



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**PROPUESTA DE RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADO COMO PRÁCTICA PARA
DISMINUIR EL CAUDAL QUE ALIMENTA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
LIXIVIADO EN EL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA.**

PRESENTADO POR:

JOHAN MATEO ROA SÁNCHEZ – 506853

JOSÉ YESIT ARDILA RODRÍGUEZ - 507068

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ, COLOMBIA
16 DE NOVIEMBRE DE 2020**

**PROPUESTA DE RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADO COMO PRÁCTICA PARA
DISMINUIR EL CAUDAL QUE ALIMENTA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
LIXIVIADO EN EL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA.**

JOHAN MATEO ROA SÁNCHEZ – 506853
JOSÉ YESIT ARDILA RODRÍGUEZ – 507068

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

TUTOR DE TESIS:
FELIPE SANTAMARÍA ALZATE
INGENIERO

GRUPO DE INVESTIGACIÓN:
SEMILLERO ECOCIVIL

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ, COLOMBIA
2020**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Este trabajo lo quiero dedicar primero a mis dos hijas, quién son el motivo de seguir adelante, segundo, a mis padres, quienes, sin su apoyo en varias áreas de mi vida, esta meta difícilmente sería posible, y a todas aquellas personas como amigos y compañeros, quienes han aportado su granito para contribuir en mi meta.

José Yesit Ardila Rodríguez

Dedico de manera especial esta tesis a mi familia: papá, mamá y hermana; quienes con su apoyo durante estos 5 años han permitido que culmine la carrera profesional y pueda obtener el título de ingeniero civil.

A cada persona que aportó un grano de arena durante estos 5 años con sus conocimientos y experiencias.

Johan Mateo Roa Sánchez

AGRADECIMIENTOS.

Los autores expresan sus agradecimientos a:

En primer lugar, un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibido de familia, amigos y compañeros de trabajo.

Al Ingeniero Felipe Santamaría Alzate, por ser nuestro tutor de trabajo de grado, quien desde un principio se vio muy interesado por el proyecto y el trabajo de investigación a realizar. Con su conocimiento y experiencia influyó para poder realizarlo.

A las directivas y trabajadores del concesionario *CGR Doña Juana* e interventoría *Unión Temporal Inter DJ* que con su apoyo lograron hacer posible el trabajo de investigación dentro de las instalaciones del relleno sanitario de la manera más adecuada y completa.

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este trabajo de grado

Nota Aclaratoria: La información contenida en este documento solamente será autorizada y utilizada para fines académicos de la Universidad.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. GENERALIDADES	15
1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	15
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.3. MARCO DE REFERENCIA	20
1.3.1. Estado del arte.....	20
1.3.2. Marco teórico.....	21
1.3.3. Marco conceptual.....	22
1.4. OBJETIVOS.....	24
1.4.1. Objetivo General.....	24
1.4.2. Objetivos Específicos.....	24
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	25
1.6. METODOLOGÍA.....	26
1.6.1. Metodología teórica.....	26
1.6.2. Metodología práctica/experimental.....	28
1.6.3. Análisis de resultados.....	30
2. DESARROLLO DEL PROYECTO	31
2.1. DESARROLLO DE METODOLOGÍA.....	31
2.1.1. Definición de modelo a escala.....	31
2.1.2. Localización de modelo.....	31
2.1.3. Montaje experimental.....	33
2.1.4. Cantidad de lixiviado generado.....	39
2.1.5. Extracción de lixiviado.....	42
2.1.6. Recirculación de lixiviado.....	43
2.1.7. Tomas de muestra para laboratorio.....	45
2.1.8. Resultados de laboratorio.....	46
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
3.1. TEMPERATURA.....	50

3.2. PH.....	50
3.3. CONDUCTIVIDAD.....	51
3.4. ALCALINIDAD	52
3.5. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	53
3.6. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DQO)	54
3.7. ASENTAMIENTOS	55
3.8. VOLUMEN DE LIXIVIADO AL MOMENTO DE LA RECIRCULACIÓN.....	56
3.9. MANÓMETROS.....	58
3.10. COLOR.....	58
4. RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADO PARA DISMINUIR EL CAUDAL QUE LLEGA A LA PTL.....	60
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
5.1. CONCLUSIONES.....	65
5.2. RECOMENDACIONES.....	66
6. BIBLIOGRAFÍA.....	67

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1 Metodología teórica	28
Figura 1-2 Metodología práctica/experimental	29
Figura 1-3 Análisis de resultados	30
Figura 2-1 Localización general del Relleno Sanitario Doña Juana	32
Figura 2-2 Localización de los modelos dentro del Relleno Sanitario Doña Juana	32
Figura 2-3 Distancia de tanques hasta zona de disposición	33
Figura 2-4 Adecuación de modelos a escala	34
Figura 2-5 Pesaje de camioneta con tanque No.1 vacío	34
Figura 2-6 Llenado de tanque No. 1 con ayuda de retroexcavadora	35
Figura 2-7 Compactación manual del tanque No. 1	35
Figura 2-8 Pesaje de camioneta con tanque No. 1 lleno	36
Figura 2-9 Pesaje de camioneta con tanque No. 2 vacío	37
Figura 2-10 Extracción de residuos antiguos para el tanque No. 2.....	37
Figura 2-11 Compactación manual del tanque No. 2.....	38
Figura 2-12 Pesaje de camioneta con tanque No. 2 vacío	38
Figura 2-13 Extracción de lixiviados de la red de conducción de Optimización Fase II.....	43
Figura 2-14 Extracción de lixiviado en tanques (izquierda) y control de volumen recirculado (derecha).....	44
Figura 2-15 Recirculación manual sobre residuos	44
Figura 2-16 Toma de muestras para laboratorio.....	45
Figura 2-17 Primera muestra a tanque No. 1	47
Figura 2-18 Segunda muestra a tanque No. 1	47
Figura 2-19 Primera muestra a tanque No. 2.....	48
Figura 2-20 Segunda muestra a tanque No. 2.....	48
Figura 3-1 Asentamientos presentados en el tanque No. 1	56
Figura 3-2 Asentamientos presentados en el tanque No. 2	56
Figura 3-3 Color del lixiviado en la muestra 3	58
Figura 4-1 Dimensión de celda de disposición con cobertura en arcilla	62

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1 Parámetros de calidad de la Res. 0827 de 2015	17
Tabla 2-1 Pesaje en básculas.....	39
Tabla 2-2 Cálculo de peso por material	39
Tabla 2-3 Humedad total de residuos	40
Tabla 2-4 Dimensiones del tanque	40
Tabla 2-5 Cálculo del peso específico de los residuos	40
Tabla 2-6 Relación de los métodos y parámetros tomados por laboratorio	45
Tabla 2-7 Resumen de resultados para el Tanque No. 1	49
Tabla 2-8 Resumen de resultados para el Tanque No. 2	49
Tabla 3-1 Resultados de muestras para punto antes de la PTL	50
Tabla 3-2 Volumen tomado para recircular en el tanque No. 1.....	57
Tabla 3-3 Volumen tomado para recircular en el tanque No. 2.....	57
Tabla 4-1 Datos históricos de estación meteorológica desde el 2010	60
Tabla 4-2 Humedad total de residuos en RSDJ.....	61
Tabla 4-3 Dimensiones de celda diaria en el RSDJ.....	61

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 3-1 pH vs. Tiempo	51
Gráfica 3-2 Conductividad vs. Tiempo	52
Gráfica 3-3 Alcalinidad vs. Tiempo	53
Gráfica 3-4 DQO vs. Tiempo.....	54
Gráfica 3-5 DBO vs. Tiempo	55
Gráfica 3-6 Volumen recirculación vs. Tiempo.....	58

RESUMEN.

