

1-1-2018

# Uso del óxido de grafeno como floculante para el tratamiento en el lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana

María Fernanda Bustos Castro

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria)

---

## Citación recomendada

Bustos Castro, M. F. (2018). Uso del óxido de grafeno como floculante para el tratamiento en el lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/761](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/761)

This is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).

USO DEL ÓXIDO DE GRAFENO COMO FLOCULANTE PARA EL  
TRATAMIENTO EN EL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO DOÑA  
JUANA.

MARIA FERNANDA BUSTOS CASTRO

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
2018

USO DEL ÓXIDO DE GRAFENO COMO FLOCULANTE PARA EL TRATAMIENTO  
EN EL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA.

MARIA FERNANDA BUSTOS CASTRO

Cod. 41121060

Proyecto de investigación presentado como requisito para optar el título de  
Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Director

Oscar Fernando Contento Rubio

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

2018

**Nota de aceptación.**

---

---

---

---

**Director**

---

**Jurado 1**

---

**Jurado 2**

**Bogotá D.C.**

## **AGRADECIMIENTOS**

En este paso me siento agradecida en primera instancia con Dios por haberme dado la fuerza y la oportunidad de haber culminado una etapa más en mi vida donde me empiezo a desarrollarme como profesional en ingeniera ambiental y sanitaria siendo una formada con valores de honestidad, tolerancia, respeto y amor por el prójimo y por la naturaleza.

Agradezco a mi familia por mostrarme que la unión hace la fuerza y trabajando en equipo se llega lejos. Agradezco de forma especial a mi mamá quien ha sido fuente de perseverancia, constancia, amor y rigor para llegar a cumplir mis metas a lo largo de mi vida.

Agradezco a los docentes de la Universidad de la Salle por su apoyo y su confianza en este proyecto, a mis amigos que han estado apoyándome desde el principio de este camino y que siempre han estado allí para darme ánimo, fortaleza y apoyo en todos los momentos mientras estuve en la universidad.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
ANTECEDENTES	18
1. GENERALIDADES .....	24
1.1 Generación de lixiviados.....	24
1.1.1 Fases de generación en los lixiviados .....	25
2. Composición de los lixiviados.....	26
3. Calidad del lixiviado .....	27
4. Problemática causada por los lixiviados .....	29
4.1 Compuestos orgánicos .....	31
4.2 Otras sustancias químicas.....	32
5. Relleno sanitario .....	32
5.1 Parámetros que debe tener un Relleno Sanitario para el manejo de lixiviados .....	33
5.2 Relleno Sanitario Doña Juana .....	36
5.2.1 Localización .....	36
5.2.2 Descripción de las zonas .....	39
5.2.3 Residuos depositados en el relleno sanitario Doña Juana.....	40
5.3 Generación de lixiviados en el relleno sanitario Doña Juana.....	41
5.3.1 Factores climáticos y su incidencia en la producción de lixiviados .....	43
5.3.1.1 Precipitación.....	44
5.3.1.2 Temperatura .....	44
5.3.1.3 Evaporación.....	45
5.3.2 Calidad del vertimiento .....	46
5.3.3 Proyección de generación lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana .....	49

5.4	Cambios en la Planta de Tratamiento de Lixiviados durante los últimos años .....	50
5.5	Descripción del tratamiento de lixiviados Doña Juana .....	51
5.5.1	Distribución de entrada y derivación .....	52
5.5.1.1	Línea de conducción del lixiviado .....	53
5.5.2	Proceso fisicoquímico .....	53
5.5.3	Proceso biológico aerobio .....	54
5.5.4	Proceso biológico de desnitrificación .....	55
5.5.5	Tratamiento de lodos .....	56
5.5	Líneas de tratamiento de lixiviado al año 2017 .....	56
5.7	Eficiencia de las unidades de proceso .....	58
6.	Procesos de coagulación y floculación para el tratamiento de lixiviados .....	58
7.	Oxido de grafeno .....	59
8.	Resultados y Análisis de resultados .....	61
9.	Conclusiones .....	65
10.	Recomendaciones .....	66
11.	Bibliografía .....	68
12.	Anexos .....	72

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Composición lixiviado de rellenos sanitarios por fases.....	25
<b>Tabla 2.</b> Composición de los lixiviados en un relleno sanitario .....	28
<b>Tabla 3.</b> Metales pesados y los efectos negativos sobre la salud humana. ....	30
<b>Tabla 4.</b> Compuestos orgánicos volátiles y los efectos negativos en la salud.....	31
<b>Tabla 5.</b> Compuestos orgánicos sintéticos y sus efectos negativos en la salud.....	32
<b>Tabla 6.</b> Parámetros técnicos para determinar la ubicación de un relleno sanitario .....	33
<b>Tabla 7.</b> Parámetros técnicos para el manejo de lixiviados en un Relleno Sanitario.....	34
<b>Tabla 8.</b> Descripción de las zonas del relleno sanitario Doña Juana y su función actual ...	37
<b>Tabla 9.</b> Municipios y su producción diaria de residuos sólidos.....	40
<b>Tabla 10.</b> Caudal promedio de lixiviado generado, tratado directamente y con tratamiento alternativo.....	42
<b>Tabla 11.</b> Cumplimiento parámetros de vertimiento año 2015 .....	46
<b>Tabla 12.</b> Cumplimiento parámetros de vertimiento año 2016 .....	47
<b>Tabla 13.</b> Cumplimiento parámetros de vertimiento año 2017 .....	48
<b>Tabla 14.</b> Test de jarras con PAC y polímero.....	62
<b>Tabla 15.</b> Test de jarras con óxido de grafeno.....	63
<b>Tabla 16.</b> Test de jarras óxido de grafeno y polímero .....	65

## LISTA DE GRÁFICAS

<b>Grafica 1.</b> Promedio mensual/año de residuos dispuestos .....	41
<b>Grafica 2.</b> Variación del lixiviado generado y los tratados 2014 a 2016 .....	43
<b>Grafica 3.</b> Precipitación mensual multianual - Estación CAR Doña Juana 2014 – 2016...	44
<b>Grafica 4.</b> Temperatura mensual multianual - Estación CAR Doña Juana 2014 – 2016 .....	45
<b>Grafica 5.</b> Evaporación mensual multianual - Estación CAR Doña Juana 2014 – 2016 .....	45
<b>Grafica 6.</b> Modelo predictivo de producción de lixiviados 2011 - 2020 .....	49

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Maqueta Planta de Tratamiento de Lixiviados Doña Juana .....	21
<b>Ilustración 2.</b> Límites del relleno sanitario Doña Juana .....	37
<b>Ilustración 3.</b> Descripción de las zonas del relleno sanitario Doña Juana .....	39
<b>Ilustración 4.</b> Planta de tratamiento de lixiviados .....	52
<b>Ilustración 5.</b> Escenario de operación actual - Línea A.....	57
<b>Ilustración 6.</b> Escenario de operación actual - Línea B .....	57
<b>Ilustración 7.</b> Obtención del óxido de grafeno a partir del grafito. ....	59
<b>Ilustración 8.</b> Test de jarras .....	62

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Resolución 166 de 2008; norma de vertimientos sobre la fuente de uso público denominada Río Tunjuelo .....	72
<b>Anexo B.</b> Ficha de seguridad del óxido de grafeno.....	73
<b>Anexo C.</b> Ficha de seguridad policloruro de aluminio PAC .....	77
<b>Anexo D.</b> Ficha de seguridad del polímero.....	82
<b>Anexo E.</b> Entrevista con la ingeniera a cargo de la operación del Relleno Sanitario Doña Juana. En formato de audio CD.....	82

## GLOSARIO

CGR: Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. E.S.P. desarrolla las actividades de administración, operación y mantenimiento integral de rellenos sanitarios en sus componentes de disposición final de residuos sólidos, tratamiento de lixiviados y alternativas de aprovechamiento de los residuos, cumpliendo con los compromisos técnicos, contractuales y la legislación aplicable.

COAGULACIÓN: Es el proceso por el cual se desestabilizan las partículas coloidales que se encuentran en suspensión de tal forma que se logre su aglomeración. Como consecuencia de esto se eliminan la materia suspendida, adicionalmente la coagulación disminuye y/o elimina la turbiedad, la concentración de la materia orgánica y microorganismos.

DAF: Sistema de flotación de aire directo el cual es un proceso de separación de partículas en suspensión por medio de burbujas de aire en una solución saturada. Los sólidos se adhieren a las burbujas en su recorrido ascendente y son separados en la superficie por un barredor.

DBO5: Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días. Se define como la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante el proceso de degradación de las sustancias orgánicas. Es usada para medir el grado de contaminación de un efluente y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO<sub>2</sub>/L).

DQO: Demanda Química de Oxígeno, se define como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en dióxido de carbono y agua. Es usada también como parámetro para medir el grado de contaminación de un efluente y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO<sub>2</sub>/L). Cuanto mayor sea el valor de la DQO más contaminante es la muestra.

**FLOCULACIÓN:** Es la segunda etapa luego del proceso de coagulación, la cual corresponde a una mezcla lenta que permite la aglomeración de los flóculos coagulados con el fin de aumentar su tamaño y peso para posteriormente ser sedimentados.

**FLÓCULOS:** Es un conjunto de partículas pequeñas que se aglomeran formando partículas de mayor tamaño con mejores condiciones para sedimentarse, esto se obtiene mediante un proceso fisicoquímico o biológico.

**LIXIVIADOS:** Es el líquido que se genera a partir de la descomposición bioquímica de los residuos al igual que la interacción de estos con el agua de escorrentía superficial a través de los desechos que se encuentran en proceso de biodegradación.

**METALES PESADOS:** Es cualquier elemento químico metálico que contiene una alta densidad relativa lo cual hace que sea tóxico y/o peligroso en bajas concentraciones. No tienden a degradarse por medios naturales, adicionando que suelen acumularse en el organismo.

**ÓXIDO DE GRAFENO:** Es el resultado de la oxidación del grafito, donde se intercalan moléculas de oxígeno entre las capas de carbono, que al momento de reducirse se separa en láminas de pocas capas superpuestas.

**PAC:** Policloruro de aluminio, es un coagulante inorgánico a base de sales de aluminio polimerizadas utilizado principalmente para remover color y materia coloidal en sistemas acuosos, plantas potabilizadoras y clarificación de efluentes industriales.

**POLÍMERO:** Es la unión de monómeros lo cual permite que aumente su peso molecular, los cuales pueden ser catiónicos o aniónicos que se utilizan para llevar micro-flóculos neutralizados por coagulantes juntos para hacer macro-flóculos por la reacción de puente.

**PONDAJE:** Parte del sistema de conducción y tratamiento del lixiviado el cual tiene como función almacenar temporalmente el lixiviado antes de ingresar al sistema de tratamiento.

**RELLENO SANITARIO:** Es el sitio que se selecciona teniendo en cuenta determinadas especificaciones técnicas, el cual tiene como fin tener una disposición de residuos sólidos controlada de tal forma que se eviten daños, riesgos y peligros a la salud pública. Igualmente pretenden minimizar y controlar los impactos ambientales.

**STL:** El sistema de tratamiento de lixiviados es la unión de estudios, diseños, construcciones, equipos, instalaciones, tecnologías, suministros y actividades necesarias para el tratamiento del lixiviado producido por el Relleno Sanitario Doña Juana. Este lixiviado se recolecta transporta, almacena, trata y finalmente se vierte en el Río Tunjuelo cumpliendo con la normatividad para vertimiento de la CAR, donde también se incluye el tratamiento y la disposición de los lodos producidos.

**TEST DE JARRAS:** Es un procedimiento que se realiza para determinar las condiciones óptimas para el funcionamiento de productos químicos tales como coagulantes, floculantes, antiespumantes, controladores de olores, cal, soda, ácidos, etc. De tal forma que se permite identificar la dosificación para un determinado volumen de líquido a tratar. Las condiciones que permite identificar son: (Casadiego.)

- Grado y punto de agitación.
- Tiempos de retención
- Sistemas de mezcla (estática o dinámica)

Al ser una técnica de simulación cada planta o quien utilice este método debe tener en cuenta sus propias condiciones de operación.

**UAESP:** Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos es la entidad encargada de garantizar la prestación, coordinación, supervisión y control de los servicios de recolección, transporte, disposición final, reciclaje y aprovechamiento de residuos sólidos, la limpieza de vías y áreas públicas; los servicios funerarios en la infraestructura del Distrito y el servicio de alumbrado público.

## RESUMEN

El trabajo de tesis elaborado nace de una de las problemáticas más grandes que poseen los rellenos sanitarios el cual es la generación de lixiviados. Para ello se han desarrollado diferentes métodos y tecnologías con el fin de mejorar los sistemas de tratamiento de lixiviados. Uno de los procesos unitarios de gran importancia es el proceso fisicoquímico el cual tiene como fin remover los metales pesados y disminuir la carga orgánica usando sustancias químicas que permitan la aglomeración de partículas para luego ser sedimentadas.

El proceso fisicoquímico requerido es el uso de coagulantes o floculantes, que según las condiciones en las que se encuentre el lixiviado se realiza una dosificación para que el proceso funcione. Se estudió el uso del óxido de grafeno como un posible floculante, debido a sus propiedades para la absorción de metales y se evaluó su capacidad de remoción de materia orgánica expresada en este caso de estudio como DQO

Para determinar la dosificación adecuada del óxido de grafeno se realizaron diferentes pruebas de jarras donde se tomó el valor de la turbiedad como parámetro para determinar la jarra a la cual se le realizó la prueba de DQO.

Se realizaron tres pruebas de jarras; el primer test de jarras se ejecutó con el PAC y el polímero que se utiliza en el relleno sanitario Doña Juana, el segundo se efectuó con el óxido de grafeno y el polímero; el tercero y último se realizó solo con el óxido de grafeno.

Al final se evaluó la variación de la DQO para determinar con cual mezcla se obtiene mayor porcentaje de remoción y el rango de dosificación. Dando como resultado un porcentaje similar de remoción de DQO utilizando el PAC y el polímero juntos, así como utilizando el óxido de grafeno como floculante.

Por lo anterior, se concluye entonces la necesidad de seguir estudiando las propiedades del óxido de grafeno con el fin de determinar cuál estructura es más eficiente para el proceso de adsorción de metales pesados y materia orgánica expresada en DQO.

*PALABRAS CLAVE: Relleno Sanitario, lixiviados, proceso fisicoquímico, PAC, DQO, turbiedad.*

## ABSTRACT

The elaborated thesis work is born from one of the biggest problems that landfills have, which is the generation of leachates. To this end, different methods and technologies have been developed in order to improve the leachate treatment systems. One of the unitary processes of great importance is the physicochemical process, which aims to remove heavy metals and reduce the organic load using chemical substances that allow the agglomeration of particles and then be sedimented.

The physicochemical process requires the use of coagulants or flocculants that, depending on the conditions in which the leachate is found, a dosage is made for the process to work. The use of graphene oxide as a possible flocculant was studied, due to its properties for the absorption of metals and its organic matter removal capacity expressed in this case was evaluated as COD.

To determine the proper dosage of graphene oxide, different jar tests were performed where the turbidity value was taken as a parameter to determine the jar to which the COD test was performed. Three jar tests were performed; for the first test of jars was made with the PAC and the polymer used in the Doña Juana landfill, the second was made with graphene oxide and the polymer and the third was made only with graphene oxide. In the end, the variation of the COD was evaluated to determine which mixture obtained the highest percentage of removal and the dosage range. Resulting in a similar percentage of COD removal using the PAC and the polymer together and using the graphene oxide as a flocculant. The properties of graphene oxide should be further studied to determine which structure is most efficient for the adsorption of heavy metals and organic matter expressed in COD.

*KEYWORDS: Landfill, leachate, physicochemical process, PAC, DQO, turbidity.*

## INTRODUCCIÓN

De los grandes problemas ambientales a los cuales se enfrentan las sociedades del mundo es el sitio de disposición final de los residuos sólidos. El acelerado crecimiento demográfico genera un incremento en la demanda de servicio de limpieza, así como una producción elevada de cantidades de residuos sólidos.

Se ha evidenciado en la literatura que los países emergentes son grandes productores de residuos sólidos, y además carecen de la tecnología adecuada para el manejo de este problema ambiental; por lo cual, para la disposición final de estos residuos, se han implementado los rellenos sanitarios, los cuales son sitios adecuadamente seleccionados para depositar los residuos generados evitando su dispersión y focos de infección.

Sin embargo, esto no es el único problema que generan los residuos sólidos. El producto de la degradación de la materia orgánica que poseen los residuos sólidos genera gases y líquidos con altas concentraciones de ácidos orgánicos y materia disuelta en forma de sólido, el cual se conoce como lixiviado.

Los lixiviados son líquidos de tonos oscuros que se generan a partir de la descomposición de la materia orgánica y el agua que se filtra por la precipitación, los cuales al mezclarse se disuelven y arrastran partículas contenidas en los residuos. La composición de los lixiviados varía dependiendo al tipo de residuos, factores climáticos de la zona, velocidad de descomposición entre otras condiciones que hacen que posea una alta carga orgánica. (Luna, 2008)

En los sistemas de tratamiento de los lixiviados muchas veces para mejorar la eficiencia 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 por el efecto de los químicos coagulantes que pueden ser sales metálicas o poli electrolitos. En seguida del coagulante se utiliza un floculante y luego se realiza la sedimentación de las partículas. Para este proceso

es de gran importancia determinar de forma asertiva el coagulante y la dosificación adecuada con el fin de encontrar la relación con las características fisicoquímicas del lixiviado.

Los coagulantes que se utilizan comúnmente en el mercado son las sales metálicas como el sulfato y cloruro de aluminio, sulfato y cloruro férrico o poli férrico entre otros, se utilizan también poli electrólitos. (Novelo, Borges, Riancho, Franco, Vallejos, & Mejía, 2004)

Teniendo en cuenta que la función de los floculantes es aglomerar los floculos para la remoción de material particulado, materia orgánica, metales pesados entre otros. El óxido de grafeno es un alótropo del carbono que se compone por una red de carbón hexagonal donde experimentalmente se ha demostrado que está constituido por grupos hidroxil y átomos de oxígeno unidos a dos átomos de carbono llamados epóxidos, mientras que la cantidad de grupos carboxil y carbonil es relativamente mínima. (Maos, 2012). Aún está sujeto a debate su estructura química debido a la complejidad del material y la falta de técnicas analíticas precisas para la caracterización de este material.

El óxido de grafeno ha tenido diferentes campos de aplicación como en películas conductivas transparentes, sensores, aplicaciones fotovoltaicas, baterías, sistemas de administración de medicinas, en compuestos de polímeros, como adsorbentes de materiales entre otros. (Dreyer, 2010).

Estudios realizados por el Instituto de Nanociencia e Ingeniería ubicado en Australia en el año 2011 publicó resultados de una investigación en la cual se hizo una corteza de óxido de grafito a partículas de arena donde se logró incrementar significativamente la retención de iones pesados como el plomo. Esto evidencia que este alótropo puede generar tecnologías de bajo costo para la purificación de agua o líquidos con un alto contenido de metales pesados. (WEI, 2011).

Por lo anterior, el propósito de la investigación fue determinar la eficiencia del óxido de grafeno como floculante y la dosis óptima para la remoción de materia orgánica medida

como demanda química de oxígeno DQO y evaluar la remoción de los metales pesados que están fuera del rango de la resolución 166 del 2008 la cual rige la calidad que debe tener el vertimiento del lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana sobre el río Tunjuelo.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Evaluar la aplicación del óxido de grafeno como floculante para el tratamiento del lixiviado en el relleno sanitario de Doña Juana, de tal forma que permita determinar la disminución en las concentraciones de los contaminantes tomando como componente de estudio la materia orgánica expresada en DQO.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la caracterización físico – química que actualmente contiene el lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana.
- Analizar las características del óxido de grafeno y su eficiencia como agente floculante.
- Identificar los porcentajes de remoción en las concentraciones de los contaminantes con la aplicación del óxido de grafeno.

## ANTECEDENTES

Bogotá actualmente cuenta con aproximadamente 8'081.000 habitantes. La tasa de crecimiento de la población es aproximadamente el 2% anual que así mismo lleva un crecimiento económico aproximadamente del 4% lo cual conlleva al incremento de la demanda y oferta de servicios públicos aumentando significativamente la producción de residuos sólidos en la ciudad. La tasa de crecimiento de residuos es de un promedio del 4% anual. (Observatorio de salud ambiental, 2015)

La Secretaria Distrital de Salud desde el año 2002 ha implementado acciones de inspección y vigilancia con el fin de realizar intervenciones en el componente sanitario, ambiental y social con participación comunitaria en el área de influencia del relleno sanitario Doña Juana. El objeto de estas intervenciones es mejorar la operación del relleno sanitario de tal modo que contribuya a la disminución de los impactos negativos en la calidad de vida de la población y condiciones de salud de la población aledaña y de los mismos trabajadores.

