

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO
SANITARIO EL OJITO EN EL MUNICIPIO DE POPAYÁN (CAUCA) MEDIANTE
EL USO DE FILTROS EMPACADOS (CARBÓN MINERAL Y GRAVA) A
ESCALA PILOTO.**



**ASTRID CAROLINA GONZALEZ GUEVARA
LINA MARCELA TAIBE PEREZ**

**CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYAN, CAUCA
2020**

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO
SANITARIO EL OJITO EN EL MUNICIPIO DE POPAYÁN (CAUCA) MEDIANTE
EL USO DE FILTROS EMPACADOS (CARBÓN MINERAL Y GRAVA) A
ESCALA PILOTO.**



**ASTRID CAROLINA GONZALEZ GUEVARA
LINA MARCELA TAIPE PEREZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Ambientales y Sanitaria

Director

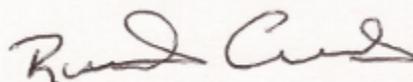
M.S.c. Ronald Édinson Cerón

**CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYAN, CAUCA**

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

una vez revisado el documento final del trabajo de grado titulado “evaluación del tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario el ojito en el municipio de Popayán (cauca) mediante el uso de filtros empacados (carbón mineral y grava) tipo pistón a escala piloto”; realizado por las alumnas Astrid Carolina González y Lina Marcela Taipe, se autoriza la sustentación de este para optar al título profesional en Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.



Ronald Edinson Cerón, Ingeniero Ambiental,
M.S.c.
Director
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



Cesar Julián Muñoz, Ingeniero Ambiental,
M.S.c.
Jurado
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



Julián Andrés Betancourt, Ingeniero Químico
M.S.c.
Jurado
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios por darme la vida y haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional, a mi madre por ser el pilar más importantes en este proceso, por darme su cariño y apoyo incondicional, a mi hijo por darme la fuerza para seguir y no desistir, por darme felicidad cada día de mi vida, a mi padre que a pesar de la distancia que hemos tenido siento que estas aquí conmigo siempre y sé que este triunfo es especial para ti como lo es para mí, a mi hermana por tu apoyo incondicional y por compartir conmigo no solo los buenos momentos sino también los malos, a mi hermano por darme sabios consejos y estar conmigo en cada paso, a mi amiga Lina por cada momento, por cada lagrima, risa y palabra de aliento en este proceso.

Astrid Carolina González Guevara

Le dedico este trabajo a Dios por brindarme sabiduría, paciencia y voluntad para llevar a cabo este sueño tan anhelado.

A mi amado abuelo que desde el cielo me acompañó durante todo este proceso, este triunfo es en nombre de él ya que siempre fue mi inspiración, porque con su amor y dedicación que me brindó hasta el último momento logró sembrar en mi esa confianza que permitió no darme por vencida fácilmente hasta cumplir con este sueño.

A mis padres porque tengo la fortuna de tener a los mejores conmigo, por su amor incondicional, por nunca dejarme sola y por llenarme de valentía en los momentos difíciles. A mi abuela y mi hermano porque ellos son mi tesoro y la razón de toda mi felicidad. Este logro es por ustedes.

Lina Marcela Taipe Pérez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por bendecirme la vida y guiarme en cada paso de mi proceso profesional, ser mi apoyo, fortaleza en momentos de debilidad y dificultad.

Gracias a mis padres María Lucila Guevara y Duilo González por ser los principales inspiradores de mis sueños, por confiar y por creer en mis aspiraciones.

A Lina Marcela Taipe por no solo ser mi compañera de tesis sino mi mejor amiga, gracias por aguantarme, tienes un carácter un poco pesado y a veces tuvimos nuestros roces, pero también sé que fueron muchos los momentos en que nos divertimos, gracias por tu paciencia, por tus palabras de aliento, de amor y esperanza en el momento en el que quería desistir y dejar todo ahí, nunca olvidare todas las adversidades que tuvimos en la ejecución de nuestra tesis, pero la pudimos superar juntas y aquí estamos a punto de culminar uno de nuestros sueños.

Agradezco al director de nuestra tesis ingeniero Ronald Cerón, por su tiempo, comentarios y sugerencias que enriquecen la presentación y el contenido del mismo. Igualmente, al ingeniero Diego encargado del relleno sanitario el ojito por permitir tomar la muestra del lixiviado objeto de estudio, a la Universidad Autónoma del Cauca por permitir utilizar el laboratorio de química donde se llevó a cabo la fase experimental del proyecto de investigación.

Astrid Carolina González Guevara

Agradezco a Dios por la vida, por sus bendiciones y por brindarme fortaleza en los momentos de dificultad.

Gracias a mis padres por los valores y la excelente educación que siempre me brindaron, por su confianza y por todo el apoyo que me ofrecieron en todo este largo proceso para que este sueño se pudiera cumplir.

A mi compañera de tesis Carolina González le agradezco su paciencia, su dedicación y su apoyo e incondicionalidad durante todo este tiempo, más que una amiga ella hace parte de mi familia.

Agradezco a nuestro director de tesis ingeniero Ronald Cerón, por disponer de su tiempo, por brindarnos su conocimiento y por guiarnos en todo este proceso. Al ingeniero Diego encargado del relleno sanitario el ojito por permitir y autorizar nuestra entrada durante los días de nuestra investigación.

Lina Marcela Taipe Pérez

Tabla de contenido	
RESUMEN	9
ABSTRAC	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I: PROBLEMA	13
1.1. Planteamiento del problema	13
1.2. Justificación	15
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
CAPÍTULO II: REFERENTES CONCEPTUALES	18
2.1. Antecedentes	18
2.2. Bases teóricas	20
2.3. Bases legales	31
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	32
3.1. Fase I: Diseño y construcción de los filtros para el post tratamiento de los lixiviados provenientes del relleno sanitario el ojito a escala piloto.	32
3.2. fase II: Verificación de la eficiencia de remoción de las unidades experimentales.....	39
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1. Presentación y análisis de los resultados obtenidos en la investigación.	44
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
5.1. CONCLUSIONES	58
5.2. RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros generales de lixiviados según la edad	22
Tabla 2. Resumen de procesos de tratamientos convencionales (biológicos y fisicoquímicos)	24
Tabla 3. Resumen de procesos de tratamiento de bajo costo	26
Tabla 4. Resumen de procesos de tratamientos avanzados con membrana.....	27
Tabla 5. Materiales.....	36
Tabla 6. Parámetros a evaluar	42
Tabla 7. Porcentaje de porosidad del lecho (carbón mineral).....	44
Tabla 8. Porcentaje de porosidad del lecho (grava)	44
Tabla 9. Medición de parámetros día 1	48
Tabla 10. Medición de parámetros día 2	48
Tabla 11. Medición de parámetros día 3	49
Tabla 12. Medición de parámetros día 4	49
Tabla 13. Medición de parámetros día 5	49
Tabla 14. Medición de parámetros día 6	50
Tabla 15. Medición de parámetros día 7	50
Tabla 16. Medición de parámetros día 8	50
Tabla 17. Medición de parámetros día 9	51
Tabla 18. Medición de parámetros día 10	51
Tabla 19. Medición de parámetros día 11	52
Tabla 20. Medición de parámetros día 12	52
Tabla 21. Medición de parámetros día 13	52
Tabla 22. Porcentaje de remoción SST	53
Tabla 23. Porcentajes de remoción SST	55
Tabla 24. Comparación de medias SST (mg/l).....	56

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Resumen de tratamientos convencionales.....	25
Imagen 2. Sistema de filtración combinado con osmosis inversa	27
Imagen 3. Filtración.....	28
Imagen 4. Parámetros máximos permisibles	31
Imagen 5. Ubicación	32
Imagen 6. Elección del tamaño de los materiales.....	33
Imagen 7. Grava triturada	33
Imagen 8. Carbón triturado	34
Imagen 9. Porosidad del carbón mineral.....	35
Imagen 10. Tubo con grava	37
Imagen 11. Tubo con carbón.....	37
Imagen 12. Instalación del sistema	39
Imagen 13. Recolección de muestras.....	40
Imagen 14. Medición de parámetros.....	41
Imagen 15. Tabla T-Student.....	43
Imagen 16. Montaje final del sistema de tratamiento	47
Imagen 17. Lixiviado antes y después de la remoción.....	56

LISTA DE GRÁFICAS

Grafica 1. Resultados SST en filtro de grava.....	53
Gráfica 2. Resultados SST en filtro de carbón.....	54
Gráfica 3. Resultados SST en filtro de carbón y grava	54

RESUMEN

El objetivo del trabajo de investigación fue evaluar un tratamiento opcional para los lixiviados del relleno sanitario El Ojito en el municipio de Popayán (Cauca) mediante el uso de filtros empacados (carbón mineral y grava) a escala piloto. Se construyó cada filtro en tubos PVC empacados uno con grava y el otro con carbón mineral, el líquido objeto de estudio (lixiviado maduro) tuvo un sentido de flujo descendente en el proceso de filtración. Para el seguimiento se tomaron muestras a la entrada y salida de cada filtro, los parámetros evaluados fueron SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST), CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, TEMPERATURA Y pH, se realizaron 13 muestras durante 13 días consecutivos, el sistema de filtración resultó eficiente en la disminución de los anteriores parámetros arrojando porcentajes máximos de remoción del 65% para el filtro de grava y 44% para el filtro de carbón en cuanto a los SST. Realizando el porcentaje de eficiencia de remoción para cada filtro, el filtro con mayor rendimiento en la remoción de SST fue el de carbón mineral con un porcentaje de 29.18%. Analizando los resultados obtenidos, se pudo concluir que los dos filtros tuvieron eficiencia de remoción en los parámetros antes mencionado durante los 13 días de estudio, esto debido a la capacidad de adsorción que tienen los materiales filtrantes utilizados en la investigación y a las fuerzas electrostáticas que existen en cada filtro.

Palabras claves: carbón mineral, grava, lixiviado, adsorción, fuerzas intermoleculares, SST.

ABSTRACT

The aim of this research project was the evaluation of an optional leachate treatment at “El Ojito” landfill in the municipality of Popayan (Cauca) through the use of mineral carbon and gravel filled filters at pilot scale. Everyone of the filters were built with PVC pipes; some of them filled with gravel and the other ones with mineral carbon. The liquid (old leachate) which was under study, flowed downward during the filtration process. Some samples of this liquid were taken in and out of each filter once a day for monitoring. The evaluated parameters were TSS, ELECTRICAL CONDUCTIVITY, TEMPERATURE and pH. In total, 13 samples were taken during 13 consecutive days. The filter system eventually was found to be efficient in the reduction of the previous parameters with maximum removal percentages of 65% in the gravel filter and 44% in the mineral coal filter for TSS. Calculating the removal efficiency percentage for each filter, it was found that the mineral carbon filter showed better performance in the removal of TSS with percentages of 29.18%. By analyzing the results, it was determined that both filters are efficient to remove the parameters mentioned for 13 days due to the absorption capacity of the filter materials used and the electrostatic forces existing in each filter.

Key Words: mineral carbon, gravel, leachate, absorption, intermolecular forces, TSS.

INTRODUCCIÓN

El medio ambiente es un sistema formado por elementos naturales y artificiales en donde nos desenvolvemos todos los seres vivos, sin embargo, la acción directa del hombre ha ido generando contaminación y esto ha causado desde hace muchos años la destrucción del planeta. La producción de residuos sólidos es uno de los principales problemas que ha ido aumentando a través del tiempo y que a su vez ha ido desencadenando otros tipos de problemáticas [1].

La descomposición de estos residuos sólidos en los rellenos sanitarios genera principalmente emisiones gaseosas y descargas líquidas conocidas como lixiviado. Este líquido tiene elementos con alto grado de toxicidad por tal motivo se les debe realizar un tratamiento y manejo adecuado para prevenir la contaminación de aguas subterráneas, aguas superficiales y suelo ya que son recursos importantes dentro de las dinámicas sociales, económicas y ambientales, por consiguiente, es necesario e importante protegerlos y evitar en lo posible descargas con altos grados de contaminación [2].

A lo largo del tiempo se han ido creando diferentes tipos de tratamientos con tecnologías avanzadas que aportan significativamente a la reducción de ciertas partículas contaminantes de los lixiviados, sin embargo, se debe tener en cuenta que existen muchas poblaciones con escasos recursos económicos, además de eso no cuentan con grandes espacios e infraestructura apropiada lo que les impide la utilización de estas nuevas tecnologías.

