



**APOYO EN EL DIAGNÓSTICO FÍSICOQUÍMICO DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO LA VICTORIA DE
IPIALES, NARIÑO**

Maira Lizeth Velasco Nazate

Informe de práctica de semestre de industria para optar al título de Ingeniera Sanitaria

Asesora Interna:

Diana Catalina Rodríguez Loaiza
Ph.D. Msc. Ingeniera Sanitaria

Asesora externa:

Ana Gabriela Hernández
Ingeniera ambiental
Coordinadora relleno sanitario la Victoria

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Sanitaria
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita

(Velasco Nazate, 2022)

Referencia

Velasco Nazate, L. (2022). *Diagnostico fisicoquímico de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario la victoria, Ipiales, Nariño* [Trabajo de grado]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Estilo APA 7 (2020)



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza

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

Dedicatoria

Este trabajo de grado va dedicado a Dios en primer lugar porque sin el nada es posible, porque me dio la fortaleza y sabiduría para llegar hasta este punto de mi carrera, fue, es y será mi apoyo en cada momento de vida, a mi madre porque es mi apoyo en todo momento y este logro es tan suyo como mío, por eso se lo doy en ofrenda por su paciencia y amor incondicional, por sus esfuerzos impresionantes que hizo para que juntas llegáramos hasta aquí, de verdad que no me alcanzara la vida para agradecerle todo lo que hizo y hace por mí, también va dirigida a mis hermanos porque sé que mis logros son los suyos, sé que soy la base de los cimientos de responsabilidad y deseos de superación que juntos tenemos, también va dedicada a mi pareja porque su ayuda y amor incondicional ha sido fundamental para culminar con mi propósito.

Agradecimientos

Después de la difícil circunstancia que pasamos por la pandemia, agradezco a Dios por permitirme cumplir esta meta, este agradecimiento también va dirigido para cada uno de mis familiares que fueron partícipes de este proceso, agradezco cada palabra y voz de aliento que me dieron en los momentos más difíciles, agradezco a mis compañeros de carrera que se convirtieron en familia y nos acompañamos mutuamente en todo el tiempo que duro el proceso de formación, mi agradecimiento más grande va dirigido hacia la Universidad de Antioquia que me permitió aprender, conocer y sobre todo me brindó la oportunidad de formarme académicamente para convertirme en un profesional útil para la sociedad. También agradezco a ISERVI E.S.P. por brindarme la oportunidad de realizar las prácticas profesionales, que gracias a estas me encaminaron hacia la sabiduría y la perfección profesional.

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 10 |
| Abstract | 11 |
| Introducción | 12 |
| 1 Objetivos | 13 |
| 1.1 Objetivo general | 13 |
| 1.2 Objetivos específicos..... | 13 |
| 2 Marco teórico | 14 |
| 2.1 LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS | 14 |
| 2.2 DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO | 14 |
| 2.2.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR | 15 |
| 2.2.2 REACTOR UASB | 15 |
| 2.2.3. REACTOR DE LODOS ACTIVADOS | 16 |
| 2.2.4. SEDIMENTACION SECUNDARIA | 17 |
| 3 Metodología | 17 |
| 4 Resultados y Análisis | 18 |
| FASE I: PROCESOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS LA VICTORIA DE IPIALES NARIÑO | 18 |
| 4.1 DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO | 18 |
| 4.1.1 DESARENADOR..... | 18 |
| 4.1.2 REACTORES UASB..... | 20 |
| 4.1.3 REACTOR DE LODOS ACTIVADOS | 21 |
| 4.1.4 SEDIMENTACIÓN SECUNDARIA..... | 22 |
| 4.1.5 LECHOS DE SECADO..... | 23 |
| 4.2 OPERACIÓN DE LA PTAL | 24 |

| | |
|---|----|
| 4.3 PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS | 25 |
| FASE II: PUNTOS CRÍTICOS ENCONTRADOS EN LA FASE 1 Y PLAN DE ACCIÓN PARA MEJORARLOS | 25 |
| 4.4 FALLAS ENCONTRADAS EN LA VISITA TÉCNICA | 25 |
| 4.5 FALLAS EN EL TRATAMIENTO PRELIMINAR | 26 |
| 4.6 FALLAS EN TRATAMIENTO PRIMARIO | 27 |
| 4.7 FALLAS EN EL TRATAMIENTO SECUNDARIO | 29 |
| 4.8 FALLAS EN LECHOS DE SECADO..... | 31 |
| 4.9 CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO | 31 |
| FASE III: ANÁLISIS DE LOS PLANES DE ACCIÓN APLICADOS..... | 32 |
| 4.10 RESULTADOS DEL PLAN DE ACCIÓN | 32 |
| 4.10.1 RESULTADOS EMITIDOS POR EL LABORATORIO CERTIFICADO..... | 32 |
| 4.10.2 ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS EMITIDOS POR EL LABORATORIO..... | 34 |
| 4.10.3 ANÁLISIS Y SEGUIMIENTOS DE LOS PARÁMETROS AFECTADOS EN LA CARACTERIZACIÓN..... | 35 |
| 4.10.4 ANALISIS Y SEGUIMIENTO DE LAS FALLAS ENCONTRADAS EN LOS REACTORES UASB..... | 37 |
| 4.10.5 ANALISIS Y SEGUIMIENTO A LAS FALLAS ENCONTRADAS EN LOS REACTORES DE LODOS ACTIVADOS. | 39 |
| 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 40 |
| 6 REFERENCIAS | 41 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Especificaciones técnicas del desarenador | 19 |
| Tabla 2: Especificaciones técnicas reactores UASB | 21 |
| Tabla 3: Especificaciones técnicas de los reactores de lodos activados | 22 |
| Tabla 4: Especificaciones técnicas del sedimentador secundario | 23 |
| Tabla 5: Especificaciones técnicas de los lechos de secado | 24 |
| Tabla 6: Caudal de ingreso promedio a la PTAL | 25 |
| Tabla 7: Entrada a la planta de tratamiento | 26 |
| Tabla 8: Eficiencia de remoción de contaminantes | 32 |