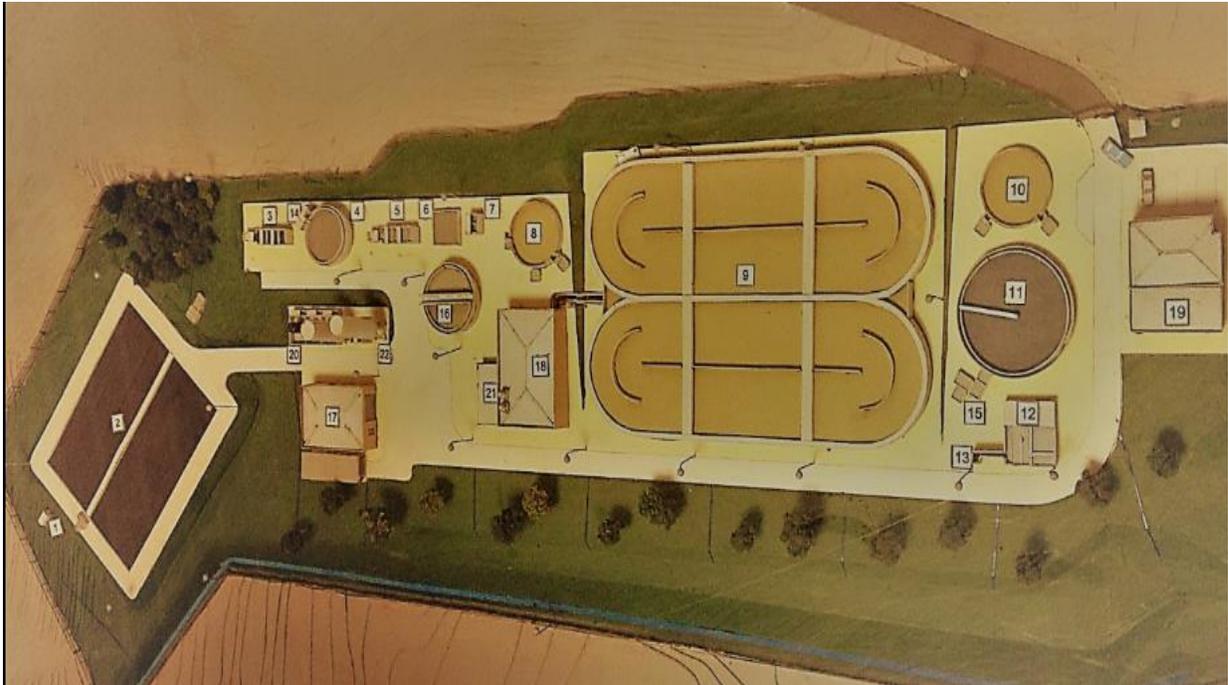
Desde el inicio del funcionamiento del relleno sanitario en el año 1988 se presentaron problemas con la adecuación de la zona como sitio de disposición final dado que no contaron con factores como los gases generados de la descomposición de la materia orgánica y los lixiviados que se generan con la precipitación al ser un botadero de cielo abierto. En 1992, para los diseños de la zona II, zona V, Zona IV y zona VI se incluyeron aspectos como la impermeabilización de fondo con geomembrana y como tratamiento de lixiviados se realizaba recirculación de lixiviados para las nuevas zonas. En septiembre de 1997, debido al mal manejo de los gases y de los lixiviados los cuales generaban presión interna, se deslizaron aproximadamente 800.000 m<sup>3</sup> de residuos. En 1999 se contrataron los diseños para un sistema de tratamiento de lixiviados producidos por el relleno sanitario Doña Juana y en el año 2000 se inició su construcción. La planta fue diseñada para tratar inicialmente un caudal de 29m<sup>3</sup>/h y un caudal punta diario admisible de 50m<sup>3</sup>/h. (Sanchez & Castro, 2013)

Teniendo en cuenta diferentes factores ambientales y el constante crecimiento de la tasa de residuos sólidos, se han modificado los procesos con el fin de mejorar la eficiencia de la

planta teniendo en cuenta que el caudal que ingresa actualmente a la planta es de aproximadamente 70m<sup>3</sup>/h, esta información la suministró la ingeniera a cargo del Relleno Sanitario Doña Juana

Para la línea de agua, línea de lodos y servicios se tiene la siguiente estructura:

**Ilustración 1.** Maqueta Planta de Tratamiento de Lixiviados Doña Juana



Fuente: Autora

Para la línea de agua:

N°	FUNCIÓN
1	Caja de entrada - derivación
2	Tanque de almacenamiento de lixiviados
3	Mezcla de floculación
4	Decantación primaria
5	Mezcla de floculación
6	Decantación lamelar
7	Tanque de neutralización
8	Tanque de desnitrificación
9	Reactores biológicos
10	Tanque de desnitrificación
11	Decantación secundaria

<b>12</b>	Desinfección
<b>13</b>	Medida de caudal

Fuente: Autora

Línea de lodos:

<b>N°</b>	<b>FUNCIÓN</b>
<b>14</b>	Bombeo de recirculación (Decantación 1)
<b>15</b>	Bombeo de recirculación y purga de lodos (Decantación 2)
<b>16</b>	Tanque de almacenamiento de lodos
<b>17</b>	Edificio deshidratación de lodos

Fuente: Autora

Servicios:

<b>N°</b>	<b>FUNCIÓN</b>
<b>18</b>	Soplantes
<b>19</b>	Edificio de control
<b>20</b>	Zona de reactivos
<b>21</b>	Edificio de transformación
<b>22</b>	Sitio de CAL

Fuente: Autora

De acuerdo al diseño de la maqueta donde se presenta un modelo de las unidades con las cuales cuenta actualmente la planta de tratamiento, se evidencia que posee dos sistemas fisicoquímicos, los cuales actualmente trabajan en paralelo para aumentar la eficiencia de la planta.

Como coagulante actualmente se está aplicando el PAC (policloruro de aluminio) y un polímero para aumentar la eficiencia en el proceso de coagulación y floculación para posteriormente entrar al proceso de sedimentación. Sin embargo, la eficiencia en porcentajes de remoción en carga orgánica y metales pesados no todas las veces es la que se cumple según la resolución 166 del 2008 (mirar el Anexo A).

Seleccionar un proceso de tratamiento para lixiviados es un asunto complejo debido a que no existe una técnica exclusiva para el manejo de los mismos, razón por la cual se combinan diferentes métodos, que incluyen tratamientos biológicos, precipitación química, adsorción con carbón activado, sedimentación, flotación y filtración como tratamientos

generales y tratamientos específicos como oxidación o reducción química, intercambio iónico, membranas y oxidación húmeda. (Canepa, Arévalo, Schroeder, & Chiu, 2008)

En la práctica común se han implementado los procesos aerobios y anaerobios para el tratamiento de lixiviado esto con el fin de tratar principalmente las elevadas cargas orgánicas. El tratamiento fisicoquímico tiene como fin eliminar las partículas suspendidas por la acción de sustancias denominadas coagulantes (que pueden ser sales metálicas y/o polielectrolitos). Incluye procesos de coagulación, floculación y sedimentación donde el éxito de este proceso es determinar la combinación más eficiente de coagulante que relacionen necesariamente con las características fisicoquímicas del líquido. (Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario, 2004)

Actualmente en muchos países se utilizan los polímeros como ayudantes de coagulación y floculación comúnmente utilizados en países industrializados. Según estudios en Latino América no es viable hacer uso de estos debido a varios factores entre los cuales se encuentra el elevado costo de los polímeros industriales; dado que en muchos países la producción de polímeros aplicables al tratamiento es poca o inexistente por lo cual las empresas de servicio se ven forzadas a depender de productos importados y el bajo nivel de desarrollo en algunos lados no permite la rápida utilización de nuevos productos. (Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario, 2004).

Debido a los diferentes estudios que se han realizado del óxido de grafeno en las últimas décadas, se ha evidenciado que posee propiedades fisicoquímicas las cuales permiten limpiar líquidos contaminados con metales pesados o incluso de material radioactivo.

El grafeno es una capa bidimensional de átomos de carbono distribuidos en una estructura plana hexagonal en forma de panal de abejas. En el año 2004 por primera vez se logró aislar una simple capa de grafeno lo cual provocó un gran interés en física y en la ciencia de materiales debido a sus propiedades electrónicas, ópticas y termodinámicas, así como su amplio rango de aplicaciones en diferentes áreas de conocimiento. (Fernandez, 2015)

Para la producción de grafeno no puede ser aplicado en escala industrial y se ha optado por métodos alternativos para producirlo, uno de los más conocidos es la reducción del óxido de grafito dando como resultado el óxido de grafeno con diferentes niveles de oxidación.

Actualmente es el método más utilizado para obtener grafeno a gran escala. (Fernandez, 2015).

El proceso de adsorción es extensamente utilizado en el tratamiento de aguas debido a su habilidad para remover diferentes tipos de contaminantes para proveer agua de alta calidad y fácil operación. El material usado para la adsorción debe tener un área de superficie específica alta y estabilidad química. Comúnmente varios tipos de carbón se han desarrollado para remover contaminantes como por ejemplo el carbón activado, fibras de carbón activado y nanotubos de carbón. El grafeno es un nuevo material de carbón con dos estructuras dimensionales y diferentes propiedades. Su área de superficie específica es teóricamente 2600m<sup>2</sup>/g y tiene buena estabilidad química haciendo del grafeno un buen material para la adsorción en el tratamiento de aguas contaminadas. (Zhao, Ren, & Cheng, 2012).

El centro de investigación Micro-Nano Mecánico ubicado en China en el año 2012 demostró que es posible usar el óxido de grafeno como membrana selectiva para separar metales pesados y contaminantes orgánicos (Sun, 2012), un artículo reciente publicado por la Universidad de la Calabria en 2015 probó que el óxido de grafeno tiene la capacidad de descontaminar agua con colorantes (Fiallos & Gomez, 2015). Como se puede evidenciar según los estudios nombrados anteriormente el óxido de grafeno tiene un gran potencial para remover contaminantes de fuentes acuosas lo cual es de gran importancia para esta investigación.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 Generación de lixiviados

El lixiviado es la sustancia líquida que se genera a partir de la descomposición bioquímica de los residuos como resultado de la filtración de agua a través de los residuos en el proceso de descomposición. Esta sustancia tiende a salir por gravedad de la parte inferior del Relleno Sanitario. (ministerio del medio ambiente, 2002)

La carga orgánica se presenta en mayor concentración en los primeros años de operación y va decreciendo gradualmente con el pasar del tiempo. La concentración de amonio se puede presentar en cantidades superiores a 2000 mg/l, no decrece y a menudo es el principal contaminante. En cuanto al contenido de metales pesados se evidencia en mayor concentración en la fase inicial (fase ácida) mientras que en la fase metanogénica se evidencia la disminución de estos. (Castrillón, 2008)

### 1.1.1 Fases de generación en los lixiviados

Las fases que se desarrollan en este proceso poseen unos rangos de tiempo los cuales varían dependiendo de factores ambientales y la forma en como estos se presentan. La fase de fermentación ácida puede durar de 3 a 7 años donde el lixiviado puede presentar concentraciones muy altas de DQO y DBO5, durante este periodo la relación DBO5 / DQO es de aproximadamente 0.6 donde aproximadamente el 90% de la DBO5 es causada por ácidos grasos volátiles (AGV) lo que significa que la biodegradabilidad del lixiviado durante este lapso de tiempo es alta. El incremento de las bacterias metanogénicas afecta negativa y progresivamente la producción de AGV. Después de un periodo de 7 a 9 años la biocenosis<sup>1</sup> alcanza un estado estable, denominado fase metanogénica. (ministerio del medio ambiente, 2002)

Las concentraciones de amonio aumentan rápidamente, alcanzando concentraciones de 500 – 1500 mg/l NH<sub>4</sub> en un periodo de 3 a 8 años y permaneciendo así por lo menos 50 años o más (Agudelo, 1996). En la siguiente tabla, según Ehrig (1989) se identifican las características del lixiviado según la fase acética la cual ocurre al momento de disponer los residuos o la fase metanogénica que ocurre en un periodo estrictamente anaerobio. (ministerio del medio ambiente, 2002).

**Tabla 1.** Composición lixiviado de rellenos sanitarios por fases

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR PROMEDIO	RANGO
<b>FASE ACIDOGÉNICA</b>			
pH		6.10	4.5 - 7.5

<sup>1</sup> Conjunto de organismos, vegetales o animales, que viven y se reproducen en determinadas condiciones de un medio o biótomo

DBO5	mg/l	13000.00	4000 - 40000
DQO		22000.00	6000 - 60000
DBO5/DQO	mg/l	0.58	-----
SO4	mg/l	500.00	70 - 1750
Ca	mg/l	1200.00	10 - 2500
Mg	mg/l	470.00	p
Fe	mg/l	780.00	20 - 2100
Mn	mg/l	25.00	0.3 - 65
Zn	mg/l	5.00	0.1 - 120
<b>FASE METANOGENICA</b>			
pH		8	7.5 - 9
DBO5	mg/l	180.00	20 - 550
DQO	mg/l	3000.00	500 - 4500
DBO5/DQO		0.06	-----
SO4	mg/l	80.00	10 - 420
Ca	mg/l	60.00	20 - 600
Mg	mg/l	180.00	40 - 350
Fe	mg/l	15.00	3 - 280
Mn	mg/l	0.70	1 q0.03 - 4
Zn	mg/l	0.60	0.03 - 4
<b>CUANDO NO SE OBSERVAN DIFERENCIAS ENTRE LAS DOS FASES</b>			
Cl	mg/l	2100.00	100 - 5000
Na	mg/l	1350.00	50 - 4000
K	mg/l	1100.00	10 - 2500
Alcalinidad	mg CaCO3/l	6700.00	300 - 11500
NH4	mg N/l	750.00	30 - 3000
NO rg	mg N/l	600.00	10 - 4250
Total N	mg N/l	1250.00	50 - 5000
NO3	mg N/l	3.00	0.1 - 30
NO2	mg N/l	0.5	0 - 25
P Total	mg N/l	6.00	0.1 - 30
AOX	µg Cl/l	2000.00	320 - 3500
As	µg /l	160.00	5 - 1600
Cd	µg /l	6.00	0.5 - 140

Fuente: Tchobanoglous Agudelo G. Rubén Tratabilidad de Lixiviados Producidos en rellenos Sanitarios, 1990-1996 Medellín, Relleno Curva De Rodas

## 2. Composición de los lixiviados

La composición de los lixiviados dependerá de las características de los residuos depositados y de las condiciones en las que se encuentre el Relleno Sanitario donde

será depositado. Para ello se tiene en cuenta factores como la temperatura, contenido de humedad, edad del relleno, capacidad del suelo para remover contaminantes y la calidad y cantidad de agua que entra en contacto con la masa de los residuos dispuestos. (O'Leary y Tausel 1985)

Los lixiviados se caracterizan por su gran cantidad de materia orgánica, sales orgánicas e inorgánicas, nitrógeno, metales pesados y otras sustancias químicas diluidas que varían según la edad de este. (Steiner, septiembre de 2008). Se debe tener en cuenta determinadas características que poseen los lixiviados de tal forma que permita establecer cuál es la opción de tratamiento para remover las cargas contaminantes que este posee. Para ello se determina la cantidad de compuesto orgánicos presentes como lo son proteínas, carbohidratos, compuestos hidroxiaromaticos, alcoholes, principalmente los ácidos grasos volátiles.(Torres, 2005)

### 3. Calidad del lixiviado

La calidad del lixiviado, como se ha mencionado anteriormente depende de la composición de los residuos sólidos por lo cual se debe tener en cuenta si es un país desarrollado o emergente. Dependiendo del nivel de desarrollo económico del país así mismo serán sus accesos tecnológicos a la infraestructura necesaria para el tratamiento de los residuos sólidos, los cuales a su vez están determinados por los patrones de consumo de los países. De tal forma que se puede decir que un país en vía de desarrollo presenta altas concentraciones de DBO, amoniaco, metales y sustancias precipitables que los países desarrollados (Giraldo, 2014).

Este incremento de concentración de materia orgánica se debe a su facilidad en el proceso de biodegradabilidad, lo cual hace que se produzca una degradación rápida aumentando las concentraciones de los ácidos grasos volátiles y de amoniaco. Donde estos ácidos diluyen el lixiviado bajando el pH y contribuyendo a la solubilización de los metales presentes en los residuos. (Castrillón, 2008)

Como consecuencia los lixiviados de las áreas de los rellenos sanitarios que han sido recientemente rellenas producen un lixiviado altamente contaminante,

denominado lixiviado joven. A partir de ese momento, las concentraciones de las sustancias en el lixiviado de una cochada de basura en el relleno sanitario disminuyen continuamente en el tiempo, esto ocurre como regla general. Sin embargo, en algunos casos se presentan como metales con reacciones de óxido-reducción, puede ocurrir que la concentración al inicio del proceso de lixiviación no sea la mayor. No obstante, teniendo en cuenta que un relleno sanitario se opera por lustros o décadas, siempre va a haber una parte del relleno que aporta lixiviado joven, la que se está rellenoando en ese momento, mientras que otras partes del relleno tienen lixiviado maduro, las que tienen unos años, y otras lixiviado viejo, las que tienen más de cinco años. (Giraldo, 2014)

En la siguiente tabla se muestran los tres tipos de lixiviados que se han definido de acuerdo a la edad del lixiviado. Estos datos muestran que la edad del relleno sanitario y el el grado de estabilización de los residuos sólidos tiene un efecto directo en las características del agua. (Renou, 2008)

**Tabla 2.** Composición de los lixiviados en un relleno sanitario

CONSTITUYENTE	EDAD DEL RELLENO SANITARIO		
	MENOR DE 10 AÑOS		MAYOR DE 10 AÑOS
	Rango (mg/l)	Típico (mg/l)	Rango (mg/l)
DBO5	2.000 - 30.000	10,000	100 – 200
COT	1.500 - 20.000	6,000	80 – 160
DQO	3.000 - 60.000	18,000	100 – 500
S.S.T.	200 - 2.000	500	100 – 400
Nitrógeno orgánico	10 - 800	200	80 – 120
Nitrógeno amoniacal	10 - 800	200	20 – 40
Nitrato	mm	25	Mm
Fósforo total	5 - 100	30	Mm
Ortofosfato	mm	20	Mm
CACO2 (Alcalinidad)	1.000 - 10.000	3,000	200 - 1.000

CONSTITUYENTE	EDAD DEL RELLENO SANITARIO		
	MENOR DE 10 AÑOS		MAYOR DE 10 AÑOS
	Rango (mg/l)	Típico (mg/l)	Rango (mg/l)
pH	4.5 - 7.5	6	6.6 - 7.5
CACO <sub>2</sub> (Dureza)	300 - 10.000	3,500	200 - 500
Calcio	200 - 3.000	1,000	100 - 400
Magnesio	50 - 1.500	250	50 - 200
Potasio	200 - 1000	300	50 - 400
Sodio	200 - 2.500	500	100 - 200
Cloro	200 - 3.000	500	100 - 400
Sulfatos	50 - 1.000	300	20 - 50

Fuente: (Pineda, 1998)

#### 4. Problemática causada por los lixiviados

Los lixiviados son sustancias sumamente contaminantes que surgen debido a la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos sólidos de los rellenos sanitarios. Debido a la variabilidad de su composición son altamente contaminantes lo cual hace que uno de sus mayores inconvenientes sea su vertimiento final en una fuente hídrica.

El problema no solo radica en la cantidad si no en la calidad del lixiviado el cual va asociado a las características ambientales donde se encuentra ubicado el relleno sanitario y el tipo de residuos sólidos. La producción del lixiviado conlleva un gran problema de contaminación debido a que en el momento del vertimiento al finalizar su tratamiento puede afectar el suelo, las condiciones freáticas y las fuentes hídricas; más aún cuando se presenta vertimiento directo causando así impactos negativos en la salud humana ya sea de forma directa o indirecta.