En este sentido, el propósito de este trabajo es generar una alternativa de buen rendimiento en cuanto a eficiencia de remoción de SST, de bajo costo y con materiales de fácil adquisición que contribuyan a mejorar los procesos de descontaminación de los lixiviados.

CAPÍTULO I: PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

A nivel mundial se ha incrementado la generación de residuos sólidos urbanos debido a factores como el crecimiento poblacional y a los cambios en las costumbres de consumo de los individuos, estos sucesos se consideran multiplicadores de la producción de residuos. Los países en vía de desarrollo son los que en su mayoría aportan grandes cantidades de desechos generando 1300 ton/año encabezados por Estados Unidos con 236 millones de ton/año, seguido por Rusia con 207.4 de millones Ton/años y en tercer lugar Japón con 52.36 millones de ton/año [2].

Esta problemática se ha ido incrementando a lo largo de los años, de igual manera que también se han ido buscando opciones que manifiesten un adecuado manejo de estos residuos, sin embargo la alternativa de mayor uso en las ciudades grandes es la recolección y disposición final (relleno sanitario); aumentando así el volumen de los residuos, la producción de lixiviados y disminución de la vida útil del relleno, dejando rezagados el aprovechamiento, reciclaje y tratamiento de los residuos [3].

En Colombia la protección del medio ambiente se creó cuando fueron expedidas las primeras normas que enmarcaron pautas para el desarrollo normativo ambiental, el derecho a gozar de un ambiente sano quedó consagrado en la constitución política de Colombia, sin embargo en gran parte del territorio no se han implementado esquemas de gestión ambiental, lo que ha producido un deterioro en el medio ambiente, en especial por la mala disposición de los residuos sólidos (en botaderos a cielo abierto o en los cuerpos de agua) causando un deterioro en la calidad de vida de la población que ve afectado su entorno natural y en consecuencia su salud [4].

Así como los demás países del mundo, Colombia no ha sido ajeno a un sin número de impactos ambientales asociados al indiscutible aumento en la producción de residuos sólidos producto de las actividades humanas en áreas urbanas; factores como la concentración demográfica, la globalización y el corto ciclo de vida de los productos hace que diariamente se generen grandes volúmenes de residuos, que sin un uso posterior terminan siendo depositados en rellenos contaminando los recursos naturales allí existentes [2].

El relleno sanitario de acuerdo con la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), es una técnica para la disposición de residuos sólidos urbanos en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestia o peligro para la salud y seguridad pública, sin embargo los procesos de descomposición pueden dar lugar a la generación de gases, partículas en suspensión y segregación de líquidos lixiviados [5]. La generación de lixiviado es un problema que afecta los recursos naturales tanto el suelo como aguas freáticas, ocasionando efectos nocivos a la salud de las poblaciones, exponiéndolas a un alto riesgo toxicológico [4].

De los 39 municipios que tiene el Cauca 25 tienen botaderos a cielo abierto una forma inadecuada de disposición final de los residuos sólidos urbanos, lo que ocasiona una problemática ambiental debido a que no existen procesos de manejo, tratamiento y disposición de lixiviados [6].

Para el caso particular del municipio de Popayán capital del Departamento del Cauca, cuenta con un relleno sanitario llamado "El ojito" el cual recibía un promedio de 200 ton/día de residuos sólidos, una producción de lixiviados de 1 l/s, con concentraciones de DBO_5 que oscilan entre 4000 y 6000 mg/l dependiendo de la época del año. En el 2013 se realizó el cierre de este sitio, lo que implica que la generación de estos lixiviados se encuentre en un estado de maduración, por ende contienen altas cargas químicas y es difícil su estabilización biológica [7].

Estos lixiviados tienen un proceso de tratamiento el cual fue diseñado y proyectado para un relleno en operación, sin tener en cuenta los lixiviados generados en la etapa de cierre y clausura del sitio, por tanto, las condiciones de tratamiento presuntivamente no alcanzan las exigencias ambientales, impacto que afecta a la fuente receptora de este vertimiento (río Cauca).

Por estos motivos es importante proponer unidades de tratamiento complementarias o que reemplacen a las actuales unidades utilizadas en la Planta de Tratamiento de Lixiviados (PTL) del relleno sanitario "El Ojito", que permitan reducir las cargas vertidas al río Cauca y los costos del tratamiento, en este caso por medio de dos filtros empacados y alimentados por el lixiviado proveniente del tratamiento biológico (Laguna de estabilización).

1.2. Justificación

Una consecuencia inevitable de la existencia de los rellenos sanitarios es la producción de lixiviado, que son una importante fuente de contaminación para los cuerpos de agua y suelo si no son tratados adecuadamente. Este líquido se caracteriza por tener altas concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos como, demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos y metales pesados lo que dificulta su tratamiento, por esta razón se deben establecer técnicas de tratamientos que permitan cumplir la normatividad ambiental vigente [8].

El tratamiento del lixiviado es una cuestión prioritaria ya que la composición de este líquido tiene elementos con un alto grado de toxicidad y estos terminan filtrándose en los mantos freáticos, evaporándose el contenido acuoso y los restos sólidos generando polución en el aire, por estas razones, es necesario considerar el tratamiento de los lixiviados, de tal manera que se disminuya su impacto contra el ambiente y la salud del hombre [9].

Para mejorar la eficiencia de remoción en el tratamiento de los lixiviados se incorporan procesos fisicoquímicos y biológicos los cuales pueden ser aerobios y/o anaerobios con el fin de remover las elevadas cargas orgánicas. El proceso fisicoquímico tiene como objeto remover las partículas suspendidas utilizando coagulantes químicos que pueden ser sales metálicas o poli-electrólitos, en seguida del coagulante se utilizan un floculante y luego se realiza la sedimentación de las partículas, este proceso es de gran importancia para determinar de forma asertiva el coagulante y la dosificación adecuada con el fin de encontrar la relación con las características fisicoquímicas del lixiviado [10].

En la actualidad la PTL del relleno sanitario El Ojito se encuentra en funcionamiento debido a que las proyecciones de producción de lixiviados después del cierre del relleno son aproximadamente de 7 años, es por ello que el ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial ha requerido a la CRC (corporación autónoma regional del cauca) que realice un seguimiento permanente a la PTL que existe en el vertedero de residuos sólidos El Ojito [11].

Como resultado de dichos seguimientos se determinó que la PTL no cumple con la normatividad puesto que presenta problemas de operación ya que los sistemas de drenaje de aguas lluvias y de lixiviados se encuentran obstruidos por la basura, la cubierta de la celda de seguridad deteriorada y acumulación de aguas lluvias ocasionando aumento en el nivel de lixiviados dentro de la masa de residuos sólidos [11].

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario aplicar un sistema alternativo o complementario al que ya existe, que sea de bajo costo, fácil operación y mantenimiento que pretenda reducir los niveles de partículas contaminantes que contiene el lixiviado, lo cual se consigue realizando pruebas pilotos emulando las

condiciones a nivel de laboratorio con condiciones controladas (caudal y concentración de contaminantes).

Existe una variedad de alternativas para el manejo y tratamiento de los lixiviados tales como procesos anaerobios, aerobios, naturales, sistemas de membranas, entre otros; que según estudios reportan altas eficiencias a cargas razonables, sin embargo estas tecnologías tienen la necesidad de utilizar insumos químicos, insumos operacionales, suministro de energía eléctrica y complejidad operacional, lo que genera que los costos para la implementación sean económicamente altos y desafortunadamente no todas las regiones cuentan con los suficientes recursos [19].

Por ende, es justificable evaluar el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario El Ojito en el municipio de Popayán mediante filtros empacados de dos materiales inorgánicos (carbón mineral y grava) a escala piloto, puesto que esta técnica presenta ventajas en cuanto a eficiencia, no necesita constante mantenimiento, no requiere de personal especializado y es de bajo costo ya que estos materiales al encontrarse en grandes cantidades es fácil su adquisición y de acuerdo a sus características y propiedades tienen la capacidad de retener partículas contaminantes presentes en el lixiviado que afectan los parámetros de calidad para el uso definido del agua.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario El Ojito en el municipio de Popayán (Cauca) mediante el uso de filtros empacados (carbón mineral y grava) a escala piloto.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir filtros empacados para el tratamiento de los lixiviados provenientes de la laguna de estabilización del relleno sanitario el ojito.
- Confrontar las eficiencias de remoción de las unidades experimentales en términos de Sólidos Suspendidos Totales de los lixiviados provenientes del relleno sanitario El Ojito.

CAPÍTULO II: REFERENTES CONCEPTUALES

2.1. Antecedentes

El tratamiento de los lixiviados es un asunto importante a nivel mundial ya que es uno de los líquidos más contaminados y contaminantes que se conocen, de no tratarse adecuadamente puede contaminar a su vez aguas subterráneas, aguas superficiales y suelos, para evitar que esto ocurra una vez se han enterrado los residuos sólidos es necesario minimizar los impactos de esta práctica por esta razón los rellenos sanitarios se impermeabilizan, se drenan apropiadamente y los lixiviados recogidos deben ser tratados [7].

Por tal motivo se han desarrollado una variedad de alternativas para el manejo y tratamiento de los lixiviados; sin embargo, se debe tener en cuenta que el tipo de tratamiento que se escoge debe ser en función de la situación específica en cada caso respetando las normas, analizando los costos y las características propias del lugar de disposición final como condiciones geográficas, climáticas y económicas de la región. De igual manera dependerá en gran medida de las características específicas del lixiviado a tratar por lo que se debe elegir la tecnología adecuada para contar con un proceso óptimo [8].

Con respecto al tratamiento de lixiviados por medio de humedales artificiales, se tienen experiencias puntuales a nivel internacional. En Noruega, los rellenos sanitarios Esval y BØlstað con temperaturas bastantes bajas, en los cuales se recomendó que se tuviera en cuenta los pretratamientos con lagunas para reducir las cargas de entrada a los humedales y reducir la probabilidad de obstrucción de los lechos y un tiempo mínimo de retención de 20 días para las estaciones frías [9].

En el relleno sanitario del Distrito Metropolitano de Quito ubicado en el sector del Inga, se diseñó un sistema de tratamiento para los lixiviados los cuales presentan elevados contenidos de DBO_5 , sólidos suspendidos, DQO y color. Para este propósito se empleó el proceso de electrocoagulación como tratamiento primario, como segundo tratamiento se usó la fitorremediación aplicada en un sistema de humedales de flujo subsuperficial vertical y la adsorción en carbón activado como tratamiento terciario [10].

La combinación de estos procesos redujo el nivel de concentración de los contaminantes hasta valores aceptables. Se trataron dos muestras procedentes del vertedero, uno de lixiviado crudo y otro de lixiviado que había recibido tratamientos de lodos activados y biorreactores de membranas [10].

En el primer caso, luego de electrocoagulación del lixiviado crudo se alcanzaron altas remociones para sólidos suspendidos (78.6 %), DBO_5 (73.5 %), DQO (40.4 %) y color (79.4 %). En el sistema de humedales (2.5 L/día) los porcentajes de eliminación de contaminantes fueron de 13.2 %, 91.2 % y 65.4 % respectivamente. Se empleó adsorción en columnas empacadas de carbón activado para la remoción

de color (70.7%). En el segundo caso se empleó la fitorremediación alcanzando porcentajes de remoción para los SST, DQO y color de 2.9 %, 56.8 % y 50.3 %. En la adsorción con carbón activado la concentración de los mismos parámetros disminuyó en un 85.9 %, 73.9 % y 92.7 % [10].

Por otra parte, durante el año 2011, en Colombia más del 90% de los residuos sólidos fueron dispuestos en rellenos sanitarios, para tal porcentaje de residuos, la generación de lixiviados es también considerable. Esto evidencia la necesidad de generar conocimientos para el mejoramiento de las técnicas y alternativas de tratamiento de lixiviados [11].

Con respecto a los sistemas biológicos aerobios se probó un tratamiento experimental por Biodiscos, donde se realizó una prueba piloto en el relleno sanitario El Guayabal de la Ciudad de San José de Cúcuta. La carga óptima del reactor de Biodiscos se encontró en un rango de 10 a 20 g DQO / m²*día; éste fue el rango en el cual el sistema de Biodiscos alcanzó los más altos valores en porcentaje de remoción de DQO, con un promedio de 75,88%, un valor máximo de 91,91% y un valor mínimo de 52,29%. El sistema de Biodiscos mostró una alta remoción de nitrógeno amoniacal; esto es muy importante, ya que este elemento causa eutrofización en fuentes hídricas [12].