Lista de ilustraciones

| | |
|--|----|
| Ilustración 1: Localización satelital de la PTAL..... | 14 |
| Ilustración 2: Diagrama de las etapas de tratamiento de lixiviado..... | 15 |
| Ilustración 3: Vista general de la PTAL..... | 18 |
| Ilustración 4: Desarenadores | 19 |
| Ilustración 5: Reactor UASB..... | 20 |
| Ilustración 6: Reactor de lodos activados..... | 21 |
| Ilustración 7: Sedimentador secundario | 22 |
| Ilustración 8: Lechos de secado | 23 |
| Ilustración 9: Esquema del funcionamiento de la planta..... | 24 |
| Ilustración 10: Entrada a la planta..... | 26 |
| Ilustración 11: Desarenaadores | 27 |
| Ilustración 12: Reactores UASB (uno en funcionamiento y otro en mantenimiento) | 28 |
| Ilustración 13: Cajilla y tubería que conecta los reactores UASB con los reactores de lodos activados..... | 28 |
| Ilustración 14: Mantenimiento de Reactor de lodos activados zonas internas..... | 29 |
| Ilustración 15: Mantenimiento reactor de lodos activados zona externa | 31 |
| Ilustración 16: Lechos de secado en mantenimiento..... | 33 |
| Ilustración 17: Registro fotográfico toma de muestras salida de la PTAL | 34 |
| Ilustración 18: Registro fotográfico toma de muestras salida de la PTAL | 36 |
| Ilustración 19: Ensayo con dosificación de cal. | 37 |
| Ilustración 20: pH metro adquirido por ISERVI E.S.P..... | 37 |
| Ilustración 21: Recirculación de inóculo hacia los reactores UASB.. .. | 37 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 22: Cambio de tubería de conducción de lixiviados | 38 |
| Ilustración 23: Cambio de tubería de entrada a la PTAL | 38 |
| Ilustración 24: Cambio de tubería entrada reactores UASB | 39 |
| Ilustración 25: Estado actual de los reactores de lodos activados | 39 |

Resumen

El relleno sanitario la Victoria se encuentra localizado en la ciudad de Ipiales, Nariño, este relleno es operado por la empresa de servicios públicos ISERVI E.S.P. y cuenta con licencia ambiental de operación, por un periodo de 15 años y una capacidad de almacenamiento de 500.000 toneladas de residuos, atiende a una población aproximada de 200.000 de habitantes.

En la actualidad el relleno sanitario recibe un promedio de 116 Ton/d de residuos sólidos provenientes de 13 municipios de Ipiales, catalogándolo como un relleno sanitario regional. El relleno cuenta con una planta de tratamiento de lixiviados con una capacidad de 86.4 m³/d, la cual será el enfoque para la ejecución de esta práctica académica.

Con este trabajo se pretende realizar el diagnóstico fisicoquímico de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario la Victoria, con el fin de encontrar posibles fallas en los procesos y unidades de tratamiento. Para iniciar el diagnóstico se realizará una visita técnica de observación directa del sitio de ubicación y su planta física, posteriormente, se realizará una revisión de los cálculos de su construcción y operación a partir de los planos existentes, para finalmente, se realizará un muestreo de lixiviados en diferentes puntos de la planta para ser analizadas en laboratorio (EMPOBANDO) y así conocer sus características fisicoquímicas y microbiológicas. Con los resultados obtenidos, se realizará una tabla comparativa que permitirá definir el cumplimiento de la normatividad actual vigente.

Palabras clave: Fisicoquímico; Lixiviados; Normatividad; Planta de tratamiento; Relleno sanitario.

Abstract

La Victoria landfill is located in the city of Ipiales, Nariño, this landfill is operated by the company ISERVI E.S.P. and has an environmental operating license for a period of **15** years and a storage capacity of 500.000 tons of waste, it serves a population of approximately 200.000 inhabitants.

Currently, the landfill receives an average of 116 T/d of solid waste from 13 municipalities of Ipiales, classifying it as a regional landfill. The landfill has a leachate treatment plant with a capacity of 86.4 m³/d, which will be our focus for the execution of this degree work.

It is intended to carry out the physicochemical diagnosis of the leachate treatment plant of La Victoria landfill, in order to find possible failures in the processes and treatment units of the plant. To start the diagnosis, a technical visit of direct observation of the location site and its physical plant will be carried out, subsequently, a review of the calculations of its construction and operation will be carried out based on the existing plans, to finally take samples of leachate at different points of the plant to be analyzed in the laboratory (EMPOBANDO) and thus know its characteristics. Physicochemical and microbiological. With the results obtained, a comparative table will be made that will allow defining compliance with the current regulations in force.

Keywords: Physicochemical, Leachate, Normativity, Processing facilities, Landfill.

Introducción

En los últimos años la contaminación de acuíferos naturales por vertimientos directos de aguas residuales, lixiviados y demás, ha venido en aumento según la Agencia de Protección de los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency - USEPA, 2000), a tal punto que hay una limitante para su uso y consumo. Para disminuir estos índices de contaminación, es indispensable brindar un tratamiento adecuado de las aguas residuales y lixiviados por medio de una planta de tratamiento, con el fin de minimizar el impacto del vertimiento a las fuentes de agua.

Los lixiviados en general tienen cargas contaminantes muy altas, en comparación con otras aguas residuales. La composición de los lixiviados varía de acuerdo con diversos factores, 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.

Este trabajo será abordado a partir de un diagnóstico realizado a la planta de tratamiento de lixiviados (PTAL) del municipio de Ipiales Nariño. Este diagnóstico se realizará con el objetivo de evaluar su funcionamiento antes, durante y después del tratamiento que se llevará a cabo, y compararlo con las memorias de cálculo del diseñador y los planos existentes, con el fin de determinar si existe cumplimiento de los parámetros fisicoquímicos exigidos por la normativa colombiana (Resolución 631 de 2017). En este sentido el trabajo se divide en tres fases: en la fase I se presenta un diagnóstico, cuyo objetivo es el de identificar mediante una visita técnica y observación directa, los factores importantes del proceso de la PTAL, haciendo a su vez una recolección de información sobre la planta, en la fase II se realizará un análisis de los factores encontrados en la fase 1, con la finalidad de identificar y priorizar los puntos críticos para posteriormente, implementar un plan de acción que busque mejorar el funcionamiento de la planta. En la fase III se analizarán los resultados de los planes de acción aplicados.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Proponer estrategias para el mejoramiento de los procesos de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario la Victoria.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico fisicoquímico y funcional de la planta de lixiviados mediante visitas, análisis de planos y manuales existentes.
- Determinar el cumplimiento de la normatividad colombiana en los procesos de la planta de tratamiento de lixiviados mediante caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas y comparaciones con la normatividad actual.
- Proponer directrices de manejo en los puntos críticos encontrados en el marco de una propuesta de manejo general de la planta de tratamiento de lixiviados.

2 Marco teórico

2.1 LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

La planta de tratamiento se encuentra ubicada al sur – occidente del municipio de Ipiales, entre el río Guaitara y la quebrada del morro, limitando con Ecuador (Ilustración 1).