En la literatura se ha evidenciado que la población de afectación directa es aquella que se encuentra ubicada en zonas aledañas a los sitios de disposición final de los residuos sólidos al igual que los ríos donde se realiza el vertimiento final. Aunque la incidencia es mayor en la población que se está cercana al punto de vertimiento debido a que la concentración es más alta en este punto.

En las siguientes tablas se mostrará la incidencia de la presencia de los componentes que son tóxicos para la salud humana y su efecto.

**Tabla 3.** Metales pesados y los efectos negativos sobre la salud humana.

<b>METALES</b>	<b>EFECTO</b>
Mercurio	Depresión, diarreas, fatiga, catarros crónicos, irritabilidad, pérdida de memoria o amnesias, inflamación de las mucosas
Cadmio	Lo transporta la sangre y se acumula en los riñones obstaculizando la filtración de tóxicos por este. También es capaz de dañar los pulmones de forma severa, afecta al sistema nervioso central (SNC), el sistema inmunitario y la integridad del ADN de las células, alta concentración provoca síntomas como diarreas, vómitos, dolores de estómago y debilidad en los huesos.
Cromo	Anemias, problemas estomacales, daño en los riñones y en el hígado. sobre la piel causan dermatitis, sensibilización de la piel, es irritante de la piel y mucosas Afecciones generales: produce tos, bronquitis crónica, ulceraciones del tabique nasal y piel, dolores respiratorios y de cabeza, hemorragia nasal, dermatitis aguda
Plomo	Fatiga, dolores de cabeza, dolores óseos, dolores abdominales, trastornos del sueño, dolores musculares, impotencia, trastornos de conducta, y otros. Síntomas avanzados: anemia, cólicos intestinales, náuseas y vómitos, enfermedad renal, impotencia sexual, delirio, esterilidad, daños al feto, hipertensión arterial, estreñimiento agudo, afectación de los nervios, enfermedad ósea, problemas de cáncer.
Arsénico	Diarrea, pigmentación cutánea, prurito generalizado, lagrimeo, vitiligo, alopecia, hiperqueratosis y edema circunscriptos. Dermatitis y queratosis en las palmas y plantas son comunes. El hígado puede dilatarse y la obstrucción de los conductos biliares puede producir ictericia. Al avanzar la intoxicación puede desarrollarse una encefalopatía. La médula ósea sufre serios daños. La anemia aplásica es el trastorno hematopoyético más común
Níquel	La sobre exposición a corto plazo al níquel no se sabe pueda causar ningún problema de salud, pero la exposición a largo plazo puede causar pérdida de peso corporal, el daño del corazón y del hígado, y la irritación de piel disminuidos.
Antimonio	La exposición a los altos niveles del antimonio por períodos del tiempo cortos causa náusea, vómitos, y diarrea. Hay poca información sobre los efectos de la exposición a largo plazo del antimonio, pero es un agente carcinógeno humano sospechado
Selenio	Pérdida del pelo y de las uñas, daño al tejido fino del riñón y del hígado, daño al tejido fino circulatorio, y un daño más severo al sistema nervioso.
Zinc	Nauseas, vómitos, diarreas, cólicos y fiebre, y en la mayor parte de los casos estos síntomas se dan tras consumos de 4-8 g de zinc. Los consumos de 2 g de sulfato de cinc provocan toxicidad aguda que provocan dolores de estómago y vómitos.

#### 4.1 Compuestos orgánicos

Los compuestos orgánicos volátiles son compuestos formados básicamente por átomos de carbono e hidrógeno que se evaporan fácilmente. (Greenpeace)

A continuación, se mostrarán los principales compuestos orgánicos volátiles y sus efectos negativos sobre la salud humana.

**Tabla 4.** Compuestos orgánicos volátiles y los efectos negativos en la salud

<b>Compuesto orgánico volátil</b>	<b>efectos en la salud</b>
Benceno	cancerígeno, muta génico, posible teratogénico, efectos sobre el sistema nervioso central y periférico, efectos sobre el sistema inmunológico y gastrointestinal, desordenes en las células de la sangre, alergias, irritaciones en los ojos y la piel.
Cloroformo	probable cancerígeno y teratogénico, efectos sobre el sistema de nervios central y efectos gastrointestinales, daños en el hígado y el riñón, embriotóxicos, irritaciones en los ojos y la piel
1,1 -Dicloetano	embriotóxico, efectos sobre el sistema nervioso central, hígado y riñones
Cloruro de metileno	posible cancerígeno, efectos sobre el sistema nervioso central, pulmones, sistema respiratorio y sistema cardiovascular, desordenes en la sangre, irritación en la piel y los ojos
Tetracloroetileno	probable cancerígeno, efecto sobre el sistema nervioso central, pulmones, sistema respiratorio, embriotóxico, daños en los riñones y el hígado, irritaciones al sistema respiratorio y los ojos
Tolueno	Posible mutagénico y cancerígeno, efectos sobre el sistema nervioso central y sistema cardiovascular, daños en los riñones, hígado, irritaciones al sistema respiratorio las piel y los ojos; alergias.
Tricloroetileno	posible cancerígeno y teratogénico, efectos sobre el sistema nervioso central, riñones e hígado, sistema cardiovascular, pulmones, sistema respiratorio, desordenes en las células de la sangre, irritaciones en el sistema respiratorio, la piel y los ojos; alergias
1,1,1-Tricloroetileno	Cancerígeno, muta génico, posibles teratogénico, efectos en el sistema nervioso central, pulmones, sistema respiratorio, daños en el hígado y el riñón, irritación en ojos y piel.
cloruro de vinilo	cancerígeno, muta génico, posibles teratogénicos, efectos en el sistema nervioso central, daños en el hígado y el riñón, irritación en ojos y piel, desordenes en las células de la sangre

<b>Compuesto orgánico volátil</b>	<b>efectos en la salud</b>
Xileno	efectos en el sistema nervioso central, sistema cardiovascular, daños en el hígado y el riñón, irritación en ojos y sistema respiratorio

Fuente: (earth, 1996)

#### 4.2 Otras sustancias químicas

Otros compuestos químicos que pueden encontrarse dentro de los lixiviados son los compuestos orgánicos sintéticos y alcoholes. (Greenpeace)

En las siguientes tablas se evidencian diferentes compuestos químicos producidos por los lixiviados y sus efectos negativos en la salud.

**Tabla 5.** Compuestos orgánicos sintéticos y sus efectos negativos en la salud

<b>Compuesto</b>	<b>Efectos sobre la salud</b>
2,4 -D	Mutagénico, posible cancerígenos y teratogénico, daños en el hígado, el riñón, en los nervios y en el sistema reproductor, efectos pulmonares, sistema respiratorio, irritación en la piel y los ojos.
Lindano	Daños en el sistema reproductor y nervioso, posible cancerígeno
Pentaclorofenol	Posible mutagénico y teratogénico, irritación en los ojos, la piel y en los pulmones, sistema respiratorio, daños en el hígado y el riñón.

Fuente: (earth, 1996)

#### 5. Relleno sanitario

Los rellenos sanitarios son el sitio de disposición final de los residuos sólidos <sup>2</sup> producidos por una población a los cuales no se les realiza proceso de aprovechamiento.

Un relleno sanitario es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o

<sup>2</sup> Se denomina a cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido que se abandona, bota o rechaza después de haber sido consumido o usado en actividades domésticas, industriales, de servicios e instituciones y de servicios. (ministerio del medio ambiente, 2002)

riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales, utilizando principios de ingeniería para la confinación y aislamiento de residuos sólidos en un área mínima con compactación de residuos, con cobertura temporal y final de los mismos y control de los gases y lixiviados. (Giraldo, 2014)

Para establecer el sitio y el funcionamiento del relleno sanitario se tienen en cuenta determinadas características y condiciones ambientales que debe tener el terreno de tal forma que permitan el óptimo funcionamiento operativo del relleno sanitario junto con las instalaciones adicionales.

En la siguiente tabla se identificarán los aspectos principales con los que se debe cumplir para un funcionamiento adecuado del sitio de disposición final.

**Tabla 6.** Parámetros técnicos para determinar la ubicación de un relleno sanitario

<b>ítem</b>	<b>aspecto técnico</b>
<b>1</b>	Ubicación
<b>2</b>	Vías de acceso
<b>3</b>	Condiciones hidrogeológicas
<b>4</b>	Vida útil del terreno
<b>5</b>	Material de cobertura
<b>6</b>	Clima de la zona
<b>7</b>	Costos
<b>8</b>	Destinación futura de los predios

Fuente: Autora

### 5.1 Parámetros que debe tener un Relleno Sanitario para el manejo de lixiviados

Al momento de la construcción de un relleno sanitario se debe tener en cuenta el procedimiento para el manejo y tratamiento del lixiviado generado en el proceso de descomposición de los residuos sólidos. Este manejo se realiza teniendo en cuenta la

calidad de los residuos que se dispongan, por lo cual se estableció un manual de operación y mantenimiento de la PTL donde se especifica las condiciones técnicas para el manejo de los lixiviados generados por el relleno sanitario.

En la siguiente tabla se muestra cuáles son las condiciones que se deben tener en cuenta.

**Tabla 7.** Parámetros técnicos para el manejo de lixiviados en un Relleno Sanitario

ITEM	ASPECTO TÉCNICO	ESPECIFICACIÓN	REFERENCIA
1	Generación de lixiviados	<p>Debe aplicarse un modelo matemático para conocer de manera confiable la cantidad de lixiviados a generarse en el relleno sanitario, tanto en la operación como en el cerramiento a 20 años.</p> <p>Para determinar la generación de lixiviados, debe tomarse en cuenta los factores climatológicos así como las características del material de cobertura, las características de operación, las características de cerramiento final y el mantenimiento a largo plazo de este. Debe hacerse un análisis de escenarios de trabajo para las diferentes características mencionadas, incluyendo operaciones adecuadas e inadecuadas del sistema.</p> <p>De manera específica debe tenerse en cuenta las infiltraciones de aguas lluvias, de escorrentía y de nivel freático al relleno. El modelo a utilizar para la generación de estos por efecto de la disposición de la fracción orgánica de los residuos en el relleno. Deben igualmente verificarse las capacidades de drenaje del sistema para garantizar que el lixiviado producido se pueda evacuar.</p>	F.6.3.6
2	Impermeabilización	<p>Capa de arcilla y geomembrana</p> <p><b>Especificaciones capa de arcilla:</b> construidas de materiales de suelos naturales, aunque la capa puede contener materiales procesados como bentonita o materiales sintéticos. Esta capa debe tener un espesor mínimo de 1m. Debe lograrse una masa homogénea con una conductividad hidráulica menor o igual <math>1 \times 10^{-7}</math> cm/s compactando el suelo con un contenido de humedad de 2% a 3% por encima de la humedad óptima y con un alto nivel de energía de compactación. El material a utilizar debe tener como mínimo las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- % finos <math>\geq 20\%</math> - 30%</li> <li>- Índice de plasticidad <math>\geq 20\%</math></li> <li>- Porcentaje de suelo grueso <math>\leq 30\%</math></li> </ul>	F.6.4.3

ITEM	ASPECTO TÉCNICO	ESPECIFICACIÓN	REFERENCIA
		<p>-Tamaño máximo de partícula = 25 mm a 50 mm</p> <p><b>Especificaciones geomembrana:</b> Compatibilidad química con lixiviados del relleno, se deben diseñar teniendo en cuenta los siguientes factores y criterios de seguridad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Espesor <math>F_s = t \text{ act./treq.}</math></li> <li>- Esfuerzo de subsidencia <math>F_s = \alpha \text{ act/ Treq.}</math></li> <li>- Esfuerzo de Tensión <math>F_s = T \text{ act./Treq.}</math></li> <li>- Anclaje</li> </ul>	
3	Drenaje de lixiviado	<p>El sistema de recolección de lixiviados debe calcularse con el caudal máximo de lixiviado y el de agua de escorrentía.</p> <p>1. Drenaje de lixiviados para los niveles bajo y medio de complejidad. Después de realizar la impermeabilización del fondo y de las paredes laterales, debe construirse un sistema de drenaje en el terreno. Construcción del sistema de drenaje. El sistema de drenaje debe ser una red horizontal de zanjas en grava gruesa.</p> <p>Para la construcción de los drenes, debe realizarse el trazado donde se ubica el drenaje en el terreno, similar al de un sistema de alcantarillado. La pendiente del fondo es del 2%. Deben llenarse las zanjas con piedras de 10 cm a 15cm, que permitan más espacios libres, y eviten su rápida colmatación. Se recomienda colocar a continuación un material que permita infiltrar los líquidos y retener las partículas finas que lo puedan colmatar.</p> <p>2. El sistema de drenaje de lixiviados para los niveles alto y medio alto de complejidad debe considerar los siguientes componentes:</p> <p>a) Área recolectora. Es aquella que cubre la superficie del área impermeabilizada y recoge el lixiviado. Debe consistir de un estrato de arena de 0.30 m de espesor con una permeabilidad mínima de <math>10^{-2} \text{ cm/s.}</math> localizado en el fondo del relleno.</p> <p>b) Recolectores laterales. Se requieren para mantener la cabeza de 0.30 m; para lo cual los recolectores laterales deben ser tubos perforados, de manera que el lixiviado sea conducido a los sumideros para ser removido del relleno sanitario. La pendiente de los recolectores laterales deber ser mayor de 2%</p>	F.6.4.4.2

Fuente: (LUNA, 2008)

## 5.2 Relleno Sanitario Doña Juana

Hasta 1988 la disposición final de los residuos sólidos se realizó en botaderos a cielo abierto, el Cortijo, Gibraltar y Protecho, los dos primeros ubicados muy cerca del río Bogotá. Desde 1989, las basuras provenientes de la capital y de los municipios de Fómez, Caquezá, Choachí, Chipaque y Ubaque se disponen en el relleno sanitario Doña Juana, al sur de la ciudad. Este relleno sanitario es el más grande del país y el único sitio autorizado para la disposición de residuos sólidos para la ciudad de Bogotá.

Es importante señalar que, a partir de 1989, se efectuaron cambios fundamentales en el manejo de desechos: en primera instancia el Distrito compró los terrenos para el relleno sanitario, buscando con ello ejercer un absoluto control sobre el mismo, en términos ambientales y administrativos.

El relleno sanitario Doña Juana es de propiedad de la ciudad de Bogotá Distrito Capital, la UAESP (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos) es la entidad pública encargada de la administración de los servicios de recolección, transporte, disposición final. Reciclaje y aprovechamiento de residuos sólidos, la limpieza de vías y áreas públicas; los servicios de funerarios y el servicio de alumbrado público de la ciudad. La operación del relleno sanitario Doña Juana se encuentra a cargo del Centro de Gerenciamiento Doña Juana (CGR) el cual empezó su gerencia el 11 de octubre del 2010.

### 5.2.1 Localización

El relleno sanitario de Doña Juana se encuentra localizado a las afueras de la capital saliendo por la autopista Villavicencio por el costado derecho, exactamente en la localidad 19 de Ciudad Bolívar.

## Ilustración 2. Límites del relleno sanitario Doña Juana



Fuente: (UAESP U. A., 2013)

El área actual del relleno sanitario es de 500 hectáreas cuadradas de las cuales 159 hectáreas han sido destinadas para disposición de residuos y se encuentran repartidas en 8 zonas, donde se han desarrollado las etapas de disposición de residuos sólidos ordinarios y de los residuos hospitalarios, que son tratados y transportados por el concesionario Ecocapital Internacional S.A. ESP. (Observatorio de salud ambiental, 2015)

**Tabla 8.** Descripción de las zonas del relleno sanitario Doña Juana y su función actual

ZONA	PERIODO DE OPERACIÓN	VIDA ÚTIL (Años)	ÁREA OCUPADA (Has)	COMENTARIOS
Zona antigua	Nov/88 - Sep/93	5	80	Actualmente empradizada
Zona I	Sep/93 - Feb/95	1,5		
Zona Mansión	Feb/95 - Oct/95	0,8	10	Actualmente empradizada
Zona II - Área 1	Oct/95 - Sep/97	2	25	Zona de derrumbe del 27 de sep. De 1997, restaurada después del evento
Zona II - Área 2	Oct/98 - Jul/00	NA	6,1	Actualmente empradizada, zona de disposición de residuos provenientes del

ZONA	PERIODO DE OPERACIÓN	VIDA ÚTIL (Años)	ÁREA OCUPADA (Has)	COMENTARIOS
				derrumbe
Zona IV	Sep/97 - Ene/99	1,4	19	Empradizada utilizada como zona de emergencia durante el derrumbe
Zona VI	NA	NA	3,2	Actualmente adecuada como zona de emergencia y de disposición de lodos
Zona VII	Ene/99 - Dic/02	3	40	Cerrada y empradizada
Zona VIII	Mar/02 - Sep/10	6,2	41	En proceso de cierre y con sistema de captación de Biogás
Zona II - Área 3	Sep/08 - May/09	1	3,3	Actualmente empradizada y con sistema de captación de biogás
Biosólidos	Sep/10 - Abr/11	0,7	9,7	En proceso de cierre y con sistema de captación de Biogás
Celda hospitalarios	Jul/98 - A la fecha	18	4	En operación
Fase I de optimización	Abr/11 - A la fecha	5	35	En operación
Fase II de optimización	Jun/14 – Año 2022	7,6	41,52	En operación

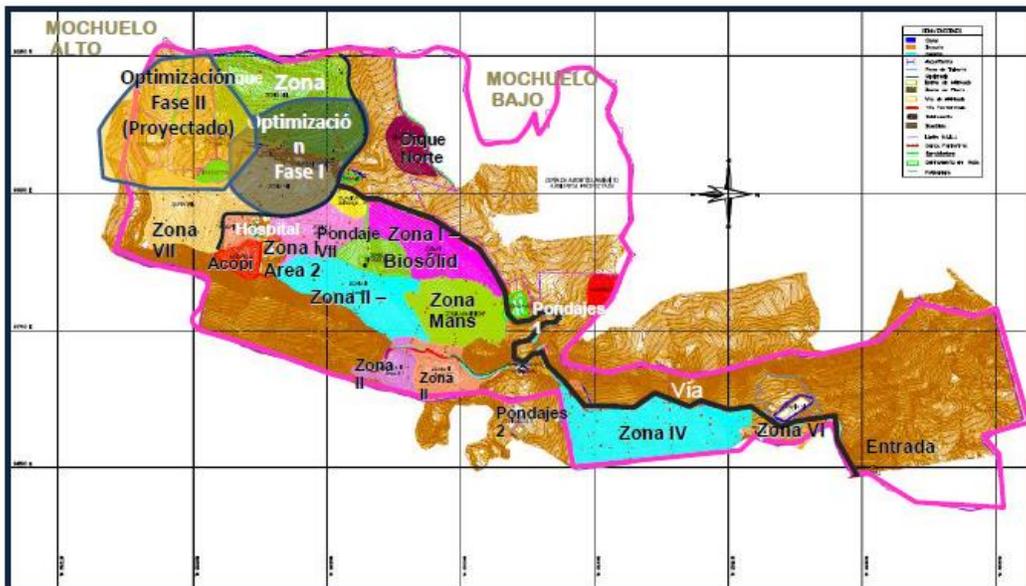
Fuente: (Montenegro, 2013)

### 5.2.2 Descripción de las zonas

Desde el año 1998 cuando el relleno sanitario de Doña Juana inicio su función como sitio de disposición final se construyó dividido en zonas de tal forma que facilite la organización y funcionamiento de relleno.

Actualmente cuenta con 9 zonas rellenas (Antigua, Mansión, Zona I, Zona II, Zona IV y Área 2, Zona VII, Zona VIII, Zona de Biosólidos) y un área en operación (Zona de Optimización I y II) El área total revisada a mayo de 2008, sin tener en cuenta predios nuevos para la Zona de Optimización ni predios nuevos de la Zona de amortiguamiento, es de 483,13 hectáreas, de las cuales solamente 189.69 hectáreas (37,15%) son utilizadas para la operación del Relleno Sanitario; esta última área se ha repartido en ocho (8) zonas, en las cuales se han desarrollado o están en proceso de desarrollo las etapas de disposición de residuos sólidos convencionales y de residuos hospitalarios, tal como se describen más adelante. Por otra parte, entre los años 2007 y 2011 la UAESP ha adquirido o está en proceso de adquisición de 94,46 hectáreas para Zona de amortiguamiento y 15,05 hectáreas para la Optimización de Zona VIII, con lo que el área total del relleno una vez se culminen las adquisiciones, ascenderá a 592,64 hectáreas. (Montenegro, 2013)

**Ilustración 3.** Descripción de las zonas del relleno sanitario Doña Juana



Fuente: (UAESP U. A., 2013)

### 5.2.3 Residuos depositados en el relleno sanitario Doña Juana

El relleno sanitario de Doña Juana presta los servicios como sitio de disposición final para nueve municipios aledaños a este. De los cuales Bogotá es una de las ciudades que aporta mayor cantidad de residuos al relleno sanitario. La cantidad de residuos depende del tamaño de la población y la producción per cápita de cada municipio.