Por otro lado, los residuos generados en la Ciudad de Cartagena se disponen en el relleno sanitario Loma de los Cocos en donde se evaluaron dos sistemas de tratamiento: adsorción con carbón activado granular y evaporación. Para el sistema de adsorción, se implementó una columna de adsorción y se midió en el afluente y efluente, la DQO, DBO, DBO/DQO, pH y color [13]

El proceso de adsorción en la columna genera remociones hasta del 90% de DQO, 70% DBO, 80% de Color y una relación DBO/DQO de 0,7; para el proceso de evaporación se obtuvo que, los evaporadores naturales serían una alternativa viable, incluso en época de lluvia. En cuanto a los evaporadores mecánicos, se encontró que los que mejor se ajustarían serían aquellos que permiten el aprovechamiento de los gases generados en el relleno [13].

En lo que se refiere al relleno sanitario Parque Ambiental Los Pocitos (Atlántico, Colombia) se diseñó un tratamiento usando el proceso de coagulación con policloruro de aluminio como coagulante seguido del proceso foto-Fenton solar para la remoción de materia orgánica medida como DQO, en donde el proceso foto-Fenton solar mejoró la eficiencia en la remoción de materia orgánica cuando es usado como post-tratamiento a un proceso de coagulación/floculación, pasando de un 37,25 % a un 65,66 % de remoción. La unión de los dos tratamientos se puede utilizar para tratar lixiviados de rellenos sanitarios con el fin de mejorar la biodegradabilidad, y así ser usado como pre tratamiento a los procesos biológicos [14].

2.2. Bases teóricas

Relleno sanitario el ojito (Popayán-Cauca)

El relleno sanitario el ojito cuenta con un sistema de tratamiento de lixiviados que incluye procesos físicos, químicos y biológicos que serán detallados a continuación:

- **Tanques de Sedimentación**

Esta es la primera etapa de tratamiento del lixiviado maduro en el relleno sanitario el ojito, cuenta con 2 tanques de sedimentación circulares cuya función es separar por gravedad las partículas en suspensión del lixiviado generado en el lugar.

- **Laguna**

Es un sistema empleado para tratamiento de contaminantes mediante un proceso natural biológico, cuenta con un tiempo de retención que oscila entre 12 y 18 horas un estanque rectangular con 25m de largo, 13 m de ancho y 3m de profundidad, consiste en el uso de microorganismos para transformar o degradar compuestos orgánicos, en compuestos menos tóxicos.

- **Reactores FFA**

Es un sistema de tratamiento químico donde se utiliza una dosificación de peróxido de hidrógeno al 50% y sulfato de aluminio al 50% son altamente corrosivos la dosificación se realiza entre las 2 p.m. y 4 p.m. se deja toda la noche actuando para eliminar los compuestos contaminantes.

- **Tanque de coagulación.**

El propósito del tanque de coagulación es desestabilizar las partículas en suspensión es decir facilitar su aglomeración, utilizando como coagulante químico el sulfato de aluminio; la cantidad que se utiliza depende de la cantidad de lixiviado que se vaya a tratar.

- **Tanque de floculación**

El tanque de floculación tiene como objetivo favorecer con la ayuda de la mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas, estas partículas se aglutinan para formar un floc que puedan ser fácilmente eliminados por el proceso de decantación. Estos floc van al lecho de secado donde se le aplica cal y se convierte en abono para las plántulas.

- **Filtro prensa**

El lixiviado a filtrar se encuentra almacenado en un estanque con agitación y desde este es enviada al filtro mediante una bomba centrífuga, midiendo la presión de filtración con ayuda de un manómetro tipo Bourdon, este filtro contiene un medio poroso que retiene las partículas sólidas permitiendo el paso del fluido.

Relleno sanitario

El relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos, que no causa daño ni riesgo para la salud o la seguridad pública, minimiza y controla los impactos ambientales. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar y aislar los residuos sólidos en un área mínima, con compactación para reducir su volumen, cobertura diaria de los mismos, además previene los problemas que puedan causar los lixiviados y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica [15]

Lixiviados

Los lixiviados son los líquidos generados como consecuencia de la descomposición biológica de la parte orgánica procedente de los residuos sólidos bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación [15]

El agua que llega a formar parte de los lixiviados es un factor importante en la producción de estos y depende de la climatología e hidrología de la zona, se pueden ocasionar problemas debido a que las aguas de escorrentía provocadas por las precipitaciones pueden infiltrarse tanto de forma superficial como subterránea [15].

Se debe tener en cuenta que un relleno sanitario tras su clausura puede seguir produciendo lixiviado hasta 50 años después del cese de su actividad, por eso es importante establecer y mantener medidas de gestión integral post-clausura de un relleno [16].

Generación de lixiviado

Los siguientes factores establecen el volumen de lixiviado en un relleno sanitario:

- Precipitación pluvial.
- Escorrentía superficial y/o infiltración subterránea.
- Evapotranspiración.
- Humedad natural de los RSU (Residuo sólido urbano).
- Grado de compactación de los residuos.
- Capacidad de campo para retener humedad [17].

Tipos de lixiviados según la edad

las características de los lixiviados varían considerablemente en el tiempo, por lo tanto debe tenerse cautela cuando se busque hacer la aplicación de las tecnologías a los casos locales [17].

- **Lixiviado joven:** Se produce en rellenos menores a 5 años de edad, cuyas características son altamente contaminantes, provocando problemas de toxicidad.
- **Lixiviado maduro:** Se considera a los residuos líquidos que tienen una edad entre 5 y 10 años.

- **Lixiviado viejo:** lixiviado entre una edad mayor a 10 años, tienen una baja biodegradabilidad de la materia orgánica. Se recomienda sistemas de tratamiento físico químicos. La relación DBO_5/DQO es inferior a 0.1, esto representa una menor carga orgánica [17].

Tabla 1. Parámetros generales de lixiviados según la edad

Parámetro	Edad del relleno (años) y tipo de lixiviado		
	< 5 (Joven) (Biodegradable)	5-10 (Medio) (Intermedio)	> 10 (Viejo) (Estabilizado)
pH	< 6.5	6.5 - 7.5	> 7.5
DQO (mg/L)	> 20000	3000 – 15000	< 5000
DQO/COT	< 2.7	2.0 - 2.7	> 2.0
DBO_5/DQO	> 0.5	0.1 - 0.5	< 0.1
AGV (%COT)	> 70	5 – 30	< 5
Metales Pesados (g/L)	2		< 50 mg/ L

Fuente: [17].

La conductividad, la dureza y la alcalinidad tienen una relación directamente proporcional ya que dependen de la presencia de iones en los lixiviados, por lo tanto a medida que aumenta la edad del lixiviado la dureza y la alcalinidad tienden a disminuir. De igual manera la existencia de iones de bicarbonato calcio magnesio y carbonato incrementan esta tendencia en la conductividad.

El nitrógeno total como el amoniacal en el lixiviado se reducen a medida que aumenta su edad, ya que en los rellenos jóvenes ocurre la diseminación de los aminoácidos y la destrucción de compuestos orgánicos [18].

Composición de los lixiviados y efectos en la salud

La composición de los lixiviados depende del tipo de RSU (Residuo sólido urbano) depositado en la celda, sin embargo, los componentes que se registran en la mayoría de rellenos sanitarios corresponden a grupos de sustancias detalladas en el siguiente cuadro:

Tabla 2. Composición general del lixiviado y efectos en la salud

COMPUESTO	DESCRIPCIÓN	EFECTO EN LA SALUD
Compuestos orgánicos volátiles	Están formados por carbono e hidrogeno que se evaporan con facilidad. Los compuestos que más se encuentran en los lixiviados son: Benceno, cloroformo, 1.1 – dicloroetano, metilbenceno, cloruro demetileno, tolueno, tetracloroetileno.	Cancerígeno, daños en el SNC, irritaciones en el sistema respiratorio, daños al hígado y riñón, alergias, entre otros.
Metales	Son elementos químicos que al entrar en contacto con el residuo lixiviado se disuelven y disipan en el medio. Entre los más comunes están: arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo.	Cancerígeno, daños a corazón y SNC, efectos en el sistema reproductivo, respiratorio y renal, desordenes genéticos y celulares, entre otros.
Alcoholes	Los alcoholes son compuestos químicos orgánicos caracterizados por tener un grupo hidroxilo (OH ⁻) en su estructura; se forman mediante las reacciones que se forman en las celdas de residuos sólidos.	Malformaciones congénitas, muta génicas y cancerígenas.

Fuente: [17].

Tratamientos de lixiviados

Las instalaciones de las diferentes alternativas de tratamiento de lixiviados dependen principalmente de las características del lixiviado, del lugar de localización geográfica y física del relleno y de la disponibilidad económica del sector. Existe una amplia literatura sobre las aplicaciones de las diferentes tecnologías, en las secciones siguientes se hace un resumen de las principales alternativas que se tienen actualmente [17].

Tratamientos convencionales

- **Proceso aerobio:** Este proceso biológico se lleva a cabo gracias a la acción de asimilación de oxígeno de los microorganismos, que asimilando la materia orgánica presente en el medio y junto con los nutrientes que necesitan producen nuevos microorganismos [17].

- **Proceso anaerobio:** En este proceso biológico a partir de la materia orgánica y en ausencia de oxígeno disuelto los microorganismos obtienen lo que necesitan a partir de los compuestos oxigenados que se encuentra en el medio y con ello producir nuevos microorganismos [17].

• **Procesos fisicoquímicos:** Estos procesos se llevan a cabo mediante el uso de técnicas físicas o la alteración fisicoquímica de la disolución, con el fin de eliminar los compuestos sólidos, coloidales y disueltos presentes en la mezcla, estos procesos se suelen utilizar como pretratamiento para la eliminación de sustancias que se encuentran en la disolución a tratar y pueden interferir en las etapas de tratamiento posteriores [17].

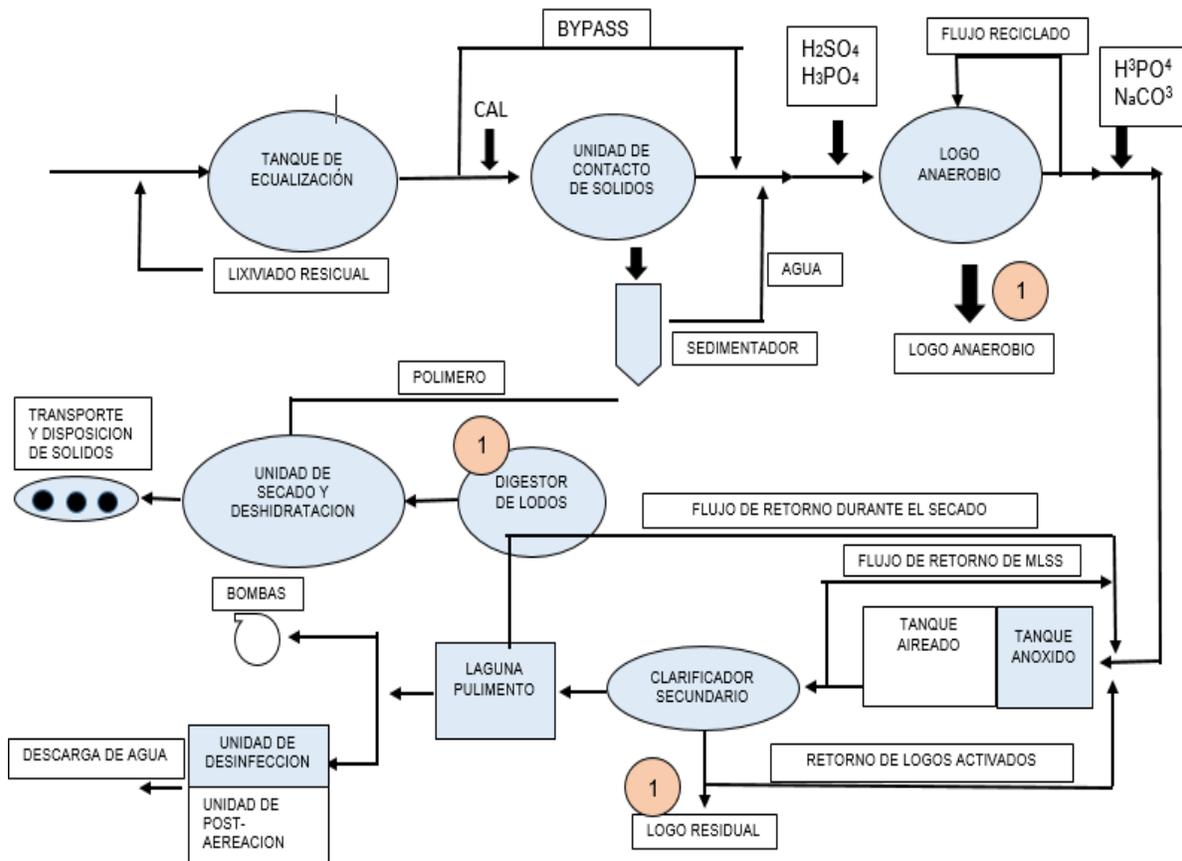
Tabla 2. Resumen de procesos de tratamientos convencionales (biológicos y fisicoquímicos)

