas cercanas al 70%.

2. Laguna anaerobia cubierta

Si la laguna anaerobia opera con el efluente de la laguna de homogeneización, tendría posiblemente las siguientes condiciones:

- $COV = 1627 \text{ g DBO/m}^3 \cdot \text{día}$
- $COS = 52061 \text{ kg DBO/Ha} \cdot \text{día}$
- $TRH = 5,8 \text{ días}$

En la Tabla 29 se presentan los factores de diseño de lagunas anaerobias de acuerdo con los rangos presentados por Romero (2015).

Tabla 29. Factores de diseño de lagunas anaeróbicas

Carga orgánica volumétrica (g DBO/m ³ -día)	Tiempo de retención (días)	Profundidad (m)	Temperatura (°C)	Eficiencia de remoción de DBO (%)	Carga orgánica superficial (kg DBO/Ha-día)	
320	≥4	4,5	≥25	75	-	
100-400	≥2	>2,5	12 20 25	45 62 70	4000-16000	
<300	5	2,5-5	>22	50	-	
<400	1	2-4	20	50	-	
<400	2,5	2-4	20	60	-	
<400	5	2-4	20	70	-	
125	-	-	-	-	-	
-	5	-	10	10	-	
-	4-5	-	10-15	30-40	-	
-	2-3	-	15-20	40-50	-	
-	1-2	-	20-25	50-60	-	
-	1-2	-	25-30	60-80	-	
100	2-5	3-4	≤10	40	-	
200	2-5	3-4	11-19	50	-	
300	2-5	3-4	≥20	60	-	
132-311	0,8-2	-	26	76-81	-	
190-240	2-5	3-5	-	-	1000-6000	
100	-	2-4	<10	40	-	
20T-100	-	2-4	10-20	2T+20	-	
300	-	2-4	>20	60	-	
-	1,25	-	-	45-80	1120-2240	
Laguna de Homogeneización	79	239	11	14,8	-	8679
Laguna Anaerobia Cubierta	1627	5,8	4	35	-	52061

T: Temperatura (°C)

Fuente: *Lagunas de estabilización de aguas residuales (Romero, 2015)*

La comparación de los valores operativos supuestos para laguna anaerobia refleja que la carga orgánica volumétrica (COV) y la carga orgánica superficial (COS), son muy superiores a los valores propuestos en la bibliografía, esto indica que la laguna anaerobia cubierta estaría sobrecargada.

3. Planta fisicoquímica

Agustino (2011), menciona que diferentes estudios han evidenciado que la efectividad de los procesos de coagulación/floculación para la precipitación de metales pesados es superior a pH básico, por lo cual la adición de ácido clorhídrico al proceso afecta negativamente las eficiencias. El operador ha efectuado evaluaciones para la optimización de esta unidad (así como de la unidad compacta de clarificación) mediante ensayos de jarras evaluando diferentes coagulantes.

El coagulante empleado en la planta fisicoquímica es cloruro férrico en una concentración de 2000 mg/L. En los ensayos de jarras se obtuvo que con estas condiciones la remoción de turbidez es tan sólo del 49%.

Tabla 30. Resultados de ensayos de jarras con dosificación actual de la planta fisicoquímica

Coagulante	Cloruro férrico
Dosificación	2000 mg/L
Turbidez inicial (NTU)	929
Turbidez final (NTU)	470
% Remoción	49%

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S ESP



Foto 24. Ensayo de jarras con dosificación actual de la planta

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S ESP

Ensayos utilizando polímero (Trafloc22) y una solución al 10% (P/V) de cal viva, alcanzan remociones hasta del 62% como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Ensayos de jarras con dosificación de Trafloc22 y cal viva para la planta fisicoquímica

Componente	JARRA			
	1	2	3	4
Trafloc22 (mg/L)	2000	0	2000	0
Cal (mg/L)	10000	20000	30000	30000
Turbidez final (NTU)	635	391	335	404
% Remoción	28%	56%	62%	54%
pH final	8,69	9,1	9,68	9,51

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S ESP



Foto 25. Resultados de ensayo de jarras con T22 y cal viva para la planta fisicoquímica

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S ESP

El tratamiento fisicoquímico en la PTL requiere un estudio particular que determine el coagulante más efectivo, dosis óptima, condiciones óptimas, ayudas de coagulación y pH óptimo de coagulación.