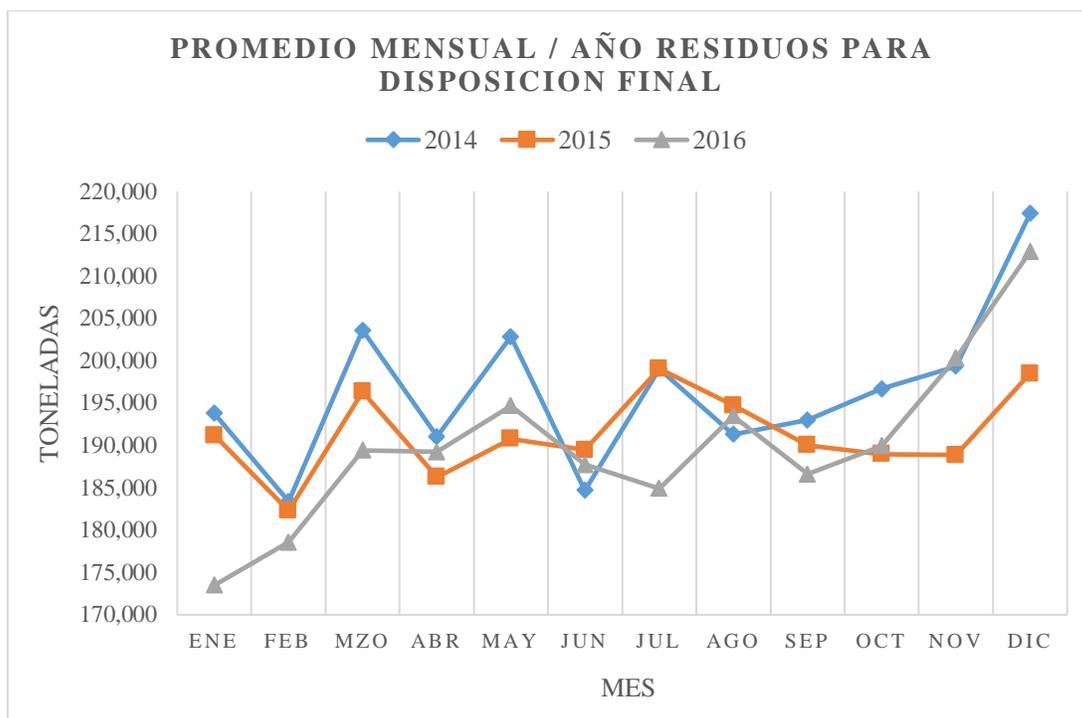
**Tabla 9.** Municipios y su producción diaria de residuos sólidos

MUNICIPIO	TON. /DÍA
Bogotá	6.307,71
Cáqueza	5,93
Chipaque	2,01
Choachí	2,60
Fosca	0,78
Quetame	1,33
Ubaque	0,83
Une	1,65
Gutierrez	0,38

Fuente: (Super Intendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2015)

Teniendo en cuenta que el relleno sanitario cuenta con zonas de aprovechamiento se depositan grandes cantidades de residuos sólidos de los cuales el porcentaje de aprovechamiento es mínimo. Al relleno ingresan en promedio 6.000 toneladas diarias de residuos sólidos. (Observatorio de salud ambiental, 2015)

**Grafica 1.** Promedio mensual/año de residuos dispuestos



Fuente: (UAESP U. A., 2014, 2015 y 2016)

### 5.3 Generación de lixiviados en el relleno sanitario Doña Juana

Como se ha mencionado anteriormente existen diferentes factores que afectan la producción de lixiviados en los rellenos sanitarios. Se tiene en cuenta la calidad de residuos sólidos que llegan, la cantidad de residuos que son aprovechados, factores ambientales como la precipitación, escorrentía entre otros.

La recolección de los lixiviados se da de tal forma que las zonas que han sido clausuradas finalicen la conducción del lixiviado en la planta de tratamiento de lixiviados. La captación del lixiviado se realiza por medio del drenaje de fondo de cada terraza, que conduce a las cajas de salida y de allí a los pondajes. Existen cinco estructuras principales para el almacenamiento de lixiviado. (Restrepo, 2016)

El volumen de lixiviados que se genera diariamente y el volumen que ingresa a tratamiento directo son diferentes. Esto debido a que actualmente la planta cuenta con dos líneas de tratamiento, uno completo y otro alternativo. Esta decisión se tomó debido a la variación en la composición del lixiviado por lo cual se realiza una mezcla del lixiviado joven y el

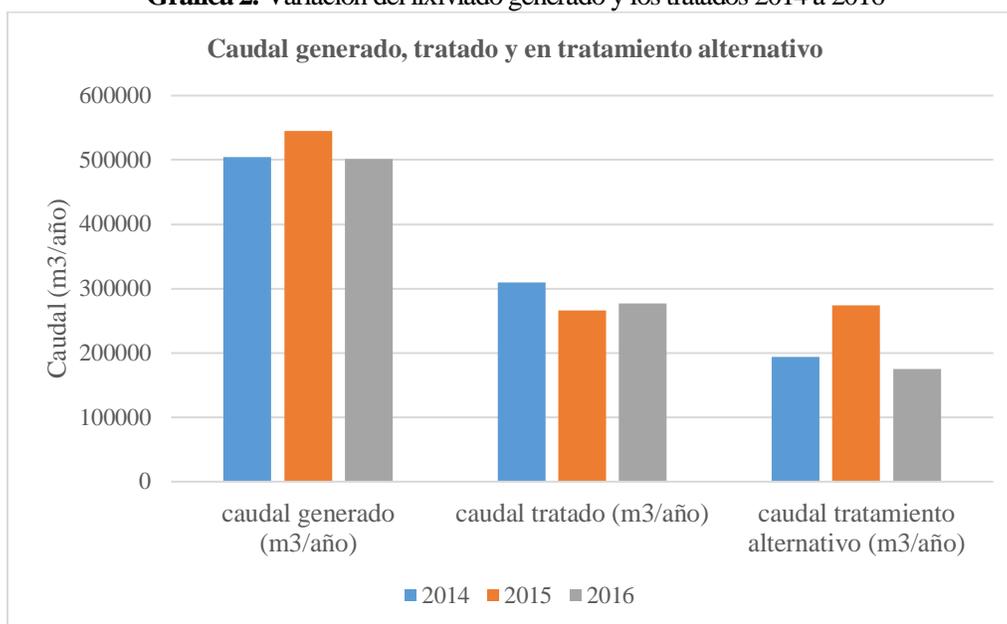
lixiviado viejo de tal forma que el lixiviado ingresa a las dos líneas de tratamiento con diferente composición esperando mejorar la eficiencia en los procesos de tratamiento.

**Tabla 10.** Caudal promedio de lixiviado generado, tratado directamente y con tratamiento alternativo

<b>Año</b>	<b>2014</b>			<b>2015</b>			<b>2016</b>		
<b>Descrip.</b>	<b>Caudal generado</b>	<b>Caudal tratado</b>	<b>Caudal tratamiento alternativo</b>	<b>Caudal generado</b>	<b>Caudal tratado</b>	<b>Caudal tratamiento alternativo</b>	<b>Caudal generado</b>	<b>Caudal tratado</b>	<b>Caudal tratamiento alternativo</b>
<b>Mes</b>	<b>(m3/mes)</b>	<b>(m3/mes)</b>	<b>(m3/mes)</b>	<b>(m3/mes)</b>	<b>(m3/mes)</b>	<b>(m3/mes)</b>	<b>(m3/mes)</b>	<b>(m3/mes)</b>	<b>(m3/mes)</b>
Ene	39024	33107	3472	72159	42290	29869	39126	23465	15661
Feb	31159	30721	1778	49428	30898	17736	36105	26541	9563
Mzo	36207	34913	1294	56629	36799	16830	37528	29662	7931
Abr	33104	31454	1650	61253	29985	31268	37528	29662	7931
May	25399	20882	4517	61625	25652	35974	46776	22646	13700
Jun	32373	21800	10573	59160	19802	39358	44932	23045	17702
Jul	57922	22320	35602	67436	26019	41411	40412	17665	15601
Ago	52500	22320	30180	64072	26626	37446	39253	19400	12469
Sep	41560	14563	26997	53193	27820	24373	48380	22106	19309
Oct	41687	16064	25623				38934	22980	16053
Nov	51718	29875	21884				48380	22106	19309
Dic	61628	31428	30200				44315	17465	19631

Fuente: (UAESP U. A., 2014, 2015 y 2016)

**Grafica 2.** Variación del lixiviado generado y los tratados 2014 a 2016



Fuente: (UAESP U. A., 2014, 2015 y 2016)

Como se evidencia en la gráfica anterior el volumen de lixiviados aumentó durante el año del 2015 por lo cual se envía a una línea de tratamiento alternativo con el fin de mantener un equilibrio en el caudal evitando aumentar la carga hidráulica de las unidades de la planta de tratamiento.

El relleno sanitario inició su operación de la fase II para junio del año 2014 teniendo como consecuencia el aumento del caudal de lixiviado generado donde aumenta aproximadamente 20.000 m<sup>3</sup> del mes de junio al mes de julio cuando antes se presentaban variaciones máximas de 6.000 m<sup>3</sup> entre cada mes, Por lo que el caudal aumenta durante el año 2015 mientras se estabilizan los procesos de tratamiento. Para el año 2016 se evidencia el descenso de volumen del lixiviado generado en comparación con el año 2015, igualmente se evidencia que hay mejor distribución del lixiviado en cuanto al tratamiento completo y al alternativo.

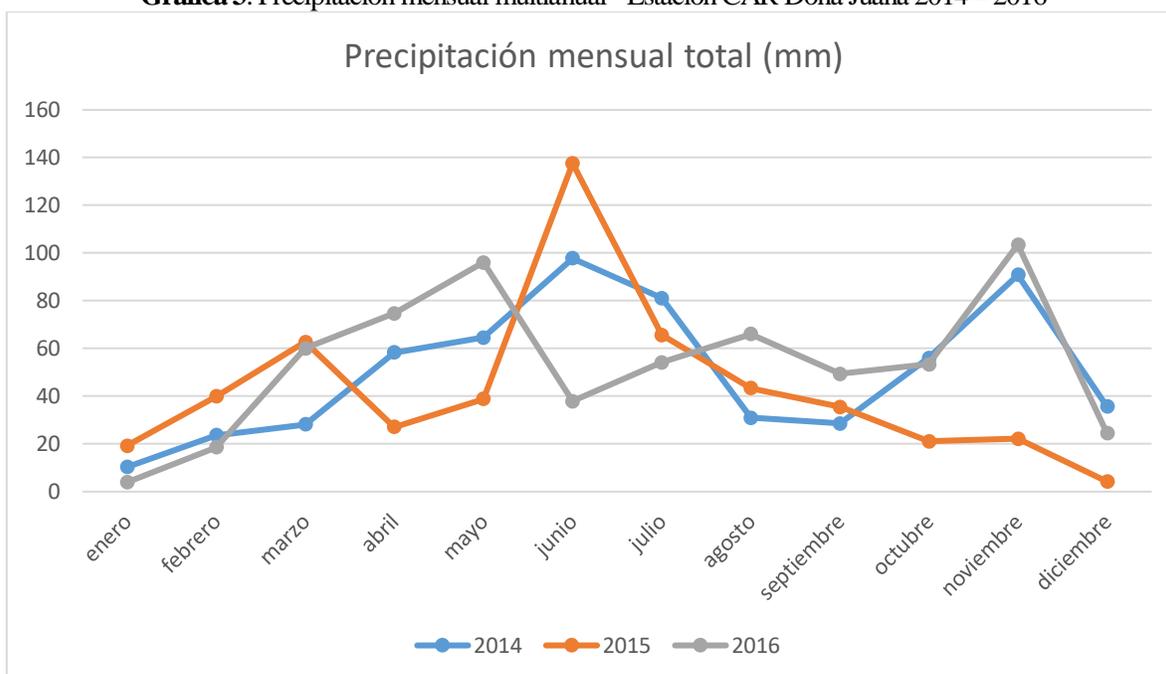
### 5.3.1 Factores climáticos y su incidencia en la producción de lixiviados

Los diferentes componentes climáticos que afectan la zona de estudio son factores importantes para la cuantificación y caracterización del lixiviado desde que se genera hasta que llega al sitio de tratamiento. A continuación, se explicarán brevemente.

### 5.3.1.1 Precipitación

Este es un factor climático con gran influencia en la producción de lixiviados especialmente en las celdas donde el área descapotada es grande. La precipitación inicia su infiltración de forma directa sobre los residuos sólidos absorbiendo y adsorbiendo los compuestos orgánicos e inorgánicos que finalmente son los que determinan la carga contaminante del lixiviado.

**Grafica 3.** Precipitación mensual multianual - Estación CAR Doña Juana 2014 – 2016

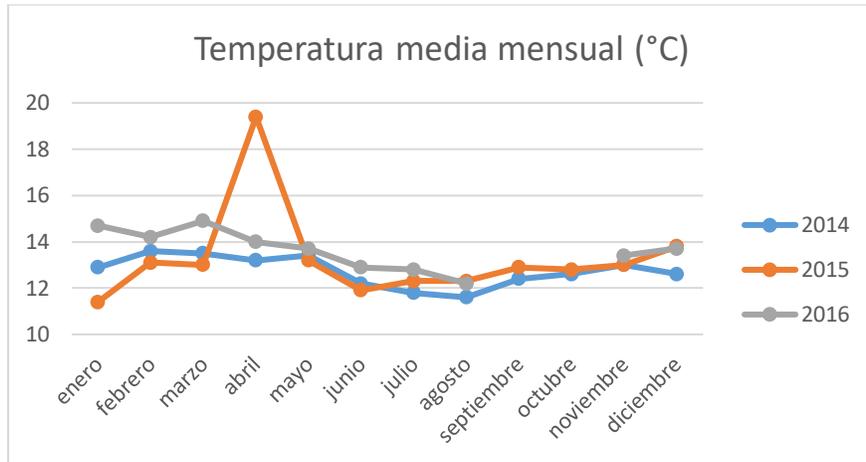


Fuente: CAR, 2017

### 5.3.1.2 Temperatura

Los cambios temperatura tienen incidencia directa en la evaporación del lixiviado desde el momento que la parte acuosa y humedad de los residuos sólidos empieza a evaporarse por el incremento de temperatura hasta el sitio almacenamiento.

**Grafica 4.** Temperatura mensual multianual - Estación CAR Doña Juana 2014 – 2016

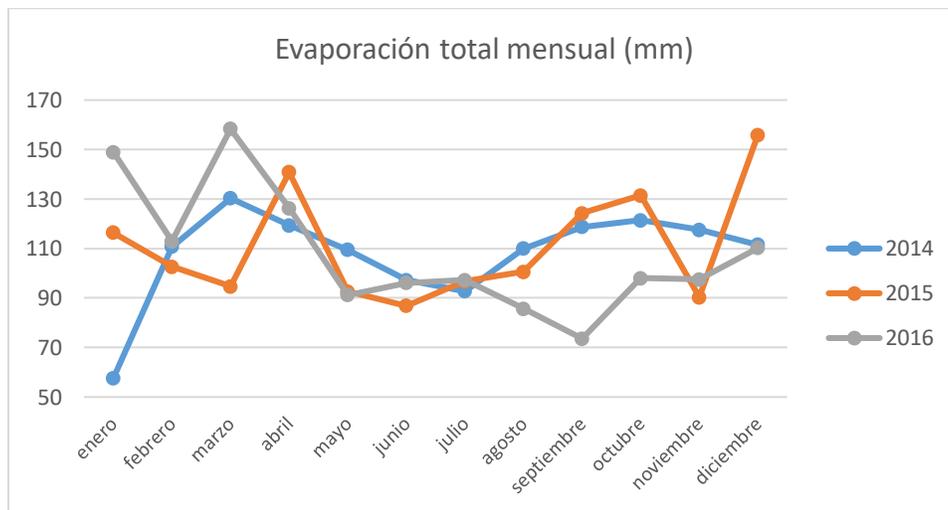


Fuente: CAR, 2017

### 5.3.1.3 Evaporación

Es la medida de la cantidad de agua en la superficie del terreno ya sea suelo o masa de residuos que pasa de estado líquido a gaseoso por acción de la temperatura, viento, presión atmosférica entre otros factores con influencia. La evaporación afecta la cantidad de agua desde el producto de la precipitación sobre los residuos como en la cantidad de lixiviados que no se infiltraran para evitar una saturación en las masas de los residuos.

**Grafica 5.** Evaporación mensual multianual - Estación CAR Doña Juana 2014 – 2016



Fuente: CAR, 2017

### 5.3.2 Calidad del vertimiento

Las características del lixiviado cuando ingresa a la planta dependen directamente de la zona de la que provenga, dependiendo del tamaño de la zona y del tipo de residuo que se deposite allí; lo cual determina la calidad del lixiviado. Las zonas nuevas poseen mayores concentraciones, igualmente dependiendo de la ruta interna de tránsito también habrá variación en las concentraciones.

En la siguiente tabla se muestra las concentraciones en el punto de vertimiento de los años 2015, 2016 y 2017 con el fin conocer cuál ha sido la variación de las concentraciones en los últimos años.

De cada año se tomaron los datos de 7 meses diferentes debido a que no se encontraron datos de los mismos meses para todos los años. Los datos que se encuentran en valor rojo son aquellos que no cumplen con la norma (Res. 166 del 2008).

**Tabla 11.** Cumplimiento parámetros de vertimiento año 2015

	UNIDAD	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	JUNIO	JULIO	AGOSTO
<b>Aluminio</b>	mg/L	18.33	21.9	6.08	5.33	1.96	4.75	5.55
<b>Arsénico</b>	mg/L	0.012	0.02	0.017	0.02	0.04	0.02	0.02
<b>Berilio</b>	mg/L	0.05	0.05	0.05	0.05	<0.05	0.05	0.05
<b>Boro</b>	mg/L	14.3	7.5	3.63	7.17	8.64	5.82	4.7
<b>Cadmio</b>	mg/L	0.013	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01
<b>Zinc</b>	mg/L	0.113	0.19	0.184	0.42	0.89	0.59	0.42
<b>Cobalto</b>	mg/L	0.066	0.07	0.076	0.12	0.14	0.1	0.09
<b>Cobre</b>	mg/L	0.2	0.2	0.2	0.2	<0.2	0.2	0.2
<b>Cromo</b>	mg/L	0.304	0.39	0.486	0.58	0.62	0.62	0.84
<b>DBO5</b>	mg/L O2	258	109	95.93	123.08	75.9	329.25	339.5
<b>Hierro</b>	mg/L	3.25	5.3	9.75	17.8	13.18	5.6	9.25
<b>Litio</b>	mg/L	0.06	0.07	0.059	0.07	0.08	0.08	0.08
<b>Manganeso</b>	mg/L	0.16	0.66	0.24	0.2	0.2	0.2	0.08
<b>Molibdeno</b>	mg/L	0.017	0.002	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01
<b>Níquel</b>	mg/L	0.154	0.04	0.362	0.37	0.41	0.35	0.37
<b>Plomo</b>	mg/L	0.1	0.4	0.1	0.1	NR	NR	NR
<b>Selenio</b>	mg/L	0.005	0.1	0.005	0.005	<0.005	0.01	0.01
<b>Vanadio</b>	mg/L	0.1	0.005	0.1	0.1	0.11	0.14	0.14
<b>pH</b>	mg/L	7.75	0.1	7.75	8,27	7.74	8.48	8.73

Fuente: Informes de supervisión disposición final 2015

Como se puede evidenciar en la tabla de las concentraciones durante los meses que se tomaron como muestra en la mayoría de los casos son los mismos compuestos los que incumplen la norma de vertimiento siendo el Boro, Cobalto, Cromo, DBO5, Hierro y Níquel. Lo cual es un riesgo ambiental tanto para la fuente receptora como a la población aledaña al río Tunjuelo.