Ilustración 1: Localización satelital de la PTAL

Fuente: Google earth

2.2 DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO

La planta de tratamiento de lixiviados (PTAL) del relleno sanitario La Victoria fue diseñada por los ingenieros de la empresa prestadora de servicios públicos ISERVI E.S.P., la PTAL efectúa procesos biológicos y físicos que según los diseñadores permitiría mantener un equilibrio con respecto a la carga orgánica aplicada y el caudal tratado, que a medida que el tiempo transcurra la PTAL incrementara su capacidad de tratamiento, ya que el lixiviado por su antigüedad mejorara su concentración. Las memorias de cálculo de diseño de la PTAL están compuesta por las siguientes unidades de tratamiento (ilustración 2):

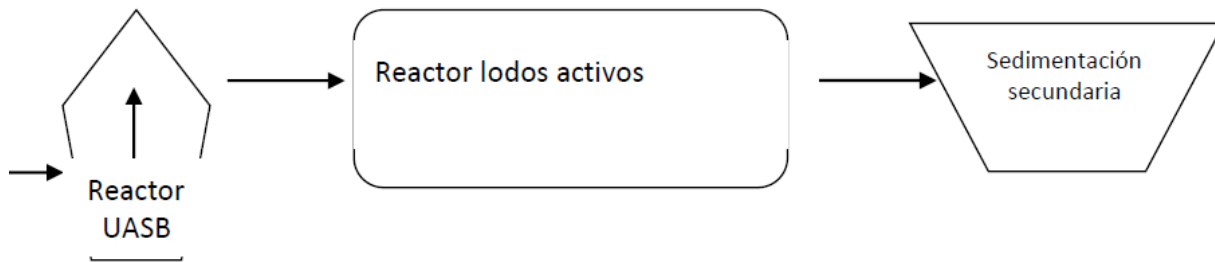


Ilustración 2: Diagrama de las etapas de tratamiento de lixiviado

Fuente: memorias técnicas de la PTAL

2.2.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR

Se implementa esta unidad para reducir la formación de depósitos pesados en las tuberías y conductos de la planta de tratamiento. Básicamente se logra una reducción en la frecuencia de limpieza del lodo y la espuma acumulada en las diferentes unidades de la PTAL (memorias técnicas PTAL, 2012).

Los lixiviados que se van a tratar tienen presencia de sólidos que pueden efectuar una acción abrasiva sobre los sistemas de tratamiento, además de colmatarlos por su sedimentación. Si no se controla este efecto, la vida útil de la tubería y de los equipos se puede acortar en forma impredecible. Parte de estos sólidos están conformados por material inerte (refractario, y/o sales disueltas) que no sufre ninguna acción en los procesos del tratamiento diseñados para el proyecto y por el contrario, comenzarán a acumularse en las unidades de proceso biológico en caso de no removerse, colmatándolas y disminuyendo su eficiencia. Por lo tanto es necesario contar con una estructura como tratamiento preliminar en la cual se remueva sólidos de fácil sedimentación, cuyo mantenimiento sea muy sencillo para extraer periódicamente las arenas y lodos acumulados en el fondo; para este efecto en el diseñador presenta como propuesta la construcción de un canal desarenador.

2.2.2 REACTOR UASB

El Reactor UASB (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket) fue desarrollado en la década del setenta por Gatzke Lettinga y Colaboradores en la Universidad Agrícola de Wageningen – Holanda. Este reactor ha sobresalido debido a la alta calidad del efluente producido y al relativo bajo costo del

tratamiento de aguas residuales de baja y mediana carga orgánica; ha sido ampliamente aplicado también al tratamiento de aguas residuales complejas con alta carga orgánica como los lixiviados. En el reactor UASB existe una zona de reacción compartida internamente y un separador de biogás. El lixiviado se distribuye en todas las secciones de reacción y en el manto de lodos, en esta sección los contaminantes orgánicos son convertidos en biogás. El biogás provee una adecuada mezcla en el lecho y se recolecta en las tres fases. Trabaja con altas concentraciones de biomasa del orden de 20 – 30 kg biomasa/m³ (5kg DQO/m³) o mejores con tiempos de retención hidráulica de 10 horas. Cuando un reactor UASB ya está funcionando a plena capacidad y el lodo es activo, se establecen dos partes definidas: El lecho donde se encuentran las altas concentraciones de sólidos y el Manto de lodos producido por el flujo ascensional del afluente a través del lecho por la mezcla que establece el gas producido en el lodo. El manto de lodos es la zona de mayor turbulencia en la que se encuentran partículas que sedimentan y otras que ascienden hasta que liberan el gas (memorias técnicas PTAL, 2012).

2.2.3. REACTOR DE LODOS ACTIVADOS

El sistema de tratamiento de lixiviados en climas fríos debe conformar un sistema totalmente aeróbico o facultativo en el peor de los casos, ya que un sistema anaeróbico no es eficiente. En este caso, el objetivo principal de un reactor de lodos activados es la oxidación total de materia orgánica e inorgánica presente en forma coloidal, lo cual reduce al mínimo la sedimentación y el tratamiento se hace dispendioso. Al oxidar esta materia, se generan productos más pesados de fácil remoción por sedimentación directa, tomando en cuenta que los requerimientos de oxígeno son altos para un producto que se generó en un ambiente anaerobio. En este sentido el diseñador seleccionó el sistema de lodos activos tomando en cuenta que, existen experiencias exitosas, las cuales se pueden tomar y no experimentar algo que no se ha aplicado aun. Las experiencias del R.S Antanas de la ciudad de Pasto, con este reactor han permitido remover la carga orgánica en más del 70% en esta unidad. Tomando en cuenta estas experiencias se diseñó un reactor de lodos activos diferenciándolo al modelo de dos unidades de oxidación conformados para dos tanques en concreto, para facilitar el mantenimiento (memorias técnicas PTAL, 2012).

2.2.4. SEDIMENTACION SECUNDARIA

Permite remover la biomasa y sólidos suspendidos de reactores biológicos secundarios, como los procesos de los lodos activados y los filtros percoladores. La biomasa generada en el tratamiento secundario constituye una carga orgánica significativa que es necesario remover. En estanques y lagunas la remoción se logra por sedimentación en el mismo reactor. En los sistemas de lodos activados y de cultivo adherido los sólidos se remueven en sedimentadores secundarios. Debido a que las características de los sólidos biológicos en los sistemas de cultivo suspendido y adherido tienen diferencias significativas, el diseño y operación de los sedimentadores secundarios en estos sistemas también son diferentes. El sedimentador secundario es importante debido a la carga grande de sólidos y a la naturaleza esponjosa del flóculo biológico de los lodos activados. Además, es conveniente que el lodo reciclado haya sido bien espesado (memorias técnicas PTAL, 2012).