4. Reactor UASB

De acuerdo con Romero (2013), los rangos de los parámetros de diseño de un reactor UASB (PAMLA), se pueden resumir en los siguientes:

Tabla 32. Características de diseño de reactores UASB

Parámetro	Valor	Reactor UASB de la PTL
DQO del afluente (mg/L)	5000 – 15000 500 – 20000	5097
Relación SSV/DQO, para aguas residuales fuertes	< 1	-
SS del afluente (mg/L)	< 1000	653
pH del afluente	6,5 – 7,5	7,31
Relación SS/DQO del afluente	< 0,5	0,13
Relación DQO/SO ₄ del afluente	> 7	-
Relación DBO/N/P del afluente	≤ 350/5/1	-
Temperatura del afluente (°C)	> 15	26
Entrada del afluente (N ₀ /m ²)	> 1	-
Tiempo de retención (h)	4 – 12 ≤ 24	11
Carga orgánica volumétrica (Kg DQO/m ³ -día)	0,5 – 40 4 – 12 8 – 40 < 20	11,2
Carga de NH ⁺ - N (Kg/m ³ -día)	2,4 – 3,4	-
Profundidad del digester (m)	≤ 4,5	3
Profundidad del sedimentador (m)	≤ 1,5	1,6
Profundidad del reactor (m)	≤ 6,0	4,6
Volumen del reactor (m ³)	< 1500	235
Velocidad ascensional de flujo (m/h)	1 – 2	0,38
Carga extractor de gas (m ³ /m ² -día)	< 120	-
Eficiencia de remoción de DQO (%)	75 – 85	-
Aguas residuales domésticas	60 – 70	-
Aguas residuales fuertes	80 – 90	-
Producción de gas (L/gDQOR @ PTN)		-
Aguas residuales domésticas	0,15	-
Aguas residuales fuertes	0,30	-
Remoción de patógenos	Baja	-
Remoción de N y P	Nula	-
Carga superficial del sedimentador (m/d)	≤ 36	-
Pendiente de paredes del sedimentador (grados)	50	-
Disposición de lodos	Sobre el suelo, relativamente estables	-
Disposición de biogás	Sobre la atmósfera o quemado	-

Fuente: Tratamiento de aguas residuales (Romero, 2013)

A partir de los valores operacionales calculados para esta unidad, se puede observar que el reactor funciona dentro de los rangos recomendados por la bibliografía. Por lo cual las eficiencias obtenidas están acordes a las condiciones operativas actuales.

5. Lodos activados

En la Tabla 33 se presentan los rangos de valores presentados por Romero (2013) para el diseño y la operación del sistema de lodos activados, así como la comparación con los valores calculados para este proceso en la PTL.