Los lixiviados son el resultado de la filtración de las aguas dentro de los residuos acumulados, lo que permite que el agua arrastre las partículas descompuestas llenándose de distintos tipos de agentes contaminantes. Estos residuos líquidos son encausados por canales o tuberías para ser dirigidas a una planta de tratamiento, donde son tratadas por métodos fisicoquímicos y luego se vierten a cuerpos de agua naturales; este es el caso del relleno sanitario Doña Juana en Bogotá, quienes utilizan una metodología similar para el manejo de los lixiviados, actualmente el aumento de población en la capital colombiana ha incrementado la cantidad de residuos y por lo cual, el incremento también se refleja en la disposición diaria y en la cantidad de lixiviado que se genera, por lo que dificulta la efectividad de la planta de tratamiento de lixiviados.

En el presente trabajo se quiere proponer el desarrollo de la investigación acerca de la recirculación de lixiviado y con ello las ventajas que puede traer para disminuir el caudal que ingresa a la planta de tratamiento y analizar la posible disminución de agentes contaminantes dentro del lixiviado, generando así una estabilización mayor en la disposición de los residuos sólidos y aumentando la velocidad de descomposición y el asentamiento diferencial de los desechos. Basándose de la construcción de celdas a escala y tomando residuos reales que se disponen en el relleno sanitario Doña Juana.

INTRODUCCIÓN.

En la antigüedad las basuras generadas por la comunidad eran de materiales naturales, lo que permitía una rápida descomposición y adaptación con el ambiente a la hora de desecharse, con la aparición de materiales más duraderos como el plástico y metalúrgicos, las basuras fueron tomando un enfoque ambiental ya que se empezó a disponer de varias formas, una de ellas fue la incineración de los residuos pero debido a la gran contaminación que provoca a la atmósfera, es una de las maneras poco adecuadas de disponer los residuos sólidos, otra de las maneras conocidas pero muy poco utilizadas es la del aprovechamiento para la creación de compostaje, esta es una de las maneras más adecuadas de tratar los residuos sólidos pero poco efectivas para materiales inorgánicos, lo que la hace ineficiente con los desechos urbanos, mientras el método más usado es la recolección de las basuras y disposición en sitios clandestinos, pero sin ningún tipo de control o reglamentación lo cual generó con el tiempo malestar alrededor de los sitios donde se disponían, desde olores, vectores, paisajes antiestéticos, contaminación en los suelos, y esto se debía a la generación de lixiviados generados por la descomposición de las basuras y la filtración de las aguas lluvias (Jesús García Barcala, 2014).

Los lixiviados es el resultado de la filtración de las aguas dentro de los residuos acumulados, lo que permite que el agua arrastre las partículas descompuestas y llenándose de distintos tipos de agentes contaminantes, estos residuos líquidos son encausados por canales o tuberías para ser dirigidas a una planta de tratamiento, donde son tratadas por métodos fisicoquímicos y luego se vierten a cuerpos de agua naturales; este es el caso del relleno sanitario Doña Juana en Bogotá, quienes utilizan una metodología similar para el manejo de los lixiviados, actualmente el aumento de población en la capital colombiana ha incrementado la cantidad de residuos y por lo cual el incremento también se refleja en la disposición diaria y en la cantidad de lixiviado que se genera, por lo que dificulta la efectividad de la planta de tratamiento de lixiviados.

En el presente trabajo se quiere proponer el desarrollo de la investigación acerca de la recirculación de lixiviado y con ello las ventajas que puede traer para disminuir el caudal que ingresa a la planta de tratamiento y analizar la posible disminución de agentes contaminantes dentro del lixiviado, generando así una estabilización mayor en la disposición de los residuos sólidos y aumentando la velocidad de descomposición y el asentamiento diferencial de los desechos, basándose de la construcción de celdas a escala y tomando residuos reales que se disponen en el relleno sanitario doña Juana, para esta metodología se utilizarán residuos jóvenes

o nuevos y residuos de una parte ya cerrada, es decir, antiguos, para analizar el comportamiento estos.

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Doña Juana es el principal vertedero de residuos de Bogotá y uno de los más grandes en Latinoamérica, ubicado al sur de la ciudad en la localidad de ciudad bolívar, entre los sectores de Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo. Forma parte de la subcuenta correspondiente a la quebrada Yerbabuena: el sitio se encuentra entre los 2,715 y 2,800 metros sobre el nivel del mar.

Bogotá, Distrito capital de la República de Colombia, como muchas otras, a menudo presenta problemas con la organización del sistema de recolección, transporte y disposición final de sus residuos sólidos (Collazos, 1998).

El vertedero Doña Juana inició operaciones el 01 de noviembre de 1988 tras una pequeña crisis sanitaria en Bogotá por la acumulación de residuos tras el cierre de los antiguos botaderos de Gibraltar y Cortijo. Actualmente, cubre un área de 623 hectáreas en total, recibe residuos de Bogotá D.C. y los municipios de Cáqueza, Choachí, Chipaque, Fosca y Gutiérrez, Ubaque; en promedio recibe 6,368 ton/día, es decir, aproximadamente 194,000 ton/mes lo que equivalen a 20,899 viajes mensuales de camiones recolectores de basura (UAESP, 2020).

En septiembre del año 1997, un derrumbe masivo de 800,000 toneladas de residuos sólidos provocó uno de los mayores fracasos en la historia de rellenos sanitarios (o vertederos). En su momento, el relleno sanitario contaba con dos áreas principales para la disposición de residuos sólidos, Zona I y Zona II. Zona I era la más antigua, donde se depositaron residuos desde 1989 hasta 1995; la Zona II, era un área nueva, donde los residuos se depositaron desde 1995 hasta el deslizamiento de basura.

Antes del derrumbe se avistaron grandes cantidades de lixiviado sobre la masa de residuos, por lo que el deslizamiento fluyó por la ladera como un líquido viscoso indicando la saturación total del material. Durante este tiempo la recirculación de lixiviados se estaba probando como medio para su tratamiento, lo que provocó que se le atribuyera el derrumbe a esta práctica. (Caicedo et al., 2002; Collazos, 1998; Jiménez, 2007).

La planta de tratamiento de lixiviados (PTL) opera en conjunto con todas las unidades de operación del relleno sanitario. Las condiciones de calidad y cantidad de lixiviado para la que fue diseñada han variado significativamente en lo correspondiente a cantidad (caudal) ha de pasar de los 8 L/s a unos 15 L/s. Sin embargo, el relleno sanitario Doña Juana produce alrededor de 25 L/s

(NoticiasUnoColombia, 2017), caudal que es controlado mediante lagunas de oxidación (pondajes) que permiten un almacenamiento y un proceso aeróbico antes de llegar a la planta, pese a esto, en muchas ocasiones la PTL no da abasto con el lixiviado por el relleno, además, de que no cumple con algunos parámetros de cumplimiento obligatorio establecidos por la norma de vertimiento.