**Tabla 12.** Cumplimiento parámetros de vertimiento año 2016

	UNIDAD	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	OCTUBRE
<b>Aluminio</b>	mg/L	3.8	5.76	2.46	4.7	5.68	8.35	5.07
<b>Arsénico</b>	mg/L	0.01	0.029	0.01	NR	0.02	0.02	0.02
<b>Berilio</b>	mg/L	<0.05	0.002	<0.01	<0.05	<0.04	<0.04	<0.05
<b>Boro</b>	mg/L	3.7	5.59	4.93	NR	4.27	2.6	NR
<b>Cadmio</b>	mg/L	0.02	0.009	0.02	<0.1	<0.01	<0.01	<0.04
<b>Zinc</b>	mg/L	0.35	0.46	0.59	0.545	0.596	0.66	0.305
<b>Cobalto</b>	mg/L	0.11	0.116	0.16	0.12	0.104	0.08	0.098
<b>Cobre</b>	mg/L	<0.2	0.19	0.04	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
<b>Cromo</b>	mg/L	1.06	0.956	0.79	0.79	1.14	554.8	0.63
<b>DBO5</b>	mg/L O2	142.75	90.6	84.5	167.33	499.22	1781	554.8
<b>Hierro</b>	mg/L	12.6	16.9	10.05	22.26	19.69	41.95	12.9
<b>Litio</b>	mg/L	0.17	0.13	0.15	<0.05	0.102	0.085	0.055
<b>Manganeso</b>	mg/L	0.16	0.166	0.2	0.575	0.16	0.375	0.145
<b>Molibdeno</b>	mg/L	<0.01	0.015	0.13	0.01	0.021	<0.01	0.057
<b>Níquel</b>	mg/L	0.48	0.496	0.44	0.45	0.418	0.385	0.353
<b>Plomo</b>	mg/L	0.1	0.09	0.15	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
<b>Selenio</b>	mg/L	<0.005	0.005	<0.005	NR	<0.005	<0.005	<0.005
<b>Vanadio</b>	mg/L	0.16	0.198	0.15	<0.1	0.118	<0.1	<0.1
<b>pH</b>	mg/L	8.78	8.95	8.93	9.01	8.52	8.39	9

Fuente: Informes de supervisión disposición final 2016

Como se evidencia en la tabla, para el año 2016 los parámetros con mayor frecuencia que incumplieron la resolución 166 del 2008 fueron el Cobalto, Cromo, DBO5, Hierro, Molibdeno y Níquel. De tal forma que para el año 2016 se tuvo un cumplimiento con la norma de un 66% lo cual no es bueno debido a la acumulación de concentraciones contaminantes en el ambiente de años anteriores cuyo porcentaje de cumplimiento tampoco ha sido alto.

De igual forma no se evidencian registros de Mercurio y la DQO que son altos contaminantes y suelen estar en mayor concentración en los lixiviados.

**Tabla 13.** Cumplimiento parámetros de vertimiento año 2017

	UNIDAD	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE
Aluminio	mg/L	5.25	3.765	2.053	3.12	1	1.63	1.425
Arsénico	mg/L	0.02	0.031	0.002	NR	NR	NR	NR
Berilio	mg/L	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Cadmio	mg/L	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Zinc	mg/L	0.33	0.4	0.29	0.297	0.16	0.24	0.31
Cobalto	mg/L	0.1	0.05	0.08	0.1	0.08	0.08	0.08
Cobre	mg/L	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Cromo	mg/L	0.83	0.7	0.48	0.42	0.47	0.59	0.68
DBO5	mg/L O2	2723.25	2545.8	2298.5	386	238	234	884
DQO	mg O2/ L	9249	7892	6741.56	4052	3908	4415	6210
Hierro	mg/L	17.3	9.8	18.02	12.63	9.61	14.4	13.25
Litio	mg/L	0.1	0.1	0.09	0.077	0.08	0.075	0.035
Manganeso	mg/L	0.08	0.15	0.185	0.103	0.157	0.14	0.18
Molibdeno	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.01	0.047	0.078	0.08
Níquel	mg/L	0.31	0.255	0.25	0.22	0.22	0.26	0.28
Plomo	mg/L	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Selenio	mg/L	0.01	0.005	0.005	NR	NR	NR	NR
Vanadio	mg/L	0.128	0.1	0.1	0.27	0.37	0.5	0.28
pH	mg/L	8.52	8.67	8.75	8	8.53	8.6	8.53
Mercurio	mg/L	NR	NR	0.0062	0.16	NR	NR	NR
Boro	mg/L	NR	NR	4.89	4.02	NR	NR	NR

Fuente: Informes de supervisión disposición final 2017

A diferencia de años anteriores para el 2017 se logró obtener los resultados promedio de la DQO y del Mercurio. Para este año se evidencia incumplimiento en la norma de los componentes Cadmio, Cobalto, Cromo, DBO, Níquel; Vanadio y Mercurio.

Se evidencia un aumento significativo en los valores de vertimiento de la DBO5 de los cuales los primeros meses del año se desfasan en más de 1400 mg/L O2 lo cual es un riesgo ambiental para el río Tunjuelo y para la población aledaña. Por otro lado, es del único año donde se obtienen valores de Mercurio y sobrepasan la norma igualmente.

En todos los años se puede evidenciar que la tabla no está completa con todos los parámetros que exige la norma. Adicionalmente a esto siempre se evidencia incumplimiento entre 8 y 10 parámetros de los 24 que nombra la norma. Donde anualmente

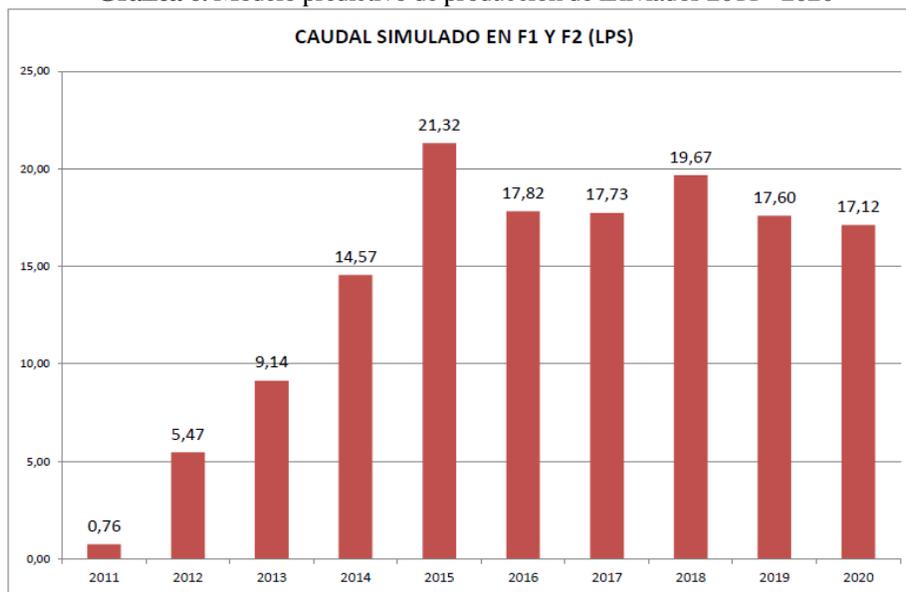
se tiene un porcentaje de cumplimiento aproximado al 66% lo cual no es bueno ambientalmente ni sanitariamente.

### 5.3.3 Proyección de generación lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana

Para realizar la proyección de lixiviados se realiza un proceso de modelación predictivo para la fase I de optimización de las zonas VII y VIII y de igual forma el modelo también estima la producción de lixiviados en la fase II que son los lixiviados que se generan en las zonas clausuradas. (CGR Doña Juana, 2014)

La finalidad de la proyección es tener consideraciones técnicas necesarias para el dimensionamiento de los sistemas de recolección, conducción y tratamiento de los lixiviados así como la operación y el mantenimiento de las áreas en las fases posteriores. El periodo analizado por este método de modelación inicia desde el año 2011 hasta el 2025 y es el que hasta la fecha ha sido utilizado.

**Grafica 6.** Modelo predictivo de producción de lixiviados 2011 - 2020



Fuente: (CGR Doña Juana, 2014)

Se estima que el caudal medio a tratar en el RSDJ en los años de mayor criticidad (2015, 2018 y 2019) se encuentra alrededor de los 20LPS a 24LPS como valores mensuales, manteniendo un promedio anual del año entre los 24.24 LPS, 20.03 LPS y 20.79 LPS; esta situación debe repercutir en la toma de decisiones del dimensionamiento de los procesos de optimización de los sistemas de tratamiento de lixiviados al interior del sitio de disposición,

así como sobre la capacidad de almacenamiento y regulación disponibles para el manejo y amortiguamiento de dichos caudales (Pondajes). (CGR Doña Juana, 2014). Esto es de gran importancia debido a que se debe tener proyecciones en términos climáticos, demográficos y la producción de residuos sólidos para poder establecer con la mayor precisión posible la generación de lixiviados y así mismo dimensionar estructuralmente la PTL para tratar la cantidad de volumen que genere el relleno y que al momento del vertimiento cumpla con las condiciones de la resolución 166 del 2008

#### 5.4 Cambios en la Planta de Tratamiento de Lixiviados durante los últimos años

Desde que se inició la construcción de la planta de tratamiento en el año 2000 cuyo concesionario encargado se llamaba STL no se han realizado cambios en cuanto a la estructura y operación. Las únicas unidades que se han adicionado fueron dos baterías de tratamiento fisicoquímico y dos unidades de DAF. En esencia es lo mismo, solo se aumentó la cantidad de tanques para que pudiera tratar mayor cantidad de lixiviado. Entre el año 2012 y el 2013 se implementaron los SBR (Secuencial Batch Reactor) que se encuentran en la parte alta del relleno.

Las variaciones de operación entre el año 2015 y actualmente son de tipo hidráulico, de cambiar líneas de proceso y repartir las unidades que se manejan para ampliar la capacidad hidráulica. El tamaño de las unidades no ha variado, sin embargo se han construido diferentes pondajes con diferentes tamaños con el fin de tener un manejo sobre el volumen de lixiviado que genera el relleno. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

Originalmente el tratamiento fue diseñado para un caudal medio diario de 29 m<sup>3</sup>/h y un caudal punta diario de 50 m<sup>3</sup>/h (Sanchez & Castro, 2013). Actualmente se tratan 37 m<sup>3</sup>/h en toda la planta y 35 m<sup>3</sup>/h que entran a tratamiento fisicoquímico. Anteriormente se utilizaba ácido sulfúrico para realizar neutralización de pH, sin embargo desde el año 2015 se dejó de utilizar porque la eficiencia obtenida con la neutralización no varía mucho en comparación con el tratamiento que se utiliza hoy en día; se aumentaban los costos de operación de la planta considerablemente y adicionalmente se requiere un permiso de sustancias controladas con el cual se han presentado varios inconvenientes debido a que la restricción actual es mayor. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

Anteriormente, el ácido sulfúrico se aplicaba en la cámara antes del tratamiento biológico y al final del proceso fisicoquímico antes de salir al vertimiento. Esta neutralización se realizaba porque los procesos fisicoquímicos se realizaban antes del proceso biológico. Esto se modificó debido a que se bajaba el pH para hacer una pre-acidificación y al ser un tratamiento aerobio en ocasiones no es, obteniendo un incremento en las concentraciones de aluminio porque se dosifica el policloruro de aluminio (PAC) desestabilizando los microorganismos en el reactor. Teniendo en cuenta las condiciones mencionadas actualmente primero se realiza el tratamiento biológico y posteriormente el tratamiento fisicoquímico. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

El tratamiento biológico y el tratamiento de lodos no ha tenido cambios en su operación, sin embargo el tratamiento biológico puede trabajar en paralelo o en serie con los tratamientos fisicoquímicos dependiendo de la calidad y cantidad de lixiviado que se quiera verter. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

#### 5.5 Descripción del tratamiento de lixiviados Doña Juana

Actualmente el sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana cuenta con la implementación de los componentes como: (1) transporte del lixiviado desde la zona de disposición de residuos por medio de líneas de conducción de lixiviado, (2) estructuras de regulación y almacenamiento como los pondajes y (3) sistema de depuración biológica denominados SBR y planta de tratamiento de lixiviados. (Sanchez & Castro, 2013)

El lixiviado generado es transportado por canales en posición paralela a la vía de acceso del relleno sanitario, donde luego se dirige a una caja de derivación la cual reparte el caudal en las dos líneas de tratamiento que se están usando actualmente. Una de ella es el subsistema SBR realizando una depuración preliminar o a los pondajes II para su almacenamiento y regulación hasta el sistema de tratamiento. La línea dos consiste en un proceso biológico de desnitrificación que consiste en un tanque pre-desnitrificar, seguido de dos zanjones de oxidación donde se extrae la contaminación orgánica disuelta y se realiza una desnitrificación mediante una serie de bacterias adaptadas al lixiviado, sale a un posdenitrificaro y finaliza en un decantador secundario para luego salir a vertimiento.

(Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017) El sistema de tratamiento de Doña Juana actualmente se compone de tres procesos unitarios:

1. Proceso físicoquímico
2. Proceso biológico aerobio
3. Proceso biológico de desnitrificación.

**Ilustración 4.** Planta de tratamiento de lixiviados



Fuente: Google Earth, 2017

#### 5.5.1 Distribución de entrada y derivación

La estructura se compone por una canaleta de entrada a los pondajes. Actualmente la planta cuenta con siete pondajes los cuales varían su volumen desde 2000m<sup>3</sup> siendo el secador de lodos el más pequeño seguido del pondaje 2 antiguo, le siguen los pondajes del 2-1 al 2-4 cuyo volumen puede estar entre 4000 – 5000 m<sup>3</sup> y uno de los más grandes es el pondaje siete con un volumen aproximado de 7000 m<sup>3</sup>. En donde cada uno cuenta con un medidor de nivel tipo radar que permite la medición de los caudales de entrada a los pondajes. Adicionalmente, en la estructura de entrada los pondajes cuentan con un vertedero triangular provisto de una regleta para el cálculo de caudales con la respectiva curva de calibración. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

Los sistemas de conducción existentes en la estructura de entrada y la derivación están compuestos por válvulas reguladoras de caudal con el fin de variar la operación de acuerdo a los requerimientos. (Sanchez & Castro, 2013)

#### 5.5.1.1 Línea de conducción del lixiviado

Cada zona que se ha construido en el relleno está dividida por terrazas las cuales pueden tener hasta cinco terrazas y cada terraza dentro de sus adecuaciones tiene adecuaciones de fondo, en el cual se incluyen el tema de la impermeabilización, construcción de drenes y filtros. Generalmente la evacuación de lixiviado se hace por tubería de polietileno de 12 o 14 pulgadas con una, dos o tres líneas dependiendo el tamaño de la terraza y todas se conectan a una conducción principal de lixiviado cuya tubería está entre 14 y 16 pulgadas que también cuenta con una sección construida en polietileno. Existe otra conducción que es un canal construido en concreto revestido en geomembrana por donde se conduce otra parte del lixiviado y luego vuelve y se conecta de nuevo a la tubería principal. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

La zona que aporta mayor cantidad de lixiviado es la zona en operación (zona VIII), las terrazas 1A, 1B, 1C. Le sigue la zona VII la cual estuvo en funcionamiento hasta octubre del 2017 y las que menos producen lixiviados son las zonas de biosólidos y las zonas cerradas como la zona de mansión y la zona IV que están en proceso de pos clausura.

Igualmente, el lixiviado de las zonas en operación y las zonas clausuradas van por una conducción de fondo que es un filtro gavión con tubería interna. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

#### 5.5.2 Proceso fisicoquímico

El objetivo de este proceso es remover los metales pesados por medio de precipitación que se producen por la mezcla de lixiviados en las diferentes zonas del Relleno Sanitario. Adicionalmente, se puede obtener porcentajes de remoción en sólidos suspendidos totales, materia orgánica indicada como DBO5 y DQO, materia nitrogenada indicada como nitrógeno total, grasas y aceites. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

La planta cuenta con tres procesos fisicoquímicos de los cuales solo se están usando los procesos fisicoquímicos 1 y 3 en serie debido a que el 2 se encuentra en mantenimiento.

El proceso fisicoquímico 3 se compone por una cámara de agitación lenta-rápida, un DAF y un decantador. Para el proceso de coagulación y floculación se aplica policloruro de aluminio (PAC) el cual se dosifica entre 0,1 – 0,3 mL/L y el polímero se aplica con una

dosificación entre 0,5 – 1,5 mL/L con un tiempo de retención hidráulico de aproximadamente 4 minutos para la mezcla rápida y 24 minutos aproximadamente para la mezcla lenta. Las condiciones fisicoquímicas del lixivado hacen que no sea necesario aplicar químicos para neutralizar el pH debido a que este ingresa a la planta con un pH básico entre 8 y 10. Donde metales como hierro, níquel, cadmio, aluminio, cromo trivalente y zinc son precipitados y removidos en el proceso de decantación posterior. Adicionalmente se presenta oxidación química en la materia orgánica. Los lodos fisicoquímicos que se generan se purgan y se deshidratan para ser depositados finalmente en una celda de seguridad. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

El proceso fisicoquímico 2 fue diseñado con el fin de aumentar la capacidad de la planta cuyo objetivo es acelerar el tratamiento y evacuar el mayor volumen posible de lixiviado. Este proceso consiste en mejorar la remoción especialmente de metales pesados el cual ha trabajado en serie con el tratamiento biológico o en paralelo con los otros tratamientos fisicoquímicos. Este tiene el mismo funcionamiento que el tratamiento fisicoquímico 1 solo que es su decantación es lamelar y no por gravedad. A la fecha se encuentra en mantenimiento debido a que la decantación lamelar al ser de alta tasa no es eficiente para el tratamiento de lixiviados por la gran cantidad de lodo que se genera, como consecuencia de ello se han colmatando las lamelas rápidamente. Cada unidad tiene un caudal de diseño de 30 m<sup>3</sup>/h con un diámetro de 9 m. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

Actualmente las unidades fisicoquímicas han sido modificadas para tener una mejor eficiencia donde pueden trabajar tanto en serie como en paralelo logrando amortiguar los picos hidráulicos que se puedan presentar. El tratamiento fisicoquímico trata actualmente 35m<sup>3</sup>/h. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

### 5.5.3 Proceso biológico aerobio

Este proceso tiene como objetivo remover el mayor porcentaje de contaminación orgánica que se expresa como DBO<sub>5</sub> y DQO, donde también se puede remover algún porcentaje de grasas y aceites, metales por bioabsorción, sólidos suspendidos y disueltos, virus y bacterias entre otras sustancias contaminantes. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

También, se cuenta con un proceso para la remoción de nitrógeno amoniacal el cual tiene como objetivo remover el mayor porcentaje posible de contaminación en forma de nitrógeno amoniacal, producto de la descomposición de los residuos. Este proceso se realiza por medio de una etapa de nitrificación en medio aerobio y una etapa de desnitrificación en medio anóxico (Sanchez & Castro, 2013).