Tabla 33. Parámetros de diseño y operación de lodos activados

Proceso	Periodo aireación (horas)	COV gDBO/m ³ .d	A/M gDBO/gSSVLM.d	X SSLM (mg/L)	Edad de todos (días)	Tasa de recirculac. (%)	Eficiencia DBO (%)	Observac.
Convencional	4 - 8	300 - 600	0,2 - 0,4	1500 - 3000	5 - 15	25 - 75	85 - 95	Sensible a cargas súbitas Flujo en pistón
Aireación gradual	4 - 8	300 - 600	0,2 - 0,4	1500 - 3000	5 - 15	25 - 50	85 - 95	Uso general
Mezcla completa	3 - 5	800 - 2400	0,2 - 0,6	2500 - 4000	5 - 15	25 - 100	85 - 95	Resistente a cargas de choque
Aireación escalonada	3 - 5	600 - 1000	0,2 - 0,4	2000 - 3500	5 - 15	25 - 75	85 - 95	Uso general, flujo en pistón
Aireación corta	1,5 - 3	1200 - 2400	1,5 - 5,0	200 - 1000	0,2 - 0,5	5 - 25	60 - 75	Efluente de baja calidad
Aireación prolongada	18 - 36	100 - 400	0,05 - 0,15	3000 - 6000	20 - 30	50 - 150	75 - 95	Plantas pequeñas
Krauss	4 - 8	600 - 1600	0,3 - 0,8	2000 - 3000	5 - 15	50 - 100	85 - 95	Usado en residuos fuertes bajos en N
Tasa alta	2 - 4	1600 - 16000	0,4 - 1,5	4000 - 10000	5 - 10	100 - 500	75 - 90	Uso general, Mezcla completa
Oxígeno puro	1 - 3	1600 - 3300	0,25 - 1,0	2000 - 5000	3 - 10	25 - 50	85 - 95	Usado para reducir volumen requerido para tratamiento, Mezcla completa
Zanjón de oxidación	8 - 36	80 - 480	0,025 - 0,3	3000 - 6000	10 - 30	75 - 150	75 - 95	Usado en ciudades pequeñas
Reactor secuencial de cocheda	2 - 4	100 - 300	0,04 - 0,10	2000 - 5000	10 - 30			El control de proceso es complicado
Lodos activados en PTL	14,5	3617	-	-	-	-	97%	-

Fuente: Tratamiento de aguas residuales (Romero, 2013)

Se evidencia que la carga orgánica volumétrica calculada para el tanque de aireación (3616,8 g DBO/m³-día) es superior a casi todos los valores recomendados en las referencias bibliográficas. El valor obtenido sólo se ajusta al proceso de tasa alta, sin embargo, para este proceso el periodo de aireación recomendado es de 2 a 4 horas, mientras que, en la operación el periodo de aireación es de 14,5 horas.

Para la evaluación del tanque sedimentador, se toman los valores recomendados para este tipo de unidades por Romero (2013):

Tabla 34. Parámetros de diseño de sedimentadores secundarios

Tipo de tratamiento	Carga superficial (m/d)		Carga de sólidos (Kg/m ² .d)		Profundidad (m)
	Q prom	Q pico	Q prom	Q pico	
Sedimentación secundaria	16 – 29 < 34	40 – 65 < 65	100 – 150	245	3,7 – 4,6
Sedimentación secundaria	8 – 33	24 – 49	23 – 164	164 – 234	3 – 6
Sedimentación secundaria después de filtro percolador	16 – 24	41 – 49	-	-	3 – 3,7
Sedimentación después de lodos activados (excluyendo aireación prolongada)	16 – 32	41 – 49	98 – 147	245	3,7 – 4,6
Sedimentación después de aireación prolongada	8 – 16	32	98 – 147	245	3,7 – 4,6
Tanque sedimentador en PTL	18		-		4

Fuente: Tratamiento de aguas residuales (Romero, 2013)

La carga hidráulica superficial calculada para el tanque sedimentador es de 18 m/día, lo cual es un valor apropiado comparando el rango propuesto en la tabla anterior, con esta carga hidráulica el sedimentador puede trabajar con cargas de sólidos entre 98 y 147 kg/m²-día.

6. Unidad compacta de clarificación

Esta unidad compacta es un tratamiento fisicoquímico complementario y hace parte de los últimos procesos de tratamiento del lixiviado, no está diseñada para altas cargas y realiza un tratamiento fisicoquímico posterior enfocado a remover las cargas no removidas en el tratamiento biológico. Al igual que para la planta fisicoquímica, el operador efectuó ensayos de jarras en esta unidad para evaluar la posibilidad de su optimización.

El coagulante empleado en esta unidad es cloruro férrico a 550mg/L en conjunto con peróxido de hidrógeno a 160mg/L. En los ensayos de jarras se obtuvo que con estas condiciones la remoción de turbidez es tan sólo del 6%, sin evidenciar formación de flocs, ni sedimentación. Esta situación posiblemente pueda asociarse a que no se dosifican las cantidades óptimas de coagulantes, o también a que los químicos empleados no son adecuados para el tratamiento en las condiciones actuales.