La investigación se originó por la necesidad de demostrar en la práctica, las ventajas del proceso de la recirculación de lixiviado que se han podido concluir en anteriores estudios. Evidenciando cómo esta puede presentar una flexibilidad a la hora de manejar grandes volúmenes de lixiviado y la disminución de la carga contaminante de este mismo (Bilgili et al., 2007; Díaz Aliaga & Reyes Huanchaco, 2006; Francois et al., 2007; Hernández-Berriel et al., 2014; Palma H. et al., 2000; Reinhart, 1996; Reinhart & Al-Yousfi, 1996; Šan & Onay, 2001; Schiappacasse et al., 2008).

1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El relleno sanitario Doña Juana presenta fallas que han afectado la salud de los habitantes de la zona. Además, genera alertas ambientales ya sea por presencia de vectores (roedores y moscas) en las comunidades cercanas o por el vertimiento del lixiviado tratado, que no cumple con la norma que lo rige.

Es importante destacar que CGR Doña Juana (actual consorcio que opera el relleno sanitario Doña Juana) a partir del mes de enero de 2018 realiza los análisis de calidad de vertimiento con las normas vigentes, como lo son: la resolución 166/2008 de la CAR, la resolución 631/2015 del MADS y la resolución 3956/2009 de SDA (UAESP, 2019). Cabe aclarar que por medio de la resolución No. 0827 del 29 de abril de 2015, *“Por la cual se declara no viable un permiso de vertimientos para la descarga de lixiviados generados en el Relleno Sanitario Doña Juana, se declara no viable la autorización de ocupación de cauce, se modifica una norma de vertimiento, se exige un plan de cumplimiento y se adopta otras determinaciones”*, se presenta una norma definitiva de vertimientos (ver Tabla 1-1) que se debe cumplir en la descarga de aguas residuales tratadas del relleno sanitario Doña Juana al río Tunjuelo, presentando los siguientes parámetros de calidad establecidos para su cumplimiento:

Tabla 1-1 Parámetros de calidad de la Res. 0827 de 2015

RESOLUCIÓN 0827 de 2015		
Parámetro	Unidad de Medida	Valor máximo permisible
Parámetros Físicos		
Temperatura	°C	20
Parámetros Químicos		
pH	Un	6.5 - 8.5
Grasas y Aceites	mg/L	10
DBO	mg/L	100
DQO	mg/L	800
Sólidos suspendidos Totales	mg/L	250
Sólidos Sedimentables	mg/L	2
Nitrógeno Total	mg/L	40
Fósforo Total	mg/L	8
Fenoles	mg/L	0.15
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	1
Hidrocarburos Totales	mg/L	10

Continuación de la Tabla 1-1:

Aluminio	mg/L	1.5
Arsénico	mg/L	0.05
Bario	mg/L	5
Berilio	mg/L	0.1
Boro	mg/L	4
Cadmio	mg/L	0.01
Cianuro (CN-)	mg/L	1
Zinc	mg/L	0.2
Cobalto	mg/L	0.05
Cobre	mg/L	0.025
Cromo total	mg/L	0.02
Cromo +6	mg/L	0.5
Hierro	mg/L	8
Litio	mg/L	1
Manganeso	mg/L	0.1
Mercurio	mg/L	0.02
Molibdeno	mg/L	0.02
Níquel	mg/L	0.02
Plata	mg/L	0.5
Plomo	mg/L	0.03
Selenio	mg/L	0.03
Vanadio	mg/L	0.1
Sulfatos	mg/L	400
Difeniles policlorados	mg/L	Concentración de agente activo No detectable
Parámetros Microbiológicos		
Coliformes Fecales	NMP/100ml	5.0 E+05
Parámetros Hidrobiológicos		
Caudal	L/s	20

Fuente: (CAR, 2015)

Según el informe correspondiente al primer semestre (enero a junio) del año 2019 el tratamiento de lixiviados tuvo un promedio de aproximadamente 64.81% de los parámetros mínimos cumplidos de las exigencias normativas¹ de la autoridad ambiental.

Se evidencia en los indicadores de operación para el tratamiento de lixiviados que se incumplen en los indicadores de carga orgánica trata en los reactores biológicos respecto a la carga de diseño, la remoción de DBO total, la remoción de DBO PTL, entre otros (UAESP, 2019).

¹ Resolución CAR 166 de 2008, Resolución SDA 3956 de 2009 y Resolución MADS 631 de 2015.

Actualmente el relleno sanitario Doña Juana para cumplir con la norma de calidad de vertimiento tiene como proyecto modernizar el tratamiento de lixiviados con plantas de osmosis inversa, proyecta hacer uso de 6 plantas ya instaladas al año 2020 (UAESP, 2020).

Sin embargo, debido al alto costo operacional y de mantenimiento que presenta esta última tecnología, la investigación de este proyecto tiene como fin proponer la práctica de recirculación de lixiviado para el manejo flexible de los grandes volúmenes (caudales) que se presenta el relleno y la disminución de carga contaminante con la que llega el lixiviado a la planta de tratamiento.

El problema responde a las siguientes interrogantes: ¿En qué medida favorece la práctica de recirculación para el manejo de lixiviados dentro de un relleno sanitario y la disminución de la carga contaminante de este?

1.3. MARCO DE REFERENCIA

1.3.1. Estado del arte.

En la actualidad la recirculación de lixiviado es una técnica no muy común a la hora de utilizarse en la mayoría de los rellenos sanitarios, uno de los planteamientos más fuertes que se opone a la recirculación, es la manipulación del lixiviado ya que lo vuelve un riesgo total para la salud del operador, en Colombia debido al derrumbe generado en 1997 en el relleno sanitario doña Juana, hecho que hizo perder el reconocimiento en la técnica de recirculación del lixiviado.

La recirculación ha sido utilizada para realizar algunos estudios, como el realizado en 2007 por la universidad de los Andes de Colombia para desmentir que la recirculación del lixiviado fue la causante del derrumbe en 1997, si no que hubo otras variables importantes para que dichas circunstancias se desataran, este trabajo realizado por la ingeniera Camila Jiménez Sáenz permite concluir que la recirculación no es causante de la desestabilidad de la zona, sino que se presentó por una inadecuada de la recirculación, sumado a alta presencia de gas por la descomposición de las basuras, las cuales no tenían los suficientes filtros verticales para su salida a la superficie (Jiménez, 2007).

Otro de los estudios realizado con la recirculación es el aumento del diferencial de asentamiento, trabajo llevado a cabo por la universidad Católica de Valparaíso Chile en 1997, apoyándose de dos modelos a escala de una celda llena de residuos, donde a una de ellas se le aplica la recirculación y a otra no, dando como resultado un asentamiento por más del doble de diferencia entre el modelo de recirculación y el modelo de no recirculación, concluyendo la aceleración de degradación de las basuras en una celda, debido a la recirculación. Los directores de esta investigación 11 años más tarde en 2008, publicaron un artículo con el estudio de la comparación de la degradación de la basura sólida entre la recirculación del lixiviado común y la recirculación del lixiviado tratado anaeróticamente, lo cual concluye que la recirculación de lixiviado tratado genera un mayor asentamiento frente a la recirculación no tratada (R. Espinace A., J. Palma G. & M. C. Schiappacasse D., 1997).