3 Metodología

En respuesta a los objetivos planteados la metodología utilizada se basó en realizar un diagnóstico general de la Planta de Tratamiento de lixiviados, revisión y análisis de las características fisicoquímicas históricas existentes y revisión de las memorias de cálculo del diseñador, con el fin de identificar las fallas en las unidades que componen la planta y en los procesos que se dan dentro de ellas, posterior a los resultados del diagnóstico se implementó un plan de acción que tuvo como finalidad mejorar los procesos fisicoquímicos de la PTAL, este plan de acción se implementó con ayuda de la revisión bibliográfica que nos brindaba diferentes alternativas que mejoraban el funcionamiento de la PTAL. La metodología aplicada se dividió en las fases que se mencionan a continuación:

Fase I: Se presenta un diagnóstico, cuyo objetivo es el de identificar mediante una visita técnica y observación directa, los factores importantes de los procesos de la PTAL, haciendo a su vez una recolección de información sobre la planta.

Fase II: Se realizará un análisis de los factores encontrados en la fase 1, con la finalidad de identificar y priorizar los puntos críticos para posteriormente, implementar un plan de acción que busque mejorar el funcionamiento de la planta.

Fase III: Se analizarán los resultados de los planes de acción aplicados y se buscará mejorarlos mediante nuevos planes de manejo o rediseñando la PTAL.

4 Resultados y Análisis

FASE I: PROCESOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS LA VICTORIA DE IPIALES NARIÑO

4.1 DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO

La planta de tratamiento de lixiviados realiza un tratamiento preliminar, primario y secundario, divididos de la siguiente manera (Ilustración 3):



Ilustración 3: Vista general de la PTAL

Fuente: Propia

4.1.1 DESARENADOR

Se implementa esta unidad para reducir la formación de depósitos pesados en las tuberías y conductos de la planta de tratamiento (Ilustración 4).



Ilustración 4: Desarenadores

Fuente: Propia

Con el desarenador, básicamente se logra una reducción en la frecuencia de limpieza del lodo y la espuma acumulada en las diferentes unidades de la PTL. Esta estructura es un pre-tratamiento en el cual se remueven sólidos de fácil sedimentación, cuyo mantenimiento es sencillo para extraer periódicamente las arenas y lodos acumulados en el fondo. En la Tabla 1 se presentan las especificaciones técnicas que se tuvieron en cuenta para el diseño del desarenador.

Tabla 1: Especificaciones técnicas del desarenador

| Datos | Distancia |
|-------------------------------------|---|
| Largo total | 2,3m |
| Ancho total | 1,3m |
| Altura húmeda | 0,6m |
| Borde libre | 0,1m |
| Espesor de paredes | 0,15m |
| Tubería de entrada | PVC 8" |
| Tubería de salida | PVC DE 8" |
| Número de unidades de sedimentación | 4 |
| Volumen húmedo | 1,2m ³ |
| Separadores | Tres separadores en concreto de 0,5m de alto x 1m de largo x 0,05m de ancho |
| Tiempo de residencia hidráulico | 24,5 minutos |

4.1.2 REACTORES UASB

El proceso de la PTAL es un sistema de tratamiento basado en la digestión anaerobia como principal tratamiento, el cual es denominado UASB (Ilustración 5)



Ilustración 5: Reactor UASB

Fuente: Propia

Las bases de este proceso son un conjunto de bacterias que, en ausencia de oxígeno, se encargan de descomponer la materia orgánica en compuestos más simples a través de una serie de fases en las cuales se obtienen diferentes productos, una menor cantidad de carga orgánica que es sinónimo de menor contaminación, además de la obtención de biogás que es un combustible renovable de buen rendimiento energético. En la Tabla 2 se muestran las especificaciones técnicas de los reactores UASB.

Tabla 2: Especificaciones técnicas reactores UASB

| Datos | Distancia |
|---------------------------------|------------------------------|
| Largo total | 2,5m |
| Ancho total | 2,5m |
| Altura húmeda | 3m |
| Borde libre | 0,5m |
| Espesor de paredes | 0,3m |
| Tubería de entrada x unidad | PVC 6" por ambos extremos |
| Tubería de salida x unidad | PVC DE 6" por ambos extremos |
| Altura lecho de lodos | 1m |
| Volumen lecho de lodos | 6,25m ³ |
| Volumen del reactor | 18,75m ³ |
| Tiempo de residencia hidráulico | 6 horas |

4.1.3 REACTOR DE LODOS ACTIVADOS

Los reactores de lodos activados (Ilustración 6), tienen como objetivo principal la oxidación total de la materia orgánica e inorgánica presente en forma coloidal. Al oxidar la materia orgánica, se generan productos más pesados de fácil remoción por sedimentación directa, tomando en cuenta que los requerimientos de oxígeno son altos para un producto que se generó en un ambiente anaerobio.



Ilustración 6: Reactor de lodos activados

Fuente: Propia

En la Tabla 3 se presentan las especificaciones técnicas de los reactores de lodos activados, según su diseño tiene un tiempo de retención hidráulico de 6 horas y se debe hacer una purga de lodos cada 10 días.

Tabla 3: Especificaciones técnicas de los reactores de lodos activados

| Datos | |
|-------------------------------------|----------------------|
| Tiempo de residencia hidráulico | 6 Horas |
| Volumen del reactor | 172.8 m ³ |
| Profundidad | 3 m |
| Edad de lodos | 10 días |
| Relación (alimento/microorganismos) | |

4.1.4 SEDIMENTACIÓN SECUNDARIA

Este proceso permite remover la biomasa y los sólidos suspendidos de reactores biológicos secundarios, como es el proceso de lodos activados, la biomasa generada en estos reactores constituye una carga orgánica significativa que es necesario remover (Ilustración 7).



Ilustración 7: Sedimentador secundario

En la Tabla 4 se presentan las especificaciones técnicas del sedimentador secundario, donde el tiempo de retención hidráulica es de 20.8 horas para poder recircular los lodos a los reactores UASB.

Tabla 4: Especificaciones técnicas del sedimentador secundario

| Datos | Especificación |
|-----------------------------------|------------------------|
| Cantidad de sedimentadores | 2 |
| Largo total | 5m |
| Ancho total | 2,5m |
| Altura húmeda | 3m |
| Borde libre | 0,5m |
| Espesor de paredes | 0,3m |
| Tubería de entrada x unidad | PVC 6" |
| Tubería de salida x unidad | PVC DE 6" |
| Altura lecho de lodos | 1m |
| Volumen lecho de lodos por unidad | 12,5m ³ |
| Volumen por cada sedimentador | 37,5m ³ |
| Tiempo de residencia hidráulico | 20,8 horas = 0,86 días |

4.1.5 LECHOS DE SECADO

En la mayoría de los procesos de tratamiento primario y secundario se producen lodos que hay que tratar de forma adecuada. Los lodos que resultan únicamente de los procesos de separación sólido – líquido, se catalogan como lodos primarios y los lodos que provienen de procesos biológicos se catalogan como lodos secundarios. Básicamente las sustancias contaminantes que se separan en los procesos de tratamiento se encuentran finalmente en esta unidad (Ilustración 8).