El predesnitrificador es un reactor circular con un diámetro de 17 m y una profundidad aproximada de 3,5 m y cuenta con un agitador sumergible el cual permite mantener las condiciones anóxicas para la transformación de nitratos a nitrógeno gaseoso. Su tiempo de retención hidráulico es de aproximadamente 6 horas y se alimenta del lixiviado proveniente de la caja de entrada. (Sanchez & Castro, 2013)

#### 5.5.4 Proceso biológico de desnitrificación

Este proceso se realiza en reactores conocidos como zanjones de oxidación. La función de los reactores es extraer la contaminación orgánica disuelta y se realiza una desnitrificación parcial mediante una serie de baterías adaptadas al medio de los lixiviados. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

La variante que se utiliza para conocer el porcentaje de remoción de nitrógeno es conocida como “proceso modificado de Ludzack-Ettinger (MLE)”. Esta tecnología consiste en colocar un tanque anóxico ubicado aguas arriba de la zanja en el cual al entrar en contacto con el licor de mezcla de la recirculación procedente de la zona aeróbica con el lixiviado fresco se obtiene como resultado altos niveles de desnitrificación. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

Los nitritos y los nitratos se convierten en nitrógeno amoniacal debido a las bacterias nitrificantes presentes en el tanque aeróbico. En la zona anóxica las bacterias heterotróficas convierten el nitrógeno en forma de nitratos a nitrógeno gaseoso el cual se libera a la atmósfera. Se recircula parte del licor de mezcla del tanque aeróbico a la zona anóxica de tal forma que aumente el contenido de nitratos. El sistema de tratamiento cuenta con dos unidades desnitrificadoras antes y después de los zanjones de oxidación (Sanchez & Castro, 2013). (Castrillón, 2008)

La planta dispone de dos reactores de aireación extendida de sistema de carrusel, con un área anóxica para desnitrificación. El volumen de estas estructuras alcanza los 15600 m<sup>3</sup> entre los dos. Los reactores son del tipo aireación extendida y flujo de pistón, con un tiempo de retención celular que ha variado entre 20 y 30 días, con Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS) de 4210 mg/L en condiciones máximas. El sistema cuenta con aireación a través de difusores de burbuja fina y 4 agitadores sumergibles, 1 medidor de potencial redox y 2 medidores de concentración de oxígeno por reactor. (Sanchez & Castro, 2013)

#### 5.5.5 Tratamiento de lodos

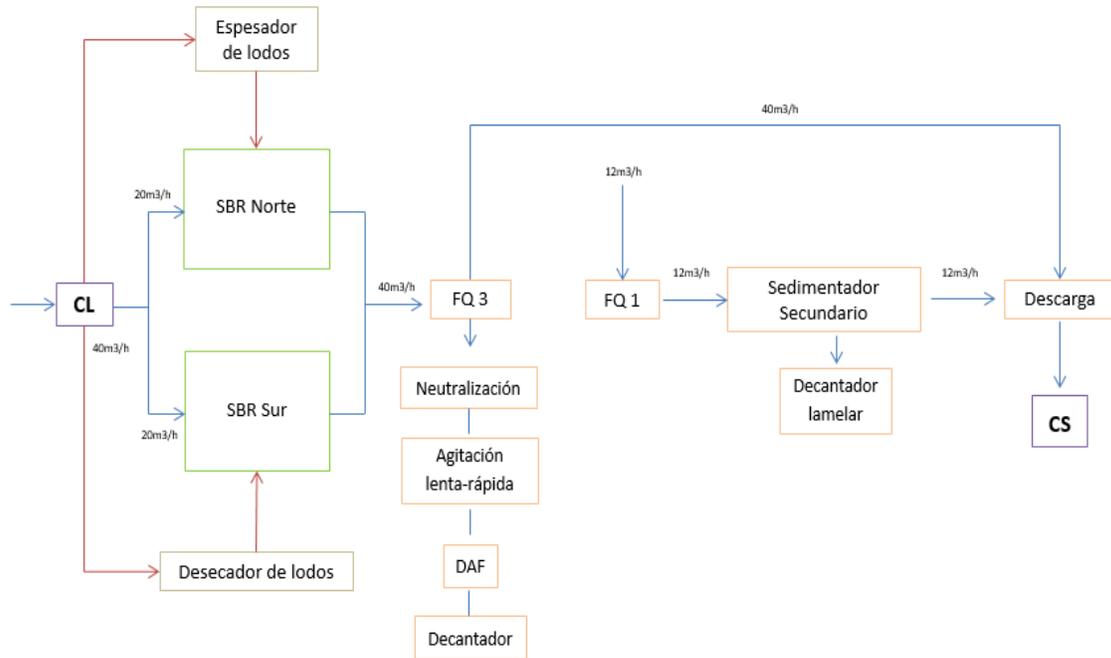
A los lodos se les da dos tipos de tratamiento, espesamiento y deshidratación. Se cuenta con un espesador por gravedad el cual recibe los excesos de decantación primaria (decantación por gravedad y decantador lamelar) y la decantación secundaria donde el lodo sale espesado en un 5%. Cuando el lodo ya está espesado es dirigido a la deshidratación mediante centrifugas donde el sistema cuenta con tres centrifugas. 2 con capacidad de 10 m<sup>3</sup>/h y 1 con capacidad de 20 m<sup>3</sup>/h. (Observatorio de salud ambiental, 2015)

#### 5.5 Líneas de tratamiento de lixiviado al año 2017

Hoy la planta cuenta con dos líneas de tratamiento que trabajan en paralelo y luego sale a descarga directamente. A continuación, se describe cómo funcionan las líneas de tratamiento donde se evidencia que caudal entra en cada unidad. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

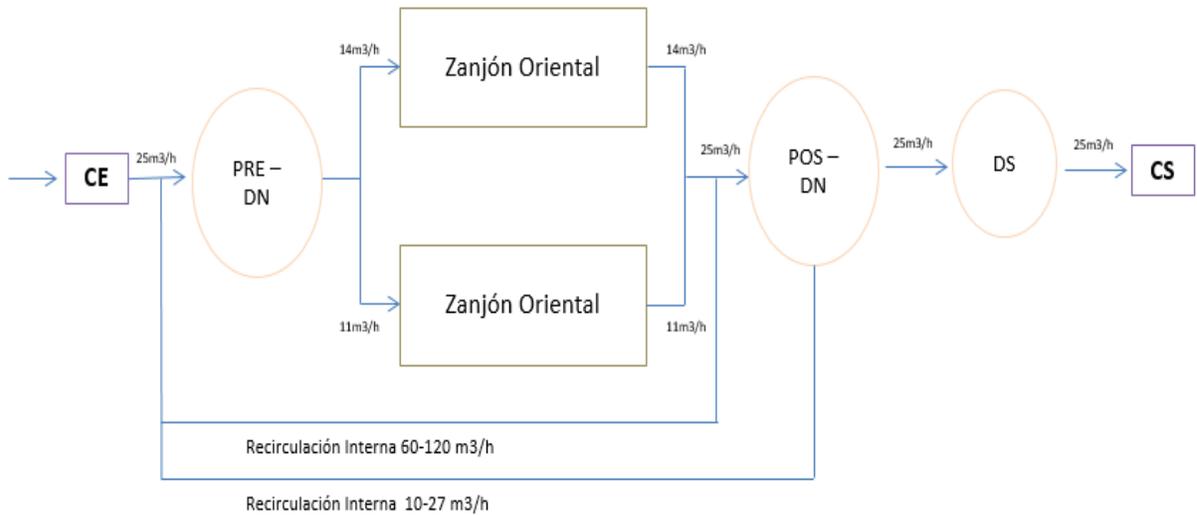
La estructura de entrada de los pondajes cuenta con vertedero triangular y dos bombas sumergibles ubicadas en la caja de entrada. El caudal de ingreso al proceso biológico por SBR puede venir de la conducción principal o del pondaje siete, con un caudal de entrada aproximado de 30 m<sup>3</sup>/h a 36 m<sup>3</sup>/h máximo, luego se dirige al proceso fisicoquímico 3, luego al proceso fisicoquímico 1 y luego a descarga como evidencia la imagen de la línea A. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

**Ilustración 5.** Escenario de operación actual - Línea A



Fuente: CGR Doña Juana, 2017.

**Ilustración 6.** Escenario de operación actual - Línea B



Fuente: CGR Doña Juana, 2017.

La línea biológica por zanjones se alimenta del lixiviado que llega del pondaje 2 (dos) donde llega a la caja de entrada para ingresar con un caudal de 33 m<sup>3</sup>/h a 37 m<sup>3</sup>/h máximo dando un total de volumen tratado entre las dos líneas de 70 m<sup>3</sup>/h a 73 m<sup>3</sup>/h. de la caja de

entrada continua al pre-desnitrificador, luego se dirige a los zanjones de oxidación sale de ahí al pos-desnitrificador, de allí entra al decantador secundario y luego a vertimiento. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

Es de importancia resaltar que el total del lixiviado generado recibe tratamiento biológico y fisicoquímico antes de ser vertido al río Tunjuelo.

#### 5.7 Eficiencia de las unidades de proceso

Los biorreactores en la planta de tratamiento alcanzan un porcentaje de remoción del 99% de DBO5 antes de que se mezcle con el flujo tratado por el SBR (Sequential Batch Reactor). Por lo que la eficiencia global para la remoción de DBO5 en la planta de tratamiento es del 75%. Adicionalmente la eficiencia en la depuración de la DBO5 en los bioreactores (SBR) es del 75%. (Celis, comunicación personal, 27 de diciembre de 2017)

### 6. Procesos de coagulación y floculación para el tratamiento de lixiviados

En los procesos de tratamiento para lixiviados es común que se incorporen procesos fisicoquímicos con el fin de eliminar las cargas contaminantes de sales metálicas y/o polielectrolitos. Este proceso consiste en la eliminación de las partículas suspendidas por medio de la sedimentación. El elemento esencial para el éxito de este proceso es determinar el coagulante y su relación con las condiciones fisicoquímicas del líquido.

Los coagulantes usualmente usados son aquellos que se encuentran formados por sales metálicas como el sulfato y cloruro de aluminio, sulfato y cloruro férrico o poliférrico entre otros. También, son usados genéricamente los polielectrolitos los cuales pueden ser clasificados como catiónicos, aniónicos y neutros donde cada uno cuenta con diferentes intensidades. (Cárdenas, 2000)

Características como la alcalinidad, el pH, la concentración de sólidos suspendidos, carga eléctrica de las partículas suspendidas y la forma de agregación de estos sólidos son los parámetros que se deben tener en cuenta al momento de determinar la eficiencia del coagulante usado. (Méndez Novelo, 2004).

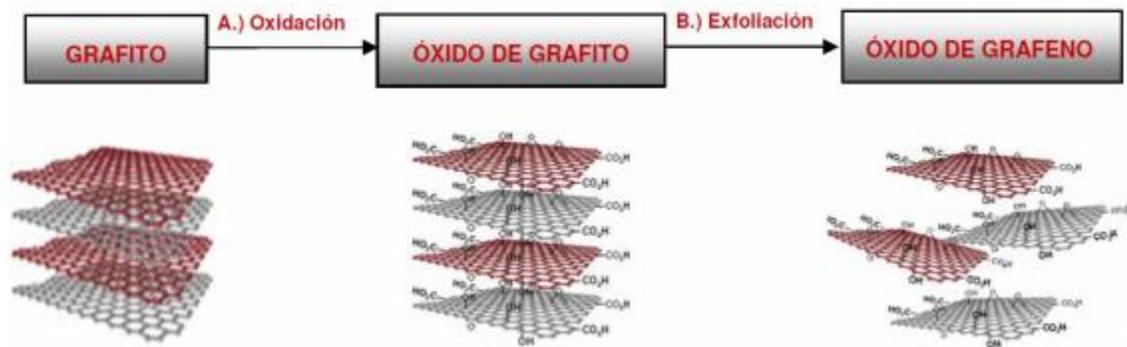
Para el caso de estudio y teniendo en cuenta la función del proceso fisicoquímico en la planta de tratamiento de lixiviados para el Relleno Sanitario Doña Juana se debe tener en

cuenta el porcentaje de remoción de materia orgánica expresada como DBO5 y DQO, además de la materia nitrogenada expresada como nitrógeno total.

## 7. Óxido de grafeno

El óxido de grafeno nace de la síntesis del grafito puro. Se han desarrollado diferentes formas de sintetización, los métodos principales desarrollados han sido el por Brodie, Staudenmaier, Hummers o alguna variación de estos. Los tres métodos involucran la oxidación de grafito a varios niveles. Brodie y Staudenmaier usan una combinación de clorato de potasio ( $\text{KClO}_3$ ) para oxidar el grafito, mientras el método de Hummers involucra el tratamiento de grafito con permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) y ácido sulfúrico. El proceso de obtención del óxido de grafeno a partir del grafito se puede apreciar como los grupos funcionales provocan un aumento la distancia entre capas. (Fernandez, 2015)

**Ilustración 7.** Obtención del óxido de grafeno a partir del grafito.



Fuente: (Fernandez, 2015)

El óxido de grafeno, conocido como GO es una lámina de grafeno funcionalizada con diferentes grupos oxigenados, que se puede emplear como precursor del grafeno o como un material grafénico en sí mismo. (Martinez, 2013)

El grafeno ha sido estudiado durante décadas debido a sus propiedades químicas y físicas. Es una estructura laminar plana, bidimensional del espesor del orden de un átomo [1-6]. La red está compuesta por átomos de carbono densamente empaquetados en dos subredes cristalinas tipo panel de abejas mediante enlaces covalentes que se formarían a partir de la superposición de los enlaces híbridos  $\text{sp}^2$  de los átomos de carbono. Como elemento estructural componente del grafito es el material más conductor y resistente que existe en la

actualidad y estas características lo hace un futuro sustituto del silicio. Las propiedades más destacadas del grafeno son:

- Alta conductividad térmica y gran conductividad eléctrica.
- Alta elasticidad, gran dureza y una resistencia mecánica mayor que el acero.
- Químicamente el grafeno reacciona con otras sustancias para formar compuestos con diversas propiedades. Transformando al grafeno como un material de gran potencial electrotecnológico.
- Presenta alta resistencia a la ionización. (López-Bonilla, 2011)

Diferentes ensayos han demostrado que es óptimo usar el óxido de grafeno para descontaminación, señala que este material tiene afinidad por sustancias tóxicas como el azul de metileno, la rodamina B la violeta de metileno o naranja de metilo que se encuentran en los tintes. (Herruzo, 2014)

Estudios demuestran que se deben mantener condiciones estables del medio para que pueda haber una interacción entre las cargas iónicas de los tintes y las características de la superficie de grafeno. De tal forma que cuando el grafeno absorbe alguno de los componentes se produce un aumento de pH y de las fuerzas iónicas. (Herruzo, 2014)

Los desarrollos y estudios tecnológicos han demostrado las diferentes aplicaciones que posee el óxido de grafeno debido a su composición fisicoquímica. Para el tratamiento de medios acuosos éste ayuda en el proceso de adsorción, debido a que el óxido de grafeno es un material compuesto por carbonos, el cual debido a su área de superficie específica permite gran adsorción de material contaminante y desorción del mismo sin contaminar el medio, esto quiere decir que posee un alto porcentaje de tasa de recuperación en comparación con otros materiales. Adicionalmente, en su proceso de preparación del óxido de grafeno, en su superficie posee una gran cantidad de grupos activos que forman como carboxilo, carbonilo, hidroxilo, grupo epoxi, etc. Por lo tanto, óxido de grafeno tiene los elementos necesarios para un proceso óptimo de adsorción.. (Fernandez, 2015)

En la actualidad no se ha podido dar una estructura química al óxido de grafeno puesto que su inestabilidad en cuanto a composición no permite definir su forma. Este es un material que aún sigue en estudio y que puede ser utilizado en diferentes ramas de la tecnología. Por

lo cual este estudio se basa en determinar la funcionalidad del óxido de grafeno como floculante en cuanto al porcentaje de remoción de materia orgánica de los lixiviados.

#### 8. Resultados y Análisis de resultados

El propósito del estudio fue determinar si el óxido de grafeno funciona como floculante y las dosis necesarias para obtener un porcentaje aproximado de remoción del 40% de carga contaminante expresada como demanda química de oxígeno (DQO).

#### ENSAYOS DE “TEST DE JARRAS”

Para el test de jarras se realizaron tres ensayos con combinaciones distintas de las sustancias en mención, a su vez, cada uno de los ensayos realizados considero el uso de concentraciones diferentes (PAC, Oxido de Grafeno y Polímero) con el fin de evidenciar, cuál de las combinaciones presentaba condiciones eficaces para la remoción de la carga contaminante.

La muestra utilizada para los test de jarras fue tomada de manera puntual sobre la línea de conducción que transporta el efluente del sistema SBR hacia el afluente del tratamiento fisicoquímico, en el momento en que se presenta el caudal máximo de lixiviados (para esta línea ; 37m<sup>3</sup>/h), los días 7 de noviembre de 2017( para el test de jarras numero 1) y 14 de Noviembre del mismo (para los test de jaras número 2 y 3) ; teniendo en cuenta que este mes se presentaron picos de precipitación en 2014 y 2016, lo cual es de alta relevancia al momento de evaluar la generación de lixiviados en sus puntos críticos.

#### TEST DE JARRA 1

Para el primer test se aplicó el PAC y el polímero (como se aplica en la planta de tratamiento con el fin de tener resultados propios), el segundo test solo se realizó usando el óxido de grafeno y el tercer test se utilizó aplicando el óxido de grafeno y el polímero. Para cada test de jarras se utilizaron cuatro jarras y cada una se llenó con un litro de lixiviado. La mezcla rápida se realizó a 200 rpm por 2 minutos, estas condiciones garantizan el proceso de coagulación en mezcla rápida durante el tiempo necesario para el óptimo desarrollo del proceso. Por otro lado la mezcla lenta se realizó a 60 rpm por 20 minutos.

**Ilustración 8.** Test de jarras



Fuente: Autora

El primer test de jarras se realizó aplicando el PAC que se utiliza en la planta de tratamiento de lixiviados con una dosificación que se encuentra en un rango de 0,1 mL/L a 0,3 mL/L según información suministrada por la ingeniera encargada en la planta de tratamiento de lixiviados Catalina Celis, por tanto se utilizaron concentraciones de 0,1 mL/L, 0,2 mL/L y 0,3 mL/L para las pruebas de aplicación. Con respecto a la aplicación del polímero, se reporta que la relación que presenta una eficiencia mayor con respecto al PAC es la relación de 0.5 mL de polímero por cada mililitro de PAC, con base en esta información, se definieron concentraciones de 0.5 mL/L, 1 mL/L y 1.5 mL/L para las pruebas de compatibilidad.

Condiciones iniciales para el test de jarras 1:

pH: 8.93

Temperatura: 18,3°C

DQO: 3708 mg/L

**Tabla 14.** Test de jarras con PAC y polímero

JARRA	DOSIFICACIÓN PAC (MI)	DOSIFICACIÓN POLÍMERO (MI)	DQO (mg/L)	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
1	0,1	0.05	2874	22,5%
2	0,2	0.1	2874	22,5%
3	0,3	0,1.5	2928	21,03%

Fuente: Autora

Para el desarrollo del test de jarras número 1, se encontró que tanto la concentración de 0.1 mL/L de PAC como la concentración de 0.2 mL/L de la misma sustancia presentaron eficiencias similares en la reducción de la carga contaminante. Por efectos de reducción en

la dosificación y en costos se sugiere que la combinación de 0.2 mL/L de PAC en adición de 0.1 ml/L de polímero representa una eficiencia aceptable a la vez que no aumenta sus costos de aplicación.

## TEST DE JARRA 2

El segundo test se realizó usando solo el óxido de grafeno, Para realizar la síntesis del óxido de grafeno se utilizan tres métodos donde los tres métodos involucran la oxidación de grafito a varios niveles, para este caso en estudio se utilizó el método Hummers donde su concentración es de 99.5% de óxido de grafeno y 0.5% de agua (mirar ficha técnica Anexo B).

Condiciones iniciales para los test de jarras número 2 y 3:

pH: 8.33

Temperatura: 18,4°C

DQO: 8460 mg/L

**Tabla 15.** Test de jarras con óxido de grafeno

JARRA	DOSIFICACIÓN OG (mL)	DQO (mg/L)	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
1	2,0	8255	2.42%
2	2,2	8023	5.16%
3	2,4	7863	7.05%
4	2,6	7452	11.91%
5	2,8	7392	12.62%
6	3,0	7205	14.83%
7	3,2	7120	15.84%
8	3,4	7050	16,60%
9	4,2	7340	13,23%
10	4,6	7410	12,41%

Fuente: Autora

De los resultados que se obtuvieron del test de jarras número dos se evidenció que se obtuvo mayor porcentaje de remoción con una dosificación de 3,4 mL/L de óxido de grafeno. Sin embargo, los costos de operación del proceso fisicoquímico de la planta de tratamiento suelen ser altos debido al precio del coagulante y el floculante. La planta de tratamiento de lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana utiliza en promedio dos toneladas de PAC mensual para solo una unidad del proceso fisicoquímico. Cuando se

utilizan las tres unidades fisicoquímicas en paralelo se triplica la cantidad de químico a utilizar. En el mercado, la tonelada de PAC tiene un costo entre \$600.000 pesos colombianos y \$800.000 pesos colombianos la tonelada. El polímero que utiliza actualmente la planta de tratamiento tiene un costo entre \$1'500.000 pesos colombianos y \$3'000.000 pesos colombianos tonelada. Dando un total de \$4'200.000 pesos colombianos el precio más bajo y \$7'600.000 pesos colombianos el precio más alto. Mientras el óxido de grafeno tiene un precio de \$6'058.000 el litro y se consumiría mensualmente \$13'100.000 si la planta manejara un volumen constante de 35 m<sup>3</sup>/h. Teniendo en cuenta la diferencia en costo y que la eficiencia que se obtiene en porcentaje de remoción es la misma usando el PAC y el óxido de grafeno los dos como floculantes se evidencia que es rentable seguir utilizando el PAC como floculante junto con el polímero.