La universidad de Michoacana de San Nicolas de Hidalgo en México, publicó en la revista Internacional de Contaminación Ambiental en 2013, acerca de los cambios físicos y químicos de los residuos sólidos por medio de la recirculación de lixiviado, utilizando distintos volúmenes de concentración, llegando a concluir las propiedades fisicoquímicas se ven bastante alteradas con la presencia o ausencia de humedad, lo cual también se ve afectado el PH de los residuos por la descomposición anaeróbica (Mendoza et al., 2013).

La universidad Central Marta Abreu de Las Villas de Cuba, bajo la dirección de los ingenieros María López Vega y Ronaldo Santos Herrero, realizaron un biodigestor a escala para el análisis de PH, conductividad y DQO (demanda química de oxígeno) del lixiviado al ser recirculado, concluyendo que genera efectos positivos sobre la estabilización de residuos sólidos en cortos periodos de tiempo (López & Santos, 2017).

La recirculación de lixiviado es practicada actualmente para el desarrollo de investigaciones en modelos a escala de celdas, para simular comportamiento de los residuos sólidos, gases, estabilidad, propiedades químicas y físicas, pero se desconoce la utilización de esta técnica en rellenos sanitarios reales, ya que los lixiviados son dirigidos a las plantas de tratamiento antes de ser descargados a las vertientes natural.

1.3.2. Marco teórico.

Se han desarrollado varios trabajos los cuales utilizan la metodología de la recirculación de lixiviado, para sustentar las ventajas que se obtienen después de ser aplicada en los residuos sólidos urbanos.

La carga contaminante generada por los lixiviados es de gran impacto sobre el cuerpo de agua del Tunjuelito, aun después de ser tratados por la planta, y el caudal antes y después del punto donde son vertidas las aguas tratadas por la planta del relleno sanitario Doña Juana son diferenciales, lo que no la hace insuficiente para evitar la contaminación sobre este importante cuerpo de agua (Montenegro, 2013).

La recirculación parece limitar el riesgo de contaminación a largo plazo lo cual mejora la calidad de lixiviado, aumentando al mismo tiempo la producción de biogás. Para lo cual se recomienda tener en cuenta la cantidad de lixiviado recirculado en la aplicación (Francois et al., 2007).

- **Descomposición anaerobia.**

Se presenta por humedad en los residuos superiores al 60% y la ausencia del oxígeno, con temperaturas entre los 85 a 125 °F, con pH entre los 5.0 a 9.0 siendo normalmente entre 6.7 y 7.2; Este tipo de descomposición presenta dos etapas, la primera llamada “No metánica, la cual se identifica por tener pH bajos y producción de ácido, con iniciación de la descomposición”; y la segunda llamada “Metagónica, es identificada por la producción de metano, dióxido de carbono y en algunos casos hidrógeno sulfúrico, por el mal olor; La descomposición anaeróbica es más lenta que la descomposición aeróbica, por lo que estos residuos tardaran años en desaparecer completamente (Garrido et al., 1980).

- **Manejo y procedimiento de lixiviados del RSDJ.**

El relleno sanitario Doña Juana, cuenta con una red de filtros los cuales se encargan de drenar y dirigir el exceso de lixiviado desde el momento que los residuos son dispuestos, apoyados con tuberías de polietileno alta densidad (PEAD) dan forma a una amplia conexión que sirven para dirigir hacia las canales cerrados de concreto que se encuentran construidas paralelamente a lo largo de la vía principal, estos canales dirige el caudal de los lixiviados recolectados de varias zonas, que pueden estar aún en proceso de disposición o cerradas, a unos pondajes los cuales están recubiertos por membranas impermeabilizantes, donde cumplen la finalidad de sedimentación natural y control de caudal antes de llegar a la planta de tratamiento, los lodos generados por los lixiviados, son llevados a una celda especial antes de ingresar a la planta de tratamiento, el ingreso de los lixiviados a la planta de tratamiento se hace bajo un caudal controlado, donde ya estando dentro de la planta los lixiviados reciben un tratamiento biológico (que trata de zanjones de oxidación) y físico químico (el cual actúa por osmosis inversa), todo esto con el fin de cumplir y aliviar la descontaminación de las aguas vertidas al río Tunjuelo (UAESP, 2020).

- **Correcta recirculación de lixiviado.**

Para la correcta recirculación de lixiviado se debe tener un sistema semicerrado, debido a las grandes precipitaciones que se presentan en el sector donde se encuentra ubicado el relleno sanitario Doña Juana en época de invierno, es importante garantizar una humedad óptima dentro de los residuos dispuestos, para evitar saturación y así manejar un mejor asentamiento y compactación, para los sitios que aún se encuentran en proceso de disposición y para lugares ya cerrados de la disposición.

1.3.3. Marco conceptual.

Un relleno sanitario es: “es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos² en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados³, y cobertura final” (Decreto 0838 de 2005, 2005, Chapter I).

La operación del relleno sanitario Doña Juana inicia con el ingreso de los camiones recolectores de basura, que después de su debido pesaje realizan un recorrido de

² **Residuo sólido:** cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien, que el generador abandona, rechaza o entrega. (Decreto 0838 de 2005, 2005)

³ **Lixiviado:** líquido residual generado por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable. (Decreto 0838 de 2005, 2005)

aproximadamente 4 kilómetros hasta el frente de disposición⁴. Estando en este frente, el camión es ubicado en un sitio específico de descargue donde deposita los residuos, inmediatamente llega la maquinaria de empuje y arrastre (bulldozer) que esparce y distribuye los residuos, seguidamente, la maquinaria compacta y homogeniza la basura para reducir volumen y disminuir espacio de ocupación. Posteriormente de la descarga el vehículo nuevamente es pesado para hallar la cantidad de residuos descargados.

Paralelamente dentro del relleno, se realizan actividades como lo son: conformación de vías, realce y corrección de chimeneas, conducción de lixiviados, cobertura diaria⁵ y final⁶, entre otras.

Los residuos sólidos debido a su componente orgánico, inician una descomposición biológica bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación genera el lixiviado, además, debido a la poca disgregación de basuras que arriban al relleno, estos contienen componentes metálicos.

Durante este proceso de fermentación de residuos sólidos, además de las reacciones químicas entre ellos, se genera el biogás que principalmente está constituido por gas metano y dióxido de carbono, también se compone de nitrógeno, hidrógeno y otros elementos.

⁴ **Frente de disposición:** lugar dentro del relleno destinado para los procesos de descargue, compactación y cobertura de los residuos sólidos entregados para disposición final. (Decreto 0838 de 2005, 2005)

⁵ **Cobertura diaria:** capa de material natural y/o sintético con que se cubren los residuos depositados en el relleno sanitario durante un día de operación. (Decreto 0838 de 2005, 2005)

⁶ **Cobertura final:** revestimiento de material natural y/o sintético que confina el total de las capas que consta un relleno sanitario, para facilitar el drenaje superficial, interceptar las aguas filtrantes y soportar la vegetación superficial. (Decreto 0838 de 2005, 2005)

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General.