*Ilustración 8: Lechos de secado*

El secado al aire de los lodos en los lechos de arena es uno de los métodos más utilizados por el mecanismo de percolación y evaporación. En la Tabla 5 se muestran las especificaciones técnicas de los lechos de secado.

Tabla 5: Especificaciones técnicas de los lechos de secado

| | | | | |
|-------------------------|---|----|---|-------|
| Número de unidades | = | n | = | 4 |
| Largo | = | L | = | 4 m |
| Ancho | = | B | = | 4 m |
| Altura lodo dispuesto | = | H | = | 0,3 m |
| Altura lecho filtración | = | HI | = | 0,3 m |

4.2 OPERACIÓN DE LA PTAL

Durante las visitas realizadas a la planta de tratamientos de lixiviados (PTAL), se logró evidenciar que el sistema de tratamiento está adaptado a recomendaciones como las que hace Lemos (2006) en su libro “Biological Wastewater Treatment” (Ilustración 9), y la Resolución o33o de 2017 donde reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura. En la actualidad el sistema opera en un 50% en cuanto eficiencia, esto se debe a las falencias que presentan varias de las unidades pues se saturan de lodo y no permite tiempos de retención suficientes para disminuir las cargas de contaminantes.

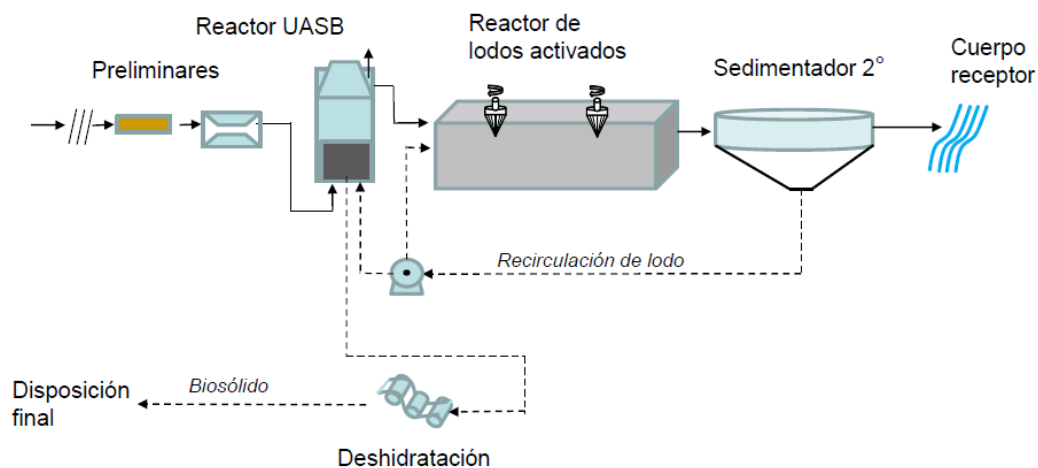


Ilustración 9: Esquema de funcionamiento de la planta

Fuente: Tomada de Lemos (2006)

4.3 PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS

La planta de tratamiento está diseñada para recibir un caudal máximo de 86.4 m³/d, el cual corresponde a los lixiviados producidos en la actual área de disposición que se encuentra en plan de cierre (celda de contingencia) y los que se producirán a futuro en la nueva área de disposición (celda # 5). Al iniciar la práctica se participó en el cierre de una celda y la apertura de otra, donde se evidenció mediante mediciones de caudal, cuál era el comportamiento de este mientras se cerraba una celda y se abría otra.

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos del caudal que ingresa a la planta de tratamiento en el primer semestre del 2022, donde se evidencia un crecimiento progresivo del caudal de ingreso a la planta, el mes que presenta mayor caudal es el mes de julio, mes donde se clausuró la celda de contingencia y se dio apertura a la celda # 5, se esperaba este incremento del caudal dado que ya se recibe el lixiviado de dos celdas. Con los cálculos y análisis ya mencionados se puede dar certeza que el sistema de tratamiento de lixiviados no presenta alteraciones en cuanto a desbordes ya que la planta está diseñada para recibir 86.4 m³/d, y hasta la fecha el caudal máximo recibido es 26.19 m³/d.

Tabla 6: Caudal de ingreso promedio a la PTAL

| CAUDAL (m ³ /día) | | | | | | |
|------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO |
| 9,47 | 9,82 | 9,87 | 13,99 | 19,62 | 21,02 | 26,19 |

FASE II: PUNTOS CRÍTICOS ENCONTRADOS EN LA FASE 1 Y PLAN DE ACCIÓN PARA MEJORARLOS

4.4 FALLAS ENCONTRADAS EN LA VISITA TÉCNICA

La visita técnica se realizó con el fin de recolectar información y caracterización del área donde se encuentra ubicada la planta, se hizo una inspección visual de la infraestructura con la finalidad de determinar las posibles fallas técnicas visibles, como fugas y puntos críticos que originan deficiencias en el proceso de tratamiento.

En la vista general de la Ilustración 2 se mostró la disposición de cada una de las estructuras que conforman la PTAL y teniendo en cuenta que el tratamiento primario se ubica en la parte alta o

cabecera del predio y el tratamiento secundario está localizado en la parte plana, con una cota más o menos inferior, con esto se garantiza su funcionamiento por gravedad.

4.5 FALLAS EN EL TRATAMIENTO PRELIMINAR

Dentro de la sección del tratamiento preliminar se encuentra una cajilla de muestreo que permitió tomar muestras para el control del sistema de tratamiento, conforme la Autoridad Ambiental lo requiera. Esta unidad está formada por una vía de acceso en tubería PVC de 10" que viene del relleno sanitario y una salida en tubo PVC de 10", después pasa a una cajilla de derivación de excesos, esta cajilla es la encargada de ajustar el caudal que ingresa a la planta a un 1 L/s, Las tuberías que conducen a esta unidad se encuentran colmatadas y en corrosión por los años que llevan en funcionamiento, tal como se muestra en la Ilustración 10.



Ilustración 10: Entrada a la planta

Fuente: propia

Los desarenadores también presentan fallas en su estructura por falta de mantenimiento y corrosión de las tuberías de acceso (Ilustración 11).