El óxido de grafeno como floculante tendría una mejor eficiencia si la dosificación fuera más alta, pero esto implicaría que el costo se incrementaría aproximadamente en un 20% por lo cual no es conveniente este incremento en el valor debido a que la planta tiene que hacer una inversión grande en infraestructura para mejorar las condiciones hidráulicas de la misma.

Debido a que su uso no había sido evaluado sobre aguas residuales de las características presentadas en los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana previamente, se empleó un rango de concentraciones más amplio que aquel utilizado en la prueba de jarras número 1, esto con el fin de evaluar el comportamiento del óxido de grafeno a distintas concentraciones y determinar aquella que presentara una remoción mayor de la carga contaminante. Para este propósito se utilizaron concentraciones entre 2 mL/L y 4.6 mL/L. La selección de la concentración de mayor eficacia se realizó mediante la comparación de la reducción de la DQO entre la muestra con condiciones iniciales y la muestra resultado posterior del test de jarras.

### TEST DE JARRA 3

El tercer test de jarras se realizó aplicando óxido de grafeno y el polímero que se utiliza en la planta de tratamiento. Una vez evidenciadas las concentraciones de óxido de grafeno que presentan una mayor eficiencia en la remoción de la carga contaminante, se procedió a

incluir la presencia del polímero con el fin de evidenciar si interfería con la remoción o por el contrario potencia la reducción de la carga contaminante en los lixiviados, por ende, se utilizaron las mismas concentraciones de óxido de grafeno y una relación de 0.5 ml de polímero por cada ml de óxido de grafeno.

**Tabla 16.** Test de jarras óxido de grafeno y polímero

JARRA	DOSIFICACIÓN OG (mL)	POLÍMERO (mL)	DQO (mg/L)	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
1	3,4	1.7	8310	1,77%
2	4,2	2.1	8250	2,48%

Fuente: Autora

Una vez analizados los resultados, se evidencio que los porcentajes de reducción fueron menores a todos los obtenidos anteriormente, esto debido al cambio de cargas entre los agentes floculantes en comparación (oxido de grafeno y PAC). En el test de jarras número 1 se observó que el polímero trabajó de manera eficiente en conjunto con el PAC, sin embargo, al trabajar con una sustancia de carga opuesta como lo es el óxido de grafeno se observa una interferencia provocada por la fijación electrostática de ambas sustancias reduciendo de manera considerable la eficiencia del mismo como agente floculante.

## 9. Conclusiones

- El óxido de grafeno puede interactuar con diferentes metales como lo son el plomo, cadmio, cromo entre otros que aún están en investigación. Incluso, en la disminución de metales pesados se puede evidenciar una disminución de la DQO. Teniendo en cuenta los resultados en porcentaje de remoción de DQO se puede evidenciar que la dosificación del óxido de grafeno no fue suficiente debido a que el porcentaje de remoción más alto que se evidenció fue del 16,6% de la jarra 8 con una DQO inicial de 8460 mg/L disminuyendo a 7050 mg/L con una dosificación de óxido de grafeno de 3,4 mg/L. Aunque se quiso manejar una dosificación en un rango similar al del PAC no fue posible debido a que con una dosificación de 2 mg/L de óxido de grafeno tuvo un porcentaje de remoción del 2.42% por lo que si se hubiera utilizado una dosificación menor probablemente se hubiera tenido un porcentaje de remoción de menos del 1% lo cual no lo hace viable para el estudio.

- La eficiencia del óxido de grafeno al igual que el uso de otros coagulantes se encuentra estrechamente condicionada por la concentración de agentes contaminantes en el lixiviado a tratar. Esto se puede evidenciar en las tablas de concentraciones en el punto de vertimiento de los años 2015, 2016 y 2017 se evidencia una tendencia de componentes fuera de la norma como lo son la DBO, Cromo y Cadmio. Así como varía la DBO varía la DQO debido a que están directamente relacionadas por lo que al mezclar lixiviado joven (20%) con lixiviado maduro (80%) se generan condiciones de inestabilidad en un rango amplio lo cual impide tener una concentración estándar y así el porcentaje de remoción cambiará según las condiciones del lixiviado.
- El óxido de grafeno no presentó cambios significativos en porcentaje de remoción cuando se utilizó junto con el polímero. Se evidenció que el porcentaje más alto de remoción fue del 2.48% lo cual hace que no sea viable. Se debe realizar un estudio que permita identificar cuáles son las interferencias químicas del polímero al entrar en contacto con el óxido de grafeno y de esta forma identificar que compuesto puede ser el elemento adecuado (sin interferencias) para una mejor eficiencia del óxido de grafeno.
- Teniendo en cuenta que el porcentaje de remoción que se obtuvo con el óxido de grafeno se puede concluir que es muy cercano al que se obtiene utilizando el PAC. Si se aplicará una dosificación más alta de óxido de grafeno se podrían tener mejores porcentajes de remoción de materia orgánica medida como DQO. Sin embargo, los costos hacen que esta alternativa no sea viable económicamente debido a que un litro de óxido de grafeno en el mercado está en aproximadamente \$6000.0000 y la tonelada de PAC cuesta aproximadamente \$800.000 y el polímero tiene un costo aproximado de \$600.000. Así se utilizara solo el óxido de grafeno habría una diferencia de \$5'400.000 lo cual no hace que sea rentable esta alternativa ni siquiera aumentando la eficiencia del óxido del grafeno.
- Para que el óxido del grafeno sea una alternativa viable tendría que usarse una dosificación aproximada de 120 mL/L lo cual implica que las unidades de

tratamiento fisicoquímico deberían tener la capacidad de soportar el volumen que aumenta con la aplicación del óxido de grafeno.

- Recomendaciones

Con base a los resultados obtenidos en el desarrollo de la presente tesis y una vez realizado el análisis de los mismos, la autora postula la siguiente recomendación, cuyo fin es el de alcanzar los objetivos propuestos.

Como recomendación principal se propone, una reestructuración de la infraestructura de la planta donde se tenga en cuenta la variación en las concentraciones del lixiviado de tal forma que se pueda implementar un tanque de homogenización para intentar mantener las cargas constantes antes de iniciar un proceso de tratamiento especialmente en los procesos fisicoquímicos.

Considerando que el óxido de grafeno es una alternativa de coagulante se puede implementar en una unidad de proceso fisicoquímico con un volumen a tratar de 20m<sup>3</sup>/h con el fin de mantener un volumen que la unidad y el terreno puedan soportar y así mismo brindar calidad al vertimiento final. Sabiendo que se puede aplicar en un litro de lixiviado 120 mg/L del óxido de grafeno y sabiendo la capacidad de la unidad para tratamiento fisicoquímico se puede calcular cual sería el volumen que se puede tratar con esa dosificación así no modificar la estructura inicial de la planta y si se puede mejorar considerablemente la calidad del vertimiento.

Es de gran importancia continuar con estudios de métodos de implementación del óxido de grafeno como floculante debido a que este compuesto tiene una alta capacidad de adsorción y desorción de metales y compuestos contaminantes. Sin embargo los porcentajes de adsorción pueden variar teniendo en cuenta el proceso de obtención del óxido de grafeno que puede ser de varias formas y esto puede cambiar su estructura haciendo que varíen los resultados. Debido a que es un material que aún se encuentra en estudio hay que tener en cuenta las variables de composición, reacción, interferencias y eficiencias en los medios donde se utiliza.

## 10. Bibliografía

- Agudelo, R. (1996). *Tratamiento de lixiviados producidos en el relleno sanitario "Curva de Rodas" de la ciudad de Medellín utilizando reactores UASB y filtro anaerobios FAFA*. IV Seminario – Taller Latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales, Bucaramanga, Colombia.
- Canepa, J. R., Arévalo, J. A., Schroeder, R. H., & Chiu, W. C. (2008). mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. *INTERCIENCIA*, 33(1), 22-24.
- Castrillón, L. e. (2008). *Tratamiento de lixiviados de vertederos de residuos urbanos (ru)*. Universidad de Oviedo, Gijón, Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. España: Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias.
- CGR Doña Juana. (2014). *modelo predictivo de producción de lixiviados en el relleno sanitario doña juana versión 2014*. Bogotá.
- Defensoria del pueblo. (s.f.). *disposición final de residuos sólidos en Bogotá*. Informe defensorial N° 38, Bogotá.
- Dreyer. (2010). The chemistry of Graphene Oxide. *The Royal Society of Chemistry*, 39, 36-37.
- earth, F. o. (1996). *"Citizen's Guide to Municipal Landfills"*. Global Alliance for Incinerator Alternatives, Estados Unidos.
- Fernandez, D. B. (2015). *posible aplicación del óxido de grafeno para la remoción del plomo (Pb): aplicando a teoría funcional de la densidad (DFT)*. Escuela superior politécnica de Chimborazo, Riobamba.
- Fiallos, C., & Gomez, V. (2015). *Removal of Acridine Orange from Water by Graphene Oxide*. University of Calabria, department of physics, Italy.

- Giraldo, E. (2014). tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista de Ingeniería, [S.l.], n. 14., 44-55.*
- Greenpeace. (Mayo 2004. Segunda Revisión: Julio 2004. Tercera revisión: Septiembre 2008). *resumen de los impactos ambientales y sobre la salud de los rellenos sanitarios.* Campaña Contra la Contaminación, Argentina.
- Herruzo, J. A. (2014). *Grafeno, descontaminación de aguas residuales .*
- López-Bonilla, H. T.-S. (2011). Aspectos quirales del grafeno. *Revista chilena de ingeniería, 67-75.*
- Luis Fernando Londoño Franco, p. t. (julio - diciembre de 2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustria, 14(2), 145 - 153.*
- Luna, M. d. (2008). *Sistemas de tratamiento para lixiviados generados en rellenos sanitarios.* Sincelejo.
- Luna, M. d. (2008). *sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios.* universidad de sucre, departamento de ingeniería civil, sincelejo.
- Maos. (2012). Graphene Oxide and its Reduction: Modeling and Experimental Progress. *The Real Society of Chemistry, 2643-2646.*
- Martinez, V. G. (2013). *Estudio de la estabilidad del óxido de grafeno con el tiempo.* universidad de oviedo, Departamento de ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica.
- Méndez Novelo, R. &. (2004). *Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario.* Ingeniería 8-2.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (s.f.). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS 2000.* Colombia.
- ministerio del medio ambiente. (2002). *guia ambiental rellenos sanitarios.* Tolima.

- Montenegro, D. L. (2013). *Estimación del efecto del lixiviado del relleno sanitario Doña Juana sobre la calidad del río Tunjuelo y su posible tratamiento en la PTAR Canoas*. Universidad Nacional, Facultad de ingeniería, Bogotá.
- Novelo, R. M., Borges, E. C., Riancho, M. R., Franco, C. Q., Vallejos, G. G., & Mejía, B. J. (2004). Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería* 8-2, 155-163.
- Observatorio de salud ambiental. (2015). *Relleno sanitario Doña Juana*. Bogotá: Bogotá humana.
- Pérez Vázquez, R. G. (2011). *Efecto de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana*. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca", Departamento de Geología, Cuba.
- Pineda, S. I. (1998). Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Asociación Colombiana De Ingeniería Sanitaria Y Ambiental.
- Renou, S. e. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, 150(3), 468-93.
- Restrepo, M. d. (2016). *Transformación del hábitat en el área de influencia directa del Relleno Sanitario Doña Juana entre los años 1988-2012. Las poblaciones Mochuelo Bajo y Mochuelo Alto, como estudio piloto*. Universidad Nacional de Colombia, facultad de artes, Bogotá.
- Roger Bacon Drive Reston, V. (2007). *Informe de evaluación relleno sanitario Bogotá, Colombia*. scs engineers, Bogotá.
- Sanchez, A. M., & Castro, G. A. (2013). *Evaluación del comportamiento de la descarga de lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana en el río Tunjuelo*. Bogotá.
- SISPD, S. I. (2015). *Disposición final de residuos sólidos*. Informe Nacional, Bogotá.
- Steiner, M. W. (septiembre de 2008). *el libro de la basura*. una guía básica para la gestión de residuos, European Leonardo Da Vinci Project, Waste TRAINING., Madrid.

- Sun, P. &. (2012). *Selective Ion Penetration of Graphene Oxide Membranes*.
- Torres, P. e. (2005). *Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores*. Universidad del Norte, Ingeniería y desarrollo 18 de Julio de 2005 No 18. Barranquilla: Ediciones Uninorte.
- UAESP, U. A. (2013). *Informes de las Interventorias del Relleno Sanitario Doña Juana*. Bogotá.
- UAESP, U. A. (2014, 2015 y 2016). *informe mensual de supervision y control de disposición final*. Bogotá.
- UAESP, U. A. (2015). *Actualización Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Bogotá DC*. VERSIÓN No. 01, Bogotá.
- WEI. (2011). Engineered Graphite Oxide Materials for Application in Water Purification. *Aplied materials and Interfaces*(3), 1821.
- Zhao, J., Ren, W., & Cheng, H.-M. (2012). Graphene sponge for efficient and repeatable adsorption and desorption of water contaminations. *journal material chemistry*, 20197.

11. Anexos

**Anexo A.** Resolución 166 de 2008; norma de vertimientos sobre la fuente de uso público denominada Río Tunjuelo

PARAMETRO	EXPRESADO COMO	VALOR DE LA NORMA *
ALUMINIO	Al	5.0 mg/l
ARSENICO	As	0.1 mg/l
BERILIO	Be	0.1 mg/l
BORO	B	0.3 mg/l
CADMIO	Cd	0.01 mg/l
CINC	Zn	2.0 mg/l
COBALTO	Co	0.05 mg/l
COBRE	Cu	0.2 mg/l
CROMO TOTAL	Cr	0.1 mg/l
DBO <sub>5</sub>	O <sub>2</sub>	100 mg/l
GRASAS Y ACEITES	Fe	2.0 mg/l
HIERRO	Fe	5.0 mg/l
LITIO	Li	2.5 mg/l
MANGANESO	Mn	0.2 mg/l
MERCURIO	Hg	0.01 mg/l
MOLIBDENO	Mo	0.01 mg/l
NIQUEL	Ni	0.2 mg/l
PLOMO	Pb	0.1 mg/l
SELENIO	Se	0.02 mg/l
VANADIO	V	0.1 mg/l
PH		4.5 – 9.0 Unidades
FENOLES	Fenol	0.2 mg/l
DIFENIL POLICLORADOS	Agente Activo	ND mg/l
COMPUESTOS ORGANOCOLORADOS	Concentración del Agente Activo	0.05 mg/l

CAR – 2017

**Anexo B.** Ficha de seguridad del óxido de grafeno

## 1.- Identification of the substance/preparation and of the company

– Identification of the product:	Reduces Graphene oxide
– Chemical family:	Synthetic Graphite
– Product name:	Graphene Oxide Solution
– Use of the substance/preparation:	Experimental research
– Manufacturer/supplier identification:	Nanotechnology Laboratories S.A.S NanoTech Labs. <b>Cra. 14 N° 49-55 Apto. 301</b> Bogotá, D.C., Colombia Móvil 3143445586 E-mail. marodriguezp7@gmail.com

Fuente: Nano Tech Labs 2016.

## 2. HAZARD IDENTIFICATION

Emergency overview: this material may be an irritant to eyes, skin or respiratory tract.

Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS)

Physical hazard: Not applicable

Health hazard: Not applicable

Environment hazard: Not applicable

Label elements including precautionary statements

Symbol: Not applicable

Signal word: Not applicable

Hazard statements: Not applicable

Precautionary statements: Not applicable

NFPA Rating

Health: 0 Flammability: 0 Reactivity: 0 Water reactivity: 0

## 3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

Material: Graphene Oxide in Water solution.

CAS Registry No. 7732-18-5.

EINECS No. 231-791-2

Conc. Graphene oxide: 99.5 %

Water: 0.5 %

## 4. FIRST AID MEASURES

In case of eye contact

- Rinse thoroughly with plenty of water for at least 15 minutes and consult a physician.
- In case of skin contact  
Wash off with soap and plenty of water.
- If inhaled  
If not breathing, give artificial respiration.
- If swallowed  
Never give anything by mouth to an unconscious person.

- Rinse mouth with water.
- Other medical attention.
- Medical personnel should be aware of the protective measures of the substance.
- Potential health effect
- May be harmful if swallowed.

## **5. FIRE-FIGHTING MEASURES**

Flammable properties

Flash point: No flash occurred under 93 °C. (Tag closed cup)

Flash point: No flash occurred under 250 °C. (Cleveland open cup)

Auto ignition temperature: No spontaneous combustion under 500 °C.

Suitable extinguisher

Water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical, carbon dioxide

Specific hazards arising from the chemical

No data available

Special protective equipment for fire-fighters

Wear self-contained breathing apparatus for firefighting if necessary.

## **6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES**

Personal precautions

Avoid breathing mist.

Ensure adequate ventilation.

Environmental precautions

Don't dispose the product into drainages.

Methods and materials for containment and cleaning up

Keep in suitable, closed containers for disposal.

## **7. HANDLING AND STORAGE**

Precautions for safe handling

Prevent to spill.

Conditions for safe storage

Stable under general condition.

## **8. EXPOSURE CONTROL/PERSONAL PROTECTION**

Components with workplace control parameter

KOSHA: No data available

US OSHA: No data available

Appropriate engineering controls: No data available

Personal protective equipment

Respiratory protection: Dust mask

Hand protection: Protective gloves

Eye protection: Protective goggles

Skin and body protection: Working clothes

## **9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES**

State: Liquid at 20 °C.

Flash point

No flash occurred under 93 °C. (Tag closed cup)

No flash occurred under 250 °C. (Cleveland open cup)

Auto ignition temperature: No spontaneous combustion under 500 °C.

pH: 3.11 at 20 °C.

Boiling point (Initial): > 100 °C.

Viscosity: 1.3 mPa · s (cP) at 20 °C.

Density: 1.000 g/ml at 20 °C.

Water solubility: Soluble at 20 °C.

Explosive properties

No self-reaction hazard. UN TDG test & criteria - Test E3

Freezing range (Initial): No data available

Vapor pressure: No data available

Oxidizing properties: No data available

Decomposition temperature: No data available

Partition coefficient (n-octanol/water): No data available

Evaporation rate: No data available

Lower explosion limit: No data available

Upper explosion limit: No data available

## **10. STABILITY AND REACTIVITY**

Chemical stability

Stable under general condition.

Conditions to avoid

No data available

Materials to avoid

Substances which, in contact with water, emit flammable gases

Hazardous decomposition products

No data available

## **11. TOXICOLOGICAL INFORMATION**

Acute toxicity

Oral rat LD50: > 2,000 mg/kg from IUCLID / US NLM

Skin rabbit LD50: No data available

Inhalation rat LC50: No data available

Skin irritation: No data available

Eye irritation: No data available

Respiratory sensitization: No data available

Skin sensitization: No data available

Carcinogenicity: Not classifiable. From CCRIS / IARC / EC ESIS

Reproductive toxicity: No data available

Specific target organ toxicity -single exposure (GHS): No data available

Specific target organ toxicity -repeated exposure (GHS): No data available

Aspiration hazard: No data available

## **12. ECOLOGICAL INFORMATION**

Toxicity  
Fish LC50: > 100 mg/L 96  
H. From IUCLID/US NLM  
Crustacean EC50: No data available  
Algae EC50: No data available  
Persistence and degradability: No data available  
Bio accumulative potential: No data available  
Mobility in soil: No data available  
Other adverse effects: No data available

## **13. DISPOSAL CONSIDERATIONS**

Disposal consideration  
Observe all environmental regulations.  
Disposal precaution: No data available

## **14. TRANSPORT INFORMATION**

UN TDG: Not dangerous goods  
IMDG: Not dangerous goods  
IATA: Not dangerous goods  
Marine pollution: Not applicable  
Special precaution  
Fire EmS Guide (Recommendation): F-A  
Spillage EmS Guide (Recommendation): Not dangerous goods

## **15. REGULATORY INFORMATION**

Graphene Oxide in Water solution (CAS No. 7732-18-5) is not listed as a hazardous material under US Federal regulations. It is not listed under the Clean Air Act, the Clean Water Act, SARA (section 302, section 311/312, or section 313), HAPS, or IARC.  
Graphene Oxide in Water solution (CAS No. 7732-18-5) is listed on: US: TCSA, Canada: DSL EC: EINECS This product has WHMIS (Canada) classification D2A

## **OTHER INFORMATION**

This information is based on our present state of knowledge and our research into available scientific literature as well as information obtained from our vendors. NanoTech Labs., makes no responsibility regarding the accuracy of the scientific literature or any third-party information and, therefore, cannot guarantee any specific material properties.