- Proponer la recirculación de lixiviado para disminuir el caudal tratado en la planta de tratamiento de lixiviados (PTL) en el relleno sanitario Doña Juana.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Realizar un modelo a escala con lisímetro, que simule el comportamiento de una celda tipo de disposición del relleno sanitario Doña Juana.
- Analizar el efecto de la recirculación de lixiviados en residuos sólidos urbanos (RSU) de zonas operativas y zonas cerradas del relleno sanitario Doña Juana.
- Caracterizar la calidad del lixiviado después de la recirculación.

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

Se presenta un documento final donde se expondrán la investigación y la propuesta de la recirculación de lixiviados dentro del relleno sanitario Doña Juana, donde el principal objetivo, meta y alcance es plantear la recirculación como una práctica viable para manejar de manera flexible los grandes volúmenes de lixiviado tratado en el relleno, además, de disminuir su carga contaminante.

El desarrollo del proyecto se realiza durante el año 2020 en las instalaciones del relleno sanitario, debido a las problemáticas ambientales y los riesgos para la salud que puede conllevar la realización de este dentro de las instalaciones de la universidad.

Dentro de las limitaciones se encuentran:

- El proyecto se limita solo a identificar los beneficios de la práctica de la recirculación de lixiviados con los residuos sólidos provenientes de Bogotá, por consiguiente, se enfoca directamente en el relleno sanitario Doña Juana y la operación de su actual planta de tratamiento de lixiviados (PTL).
- No se realizó un cuarteo o clasificación de los residuos sólidos, puesto que estos se tomaron directamente in-situ de una zona operacional y una zona cerrada con el debido consentimiento del consorcio que opera el relleno. Sin embargo, si se cuenta con la caracterización de los residuos de las zonas donde se tomaron dichos residuos.
- Los análisis y comparaciones se limitaron a realizarse con los datos proporcionados por el consorcio, o los extraídos de informes por interventoría o de entidades públicas tales como: unidad administrativa especial de servicios público (UAESP) o la superintendencia de servicios públicos domiciliarios (superservicios).

1.6. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación: “*propuesta de recirculación de lixiviado como práctica para disminuir el caudal tratado en la planta de tratamiento de lixiviado en el relleno sanitario Doña Juana*”, por su modalidad corresponde a un proyecto encaminado a resolver el eje temático de la problemática presentado anteriormente, a través de la toma y análisis de datos presentados en un modelo a escala donde se pueda simular correctamente la recirculación del lixiviado generado.

Por los objetivos de la investigación, la metodología (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) contemplará tres etapas: una teórica, una práctica y/o experimental y finalmente un análisis de resultados; además, se encuentra encaminada en brindar unos resultados coherentes a la investigación planteada y presentar los menos errores e inconvenientes posibles.

1.6.1. Metodología teórica.

1.6.1.1. Definición de modelo a escala.

Para la metodología teórica (ver Figura 1-1), como primera instancia se encuentra la definición de un modelo a escala que pueda simular cada una de las características que puede tener una celda de disposición de residuos sólidos en un relleno sanitario, dentro de estas características se puede encontrar la impermeabilización, el drenaje y evacuación de lixiviados producidos, salida de gases producidos dentro del modelo, tener la capacidad de colocar una cobertura de arcilla para evitar la propagación de vectores, entre otros.

Para la definición del modelo a escala se pueden contemplar dos alternativas de distintos materiales y dimensiones, pero, con misma funcionalidad. La primera alternativa, es el diseño de una estructura en mampostería, recubierta con pintura epóxica para la impermeabilización, además, se realiza la recirculación manualmente (Díaz Aliaga & Reyes Huanchaco, 2006, Chapter IV)

La segunda alternativa es el uso de un lisímetro modelo realizado en fibra de vidrio, es de fácil desmonte por lo que facilita su manejo y traslado, además, simula correctamente las características de una celda de disposición de residuos (Francois et al., 2007; Ledakowicz & Kaczorek, 2004; Medina A., 2006; R. Espinace A., J. Palma G. & M. C. Schiappacasse D., 1997; Šan & Onay, 2001; Schiappacasse et al., 2008; Suna Erses & Onay, 2003)

1.6.1.2. Diseño de modelo a escala.

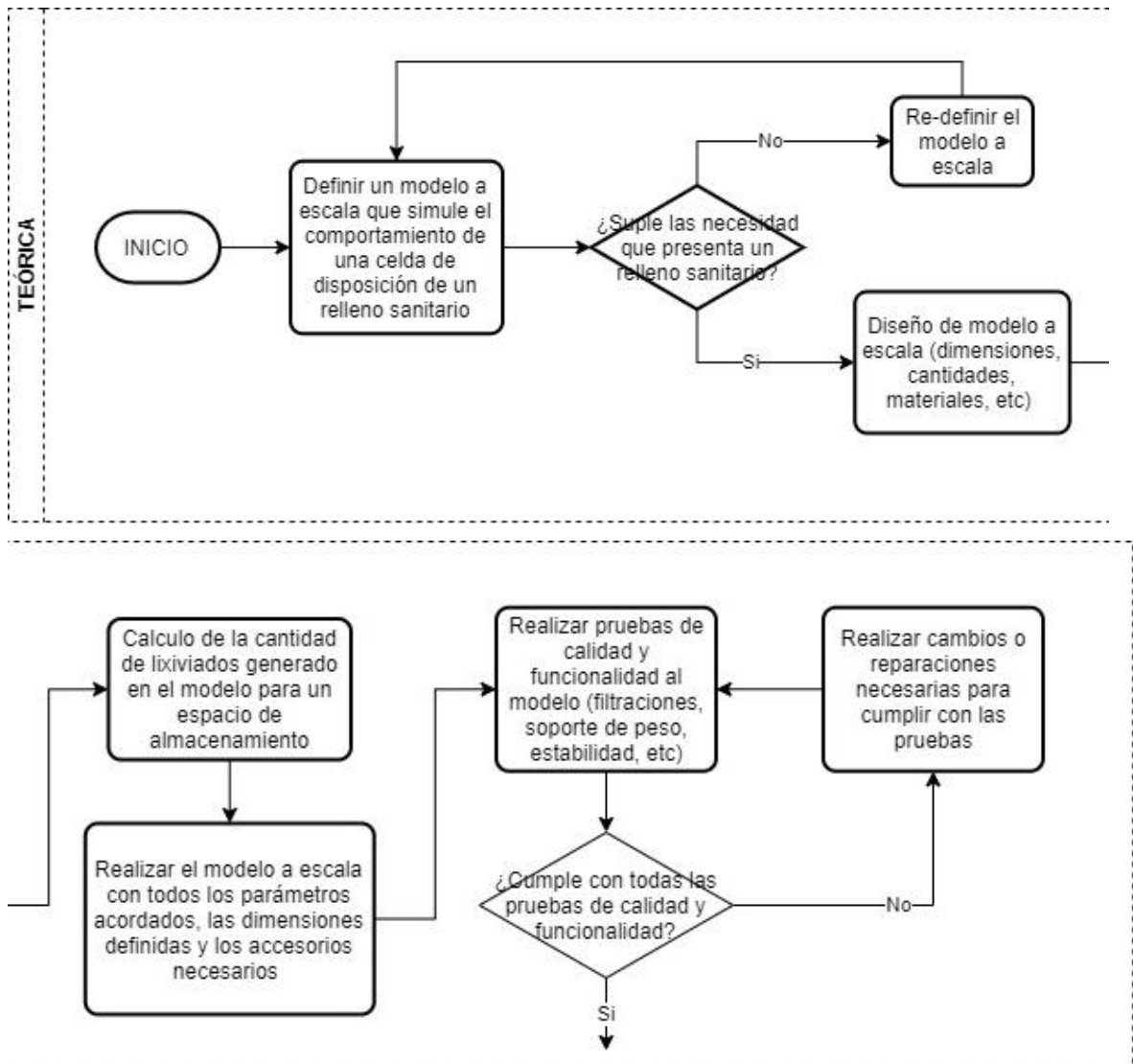
Se contempla el diseño de dos lisímetros modelos, que permitan el almacenamiento de 1 m³ de residuos directamente extraídos del relleno sanitario Doña Juana. Este modelo debe ser completamente funcional, sin presencia de filtraciones, estable, capaz de soportar el peso de la basura, entre otras pruebas.