PROCESO DE TRATAMIENTO	APLICACIÓN	OBSERVACIONES
Fangos activos	Separación de compuestos orgánicos.	Pueden ser necesarios aditivos anti-espumantes y un clarificador separador.
Estanques de estabilización	Separación de compuestos orgánicos.	Requiere gran superficie de terreno.
Lagunas anaerobias	Separación de compuestos orgánicos.	Requisitos de energía y producción de fangos menores que los sistemas aerobios, requiere calefacción, mayor potencial de inestabilidad, más lentos que los sistemas aerobios.
Nitrificación desnitrificación	Separación de hidrogeno.	Puede llevarse a cabo simultáneamente con la separación de compuestos orgánicos.
Neutralización	Control de pH.	Aplicación limitada para lixiviados.
Oxidación	Separación de compuestos orgánicos, detoxificación de algunas especies inorgánicas.	Funciona mejor con flujos de residuos diluidos, el uso de cloro puede provocar la formación de hidrocarburos clorados.
Sedimentación-flotación	Separación de materia en suspensión.	Solo tiene una aplicación limitada, puede utilizarse con otros procesos.
Filtración	Separación de materia en suspensión.	Solamente útil como proceso de afino.
Arrastre por aire	Separación de amoniaco u compuestos orgánicos volátiles.	Puede requerir equipamiento de control de la contaminación atmosférica.

Absorción	Separación de compuestos orgánicos.	Costos variables según el tipo de lixiviado.
Evaporación	Cuando no se permite la descarga de lixiviados.	

Fuente: [16].

Imagen 1. Resumen de tratamientos convencionales



Fuente: [19].

Tratamientos de bajo costo

Los tratamientos de bajo costo consisten en tecnologías sencillas que utilizan tanto fuentes de energía principales como otras que aprovechan la red de alcantarillado urbano de aguas residuales para ser tratadas en conjunto con los lixiviados. Estas tecnologías se caracterizan por la sencillez de sus instalaciones, así como, el bajo costo de inversión que supone su posterior mantenimiento [16].

Tabla 3. Resumen de procesos de tratamiento de bajo costo

PROCESO DE TRATAMIENTO	APLICACIÓN	OBSERVACIONES
Recirculación	Para favorecer la recuperación del metano para la obtención de energía. Aumenta la humedad de los residuos, incrementa la estabilidad y la degradación biológica.	A cielo abierto produce problemas de olores y de salud para los trabajadores, uso limitado a vertederos pequeños.
Técnicas de fitorremediación	Para tratar lixiviados de forma económica y por filtros naturales como son cultivos de plantas específicas, reduce sólidos en suspensión, materia orgánica, nitrógeno amoniacal y algunos metales.	Inconvenientes debido al exceso de vertido del lixiviado en los cultivos y a la falta de conocimiento del desarrollo vegetativo de las plantas sembradas en el humedal.
Tratamientos con turba	Para reducir la cantidad de metales pesados y de nitrógeno amoniacal, obtiene porcentajes de eliminación elevados pero inferiores a los teóricos.	Generalmente precedido por un buen pretratamiento del lixiviado. Con el tiempo disminuye el porcentaje de eliminación por eso se debe regenerar la turba cada varios días.

Fuente: [16].

Tratamientos avanzados

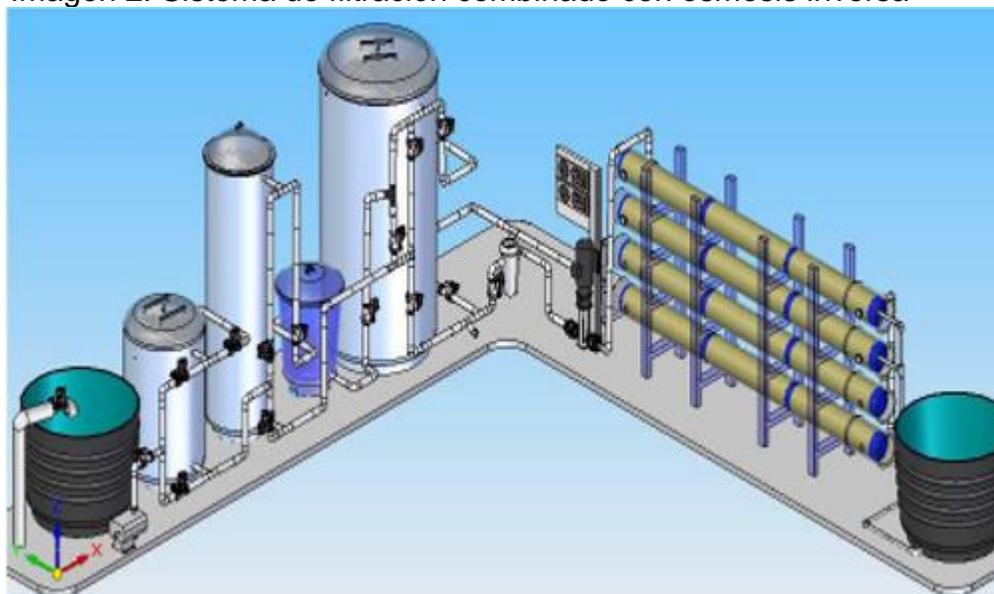
Los procesos de tratamiento de lixiviado han ido avanzando con las nuevas tecnologías, estas ponen en combinación los procesos biológicos con tecnologías de filtración avanzada o ósmosis inversa, entre otras. Todas ellas se basan en los tratamientos avanzados de separación de membranas, estos son muy efectivos en la eliminación de materia orgánica, así como iones metálicos o sólidos en suspensión, aunque tienen el inconveniente de ensuciarse sus membranas con frecuencia, disminuyendo la eficacia en el proceso de depuración de las aguas de lixiviado de vertedero [16].

Tabla 4. Resumen de procesos de tratamientos avanzados con membrana

PROCESO DE TRATAMIENTO	APLICACIÓN	OBSERVACIONES
Osmosis inversa	Disoluciones diluidas de compuestos inorgánicos, solutos de bajo peso molecular.	Costoso, necesario un pretratamiento extensivo.
Ultrafiltración	Separación de bacterias y de compuestos orgánicos con alto peso molecular, se suele usar donde los requerimientos de calidad del efluente a tratar sean bajos.	Propenso al atascamiento, suele utilizarse tratamientos previos para evitar ensuciamientos.
Nanofiltración	Separación de bacterias y de compuestos orgánicos con peso molecular más bajo que ultrafiltración.	Suele necesitar tratamiento previo para obtener buenos rendimientos de depuración.
Microfiltración	Como ultra y nano- filtración, pero en tamaño de poro más pequeño se suele usar donde los requerimientos de calidad del efluente a tratar sean bajos.	Suele utilizar tratamiento previo para evitar ensuciamientos.
Electrodialisis	Separación de especies iónicas, para tratar la precipitación de metales pesados en lixiviados contaminados por estos.	Requiere gran cantidad de energía para su funcionamiento y precisa de tratamiento previo del lixiviado.

Fuente: [16].

Imagen 2. Sistema de filtración combinado con osmosis inversa



Fuente: [20].

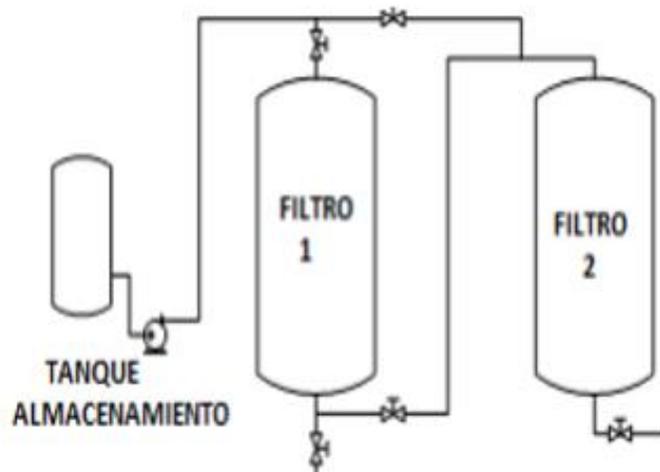
Filtración

la filtración es un proceso de separación de partículas sólidas de un líquido utilizando un material poroso llamado filtro, que permite el paso del líquido a su través, pero que retiene las partículas sólidas.

La filtración es una operación unitaria de gran importancia dentro de un sistema de tratamiento y acondicionamiento de aguas. Habitualmente la filtración se efectúa después de la separación de la mayoría de los sólidos suspendidos por sedimentación, sin embargo, se deben tener en cuenta las características del agua, ya que en ocasiones es posible que esta entre directamente a la etapa de filtración, sin ser sedimentada previamente.

Es importante resaltar que, si la cantidad de sólidos suspendidos en el agua a tratar es muy grande y se pasa directamente a la filtración, el filtro se satura rápidamente y es necesario su continua limpieza, ya que los ciclos de filtración son de poca duración. Si previamente se separan los sólidos sedimentables, la carga en el filtro disminuye, y se tiene una mejor operación y un proceso de remoción de sólidos suspendidos más eficiente [21].

Imagen 3. Filtración



Fuente: [20].

Adsorción

La adsorción es una operación unitaria de transferencia de masa; es un proceso que consiste en la eliminación de algunos componentes de una fase fluida mediante un sólido que los retiene. Los átomos, moléculas o iones de una sustancia se adhieren o concentran en la superficie de los poros del sólido por medio de fuerzas de Van der Waals, por ello se considera como un fenómeno superficial.

La sustancia que se adsorbe es el adsorbato y el material sobre el cual lo hace es el adsorbente, el proceso inverso de la adsorción es la desorción [21].

Adsorción física

Si el adsorbato y la superficie del adsorbente interactúan sólo por medio de fuerzas de Van der Waals, se trata de adsorción Física. Las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie y los calores de adsorción son bajos, apenas unas cuantas calorías, comparables al calor de vaporización del adsorbato. El aumento de la temperatura disminuye considerablemente la adsorción [21].

Requisitos del adsorbente

- Debe tener una gran superficie específica (gran porosidad) o volumen de micro poros.
- Tener una buena capacidad de regeneración.
- Estructura porosa para que las moléculas del adsorbato se transporten a los sitios activos [21].

Fuerzas de Van der Waals

Las fuerzas de Van der Waals son fuerzas intermoleculares atractivas o repulsivas, son tan débiles que no se pueden considerar un enlace, como el enlace iónico o covalente. Solo se las considera una atracción.

Se consideran 3 tipos de estas fuerzas en función de las características de la atracción:

- **Fuerzas dipolo-dipolo:** se forma entre un dipolo positivo de una molécula polar con el dipolo negativo de otra polar. Una atracción dipolo-dipolo es una interacción no covalente entre dos moléculas polares, esta fuerza de atracción entre dos dipolos es más intensa entre mayor sea la polarización de dichas moléculas polares.
- **Fuerzas dipolo-dipolo inducido:** ocurre entre una molécula no polar y una molécula polar, en este caso las cargas de una molécula polar crean una ligera distorsión en la nube de electrones de la otra molécula no polar, de tal forma que la convierte de forma transitoria en una molécula polar y se denomina dipolo inducido.
- **Fuerzas de dispersión de London:** se dan en su mayoría entre moléculas no polares y son el resultado de la distribución aleatoria de la nube de electrones alrededor del núcleo de los átomos. Cuando se forma un dipolo instantáneo en una molécula, provoca la formación de un dipolo inducido en la molécula de al lado, de tal forma que se genera una fuerza de atracción transitoria entre ambas moléculas [22].

Grava

La grava está formada por fragmentos de rocas redondeadas que han resistido sin desintegrarse al proceso de erosión transporte y sedimentación. Por tanto, serán los elementos más resistentes de las rocas de que proceden, la grava es utilizada como medios filtrantes granulares, es la forma más económica y eficiente de separar sólidos suspendidos en el agua que no son removidos por sedimentación [23].