Ilustración 11: Desarenadores

Fuente; Propia

4.6 FALLAS EN TRATAMIENTO PRIMARIO

La PTAL como tratamiento primario cuenta con dos reactores UASB que trabajan en paralelo, después pasan a dos reactores de lodos activados que al igual trabajan en paralelo (Ilustración 12). Los reactores UASB no operaban de forma adecuada, trayendo consigo la muerte de los microorganismos que son los encargados de degradar la materia orgánica que ingresa al reactor. Para tratar de dar solución a las fallas encontradas en esta unidad se inició vaciando los reactores y retirando los lodos inactivos que se encontraban en el fondo del reactor, después de realizar una adecuada limpieza se va a recircular lodo activo de las piscinas de sedimentación que cuentan con las bacterias adecuadas para degradar la materia orgánica, con esto se busca reactivar los reactores UASB. Esta unidad también requiere mantenimiento en el sistema de bombeo, la bomba de succión es la encargada de bombear el lixiviado que ingresa a los reactores UASB, después de arreglada la bomba se recomienda un periodo de bombeo de dos horas, cada vez que se llene un tanque de lodos.

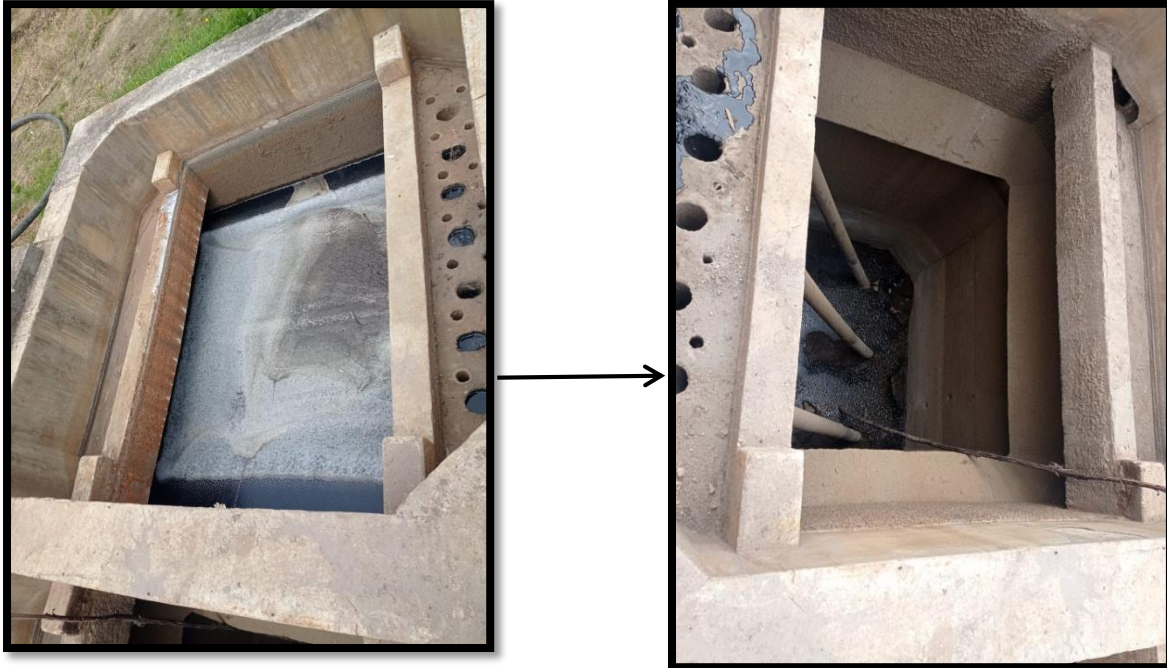


Ilustración 12: Reactores UASB (uno en funcionamiento y otro en mantenimiento)

Entre los reactores UASB y los reactores de lodos activados presentan fallas en las tuberías por carbonización de estas, esto se debe al mal procedimiento de las unidades anteriores, la tubería afectada provoca el rebose en la cajilla de muestreo en épocas de lluvia. Para mitigar esta problemática se solicitará a la oficina de recursos físicos de la empresa ISERVI E.S.P. una tubería de 6" de diámetro y una unión de 6" para hacer el cambio (Ilustración 13).



Ilustración 13: Cajilla y tubería que conecta los reactores UASB con los reactores de lodos activados

4.7 FALLAS EN EL TRATAMIENTO SECUNDARIO

Los reactores de lodos activados es una de las unidades más afectadas, la función de esta unidad es terminar de oxidar la materia orgánica que quedó en el procedimiento anterior (reactores UASB), tomando en cuenta que los requerimientos de oxígeno son altos para un producto que se generó en un ambiente anaeróbico (UASB), para compensar la necesidad de oxígeno cada reactor cuenta con 47 difusores que deberían permanecer encendidos las 24 horas del día, pero por problemas de costos de energía se dejan encendidos solo 12 horas, esta falla en cuanto a costos de energía se ha venido realizando en los últimos años, esto ha generado daños en varios difusores porque se han colmatado de lodo que no se ha retirado en largos periodo (Ilustración 14). Apagar los difusores provoca que la materia orgánica no logre oxidarse completamente y formar compuestos más pesados que logren sedimentarse con facilidad, por ende los reactores de lodos activados presentan un proceso deficiente, la primera medida que se está tomando para mitigar esta deficiencia es realizar una adecuada limpieza y retiro de lodos colmatados, también se tratará de reemplazar los difusores dañados, se espera también que al adecuar el funcionamiento de los reactores UASB sea suficiente la energía que se puede suministrar para los reactores de lodos activados, teniendo en cuenta que se cambiaría a una aireación escalonada, repartiendo las 12 horas permitidas de energía durante todo el día (Ilustración 14).



Ilustración 14: Mantenimiento de Reactor de lodos activados zonas internas

Fuente: propia



Ilustración 15: Mantenimiento reactor de lodos activados zona externa

Fuente: propia

Considerando el tiempo que la empresa se puede permitir para el gasto energético, se programó un cronograma para el encendido y apagado de los reactores de lodos activados, donde se garantice las fases de nitrificación y desnitrificación.