1.6.1.3. Cantidad de lixiviado generado.

Estimar la cantidad de lixiviados que generarán los residuos es de suma importancia para la investigación, con esta cantidad se pueden implementar métodos de recirculación efectivos, además, de tener un conocimiento del % de lixiviado que se puede recircular, su frecuencia, entre otros datos.

Esta cantidad se puede estimar por el método *corenostos*, utilizado en (Díaz & Vallejo, 2017). Cabe aclarar que existen factores que intervienen en la producción de lixiviados, tales como: el agua disponible, las características de la cubierta de los residuos, características del tipo de residuos, la impermeabilización empleada, entre otros. (Díaz Aliaga & Reyes Huanchaco, 2006)

Figura 1-1 Metodología teórica



Fuente: Elaboración propia

1.6.2. Metodología práctica/experimental.

Para la metodología práctica/experimental (ver Figura 1-2), se extraerá 1 m³ de residuos del relleno sanitario Doña Juana. Como método de investigación, se estudiarán dos tipos de residuos, el primer metro cúbico será de una zona operativa del relleno, es decir, donde actualmente se disponen los residuos; por otro lado, se extraerá un segundo metro cúbico de una zona cerrada, es decir, residuos que ya

se han dispuesto en años anteriores, estas zonas cerradas ya han tenido un proceso de descomposición y han sido cerradas (no se encuentra en operación).

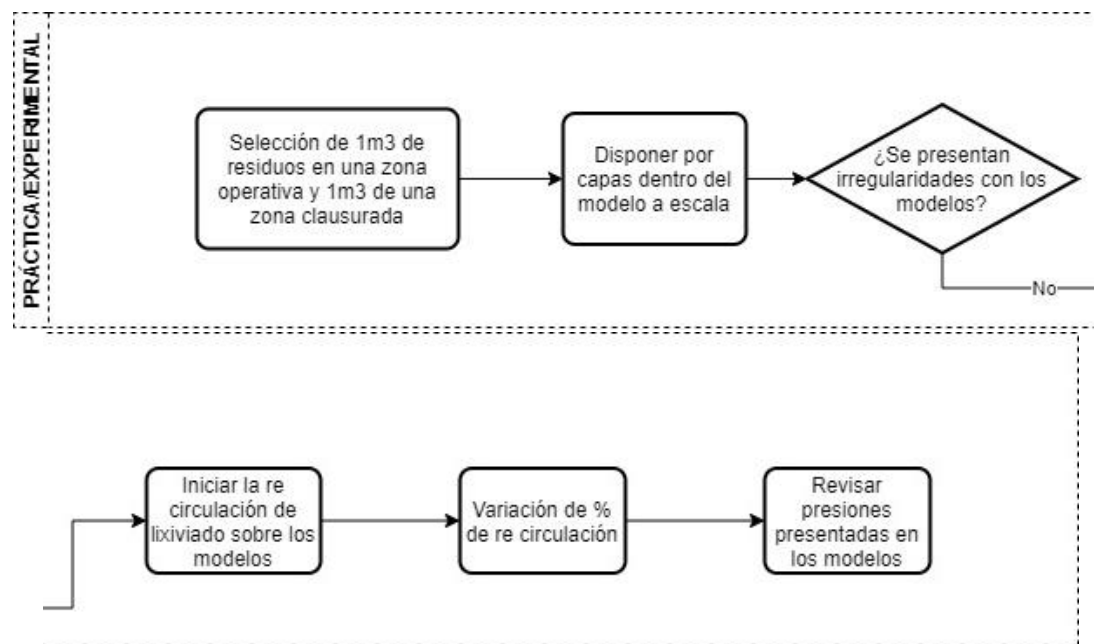
1.6.2.1. Disposición de residuos en modelo.

La disposición de los residuos dentro del lisímetro se realizará por capas, se tendrán los datos exactos de la cantidad de residuos dispuestos (ton) y el volumen donde se dispondrá (m³), esto, con el fin de obtener la densidad de residuos que tendrán los residuos dentro del lisímetro. Actualmente el consorcio que opera Doña Juana (CGR Doña Juana S.A. - E.S.P.) contractualmente debe cumplir una densidad de 1.07 ton/m³, en la investigación se buscará contar con un valor muy cercano a este para presentar datos acordes a las condiciones actuales.

1.6.2.2. Recirculación de lixiviado.

La recirculación se hará mediante una tubería en la parte superior, que sea capaz de esparcir el lixiviado en los residuos a estudiar, esto permite que el lixiviado haga su proceso nuevamente dentro de los residuos, este lixiviado ya recirculado es de nuestro estudio.

Figura 1-2 Metodología práctica/experimental

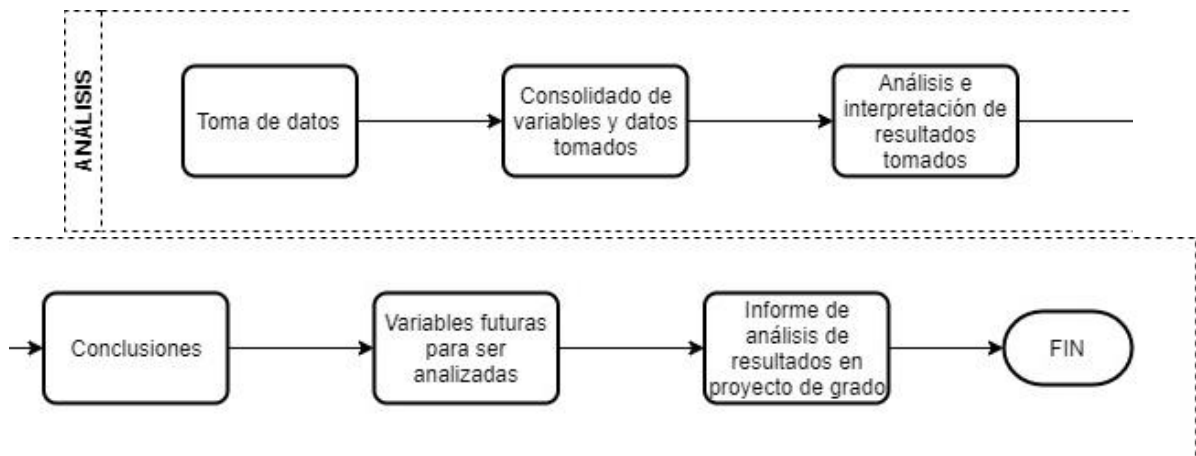


Fuente: Elaboración propia

1.6.3. Análisis de resultados.

Finalmente, como se observa en la Figura 1-3, se tomará los datos obtenidos de la investigación y se realizará los estudios pertinentes para cumplir con los objetivos propuestos.