Carbón antracita

La antracita es considerada uno de los mejores tipos de carbón ya que es muy poco contaminante y de alto poder calorífico. Es un carbón duro que presenta el mayor contenido de carbono fijo y menor en material volátil. Contiene aproximadamente un 87.1% de carbono, 9.3% de cenizas y 3.6% de material volátil. Tiene un color negro brillante de estructura cristalina.

La antracita puede utilizarse como medio filtrante al ser triturada y tamizada, es caracterizada por tener una estructura puntiaguda y fragmentada, posee propiedades como gran resistencia a la abrasión, su baja tendencia a la aglomeración y su escasa dependencia del pH (admite sin problemas pH entre 3 y 12) [23].

Filtros lentos o de gravedad:

Un filtro lento es aquel donde el agua fluye solo por efecto o acción de la gravedad y por tal motivo se les conoce también como filtros de gravedad. La velocidad de filtración en este tipo de filtros es muy lenta, por lo que se requiere de una gran área o superficie de filtración para un flujo determinado. Para caracterizar un filtro y conocer sus dimensiones para un flujo o gasto de agua determinado se emplea la relación Gasto/Área o Q/A. Para un filtro lento o de gravedad se emplea una relación Q/A de 0.6 a 6 LPM/mt² (litros por minuto por metro cuadrado) [24].

Conductividad

Es una propiedad física que tiene la habilidad de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido.

Sólidos suspendidos totales

Los sólidos pueden ser partículas orgánicas o partículas inorgánicas, están conformados por toda la materia que queda luego de evaporar el agua y someter a un secado de 103° C. [25].

2.3. bases legales

Resolución 0631 del 2015

“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y otras disposiciones”

Imagen 4. Parámetros máximos permisibles

PARÁMETRO	UNIDADES	GENERALIZACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS	RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS Y SIMILARES	RECICLAJE DE TAMBORES
Generales					
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	200,00	2000,00	500,00	1000,00
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	150,00	800,00	200,00	600,00
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	100,00	400,00	200,00	150,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00	1,00	1,00
Grasas y aceites	mg/L	20,00	50,00	20,00	20,00
Compuestos semivolátiles fenólicos	mg/L		Análisis y Reporte		
fenoles	mg/L	0,20	0,20	0,20	0,20
formaldehído	mg/L			Análisis y Reporte	
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos					
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00	10,00	10,00
Hidrocarburos aromático policíclicos (HAP)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos orgánicos alogenados absorbibles (AOX)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de fósforo					
Fósforo total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Ortofosfatos (PO ₄ ³⁻)	mg/L		Análisis y Reporte		
compuestos de nitrógeno					
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L		Análisis y Reporte		
Nitritos (N-NO ₂)	mg/L		Análisis y Reporte		
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	mg/L		Análisis y Reporte		
Nitrógeno total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones					
cloruro total (CN ⁻)	mg/L		0,50	1,00	1,00
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	250,00	500,00		Análisis y Reporte
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250,00	600,00		Análisis y Reporte
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L		Análisis y Reporte		
Metales y metaloides					
Aluminio (Al)	mg/L		3,00		
Arsénico (As)	mg/L	0,50	0,10		0,10

Fuente: [26].

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

El desarrollo de la prueba piloto se realizó en el laboratorio de la Universidad Autónoma Del Cauca (química y biología), que se encuentra localizado en el municipio de Popayán cauca específicamente en la zona suroriental en la carrera 1 # 4-24 barrio la pamba, siendo clasificado como zona comercial. Las muestras fueron tomadas del relleno sanitario el ojito que se encuentra ubicado al occidente, vía al tambo a 3 kilómetros del límite urbano.

Imagen 5. Ubicación



Fuente: propia.

3.1. Fase I: Diseño y construcción de los filtros para el post tratamiento de los lixiviados provenientes del relleno sanitario el ojito a escala piloto.

Actividad 1: cálculo del porcentaje de porosidad de los lechos filtrantes.

Debido a que el tamaño del carbón mineral y de la grava eran muy grandes se procedió a realizar la trituración de los materiales buscando la mayor uniformidad de los mismos, con un diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada.

Imagen 6. Elección del tamaño de los materiales



Fuente: Propia.

Imagen 7. Grava triturada



Fuente: Propia.

Imagen 8. Carbón triturado



Fuente: Propia.

Cálculo del porcentaje de porosidad del lecho (carbón mineral):

El carbón es un material altamente poroso por lo tanto posee porosidad interna y externa la cual es necesario medir para realizar el diseño del sistema filtrante, sin embargo, la medición de la porosidad interna no se pudo realizar ya que no contamos con técnicas ni equipos apropiados, por ende, solo fue medida la porosidad externa del lecho de carbón hasta donde había ingreso del agua a los poros.

Paso 1. En una probeta de 250 ml se introdujo 46.3 g de carbón mineral y se le agregó agua.

Paso 2. Volumen aparente: se midió el volumen que ocupaba el agua con las partículas de carbón mineral en la probeta.

Paso 3. Volumen real: Es el resultado que dio entre el volumen aparente menos el volumen que ocupaba el agua después de retirar las partículas de carbón mineral.

Paso 4. Se realizó el debido cálculo para encontrar el porcentaje de porosidad del carbón mineral.

$$\text{Porcentaje de porosidad} = \frac{V. \text{ aparente} - V. \text{ real}}{V. \text{ aparente}} \times 100$$

Imagen 9. Porosidad del carbón mineral.



Fuente: propia.

Cálculo del porcentaje de porosidad del lecho (grava):

Paso 1. En una probeta de 250 ml se introdujo 52.2 g de grava y se le agregó agua.

Paso 2. Volumen aparente: se midió el volumen que ocupaba el agua con las partículas de grava en la probeta.

Paso 3. Volumen real: Es el resultado que dio entre el volumen aparente menos el volumen que ocupaba el agua después de retirar las partículas de grava.

Paso 4. Se realizó el debido cálculo para encontrar el porcentaje de porosidad de la grava.

$$\text{Porcentaje porosidad} = \frac{V. \text{ aparente} - V. \text{ real}}{V. \text{ aparente}} \times 100$$

Actividad 2: diseño de los filtros para el post tratamiento de lixiviados.

Se diseñó un filtro que funcionó bajo flujo laminar con un número de Reynolds menor a 500, esto se determinó mediante el diámetro del tubo de 4 pulgadas, con este resultado se calculó la velocidad interna del flujo y con la velocidad interna del flujo se determinó el caudal que se suministró por el tanque de almacenamiento para cada filtro.

Factores que se tuvieron en cuenta en el diseño del filtro [18].

- Caudal medio diario del lixiviado Q.
- Tipo de flujo.
- Tiempo de retención hidráulica t_d .
- Homogeneidad del diámetro de los materiales filtrantes.
- Conductividad hidráulica del lecho filtrante.

Actividad 3: construcción de los filtros para el post tratamiento de los lixiviados.

Paso 1. Se realizó la selección y compra del material a utilizar para la construcción de los filtros.

Tabla 5. Materiales.

MATERIALES	UNIDAD
Tubo de 4 pulgadas	2
Adaptadores de limpieza de 4 pulgadas	2
Unión de 4 pulgadas	2
1/8 pegante PVC	1
Tubo silicona liquido	1
Venocllisis	1
Bomba	1
Recipiente de 30 litros	1
Codo de 90° de ½ pulgadas	2
Tee de ½ pulgadas	1
Adaptadores machos roscados	2
Adaptadores hembras roscados	2
Manguera de ½ pulgadas	10 metros
Gravilla	10 kg
Carbón mineral	15 kg

Fuente: Propia.

Paso 3. Se realizó el corte del tubo de PVC de 4 pulgadas en 2 partes con una longitud de 60 cm cada uno.

Paso 4. Teniendo los tubos de 60cm de longitud, se procedió a llenarlos con el material filtrante respectivo, uno con grava y el otro con carbón mineral.

Imagen 10. Tubo con grava



Fuente: Propia.

Imagen 11. Tubo con carbón



Fuente: Propia.

Paso 5. A cada uno de los adaptadores de limpieza y tapones de 4 pulgadas se les realizó un orificio con diámetro de 3/8 pulgadas.

Teniendo listos los adaptadores y tapones con orificios, a cada uno de los tubos con longitud de 60 cm cortados anteriormente se les colocó un tapón y un adaptador con una unión.

Paso 6. Al inicio de cada uno de los tubos donde se colocaron los tapones se ajustaron 2 adaptadores machos roscados de 1/2 pulgada, ensamblando tubos de PVC de 1/2 pulgada con una longitud de 7cm, uniendo al lado y lado codos de 90°, de la misma manera se unieron dos tubos de 7cm de longitud y finalmente por medio de una tee se unieron los dos filtros.

Paso 7. Para finalizar se pegaron las mangueras de nivel de 1 m de longitud en cada uno de los orificios de los adaptadores y de los tubos de 60 cm.

Actividad 4: lavado

Después de haber terminado la construcción de los filtros se procedió a realizar el debido lavado de estos, en donde se llenaron completamente de agua para saturar todos los poros del material filtrante con el objetivo de eliminar las impurezas y así garantizar la efectividad.

Actividad 5. Instalación del sistema.

Para el funcionamiento de los filtros se realizaron los siguientes pasos:

Paso 1. se utilizó un recipiente de 30 L como tanque de almacenamiento para el suministro del lixiviado, en la parte interior e inferior del tanque se instaló una bomba en donde se acondicionó una manguera de nivel de 1 metro de longitud para la circulación del lixiviado.

Paso 2. se adaptó una venocllisis a la manguera de nivel con el objetivo de regular el caudal y por último se unió con una tee para riego de goteo con el fin de suministrar el mismo caudal a los dos lechos filtrantes construidos anteriormente.

Imagen 12. Instalación del sistema



Fuente: Propia.

Paso 3. Al final de cada filtro se ubicaron dos recipientes para posteriormente recibir el lixiviado tratado.

Nota: El sistema completo se ubicó en un lugar limpio y seco a temperatura ambiente, cada filtro se marcó con su respectivo material. El recipiente de suministro se situó a 1 m del suelo y los filtros a una altura de 30 cm del suelo para que el lixiviado tratado circulara por gravedad a los dos tanques finales.

3.2. fase II: Verificación de la eficiencia de remoción de las unidades experimentales.

Actividad 1: duración de la prueba piloto.

La prueba piloto tuvo una duración de 13 días continuos, para determinar el tiempo de toma de datos a la entrada y salida se tuvo en cuenta el tiempo de vaciado el cual dio como resultado 10 horas, por ende, se fijó tomar los datos a las 8:00 a.m. y 6:00 p.m.

Actividad 2: Recolección de las muestras.

La recolección de las muestras se inició el día miércoles 17 de julio de 2019 a las 7:00 a.m. en el relleno sanitario el ojito con coordenadas y terminó el día lunes 29

de julio de 2019. Las muestras fueron recolectadas a la salida del tratamiento biológico (laguna de estabilización) en una poma de 30 L Completamente llena, este volumen se obtuvo del resultado de los cálculos realizados para el diseño de los filtros en donde se definió que 30 L es lo necesario para el adecuado funcionamiento del sistema de filtración.

Imagen 13. Recolección de muestras



Fuente: Propia.

Actividad 3: Medición de los parámetros.

La medición de SST se realizó por el método espectrofotométrico con medición directa, además se evaluaron parámetros físicos como temperatura, caudal, conductividad y pH con el fin de suministrar información posterior a otros estudios de trabajo de grado, estos se midieron en el laboratorio de la Universidad Autónoma del Cauca.

Nota: *En cuanto a la medición de la DQO se debe aclarar que, si se realizaron las pruebas, sin embargo, este parámetro se tuvo que retirar del trabajo debido a que la metodología que se utilizó para su medición no era la adecuada por lo tanto los jurados recomendaron la eliminación de este parámetro.*

Imagen 14. Medición de parámetros



Fuente: Propia.

Actividad 4: Evaluación de la eficiencia del sistema.

Se realizaron 13 muestras continuas durante 13 días las cuales fueron tomadas a la entrada del sistema que es la del tanque principal de suministro y se tomaron las muestras en cada filtro final, posteriormente se hizo el cálculo de los porcentajes de remoción de cada filtro y se determinó el de mayor eficiencia.

ecuación 1. porcentaje de remoción

$$\%R = \frac{[a]A - [a]E}{[a]A} * 100$$

- ([a]A) masa del analito en el afluente A
- ([a]E) masa del analito en el efluente E

Tabla 6. Parámetros a evaluar.