Tabla 35. Resultados de ensayos de jarras a dosificación actual

Coagulante	Cloruro férrico	Peróxido de hidrógeno
Dosificación	550 mg/L	160 mg/L
Turbidez inicial (NTU)	236	
Turbidez final (NTU)	221	
% Remoción	6%	

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S ESP



Foto 26. Ensayo de jarras con dosificación actual en la unidad
Fuente: Interaseo del Valle S.A.S ESP

Ensayos utilizando polímero (Trafloc22) y una solución al 10% (P/V) de cal viva, alcanzan remociones hasta del 82% tal como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36. Ensayos de jarras con dosificación de Trafloc22 y cal viva para la unidad compacta

Componente	JARRA			
	1	2	3	4
Trafloc22 (mg/L)	1600	2000	2400	2800
Cal (mg/L)	24000	24000	24000	24000
Turbidez final (NTU)	60,4	57,9	58,3	44,4
% Remoción	75%	76%	76%	82%
pH final	12,11	12,23	12,44	12,45

Fuente: Interaseo del Valle S.A.S ESP

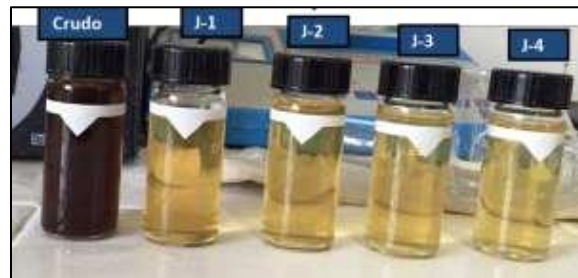


Foto 27. Resultados de ensayo de jarras con T22 y cal viva para la unidad compacta
Fuente: Interaseo del Valle S.A.S ESP

La diferencia entre los resultados obtenidos en los ensayos efectuados por el operador, evidencian que la adición de cal permite elevar el pH y mejorar el proceso de coagulación, que en conjunto con el polímero empleado (Trafloc22) permitió alcanzar remociones que varían desde 75% hasta 82%. Al igual que para el tanque de tratamiento fisicoquímico, esta unidad requiere un estudio particular que determine el coagulante más efectivo, dosis óptima, condiciones óptimas, ayudas de coagulación y pH óptimo de coagulación. Además, es necesario definir si la unidad opera como proceso convencional de coagulación o como proceso Fenton, para definir las condiciones óptimas requeridas.

7. Tanque de contacto con cloro

No hay dosificación de cloro dentro de esta unidad, ni mediciones de cloro residual en su efluente. De acuerdo con las apreciaciones hechas en campo, la función de este tanque es proveer un tiempo de retención y una velocidad de flujo suficiente para la sedimentación de las partículas antes de la filtración final. La eficiencia de esta unidad dependerá directamente de la adecuada dosificación de coagulantes en la unidad compacta de clarificación, para que se presente la formación de flocs y estos puedan ser retenidos y sedimentados en este tanque. Es importante señalar que en caso de que se quiera hacer desinfección final con cloro, esta deberá efectuarse de forma posterior a la filtración y no previamente como se encuentra actualmente planteado.

8. Filtración y adsorción

La tasa de filtración calculada ($200\text{m}^3/\text{m}^2\text{-día}$) es suficiente y acorde con el proceso. Sin embargo, el operador manifiesta que se presentan taponamientos frecuentes que ocasionan la fuga de sólidos suspendidos asociados a color en el vertimiento, esta situación posiblemente es ocasionada por la pobre remoción en las unidades previas, por lo cual los retrolavados se tienen que realizar con mayor frecuencia (a veces se requieren hasta 3 retrolavados diarios) retrasando la operación de la planta de tratamiento.