Figura 1-3 Análisis de resultados



Fuente: Elaboración propia

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1. DESARROLLO DE METODOLOGÍA

En primer lugar, se debe aclarar que a raíz del aislamiento que presentó la ciudad desde los meses de marzo, producto de la emergencia en salud pública de importancia internacional (ESPII) por el nuevo coronavirus COVID-19, no fue posible realizar al detalle la metodología planteada en este proyecto, sin embargo, a continuación, se relacionan los cambios realizados para el correcto desarrollo del proyecto sin afectar los objetivos iniciales, ni los resultados esperados.

2.1.1. Definición de modelo a escala.

Para la correcta simulación de una celda de residuos sólidos urbanos (RSU), se definió el uso de tanques de plástico de 500cc marca Humboldt, los cuales permiten que los residuos permanezcan confinados dentro de un recipiente para realizar los estudios pertinentes.

En cuanto al soporte estructural de dichos tanques, fueron reutilizados de bases de madera de los rollos de cable para telefonía.

2.1.2. Localización de modelo.

El modelo se ubicó dentro de las instalaciones del relleno sanitario Doña Juana (RSDJ) (ver Figura 2-1) con previa autorización de los directivos, se situaron cerca a Zona IV⁷ y a la planta de tratamiento de lixiviados (PTL) (ver Figura 2-2). Además, se ubicó en una zona estratégica donde no es recurrente el tránsito peatonal ni de consorcios que transportan los residuos a la zona de disposición.

⁷ **Zona IV:** zona cerrada y clausurada operada entre septiembre de 1997 y enero de 1999.

Figura 2-1 Localización general del Relleno Sanitario Doña Juana



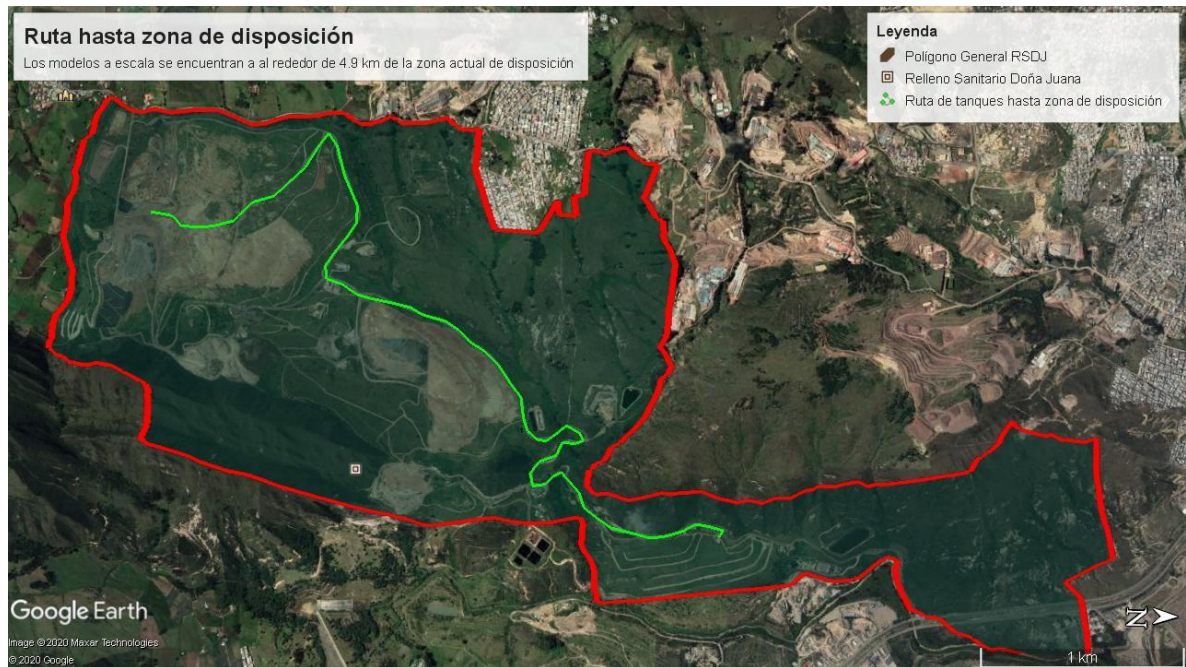
Figura 2-2 Localización de los modelos dentro del Relleno Sanitario Doña Juana



Fuente: Elaboración propia

Los modelos a escala se encuentran alrededor de 4.91 km de la zona de disposición actual del relleno (Terraza 3 Optimización Fase II), tal como se observa en la siguiente figura:

Figura 2-3 Distancia de tanques hasta zona de disposición



Fuente: Elaboración propia

2.1.3. Montaje experimental.

El montaje se realizó el día 23 de agosto del presente año (2020) con dos tanques Humboldt que simulan una celda de disposición dentro de un relleno sanitario, con drenaje de lixiviado, capa drenante de fondo y evacuación de gases.

Para tal fin, se adecuaron tanques (ver Figura 2-4) con válvula de bola en la parte inferior del tanque, junto a un manómetro para monitorear la presión hidrostática ejercida por los residuos dentro de la celda. Las aberturas por defecto que traían los tanques fueron selladas con una masilla epóxica, para evitar las fugas de lixiviado y la intervención de la presión atmosférica.

Además, en el fondo se ubicó una capa drenante de aproximadamente 7 cm de alto con gravilla, para evitar que el material obstruya la salida de lixiviado.

Figura 2-4 Adecuación de modelos a escala



Fuente: Registro fotográfico propio

Al finalizar la adecuación de los tanques, estos son transportados hacia la báscula para tomar el peso del tanque vacío con la camioneta y tomarlo como un peso inicial para el análisis de datos como se observa en la siguiente figura:

Figura 2-5 Pesaje de camioneta con tanque No.1 vacío



Fuente: Registro fotográfico propio

El tanque No.1 se llena con residuos de la zona de disposición actual (Terraza 3 Optimización Fase II) con ayuda de una retroexcavadora (ver Figura 2-6). Estos residuos están recién evacuados de los carros compactadores de basura. Luego,

se prosigue a realizar la compactación manual para la correcta simulación de los tanques en comparación con la celda de disposición (ver Figura 2-7).