PARÁMETROS	MÉTODO O EQUIPO	UNIDADES
Potencial de hidrógeno	pH – metro	
Caudal	Volumétrico	cm ³ /min
Temperatura	Termómetro	°C
Sólidos suspendidos totales	Espectrofotómetro (medición directa) HACK 2700	mg/L
Conductividad	Conductímetro	mS/cm

Fuente: Propia.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con el fin de determinar estadísticamente si existieron diferencias significativas entre los materiales filtrantes se realizó el siguiente procedimiento:

El análisis estadístico se realizó por el método de comparación de medias con poblaciones apareadas muestras pareadas, esto significa que las muestras se van tomando por pares de tal forma que cada par tienen algo en común.

Las muestras fueron tomadas al mismo tiempo, en este caso se plantearon la siguiente hipótesis:

Poblaciones pareadas (comparación de dos medias con muestras dependientes)

- Ho: $\mu_1 = \mu_2$ (los filtros no tienen diferencia significativa)
- Ha: $\mu_1 \neq \mu_2$ (los filtros tienen diferencias significativas)

Sin embargo, para el caso apareado se ajustan a las siguientes

- Ho: $\mu_d = 0$
- Ha: $\mu_d \neq 0$
-

Donde μ_d es la media de las diferencias entre las dos muestras apareadas.

De esta manera el problema se simplifica en comparar la media con una constante. Por lo cual el estadístico de prueba será:

ecuación 2.

$$t_o = \frac{\bar{x} - \mu_o}{S/\sqrt{n}}$$

Ecuación 2.

- Donde:
- \bar{X} = corresponde a la media de las diferencias
- μ_0 = corresponde al valor de la constante que para este caso toma el valor de 0.
- Por lo tanto, la expresión queda así:

ecuación 3.

$$t_0 = \frac{\bar{d}}{S_D / \sqrt{n}}$$

Ecuación 3.

- Se rechaza H_0 si $|t_0| > t_{\alpha/2}$ o sea las áreas bajo la curva a la derecha del punto $t_{\alpha/2}$ [19].

Imagen 15. Tabla T-Student

		$\alpha/2$												
		0,0005	0,001	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,45	0,475
v grados de libertad	1	636.619	318.309	63.657	31.821	12.706	6.314	3.078	1.376	1.000	0.727	0.325	0.158	0.079
	2	31.599	22.327	9.925	6.965	4.303	2.920	1.886	1.061	0.816	0.617	0.289	0.142	0.071
	3	12.924	10.215	5.841	4.541	3.182	2.353	1.638	0.978	0.765	0.584	0.277	0.137	0.068
	4	8.610	7.173	4.604	3.747	2.776	2.132	1.533	0.941	0.741	0.569	0.271	0.134	0.067
	5	6.869	5.893	4.032	3.365	2.571	2.015	1.476	0.920	0.727	0.559	0.267	0.132	0.066
	6	5.959	5.208	3.707	3.143	2.447	1.943	1.440	0.906	0.718	0.553	0.265	0.131	0.065
	7	5.408	4.785	3.499	2.998	2.365	1.895	1.415	0.896	0.711	0.549	0.263	0.130	0.065
	8	5.041	4.501	3.355	2.896	2.306	1.860	1.397	0.889	0.706	0.546	0.262	0.130	0.065
	9	4.781	4.297	3.250	2.821	2.262	1.833	1.383	0.883	0.703	0.543	0.261	0.129	0.064
	10	4.587	4.144	3.169	2.764	2.228	1.812	1.372	0.879	0.700	0.542	0.260	0.129	0.064
	11	4.437	4.025	3.106	2.718	2.201	1.796	1.363	0.876	0.697	0.540	0.260	0.129	0.064
	12	4.318	3.930	3.055	2.681	2.179	1.782	1.356	0.873	0.695	0.539	0.259	0.128	0.064
	13	4.221	3.852	3.012	2.650	2.160	1.771	1.350	0.870	0.694	0.538	0.259	0.128	0.064
	14	4.140	3.787	2.977	2.624	2.145	1.761	1.345	0.868	0.692	0.537	0.258	0.128	0.064
	15	4.073	3.733	2.947	2.602	2.131	1.753	1.341	0.866	0.691	0.536	0.258	0.128	0.064
	16	4.015	3.686	2.921	2.583	2.120	1.746	1.337	0.865	0.690	0.535	0.258	0.128	0.064
	17	3.965	3.646	2.898	2.567	2.110	1.740	1.333	0.863	0.689	0.534	0.257	0.128	0.064
	18	3.922	3.610	2.878	2.552	2.101	1.734	1.330	0.862	0.688	0.534	0.257	0.127	0.064
	19	3.883	3.579	2.861	2.539	2.093	1.729	1.328	0.861	0.688	0.533	0.257	0.127	0.064
	20	3.850	3.552	2.845	2.528	2.086	1.725	1.325	0.860	0.687	0.533	0.257	0.127	0.063
	21	3.819	3.527	2.831	2.518	2.080	1.721	1.323	0.859	0.686	0.532	0.257	0.127	0.063
	22	3.792	3.505	2.819	2.508	2.074	1.717	1.321	0.858	0.686	0.532	0.256	0.127	0.063
	23	3.768	3.485	2.807	2.500	2.069	1.714	1.319	0.858	0.685	0.532	0.256	0.127	0.063
	24	3.745	3.467	2.797	2.492	2.064	1.711	1.318	0.857	0.685	0.531	0.256	0.127	0.063
	25	3.725	3.450	2.787	2.485	2.060	1.708	1.316	0.856	0.684	0.531	0.256	0.127	0.063
	26	3.707	3.435	2.779	2.479	2.056	1.706	1.315	0.856	0.684	0.531	0.256	0.127	0.063
	27	3.690	3.421	2.771	2.473	2.052	1.703	1.314	0.855	0.684	0.531	0.256	0.127	0.063
	28	3.674	3.408	2.763	2.467	2.048	1.701	1.313	0.855	0.683	0.530	0.256	0.127	0.063
	29	3.659	3.396	2.756	2.462	2.045	1.699	1.311	0.854	0.683	0.530	0.256	0.127	0.063
	30	3.646	3.385	2.750	2.457	2.042	1.697	1.310	0.854	0.683	0.530	0.256	0.127	0.063

Fuente: [27].

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo presenta los resultados según lo planteado en la metodología, así el orden que se seguirá es el sugerido con anterioridad: fase I. se diseñaron y construyeron los filtros para el post tratamiento de los lixiviados provenientes del relleno sanitario el ojito; fase II. Verificación de la eficiencia de remoción de las unidades experimentales.

4.1. Presentación y análisis de los resultados obtenidos en la investigación.

Tabla 7. Porcentaje de porosidad del lecho (carbón mineral)

Volumen Aparente	170cm ³
Volumen real	170 cm ³ – 112 cm ³ = 58 cm ³
Porcentaje de porosidad	$\frac{170\text{cm}^3 - 58\text{cm}^3}{170\text{cm}^3} = \frac{112\text{cm}^3}{170\text{cm}^3} = 0.658 \times 100 = 65.8\%$

Fuente: Propia.

Tabla 8. Porcentaje de porosidad del lecho (grava)

Volumen Aparente	48 cm ³
Volumen real	48 cm ³ – 28 cm ³ = 20cm ³
Porcentaje de porosidad	$\frac{48\text{cm}^3 - 20\text{cm}^3}{48\text{cm}^3} = \frac{28\text{cm}^3}{48\text{cm}^3} = 0.583 \times 100 = 58.3\%$

Fuente: Propia.

Diseño del filtro de carbón

$$R = \frac{VD}{\nu} = \quad \nu = \frac{R\nu}{D}$$

Donde:

V = velocidad

ν = viscosidad del agua

D = diámetro

R = Reynolds

$$v = \frac{500 \times 1.013 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}{0.1016 \text{ m}} = 0.00498 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{0.10^2 \pi}{4} = 0.00785 \text{ m}^2 \times 0.60 \text{ m} = 0.00471 \text{ m}^3$$

0.60m = longitud del filtro

$$\begin{aligned} \text{volumen efectivo} &= \text{volumen} \times \text{porosidad} \\ &= 0.00471 \text{ m}^3 \times 0.658 = 0.00309 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Area efectiva} = \frac{\text{volumen efectivo}}{\text{longitud}} = \frac{0.00309 \text{ m}^3}{0.60 \text{ m}} = 0.00515 \text{ m}^2$$

$$\text{velocidad efectiva} = \frac{Q}{\text{Area efectiva}}$$

$$Q = 0.00498 \text{ m/s} \times 0.00515 \text{ m}^2 = 0.0000256 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$0.0000256 \text{ m}^3/\text{s} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 0.0256 \text{ l/seg}$$

$$0.0256 \text{ l/seg} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} = 25.6 \text{ ml/seg}$$

$$\text{Diametro efectivo} = \sqrt{\frac{0.00515 \times 4}{\pi}} = 0.080 \text{ m}$$

$$0.80 \text{ m} \frac{1''}{0.0254 \text{ m}} = 3.14''$$

$$\frac{3 \text{ l/min}}{\text{m}^2} \rightarrow \frac{X}{0.0078}$$

$$\frac{3 \text{ l/min}}{\text{m}^2} \times 0.0078 = X$$

$$= 0.0234 \text{ l/min} \rightarrow 0.39 \text{ ml/seg}$$

caudal = 0.39 ml/seg

$$\text{vol} = 0.60 \text{ m} \times 0.0078 \text{ m}^2 \times 0.658 = 0.00308 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ L/m}^3 = 3.08 \text{ L}$$

$$3.08 \text{ l} \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} = 3080 \text{ ml}$$

$$\frac{3080 \text{ ml}}{0.39 \text{ ml/seg}} = 7897 \text{ seg} \frac{1 \text{ dia}}{86400} = 0.091 \text{ dia} = 2.19 \text{ horas}$$

Diseño del filtro de grava

$$R = \frac{vD}{\nu} = \quad v = \frac{R\nu}{D}$$

Donde:

V = velocidad

ν = viscosidad del agua

D = diámetro

R = Reynolds

$$v = \frac{500 \times 1.013 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}{0.1016 \text{ m}} = 0.00498 \text{ m/s}$$

0.60m = longitud del filtro

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{0.10^2 \pi}{4} = 0.00785 \text{ m}^2 \times 0.60 \text{ m} = 0.00471 \text{ m}^3$$

$$\text{volumen efectivo} = \text{volumen} \times \text{porosidad} \\ = 0.00471 \text{ m}^3 \times 0.583 = 0.0027 \text{ m}^3$$

$$\text{Area efectiva} = \frac{\text{volumen efectivo}}{\text{longitud}} = \frac{0.00274 \text{ m}^3}{0.60 \text{ m}} = 0.0046 \text{ m}^2$$

$$\text{velocidad efectiva} = \frac{Q}{\text{Area efectiva}}$$

$$Q = 0.00498 \text{ m/s} \times 0.0046 \text{ m}^2 = 0.0000229 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$0.0000229 \text{ m}^3/\text{s} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 0.0229 \text{ l/seg}$$

$$0.0229 \text{ l/seg} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 22.9 \text{ ml/seg}$$

$$\text{Diametro efectivo} = \sqrt{\frac{0.0046 \times 4}{\pi}} = 0.076 \text{ m}$$

$$0.076 \text{ m} \frac{1''}{0.0254 \text{ m}} = 2.99''$$

$$\frac{3 \text{ l/m}}{\text{m}^2} \rightarrow \frac{X}{0.0078}$$

$$\frac{3 \text{ l/m}}{\text{m}^2} \times 0.0078 = X$$

$$= 0.0234 \text{ l. p. m.} \rightarrow 0.39 \text{ ml/seg}$$

caudal = 0.39 ml/seg

$$\text{vol} = 0.60 \text{ m} \times 0.0078 \text{ m}^2 \times 0.583 = 0.00273 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ L/m}^3 = 2.73 \text{ l}$$

$$2.73 \text{ l} \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 2730 \text{ ml}$$

$$\frac{2730\text{ml}}{0.39_{\text{ml/seg}}} = 7000\text{seg} \frac{1\text{dia}}{86400\text{seg}} = 0.08\text{dia} = 1.9\text{horas}$$

El diseño de los filtros fue satisfactorio debido a que se tuvieron en cuenta las condiciones de diseño como: el caudal, tipo de flujo, tiempo de retención hidráulico, conductividad hidráulica, homogeneidad y porosidad del diámetro de los materiales filtrantes, y viscosidad del agua.