- De 9 p.m. a 6 a.m. Encendido
- De 6 a.m. a 7:00 a.m. se apaga
- De 7:00 a.m. 8:00 a.m. se enciende
- De 8:00 a.m. 9:00 a.m. se apaga
- De 9:00 a.m. a 10:00 a.m. se enciende
- De 10:00 a.m. a 11:00 a.m. se apaga
- De 11:00 a.m. a 12:00 p.m. se enciende
- De 12:00 p.m. a 2:00 p.m. se apaga
- De 2:00 p.m. a 3:00 p.m. se enciende
- De 3:00 p.m. a 4:00 p.m. se apaga

- De 4:00 p.m. a 5:00 p.m. se enciende
- De 5:00 p.m. a 9:00 p.m. se apaga

4.8 FALLAS EN LECHOS DE SECADO

En el diagnóstico de esta unidad se determinó que nunca han sido utilizados porque no cuentan con tubería de drenaje y tampoco con una tubería que conduzca los lodos del reactor UASB a los lechos. La alternativa para tratar de dar solución es instalarle una tubería de drenaje y en cuanto a la conducción se la puede realizar con ayuda de una bomba y mangueras con las que cuenta la planta (Ilustración 16).



Ilustración 16: Lechos de secado en mantenimiento

Fuente: Propio

4.9 CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Para conocer a profundidad el estado en el que se encuentra el funcionamiento de la planta, se solicitó realizar una caracterización del mismo con un laboratorio certificado, ya que la empresa no cuenta con los instrumentos necesarios para llevar a cabo este procedimiento.

Los parámetros que se monitorean actualmente son mínimos y se enlistan a continuación.

- Caudal
- pH (indicadores en tiras de pH)
- Temperatura

Teniendo en cuenta estas consideraciones se realiza esta solicitud porque la normativa se ha vuelto cada más exigente a medida que pasa el tiempo y ha incluido más parámetros a analizar. También se solicita un equipo mínimo de laboratorio como es un pH metro, un kit para medir la alcalinidad, un termómetro de más precisión, que deben encontrarse dentro de las instalaciones de la planta para análisis in situ.

FASE III: ANÁLISIS DE LOS PLANES DE ACCIÓN APLICADOS.

4.10 RESULTADOS DEL PLAN DE ACCIÓN

4.10.1 RESULTADOS EMITIDOS POR EL LABORATORIO CERTIFICADO

La empresa ISERVI E.S.P. tiene toda la disposición para mejorar los procesos de tratamiento de lixiviados y por ende accedió a realizar y llevar a cabo en lo posible el plan de acción para el mejoramiento de la unidades que componen la planta, es por esto que mediante una convocatoria por prestación de servicios profesionales, se contrató a la empresa SERVICIOS GEOLÓGICOS INTEGRADOS S.A.S, CONSULTORIA E INGENIERÍA, quienes fueron los encargados de realizar la caracterización de los lixiviados y por ende emitir los resultados, teniendo en cuenta la normativa de vertimiento (resolución 0631 de 2015). Las muestras se tomaron en el afluente y efluente de la planta y los parámetros que se tuvieron en cuenta son los que se mencionan en la Tabla 8.

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

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

Tabla 7: Eficiencia de remoción de contaminantes

| Parámetro | Lixiviado afluente | Lixiviado efluente | Eficiencia | Res. 0631 de 2015 |
|-----------|--------------------|--------------------|------------|-------------------|
| pH | 7,60 | 8,33 | NA | 6-9 |

| | | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|------|------|
| T(°C) | 14 | 12 | NA | NA |
| DBO ₅ mg/L | 6695 | 4886 | 27% | 2000 |
| DQO mg/L | 9845,35 | 7185,78 | 27% | 800 |
| SST mg/L | 2010 | 1910 | 5% | 400 |
| Hg mg/L | 0,001 | 0,001 | 0% | 0.01 |
| Cd mg/L | 0,003 | 0,003 | 0% | 0.05 |
| Fenoles mg/L | 0.26 | 0,33 | -8% | 0.2 |
| Cr ⁺⁶ mg/L | 0.050 | 0,050 | 0% | 0.5 |
| Al mg/L | 2,733 | 2,373 | 13% | 3 |
| Pb mg/L | 0,010 | 0,010 | 0% | 0.2 |
| Fe mg/L | 8,879 | 3,015 | 66% | NE |
| Ba mg/L | 0,296 | 0,117 | 60% | 2 |
| Acidez mg CaCO ₃ /L | 19,71 | 8,83 | 55% | AR |
| Alcalinidad total mg/L | 1564,62 | 1894,63 | -21% | AR |
| Dureza total mg CaCO ₃ /L | 826,65 | 493,99 | 40% | AR |
| Ni mg/L | 0,010 | 0,010 | 0% | 0.5 |
| Zn mg/L | 0,021 | 0,017 | 19% | 3 |
| Sulfatos mg/L | 11 | 11 | 0% | 600 |
| Cianuros mg/L | 2,27 | 3,79 | -66% | 0.5 |
| Cloruros mg/L | 24955,03 | 21561,14 | 13% | 500 |

NOTA: NA: No Aplica, NE: No específica, NA: Análisis y reporte

Las Figuras 17 y 18 muestran los muestreos realizados en el efluente y afluente de la PTAL.



Ilustración 17: Registro fotográfico toma de muestras a la entrada de la PTAL



Ilustración 18: Registro fotográfico toma de muestras salida de la PTAL

4.10.2 ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS EMITIDOS POR EL LABORATORIO

La caracterización fisicoquímica de los lixiviados provenientes del relleno sanitario La Victoria, en comparación con el artículo 14 de la Resolución 0631 de 2015 permite concluir que, los resultados de los parámetros registrados in situ como pH, temperatura, sólidos sedimentables y caudal presentaron valores acordes al tipo vertimiento. El pH, presentó un comportamiento homogéneo, con tendencia alcalina, en consecuencia, se da el cumplimiento reglamentario ante los límites mínimos y máximos permisibles establecidos en el artículo 14 de la Resolución 0631 de 2015. Con respecto a la temperatura, esta no presentó cambios considerables que puedan incidir en aportes de contaminación térmica. Es importante tener en cuenta que, el caudal es continuo, en función de la de las actividades de descomposición de los residuos.

Los parámetros DBO₅ y DQO, reportaron valores de 6695 a 4886 mg/L y 9845,35 a 7185,78 mg/L valores acordes a las actividades realizadas en las unidades operativas de la empresa, con los valores arrojados de DBO₅ y DQO se determina la biodegradabilidad del lixiviado que ingresa a la planta con la relación (DBO₅ / DQO), donde el resultado obtenido es 0.6, valor que según la literatura está en un rango considerado muy biodegradable, pero sigue presentando incumplimiento normativo según lo establecido en el Artículo 14 de la Resolución 0631 de 2015. En lo que refiere a compuestos metálicos, en general, los valores registrados se encuentran por debajo del límite de cuantificación de la técnica de análisis utilizada por el laboratorio para cada uno de los parámetros, indicando la escasa o nula presencia de compuestos metálicos, así mismo se obtiene cumplimiento a la Resolución 0631 de 2015 Artículo 14.