Conclusiones y Recomendaciones

- Las estimaciones de generación de lixiviados no reflejan los caudales que se presentan en el relleno sanitario. Para el año 2017 el caudal debería oscilar entre 5 a 6 L/s, pero el operador reporta una generación actual de lixiviados cercana a 8 L/s.
- Se recomienda incluir monitoreos periódicos (semestral o anualmente) de los afluentes de cada una de las unidades de la PTL, pues solamente se cuenta con los efectuados para el desarrollo de esta investigación.
- El valor promedio de los cloruros en el lixiviado tratado (2196 mg/L), es superior al límite impuesto en la normatividad de vertimiento (500 mg/L). Para la remoción de cloruros se requiere tratamiento terciario (típicamente ósmosis inversa), lo cual supondría grandes inversiones.
- El valor promedio del arsénico en el lixiviado tratado (0,17 mg/L) no cumple el límite impuesto en la normatividad de vertimiento (0,1 mg/L). La remoción de arsénico puede mejorarse mediante el incremento de la eficiencia de las unidades de tratamiento fisicoquímico o bien mediante la inclusión de tratamientos terciarios como ósmosis inversa.
- La laguna de homogeneización opera con cargas apropiadas para la remoción de contaminantes, (COV de 79 g DBO/m³.día, COS de 8679 kg DBO/Ha.día y TRH de 239 días).
- La laguna anaerobia cubierta no se encuentra habilitada, pero operando con el efluente de la laguna de homogeneización tendría parámetros operativos muy elevados (COV de 1627 gDBO/m³.día y COS de 52061 kgDBO/Ha.día), fuera de los rangos recomendados por la bibliografía.

- La planta fisicoquímica tiene remociones de DBO de 56%, de DQO de 70%, de SST de 43% y de turbiedad de 49%.
- Se recomienda evaluar la optimización de la planta fisicoquímica.
- La unidad compacta de clarificación exhibe una pobre remoción de turbiedad (6%), por tanto, requiere estudio de optimización.
- Tanto la planta fisicoquímica como la unidad compacta de clarificación requieren un estudio particular que determine el coagulante más efectivo, la dosis óptima, las condiciones óptimas, las ayudas de coagulación requeridas y el pH óptimo de coagulación.
- En el tanque de contacto con cloro no hay dosificación de cloro para desinfección. En caso de que se requiera efectuar este proceso, se recomienda que sea efectuado luego de la filtración presurizada con arena y carbón activado.
- En las condiciones evaluadas la PTL cumple con los límites requeridos de calidad para vertimiento de la Resolución 631 de 2015 excepto en cloruros y arsénico.

Bibliografía

- Agustiono K., T. (2011). *Treatment of Landfill Leachate*. Lexington, USA: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC. (2007). *Resolución 0740-0377 del 09 de agosto de 2007*. Guadalajara de Buga, Colombia.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC. (2013). *Resolución 0740-230 del 11 de abril de 2013*. Guadalajara de Buga, Colombia.
- HC Ingenieros SAS. (2013). *Planta de tratamiento para los lixiviados del relleno sanitario Colomba El Guabal en el municipio de Yotoco-Valle del Cauca*. Yotoco, Colombia.
- Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). *Ingeniería Ambiental*. México: PRENTICE HALL.
- Hernandez L., A. (2015). *Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. 2da edición*. Madrid, España: Ibergaceta Publicaciones S.L.
- Isla, R. (2005). *Proyectos de plantas de tratamiento de aguas. Aguas de proceso, residuales y de refrigeración*. Madrid, España: Bellisco Ediciones técnicas y científicas.
- Mendez, R., García, R., Castillo, E., & Sauri, M. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton . *Ingeniería e Investigación*, 80-85.
- Ministerio de agricultura, Ministerio de Salud y DNP. (1984). *Decreto 1594 del 26 de junio de 1984*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (2015). *Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). *Decreto 3930 del 5 de octubre de 2010*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). *Decreto 4728 del 23 de diciembre de 2010*. Bogotá, Colombia.
- Romero, J. A. (2013). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. A. (2015). *Lagunas de estabilización de aguas residuales*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1998). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. México D.F: Mc Graw Hill.

United States Environmental Protection Agency - USEPA. (1979). *Demonstrating Leachate treatment. Report on a full-scale operating plant.* Falls Township, USA.

United States Environmental Protection Agency - USEPA. (1987). *Simulation of leachate generation from municipal solid waste.* Cincinnati, USA.

United States Environmental Protection Agency - USEPA. (2000). *Development Document for Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Landfills Point Source Category.* Washington, USA: United States Environmental Protection Agency.