En cuanto a la construcción se tuvo en cuenta que los materiales utilizados fueran resistentes al tipo de agua que se utilizó, gracias a estos factores se evidenció un buen funcionamiento del filtro en cuanto a la circulación del lixiviado por cada uno de los lechos filtrantes.

Sistema de tratamiento como post tratamiento del lixiviado

Imagen 16. Montaje final del sistema de tratamiento



Fuente: Propia.

La finalidad en cuanto al estudio experimental fue observar la capacidad de adsorción y analizar la eficiencia de remoción de los materiales filtrantes y determinar si el líquido objeto de estudio reducía su carga contaminante en función de los SST. El muestreo se realizó con el método manual de muestreo puntual a la entrada y salida del filtro.

Los lixiviados son subproductos de la operación normal de rellenos sanitarios, que pueden contener una amplia diversidad de contaminantes; las prácticas tradicionales de manejo de los rellenos sanitarios se basan, principalmente, en la caracterización físico-química, debido a su relación con la toxicidad, en general la composición de los lixiviados depende del tiempo en que se encuentren en la celda donde se originan teniendo en cuenta que a mayor edad menor es la carga contaminante.

La concentración de contaminantes en los lixiviados varía diariamente, por ello fue necesario tomar muestras de entrada durante los 13 días de estudio donde se obtuvieron valores diferentes de los SST, CONDUCTIVIDAD, PH Y TEMPERATURA.

Día 1 (17 julio 2019)

Tabla 9. Medición de parámetros día 1

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	147	116	102
pH	8.68	8.57	8.61
TEMPERATURA °C	21	21	21
CONDUCTIVIDAD mS	9.3	8,7	8.2

Fuente: propia.

Día 2 (18 julio 2019)

Tabla 10. Medición de parámetros día 2

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	160	129	126
pH	8.66	8.55	8.58
TEMPERATURA °C	21	23.8	24.4
CONDUCTIVIDAD mS	9.1	9.2	9.3

Fuente: Propia.

Día 3 (19 julio 2019)

Tabla 11. Medición de parámetros día 3

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	122	114	109
pH	8.58	8.57	8.5
TEMPERATURA °C	22	22	22
CONDUCTIVIDAD mS	9.6	9.5	9.3

Fuente: Propia.

Día 4 (20 julio 2019)

Tabla 12. Medición de parámetros día 4

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	123	106	99
pH	8.64	8.6	8.6
TEMPERATURA °C	22	22	22
CONDUCTIVIDAD mS	9.6	9,5	9.3

Fuente: Propia.

Día 5 (21 julio 2019)

Tabla 13. Medición de parámetros día 5

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	151	94	108
pH	8.6	8.6	8.59

TEMPERATURA °C	23	24	24
CONDUCTIVIDAD mS	9,7	8,6	9,4

Fuente: Propia.

Día 6 (21 julio 2019)

Tabla 14. Medición de parámetros día 6

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	159	86	96
pH	8.6	8.5	8.5
TEMPERATURA °C	22	22	22
CONDUCTIVIDAD mS	9.7	8	7.8

Fuente: propia.

Día 7 (23 julio 2019)

Tabla 15. Medición de parámetros día 7

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	139	92	84
pH	8.656	8.56	8.63
TEMPERATURA °C	22	22	22
CONDUCTIVIDAD mS	9.4	8.8	8.8

Fuente: Propia.

Día 8 (24 Julio 2019)

Tabla 16. Medición de parámetros día 8

DATOS DE SALIDA

PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	119	112	111
pH	8.66	8.63	8.65
TEMPERATURA °C	21	23	23
CONDUCTIVIDAD mS	9.6	9.7	9.8

Fuente: Propia.

Día 9 (25 julio 2019)

Tabla 17. Medición de parámetros día 9

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	188	132	105
pH	8.68	8.63	8.6
TEMPERATURA °C	21	23	23
CONDUCTIVIDAD mS	9.8	9.3	9.6

Fuente: Propia.

Día 10 (26 julio 2019)

Tabla 18. Medición de parámetros día 10

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	199	70	120
pH	8.7	8.48	8.55
TEMPERATURA °C	21	23	23
CONDUCTIVIDAD mS	9.4	8.6	9.1

Fuente: Propia.

Día 11 (27 julio 2019)

Tabla 19. Medición de parámetros día 11

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	257	207	143
pH	8.72	8.67	8.66
TEMPERATURA °C	20	23	23
CONDUCTIVIDAD mS	9.1	9.1	8.9

Fuente: Propia.

Día 12 (28 julio 2019)

Tabla 20. Medición de parámetros día 12

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	125	137	119
pH	8.7	8.66	8.56
TEMPERATURA °C	21	24	23
CONDUCTIVIDAD mS	9.2	9.0	9.0

Fuente: Propia.

Día 13 (29 julio 2019)

Tabla 21. Medición de parámetros día 13

DATOS DE SALIDA			
PARÁMETROS	ENTRADA DEL FILTRO	FILTRO DE GRAVA	FILTRO DE CARBÓN
SST (mg/l)	263	160	147
pH	8.7	8.64	8.64

TEMPERATURA °C	23	24	24
CONDUCTIVIDAD mS	9.3	9.0	9.4

Fuente: Propia.

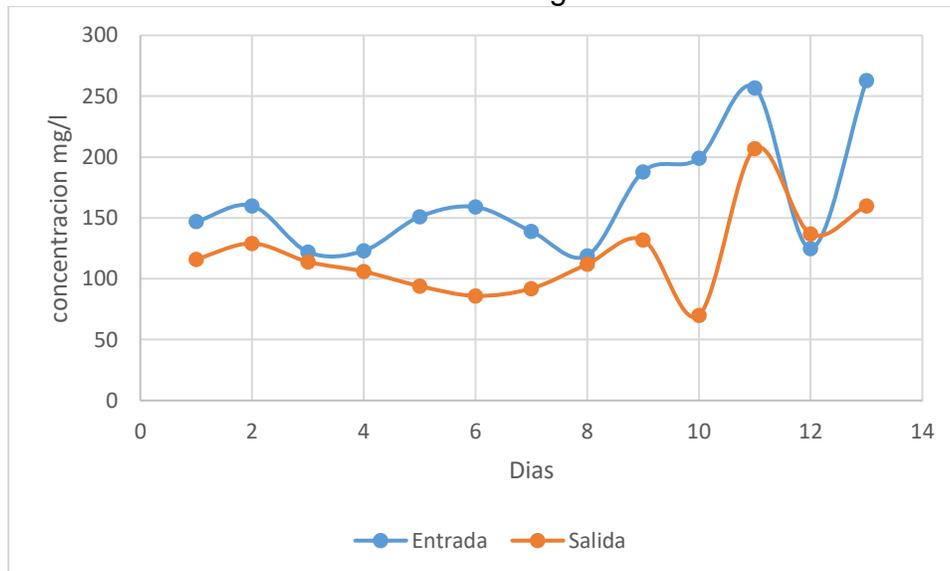
PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE SST

Tabla 22. Porcentaje de remoción SST

		SST												
		día 1	día 2	día 3	día 4	día 5	día 6	día 7	día 8	día 9	día 10	día 11	día 12	día 13
Grava		21%	19%	6.6%	14%	38%	46%	34%	6.0%	30%	65%	19%	---	39%
Carbón		31%	21%	11%	20%	28%	40%	40%	7.0%	44%	40%	44%	5.0%	44%

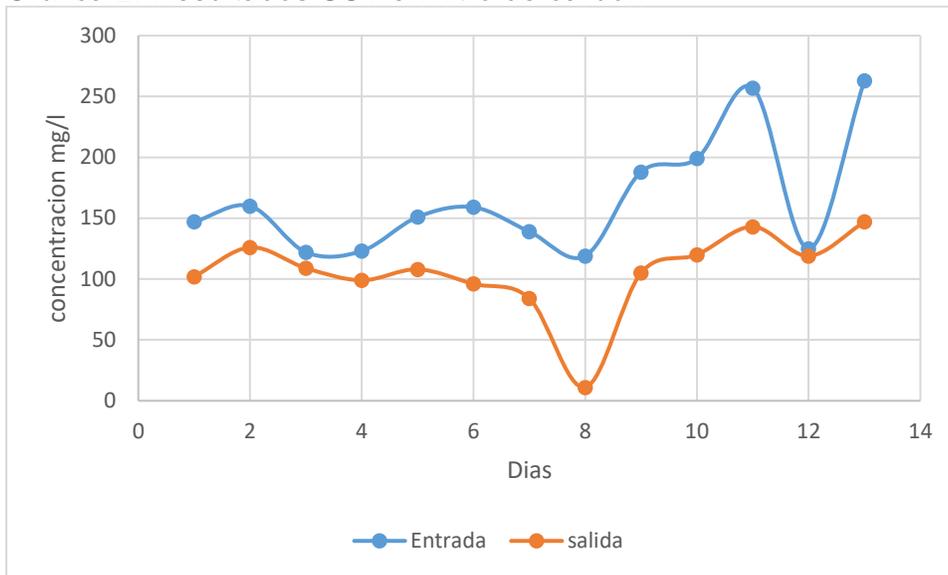
Fuente: Propia.

Gráfica 1. Resultados SST en filtro de grava



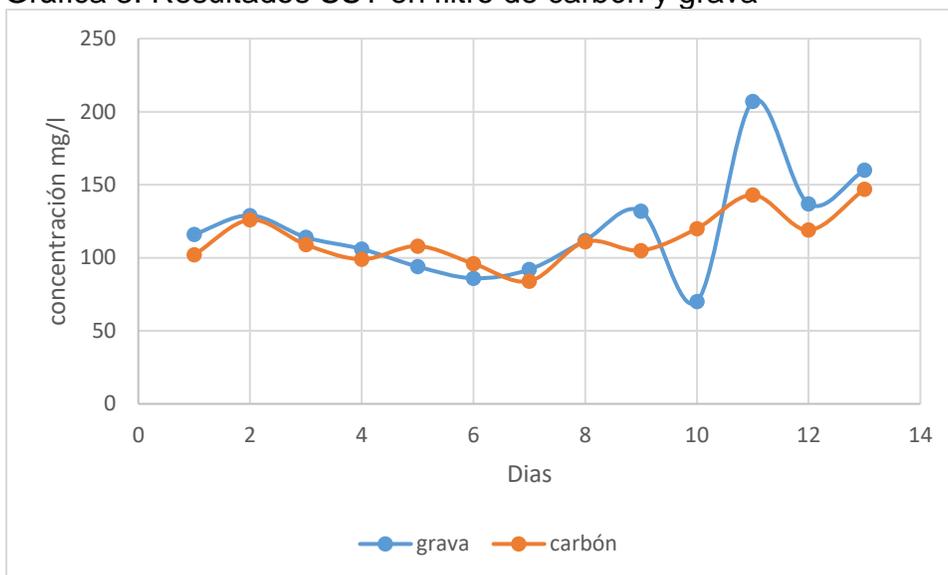
Fuente: Propia.

Gráfica 2. Resultados SST en filtro de carbón



Fuente: Propia.

Gráfica 3. Resultados SST en filtro de carbón y grava



Fuente: Propia

Como se puede observar en las gráficas 1 y 2, los días que tuvieron mayor concentración de SST a la entrada fueron el día 10 con una concentración de 199 mg/l el día 11 con 257 mg/L, el día 13 con una concentración de 263 mg/L, también se puede evidenciar que en los mismos días fue donde se tuvo mayor eficiencia de remoción en el filtro de carbón y grava, por ende se pudo deducir que a mayor concentración mayor capacidad de adsorción de los materiales filtrantes esto debido a que las fuerzas de van der Waals permitieron que las partículas se aglomerasen y

estas al aumentar su tamaño fueron retenidas con mayor facilidad en los poros por fuerzas electrostáticas en especial este tipo de sustancias ya que por ser solidos la probabilidad de adsorción aumenta en contraposición de sus medio filtrante.

También se puede analizar que en los días 9 y 11 el medio filtrante del carbón mineral fue el que presento mayor capacidad de adsorción esto debido a que las fuerzas que actuaron en el medio y entre cada partícula fueron eficaces a la hora de retener y adsorber los sólidos y el día 10 el filtro de grava fue el de mayor capacidad de adsorción un comportamiento similar al filtro de carbón como se muestra en la gráfica número 3, donde se presentan los resultados de salida de los dos medios filtrantes.