Las características fisicoquímicas del vertimiento y con relación al grado de acidez y alcalinidad, se puede concluir que las tuberías del alcantarillado o sistema posterior pueden verse afectadas, pues la Dureza Total al medir la concentración de minerales disueltos de calcio y magnesio representa con su contenido significativo según el reporte la acumulación en tuberías y el deterioro de la PTAL por lo que se recomienda realizar un seguimiento a esta variable. Es importante aclarar que la Dureza Total, Dureza Cálctica, Alcalinidad y Acidez no presentan requerimiento normativo que establezca un valor límite admisible, sin embargo, en la Resolución 0631 de 2015 se expone la condición de “Análisis y Reporte”.

En consecuencia y con base en los resultados obtenidos y expuestos por el laboratorio, es preciso inferir que, en la mayoría de los parámetros se incumple con los lineamientos establecidos en el Artículo 14 “Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas – ARnD de actividades asociadas con servicios y otras actividades para el tratamiento y disposición de residuos”;

Con estos resultados empezamos la puesta en marcha de los planes de acción para mejorar el funcionamiento de la PTAL, donde el principal punto a enfocarse es el mantenimiento de la planta de tratamiento y/o el rediseño de esta.

4.10.3 ANÁLISIS Y SEGUIMIENTOS DE LOS PARÁMETROS AFECTADOS EN LA CARACTERIZACIÓN

Se enlistan los parámetros que más enmarcan el funcionamiento de la planta y con los cuales se inició el plan de acción para mejorar su rendimiento y eficiencia.

4.10.3.1 ALCALINIDAD

La alcalinidad determina la capacidad del agua para neutralizar los efectos ácidos que sobre ella actúen, estos ácidos son principalmente carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, entre otros, también es la capacidad del agua para resistir un cambio en el pH cuando se le agrega ácido. La alcalinidad está directamente relacionada con el pH, porque cuanto mayor es la alcalinidad del agua es más difícil que cambie el pH debido a su capacidad para neutralizar el ácido, en base a estos resultados se procedió con acciones para mitigar el incremento de esta con el fin de modificar el pH a la entrada de la planta, ya que por el sistema que la compone es necesario que el pH sea igual o cercano a 7.

Para llevar a cabo esta modificación del pH a la entrada de la planta fue necesario y de suma importancia adquirir cal, que mediante una mezcla con agua se transforma a su forma más eficiente de cal apagada o hidratada que se agregó mediante un dosificador en un ensayo de laboratorio (EMPOOBANDO) para ver su comportamiento y reacción, que dependiendo de esta se dosificaría directamente in situ (Ilustración 19).



Ilustración 19: Ensayo con dosificación de cal

También fue necesario adquirir un kit para medir la alcalinidad en las instalaciones de la planta ya que es un parámetro fundamental y necesita estar monitoreando constantemente en conjunto con el pH. La empresa adquirió este equipo, como se había mencionado está en total compromiso para mejorar sus procesos, lastimosamente al ser una empresa pública de limitados recursos, se toma un tiempo considerable en la adquisición de estos, a la fecha de entrega de este informe recibí el kit de alcalinidad y el pH metro que serán utilizados in situ para el monitoreo constante de los parámetros (Ilustración 20).



Ilustración 20: pH metro adquirido por ISERVI E.S.P.

4.10.4 ANALISIS Y SEGUIMIENTO DE LAS FALLAS ENCONTRADAS EN LOS REACTORES UASB

Cuando se logró estabilizar el pH se inició con la pronta recuperación del inóculo en los reactores UASB, el sistema donde se da los procesos bacteriológicos y microbiológicos que debe encontrarse en la capacidad de remover hasta un 50% de la materia orgánica, para esta acción se tomó el inóculo de las piscinas de recirculación que por análisis visual contaba con las bacterias necesarias para volver a arrancar los reactores UASB (Ilustración 21).



Ilustración 21: Recirculación de inóculo hacia los reactores UASB

Acompañado de esto se inició el cambio de tuberías de conducción de lixiviado, del relleno hacia la planta, y tuberías de esta, que se encontraba en condiciones desfavorables y limitaba su funcionamiento (Ilustración 22 a la 24).



Ilustración 22: Cambio de tubería de conducción de lixiviados



Ilustración 23: Cambio de tubería de entrada a la PTAL



Ilustración 24: Cambio de tubería entrada reactores UASB

4.10.5 ANALISIS Y SEGUIMIENTO A LAS FALLAS ENCONTRADAS EN LOS REACTORES DE LODOS ACTIVADOS.

Esta es una de las unidades que más deficiencias presenta, con el mantenimiento realizado y el cronograma que se puso en marcha para su encendido y apagado, se espera un rendimiento más favorable que hasta la fecha de entrega de este informe no se ha logrado evidenciar porque un nuevo arranque de toda la planta necesita más de seis meses para ver resultados (Ilustración 25).



Ilustración 25: Estado actual de los reactores de lodos activados

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Como recomendación principal es la de realizar monitoreos periódicos (semestral o anualmente) de los afluentes y efluentes de cada una de las unidades de la PTL, pues el único monitoreo con el que cuenta la PTAL es el que se llevó a cabo durante esta práctica profesional.
- La planta necesita una optimización en sus procesos físicoquímicos, teniendo en cuenta que sus porcentajes de remoción de DBO₅ y DQO oscilan entre el 26 % para cada uno, con este resultado asumimos que este proceso es prácticamente deficiente y no cumple con los parámetros de vertimiento que exige la resolución 0631 de 2015.
- La capacitación de los operarios juega un papel fundamental en el buen funcionamiento de la planta, y más en esta empresa ISERVI E.S.P. que durante mi práctica me apoyo tanto en adquisición de implementos como en acompañamiento técnico, y tiene la mayor disposición para que sus procesos mejoren, teniendo en cuenta estas consideraciones los operarios deben estar en un constante aprendizaje, tanto en parte técnica como en manipulación de instrumentos.

6 REFERENCIAS

- Barba Ho, L. E. (2002). Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Santiago de Cali.
- Gaona Martínez, X. (2004). Obtenido de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3174/xgm1de1.pdf>.
- RAMÍREZ, RESTREPO, R., & CARDEÑOSA, M. (1999). Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos. Formulaciónes. - Ciencia, Tecnología y Futuro, 89-99.
- Lemus Chernicharo, C. (2006). *Biological Wasterwater Treatment in Warm Climate Regions* (Vol 1.), Brazil (pp. 700- 800): University of minas Gerais.
- Isla, R. (2005). Proyectos de plantas de tratamiento de aguas. Aguas de proceso, residuales y de refrigeración. Madrid, España: Bellisco Ediciones técnicas y científicas.
- Romero, J. A. (2013). Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.