**Anexo C.** Ficha de seguridad policloruro de aluminio PAC

	<b>PRODUCTOS QUÍMICOS PANAMERICANOS S.A.</b> <b>TARJETA DE EMERGENCIA DEL POLICLORURO DE ALUMINIO. ULTRAFLOC</b> <b>100, 200, 300 Y PAC006</b>		TE-CC-12 Versión 1 Abril de 2013 Pagina 1 de 2
	<b>1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y LA COMPAÑÍA.</b>		
<b>NOMBRE DEL PRODUCTO:</b> Policlорuro de aluminio en solución, Policlорuro de aluminio sólido.			
<b>NOMBRE COMERCIAL:</b> Ultrafloc100, ultrafloc200, ultrafloc300 y PAC006			
<b>FORMULA QUÍMICA:</b> $Al_2(OH)_m Cl_3-m$			
<b>CLASE:</b> 8. Corrosivo			
<b>NÚMERO UN:</b> 1760			
<b>NOMBRE DE LA COMPAÑÍA:</b> Productos Químicos Panamericanos S.A.			
<b>TELÉFONOS DE EMERGENCIA:</b>			
<b>PLANTA GIRARDOTA:</b> (04) 289 10 12	<b>PLANTA MUÑA:</b> (01) 719 87 32	<b>PLANTA NEIVA:</b> (08) 868 67 31	
<b>PLANTA TOCANCIPÁ:</b> (01) 857 43 66	<b>PLANTA SEVILLANA:</b> (01) 710 97 70		
<b>PLANTA JAMUNDÍ:</b> (02) 590 17 17	<b>PLANTA BARRANQUILLA:</b> (05) 368 67 13		
<i>Horario de atención plantas: 8:00am a 5:00pm</i> 01-8000-512620. Atención las 24 horas.			
<b>COLPATRIA:</b>	(01) 288 60 12 — 01-8000-916012. Atención las 24 horas.		
<b>CISPROQUIM:</b>			
<b>2. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS.</b>			
Tóxico. La inhalación, ingestión o contacto del material con la piel causa lesiones severas. Puede encender otros materiales. Su nivel de reactividad es alto en presencia de agentes catalizadores. En contacto con metales puede desprender hidrógeno gaseoso inflamable.			
<b>INHALACIÓN:</b>	Al ser inhalado causa irritaciones menores en la nariz, boca, garganta. Puede producir tos.		
<b>INGESTIÓN:</b>	Es poco tóxico vía oral pero produce irritaciones en el tracto respiratorio. En grandes cantidades puede producir irritación del tracto gastrointestinal, dolor abdominal, náuseas, vómito y diarrea.		
<b>CONTACTO CON LA PIEL:</b>	El contacto continuo con este producto causa irritaciones leves, enrojecimiento, picazón, dolor y quemaduras; de acuerdo al tiempo de exposición y la concentración del producto.		
<b>CONTACTO CON LOS OJOS:</b>	El contacto continuo con este producto puede causar irritación, enrojecimiento, inflamación y posibles quemaduras, de acuerdo al tiempo de exposición y la concentración del producto.		
<b>3. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL.</b>			
<b>CONTROLES DE INGENIERÍA</b>	Trabajar en un lugar con buena ventilación, respetar prohibiciones de no fumar, comer o beber algún tipo de bebida en el lugar de trabajo y mantener los envases bien cerrados con sus respectivas etiquetas de forma visible.		
<b>PROTECCIÓN PERSONAL:</b>	Utilizar el traje de protección completo: careta con filtro adecuado con aporte de aire limpio, gafas de seguridad con protección lateral, traje de neopreno cerrado con protección para la cabeza, guantes y botas de caucho, goma o neopreno. Cuando se maneja este producto se ha de tener especial cuidado por la ausencia de dolor inmediato a su contacto.		
			

Fuente: Relleno Sanitario Doña Juana, 2017

 <b>PRODUCTOS QUÍMICOS PANAMERICANOS S.A.</b> <b>TARJETA DE EMERGENCIA DEL POLICLORURO DE ALUMINIO. ULTRAFLOC</b> <b>100, 200, 300 Y PAC006</b>		TE-CC-12 Versión 1 Abril de 2013 Pagina 1 de 2
<b>1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y LA COMPAÑÍA.</b>		
NOMBRE DEL PRODUCTO:	Policloruro de aluminio en solución, Policloruro de aluminio sólido.	
NOMBRE COMERCIAL:	Ultrafloc100, ultrafloc200, ultrafloc300 y PAC006	
FORMULA QUÍMICA:	$Al_2(OH)_2Cl_6$	
CLASE:	8. Corrosivo 	
NÚMERO UN:	1760	
NOMBRE DE LA COMPAÑÍA:	Productos Químicos Panamericanos S.A.	
<b>TELÉFONOS DE EMERGENCIA:</b>		
PLANTA GIRAROTA: (04) 289 10 12	PLANTA MUÑA: (01) 719 87 32	PLANTA NEIVA: (08) 868 67 31
PLANTA TOCANCIPÁ: (01) 857 43 66	PLANTA SEVILLANA: (01) 710 97 70	
PLANTA JAMUNDÍ: (02) 590 17 17	PLANTA BARRANQUILLA: (05) 368 67 13	
<i>Horario de atención plantas: 8:00am a 5:00pm</i>		
COLPATRIA:	01-8000-512620. Atención las 24 horas.	
CISPROQUIM:	(01) 288 60 12 — 01-8000-916012. Atención las 24 horas.	
<b>2. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS.</b>		
Tóxico. La inhalación, ingestión o contacto del material con la piel causa lesiones severas. Puede encender otros materiales. Su nivel de reactividad es alto en presencia de agentes catalizadores. En contacto con metales puede desprender hidrógeno gaseoso inflamable.		
INHALACIÓN:	Al ser inhalado causa irritaciones menores en la nariz, boca, garganta. Puede producir tos.	
INGESTIÓN:	Es poco tóxico vía oral pero produce irritaciones en el tracto respiratorio. En grandes cantidades puede producir irritación del tracto gastrointestinal, dolor abdominal, náuseas, vómito y diarrea.	
CONTACTO CON LA PIEL:	El contacto continuo con este producto causa irritaciones leves, enrojecimiento, picazón, dolor y quemaduras; de acuerdo al tiempo de exposición y la concentración del producto.	
CONTACTO CON LOS OJOS:	El contacto continuo con este producto puede causar irritación, enrojecimiento, inflamación y posibles quemaduras, de acuerdo al tiempo de exposición y la concentración del producto.	
<b>3. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL.</b>		
CONTROLES DE INGENIERÍA	Trabajar en un lugar con buena ventilación, respetar prohibiciones de no fumar, comer o beber algún tipo de bebida en el lugar de trabajo y mantener los envases bien cerrados con sus respectivas etiquetas de forma visible.	
PROTECCIÓN PERSONAL:	Utilizar el traje de protección completo: careta con filtro adecuado con aporte de aire limpio, gafas de seguridad con protección lateral, traje de neopreno cerrado con protección para la cabeza, guantes y botas de caucho, goma o neopreno. Cuando se maneja este producto se ha de tener especial cuidado por la ausencia de dolor inmediato a su contacto.	
    		

Fuente: Relleno Sanitario Doña Juana, 2017

 <b>PRODUCTOS QUÍMICOS PANAMERICANOS S.A.</b> <b>TARJETA DE EMERGENCIA DEL POLICLORURO DE ALUMINIO. ULTRAFLOC</b> <b>100, 200, 300 Y PAC006</b>		TE-CC-12 Versión 1 Abril de 2013 Página 2 de 2
<b>4. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD.</b>		
<b>ESTABILIDAD:</b>	El producto es estable bajo condiciones normales de almacenamiento. Evite las temperaturas mayores a 40°C, a las cuales el producto comienza a ser inestable.	
<b>PRODUCTOS PELIGROSOS DE DESCOMPOSICIÓN: INCOMPATIBILIDADES:</b>	Cloruro de hidrógeno. Puede reaccionar con agua, con cinc y aluminio, produce gas hidrógeno, en contacto con soluciones de amoníaco, soda cáustica, hidróxido de potasio y cloruros puede generar calor y vapores tóxicos. En contacto con los metales despiden hidrógeno gaseoso inflamable.	
<b>5. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS.</b>		
<b>INHALACIÓN:</b>	Trasladar inmediatamente a la persona expuesta al aire fresco. Si el individuo presenta dificultad para respirar, suministrar oxígeno artificialmente (sólo por personal capacitado). Solicitar asistencia médica inmediatamente.	
<b>INGESTIÓN:</b>	Enjuagar la boca con agua corriente por mínimo 20 minutos. No suministrar ningún tipo de bebidas ni inducir el vómito. Solicitar asistencia médica inmediata.	
<b>CONTACTO CON LA PIEL:</b>	Lavar el área expuesta con abundante agua por mínimo 20 minutos. Remover la ropa y calzado contaminado y aislarlo. Evite esparcir el material sobre la piel que no está afectada. Solicitar asistencia médica.	
<b>CONTACTO CON LOS OJOS:</b>	Lavarse los ojos con agua por lo menos 20 minutos, buscando eliminar restos del producto, lentes de contacto u otros objetos extraños. Solicitar asistencia médica inmediatamente.	
<b>6. MEDIDAS PARA EXTINCIÓN DE INCENDIOS.</b>		
<b>RIESGO GENERAL:</b>	Este producto no es combustible, no enciende por sí mismo pero en caso de incendio en los alrededores puede formar productos de combustión como cloruro de hidrógeno. En contacto con los metales puede producir hidrógeno gaseoso inflamable.	
<b>MEDIOS DE EXTINCIÓN:</b>	Para incendios usar extintores de polvo químico seco, CO <sub>2</sub> , rocío de agua, espuma resisten al alcohol.	
<b>MEDIDAS PARA CUERPOS DE SOCORRO:</b>	No permanezca en el área y use el equipo de protección adecuado, que incluya traje de neopreno cerrado con protección para la cabeza, guantes y botas de caucho, goma o neopreno, gafas de seguridad con protección lateral y equipo de respiración autónomo.	
<b>7. MEDIDAS PARA FUGAS ACCIDENTALES.</b>		
<p>Para pequeñas fugas del producto, use el traje protector, eliminar todas las fuentes de ignición (no fumar, no usar bengalas, chispas o llamas en la zona de peligro), no tocar los contenedores dañados a no ser que se tenga el equipo pertinente, detenga la fuga en caso de poder hacerlo, absorber con tierra seca, arena u otro material absorbente no combustible y depositarlo en contenedores plásticos debidamente etiquetados para su posterior desecho. No introducir agua en los contenedores. <b>PARA ESTE PROCEDIMIENTO, USAR SIEMPRE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL QUE SE RELACIONAN EN EL NUMERAL 3.</b> Para derrames de cantidades mayores no intervenir directamente, alejarse de la zona a un lugar donde no tenga ningún tipo de contacto con el producto o sus vapores y comunicarse inmediatamente con los cuerpos de socorro de la zona, la empresa transportadora o los teléfonos de emergencias reportados en la sección 1.</p>		

Fuente: Relleno Sanitario Doña Juana, 2017

PRODUCTOS QUÍMICOS PANAMERICANOS S.A. HOJA DE SEGURIDAD DEL POLICLORURO DE ALUMINIO. ULTRAFLOC 100, 200, 300 Y PAC006		HS-CC-12 Versión 1 Marzo de 2013 Página 3 de 4.		
<b>9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.</b>				
APARIENCIA:	100	200	300	PAC006
TURBIDEZ:	Líquido	Líquido	Líquido	Sólido
DENSIDAD A 20°C (Kg/Lt)	50	50	50	N.A
SOLUBILIDAD EN AGUA:	1,030 +/- 0,02	1,19 +/- 0,02	1,33 +/- 0,02	N.A
	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble
<b>10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD.</b>				
ESTABILIDAD:	El producto es estable bajo condiciones normales de almacenamiento. Evite las temperaturas mayores a 40°C, a las cuales el producto comienza a ser inestable.			
PRODUCTOS PELIGROSOS DE DESCOMPOSICIÓN:	Cloruro de hidrógeno.			
INCOMPATIBILIDADES:	Puede reaccionar con agua, con cinc y aluminio, produce gas hidrógeno, en contacto con soluciones de amoníaco, soda cáustica, hidróxido de potasio y cloruros puede generar calor y vapores tóxicos. En contacto con los metales despiden hidrógeno gaseoso inflamable.			
<b>11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA.</b>				
Produce irritaciones y quemaduras en la piel, ojos y tracto respiratorio. No hay evidencia de efectos cancerígenos ni de posibles desórdenes reproductivos.				
La literatura reporta los siguientes valores de toxicidad media en ratas y conejillos:				
DL50 (ORAL, RATAS): 12700 mg/kg				
<b>12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA.</b>				
Posibles efectos ecotóxicos por desviación de pH en aguas, para esto se debe diluir en una proporción alta. No incorporar a suelos ni acuíferos.				
CL50 (Alga Marina) (72 h):	> 100 mg/L			
CL50 (Protozoa) (96 h):	12 mg/L			
CE50 (Daphnia magna) (48 h):	290 mg/L			
En general los cloruros suelen tener mala biodegradabilidad y permanecen durante años en el medio ambiente. Debido a su carácter hidrofóbico se acumula en las grasas especialmente en los últimos eslabones de la cadena alimenticia y puede provocar problemas de salud.				
<b>13. CONSIDERACIONES SOBRE LA DISPOSICIÓN DEL PRODUCTO.</b>				
Diluir con agua y luego eliminar en las aguas residuales o por el desagüe. En particular, los compuestos de bajo riesgo, se pueden diluir en agua en una proporción mínima de 1:20 u otra que sea necesaria, para luego eliminar en las aguas residuales o por el desagüe. Esta operación debe llevarse a cabo de forma cuidadosa usando todos los elementos de protección personal referenciados en el numeral 8.				
La disposición y eliminación debe realizarse de acuerdo con las disposiciones oficiales. Para los embalajes contaminados deben adoptarse las mismas medidas que para el producto contaminante.				
<b>14. INFORMACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE.</b>				
CLASE:	8			
PICTOGRAMA:	CORROSIVO			
NÚMERO UN:	1760			
GUIA EN LA GRE:	154			
GRUPO ENVASE/ EMBALAJE:	II y III			

Fuente: Relleno Sanitario Doña Juana, 2017

## Anexo D. Ficha de seguridad del polímero

HOJA DE SEGURIDAD		EXRO 653	
<b>1. IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y LA COMPANIA</b> NOMBRE DEL PRODUCTO: EXRO 653 USO: FLOCULANTE IDENTIFICACION FABRICANTE: EXRO LTDA. Cra. 25 No. 3984E Bogotá - Colombia Tel: 01 (1) 47 47 000 Fax: 01 (1) 52 59 199 FECHA DE ACTUALIZACION: JULIO DE 2008			
<b>2. COMPOSICION/INFORMACION SOBRE INGREDIENTES</b>			
COMPONENTES	LÍMITE DE EXPOSICION		
Polímero catiónico	TLV no establecido		
COMPONENTES RESIDUOS	Ninguno		
<b>3. IDENTIFICACION DE PELIGROS</b> RIESGOS PARA LA SALUD: El producto no ofrece riesgo en condiciones normales de manejo.			
<b>4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS</b>			
INHALACION:	Si se producen efectos, leve a la persona o una parte vendida.		
INGESTION:	Dar de beber agua. No inducir el vómito.		
<b>5. MEDIDAS EN CASO DE INCENDIO/EXPLOSION</b>			
PROCEDIMIENTOS ESPECIALES CONTRA INCENDIOS:	Clases extinguidoras de espuma, químico seco o CO <sub>2</sub> . Agua. No se requieren equipos especiales de protección.		
RIESGOS DE INCENDIO Y EXPLOSION:	No se requiere la información o susceptibilidad del material.		
PUNTO DE INFLAMACION:	No aplica		
PRESION DE VAPOR (mmHg):	No aplica		
TEMPERATURA DE AUTOIGNICION:	No aplica		
DESCOMPOSICION EN PRODUCTOS PELIGROSOS:	Se descompone por combustión formando CO <sub>2</sub> , óxidos de nitrógeno y otros de toxicidad.		
<b>6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL</b>			
METODO DE LIMPIEZA O CONTENCIÓN:	Las derrames de las soluciones del producto pueden formar espumas flotantes. No limpiar con agua. Contener el derrame. Absorber con material suelto. Si el derrame ha sido en grandes cantidades, recoger inmediatamente con paños o otro material y guardar en contenedores cerrados para su disposición final. Lavar de inmediato cualquier área con agua.		
PROCEDIMIENTO DE EVACUACION:	Mantenga al personal no necesario fuera del área.		
<b>7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO</b>			
TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO:	Ambiente a temperatura entre 0-30°C.		
PRECAUCIONES GENERALES:	Evitar el contacto con la piel y los ojos. Para proteger el producto, mantener que Para		
<b>8. CONTROLES DE EXPOSICION Y PROTECCION PERSONAL</b>			
EQUIPO DE PROTECCION:	No tiene, como a todo momento, tener con el producto, siempre se tienen después de trabajar con el producto.		
CAJON:	Lleve guantes de seguridad.		
PIEL:	Lleve guantes de caucho.		
RESPIRATORIA:	Alarma de fuga formada de vapores del producto en el sitio de trabajo, la ventilación natural es suficiente. En caso de ventilación insuficiente utilizar respirador para protección adicional.		
PERSONAL:	Usar mascarilla, guantes o material de caucho.		
<b>9. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS</b>			
APARENCIA:	Aspersion	Sólido granular	
	Color: blanco	Estado: Coherente	
	OP (mg/l/1%)	2.5 a 4	
	Solubilidad en agua:	Insol. 100%	
<b>10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD</b>			
ESTABILIDAD QUIMICA:	Estable.		
CONDICIONES A EVITAR:	Corrosión y altas temperaturas.		
INCOMPATIBILIDAD CON OTROS MATERIALES:	Agentes oxidantes.		
PRODUCTOS PELIGROSOS DE DESCOMPOSICION:	Ninguno.		
POLIMERIZACION:	No aplica.		
<b>11. INFORMACION TOXICOLOGICA</b>			
No se espera que sea tóxico por inhalación, o contacto con la piel. La toxicidad oral es leve en 20% a 5000 mg/kg.			
<b>12. INFORMACION ECOLOGICA</b>			
No se espera que haya bioacumulación del producto. El producto tiene una biodegradabilidad de 47% en 28 días. Los siguientes son algunos datos técnicos para especies acuáticas: -Toxicidad LC50 (96 h) = 100 mg/L.			
<b>13. COMBINACION DE EMISIONES</b>			
Para eliminar, almacenar o contener en estado del ambiente, debe tenerse en cuenta el efecto de las emisiones de los productos que se emiten al ambiente (considerar a la emisión ambiental correspondiente). En ningún caso debe haber emisión o vertido de productos al ambiente, terreno o cualquier masa de agua.			
<b>14. INFORMACION PARA TRANSPORTE</b>			
Número UN: No aplica. PELIGRO: No está clasificado como material peligroso para el transporte. CATEGORIA: No está clasificado como material peligroso para el transporte.			
<b>15. INFORMACION REGLAMENTARIA</b>			
Comisión de Pruebas: 6.7 Tiene el recipiente bien cerrado. 9.20 No causar ni beber durante la manipulación del producto.			
<b>16. OTRAS INFORMACIONES</b>			
El producto está formulado para ser utilizado preventivamente. Para el uso y disposición correcta del producto referirse a la información suministrada en las secciones 7, 8 y 13. La información debe considerarse un documento general sobre seguridad del producto y no debe ser un sustituto de las instrucciones suministradas con cada producto, puesto que en virtud de las variaciones en las condiciones de uso, manejo o almacenamiento, se pueden presentar riesgos de seguridad. La información de esta ficha es la responsabilidad del usuario.			

Fuente: Relleno Sanitario Doña Juana, 2017

## Anexo E. Entrevista con la ingeniera a cargo de la operación del Relleno Sanitario Doña Juana. En formato de audio CD