Por otro lado, en los días 3, 8 y 12 los filtros tuvieron menor concentración de SST a la entrada del filtro, el día 3 con una concentración de 122 mg/L, el día 8 con 119 mg/L y el día 12 con una concentración de 125 mg/L de igual manera se puede observar que durante estos días mencionados también se obtuvieron los menores resultados en cuanto a eficiencia de remoción, teniendo en cuenta que la concentración de entrada fue baja se puede decir que los días antes mencionados el lixiviado objeto de estudio se encontraba más diluido que el resto de los días, por lo tanto las partículas se encontraban más dispersas haciendo difícil la aglomeración entre ellas por medio de las fuerzas de van der Waals, y estas partículas al estar en constante movimiento no lograron atraerse por fuerzas electrostáticas por lo tanto el paso de ellas por los filtros fue continuo sin ser retenidas por el material.

En cuanto al resto de los días el comportamiento de los filtros fue similar en la eficiencia remoción de solidos como se observa en las gráficas 2 y 3 esto debido a que el material filtrante en esos días tuvo el mismo rendimiento en cuanto a la adsorción de las partículas suspendidas en el lixiviado y las fuerzas que ejercieron en esos días tuvieron el mismo comportamiento.

En general durante los 13 días de estudio se obtuvieron eficiencias de remoción es decir los materiales filtrantes utilizados en el método experimental tienen gran capacidad de adsorción de contaminantes, las cuales se pueden evidenciar en el siguiente subcapítulo donde se evidencia los resultados en porcentaje de remoción de cada filtro.

PROMEDIOS DE LOS PORCENTAJES DE REMOCIÓN

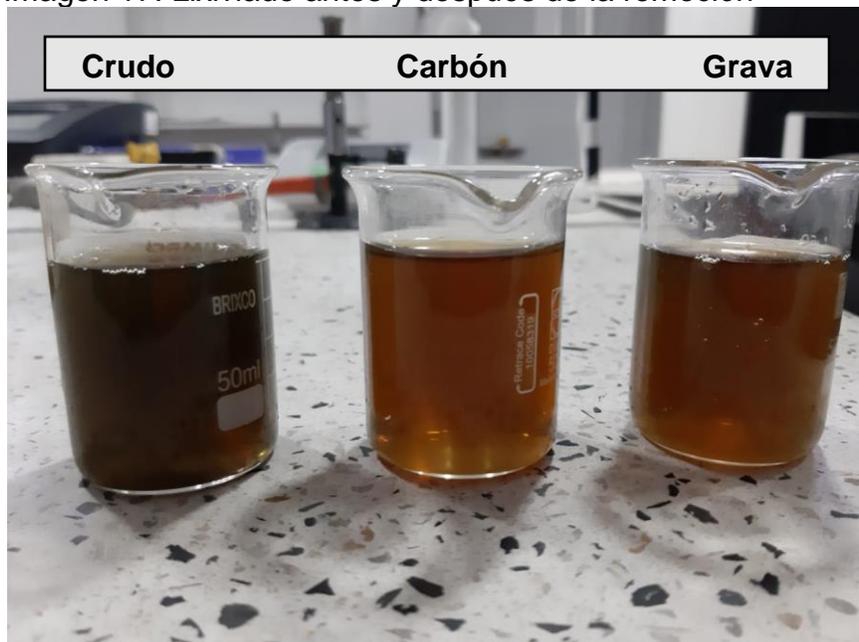
Tabla 23. Porcentajes de remoción SST

	PROMEDIO SST
Grava	26.978 %
Carbón	29.183 %

Fuente: Propia.

En la tabla número 23 se refleja el porcentaje de remoción en cuanto a SST de cada uno de los materiales filtrantes, donde se puede observar que no hay una diferencia significativa en la capacidad de adsorción, sin embargo se puede deducir que el carbón mineral tuvo mayor rendimiento en la remoción con un porcentaje de 29% lo cual puede ser por la porosidad que maneja este material que va asociado a una mayor área superficial, facilitando el contacto entre materia adsorbente y sustancia adsorbida.

Imagen 17. Lixiviado antes y después de la remoción



Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla 24. Comparación de medias SST (mg/l)

NUMERO DE DATOS (DIAS)	FILTRO GRAVA	FILTRO CARBÓN	DIFERENCIA
1	116	102	14
2	129	126	3
3	114	109	5
4	106	99	7
5	94	108	-44
6	86	96	-10

7	92	84	8
8	112	111	1
9	132	105	27
10	70	120	-50
11	207	143	64
12	137	119	18
13	160	147	13
Media	119.6	113	6.6
Varianza	1259.06	330.05	3724.47

Fuente: Propia.

$$\bar{d} = 6.6$$

$$s^2 = 3724.47$$

$$n = 13$$

$$t_0 = \frac{6.6}{\frac{\sqrt{3724.47}}{\sqrt{13}}} = 0.39$$

- Se rechaza si H_0 si $|t_0| > t_{\alpha/2}$ o sea las áreas bajo la curva a la derecha del punto $t_{\alpha/2}$
- De la tabla T Student para $\alpha/2 = 0.025$ y $n - 1 = 12$ *grados de libertad*
- $t_{\alpha/2} = 2.179$
- Dado que $|t_0 = 0.39| < t_{\alpha/2} = 2.179$
- Se concluye que no hay suficiente evidencia para rechazar H_0 lo cual indica que los dos filtros no tienen diferencias significativas y que los materiales filtrantes generan un efecto similar sobre la calidad del agua con respecto a los SST.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El análisis estadístico muestra que no hubo una diferencia significativa para los medios filtrantes es decir que los materiales generan un efecto similar sobre la calidad del agua en cuanto a SST.
- Las concentraciones de salida en los filtros presentan variaciones sinusoidales, estas no son debidas al tipo de material o fenómenos de la misma filtración, si no a que las concentraciones de entradas están sujetas a las naturalezas de insumos y tienen un comportamiento similar, asociadas las dinámicas climatológicas y esquematización del sitio de disposición final.
- El sistema muestra que la capacidad de retención de SST es mayor para el filtro de GRAVA que para el de CARBÓN, ya que el filtro de grava tuvo una capacidad de retención del 65% en el día 10 y 44% para el filtro de carbón en los días 9,11,13.

5.2. RECOMENDACIONES

- Teniendo en cuenta los resultados positivos obtenidos en la investigación se sugiere continuar este proceso con parámetros distintos a los ya evaluados para aportar un mayor conocimiento a la investigación.
- Se recomienda que para una próxima investigación relacionada con filtración se utilicen y analicen materiales diferentes a los ya evaluados.
- Para nuevas investigaciones se sugiere que el diseño del filtro se realice con un flujo ascendente y que se evalúe otro tipo de agua residual.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Acosta y E. Fabián, «Panorama actual de la situación mundial, nacional y distrital de los residuos sólidos: análisis del caso Bogotá D.C. Programa Basura Cero», *ReponameRepositorio Inst. Univ. Nac. Abierta Distancia*, may 2015.
- [2] «Repositorio Institucional UNAD: Panorama actual de la situación mundial, nacional y distrital de los residuos sólidos: análisis del caso Bogotá D.C. Programa Basura Cero». [En línea]. Disponible en: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:vXiKC11I9ZAJ:https://repository.unad.edu.co/handle/10596/3417+&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=co>. [Accedido: 13-sep-2019].
- [3] «CEPIS/OPS - Análisis Sectorial de Residuos Sólidos en Colombia». [En línea]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/analisis/colombia/colombia6.html>. [Accedido: 13-sep-2019].
- [4] C. M. Cortés, *Estudio de los residuos sólidos en Colombia*. U. Externado de Colombia, 2018.
- [5] «3.1 Principios Básicos». [En línea]. Disponible en: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:AZk6KmqxHncJ:www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap3.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>. [Accedido: 13-sep-2019].
- [6] «Basura en Colombia: en el país se producen 10 millones de toneladas al año». [En línea]. Disponible en: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/basura-en-colombia-en-el-pais-se-producen-10-millones-de-toneladas-al-ano/38765>. [Accedido: 13-sep-2019].
- [7] «Caracterización de Residuos Sólidos». [En línea]. Disponible en: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:3bMFBAMRaEgJ:ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/download/34/31/+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>. [Accedido: 13-sep-2019].
- [8] A. Pavón y M. José, «MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN MEJÍA - PICHINCHA--ECUADOR», feb. 2018.
- [9] «Tesis Doctoral - Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Sevilla». [En línea]. Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:TlqJgS-k4_cJ:www.doctorado.us.es/tesis-doctoral+&cd=3&hl=es&ct=clnk&gl=co. [Accedido: 13-sep-2019].
- [10] «Redalyc.Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario». [En línea]. Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:k08R0y-_jFMJ:www.redalyc.org/pdf/467/46780213.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co. [Accedido: 13-sep-2019].
- [11] B. Castro y M. Fernanda, «Uso del óxido de grafeno como floculante para el tratamiento en el lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana», 2018.
- [12] «Redalyc.Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario "El Guayabal" de la ciudad San José de». [En línea]. Disponible en:

- <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:HuSa577FAX0J:www.redalyc.org/pdf/852/85202007.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>. [Accedido: 13-sep-2019].
- [13] «Alternativas de tratamiento de lixiviados aplicables al relleno sanitario parque ambiental Loma de Los Cocos de la Ciudad de Car». [En línea]. Disponible en: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:KL3jSmw6zgwJ:www.redisa.net/doc/artSim2013/TratamientoYValorizacionDeResiduos/Alternativas%2520Tratamiento%2520Lixiviados%2520Vertedero%2520Colombia.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>. [Accedido: 13-sep-2019].
- [14] A. López Guerrero, A. F. L. Guerrero, y I. A. S. Ortiz, «Postratamiento en escala piloto del lixiviado del relleno sanitario Antanas (Pasto-Nariño) por filtración-adsorción con arena, antracita y carbón activado», *Rev. Ing.*, vol. 0, n.º 43, pp. 10-15, dic. 2015.
- [15] «MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL». [En línea]. Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:bMJCux8dLXcJ:www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Decretos/dec_0838_230305.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co. [Accedido: 13-sep-2019].
- [16] Y. Peng, «Perspectives on technology for landfill leachate treatment», *Arab. J. Chem.*, vol. 10, pp. S2567-S2574, may 2017.
- [17] S. F. Gómez, A. M. Rojas, J. Velandía, y J. E. Almeida, «Revisión de documentación acerca de la contaminación por lixiviados generados en rellenos sanitarios en Colombia», *Innovando En U*, n.º 8, pp. 77-90, dic. 2016.
- [18] E. Pérez-López, «Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica», *Rev. Tecnol. En Marcha*, vol. 29, n.º 3, p. 3, nov. 2016.
- [19] E. Giraldo, «Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes», *rev.ing.*, vol. 0, n.º 14, p. 44, ene. 2014, doi: 10.16924/riua.v0i14.538.
- [20] J. A. M. Benavides, «DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE OSMOSIS INVERSA PARA LA EMPRESA DOBER OSMOTECH DE COLOMBIA LTDA.», p. 136, 2011.
- [21] «SUPERFICIES SÓLIDAS: ADSORCIÓN Y CATÁLISIS HETEROGÉNEA». [En línea]. Disponible en: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XtxunawWfrQJ:https://www.uv.es/tunon/pdf_doc/Superficies_Solidas_A.pdf+&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=co. [Accedido: 30-nov-2019].
- [22] «Fuerzas de Van der Waals: Concepto y Características». [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/fuerzas-de-van-der-waals/>. [Accedido: 27-nov-2019].
- [23] J. C. L. Ramírez y P. P. Z. Guío, «EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUB- SUPERFICIAL A ESCALA PILOTO UTILIZANDO COMO MEDIOS FILTRANTES ANTRACITA, CARBÓN ACTIVADO Y COQUE Y SU EFECTO EN UN AGUA RESIDUAL», p. 138.

- [24] «UTA - FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA». [En línea]. Disponible en: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:rNqNaSyn8DoJ:ficm.uta.edu.ec/+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>. [Accedido: 30-nov-2019].
- [25] «Repositorio Digital de la Universidad de Cuenca: Evaluación de la eficacia de los filtros de los procesos de filtración lenta y filtración rápida en la potabilización de agua de la junta regional de Bayas». [En línea]. Disponible en: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:c9WPM1tVtcsJ:dspacce.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26016+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>. [Accedido: 30-nov-2019].
- [26] Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolucion 0631*, Bogotá, 2015.
- [27] «Tabla t-Student t0». [En línea]. Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:wsbdAvtkZecJ:cms.dm.uba.ar/academico/materias/1ercuat2015/probabilidades_y_estadistica_C/tabla_tstudent.pdf+&cd=17&hl=es&ct=clnk&gl=co. [Accedido: 30-nov-2019].