Figura 2-6 Llenado de tanque No. 1 con ayuda de retroexcavadora



Figura 2-7 Compactación manual del tanque No. 1



Fuente: Registro fotográfico propio

Después de llenar el tanque No. 1 y haber compactado los residuos de manera manual, se prosigue a pesar nuevamente la camioneta con el tanque lleno de residuos como se observa en la siguiente figura:

Figura 2-8 Pesaje de camioneta con tanque No. 1 lleno



Fuente: Registro fotográfico propio

Para el segundo tanque se realizó el mismo procedimiento que el primero, con la diferencia que para este se utilizaron residuos de una celda anteriormente operada, es decir, residuos antiguos, tal como se observa en las siguientes figuras:

Figura 2-9 Pesaje de camioneta con tanque No. 2 vacío



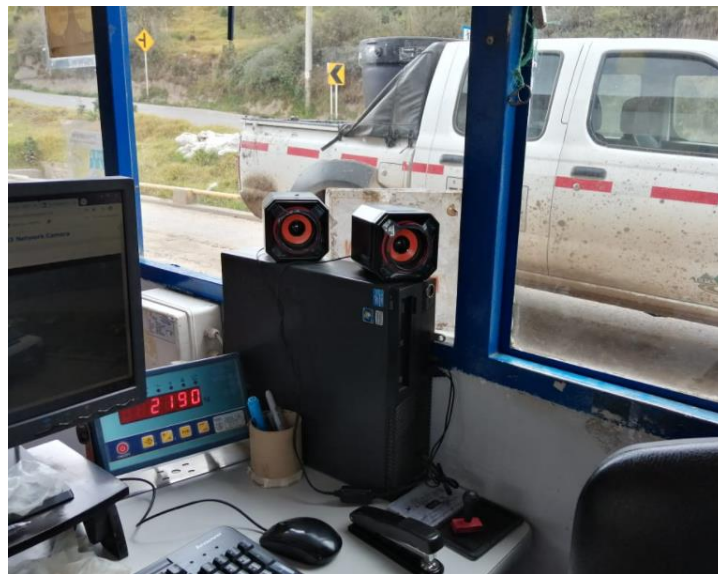
Figura 2-10 Extracción de residuos antiguos para el tanque No. 2



Figura 2-11 Compactación manual del tanque No. 2



Figura 2-12 Pesaje de camioneta con tanque No. 2 vacío



Fuente: Registro fotográfico propio

Los resultados anteriormente tomados se resumen en la Tabla 2-1

Tabla 2-1 Pesaje en básculas

Datos obtenidos en báscula			
Característica	Unidad	Tanque No. 1	Tanque No. 2
Peso tanque vacío + Camioneta	kg	1960	1970
Peso tanque lleno + Camioneta	kg	2210	2190
Peso total de residuo	kg	250	220

Fuente: Elaboración propia

2.1.4. Cantidad de lixiviado generado.

La cantidad de lixiviado generado dentro de la celda a escala se calculó mediante el método de Corenostos, el cual tiene en cuenta la caracterización de residuos sólidos. A continuación, se demuestra paso a paso el cálculo de este método:

Para empezar, se debe tener en cuenta el peso de los residuos en la celda a escala, para el cálculo de este estudio se toma el escenario más crítico, que en este caso es el tanque No. 1 que es el más pesado (ver Tabla 2-1) y posiblemente el que mayor lixiviado genere.

Siendo 250kg el peso de los residuos del tanque No. 1, se procede a calcular el peso de los residuos individualmente según el porcentaje de la caracterización de residuos que provienen al relleno sanitario. (Tabla 2-2)

Tabla 2-2 Cálculo de peso por material

Material	Composición RS (Caracterización)	kg/día
Orgánicos	56,20%	140,5
Papel y cartón	16,82%	42,05
Vidrio	1,00%	2,5
Plástico	24,87%	62,175
Metales	1,11%	2,775
TOTAL	100%	250

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, se calcula la humedad de los residuos, con el peso húmedo de los residuos teóricos, tomados del libro “*Gestión Integral de Residuos Sólidos*” (Tchobanoglous et al., 1994). (ver Tabla 2-3)

Tabla 2-3 Humedad total de residuos

Material	W _{RS}	Composición RS	Kg. /día	Kg/día Agua RS	W _{RS}
Orgánicos	70%	56.20%	140.50	98.35	39.34%
Papel y cartón	6%	16.82%	42.05	2.52	1.01%
Vidrio	2%	1.00%	2.50	0.05	0.02%
Plástico	2%	24.87%	62.18	1.24	0.50%
Metales	2%	1.11%	2.78	0.06	0.02%
TOTAL		1	250.00	102.22	40.89%

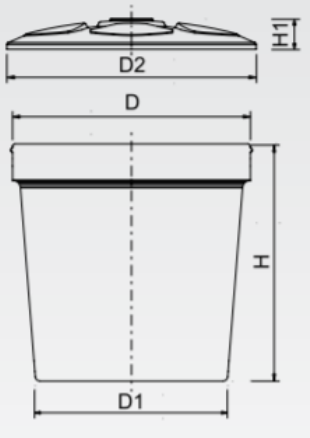
Fuente: Elaboración propia

Para calcular el caudal del lixiviado producido por el tanque, se debe calcular la capacidad de campo que tiene la celda, en función del porcentaje de humedad de los residuos, el peso específico de estos y las dimensiones del tanque.

Para calcular el volumen del tanque se usan las dimensiones del proveedor (ver Tabla 2-4), en este caso Humboldt.

Tabla 2-4 Dimensiones del tanque

Volumen Bruto Litros	Dimensiones del tanque mm			Dimensiones de la tapa mm	
	D	D1	H	D2	H1
250	810	677	720	850	138
250 mini	932	815	443	989	124
500	931	758	934	975	170
1000	1.232	1.031	1.030	1.275	236
2000	1.520	1.220	1.550	1.585	280
6000	2.205	1.800	2.197	2.277	250
Agrotanque	932	815	443	-	-



Fuente: Proveedor Humboldt

Se halla el volumen que tiene el tanque en la Tabla 2-5:

Tabla 2-5 Cálculo del peso específico de los residuos

Dimensiones del tanque		
Diámetro superior	931	mm
Diámetro superior	0.93	m
Diámetro inferior	758	mm
Diámetro inferior	0.76	m
Altura recipiente	934	mm
Altura recipiente	0.93	m
Volumen tronco de cono	0.52	m ³

Fuente: Elaboración propia

Con la información consignada anteriormente, se calcula el volumen de los residuos húmedos, teniendo en cuenta el volumen del tanque (0.52 m³) y la humedad total de los residuos sólidos (40.89 %):

$$V_{RS} = Volumen * W_{RS}$$

$$V_{RS} = 0.52m^3 * 40.89\%$$

$$V_{RS} = 0.214 m^3$$

Para el cálculo del peso se multiplica el anterior valor por el peso específico de los residuos que es de 1 ton/m³, seguidamente se multiplica por mil para cambiar sus unidades a kilogramos. Se divide en 2, debido a que para el cálculo de la capacidad de campo este se debe realizar en el centro de la celda:

$$W_{RS} = V_{RS} * \gamma * 1000$$

$$W_{RS} = \left(0.214 * \frac{1Ton}{m^3}\right) * 1000$$

$$W_{RS} = 213.91 kg$$

$$W_{TOTAL} = \frac{W_{RS}}{2}$$

$$W_{TOTAL} = 106.96 kg$$

$$W_{TOTAL} = 106.96 kg * 2.204622$$

$$W_{TOTAL} = 235.8 Lb$$

Para el cálculo de la capacidad de campo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$cc = 0.6 - 0.55 * \left(\frac{W_{RS}Lb}{10000 + W_{RS}Lb}\right)$$

$$cc = 0.6 - 0.55 * \left(\frac{235.8 Lb}{10000 + 235.8 Lb}\right)$$

$$cc = 0.587$$

Para el cálculo de volumen por capacidad de campo se multiplica la capacidad de campo por el volumen de la celda:

$$V_{CC} = cc * Volumen$$

$$V_{CC} = 0.587 * 0.52 m^3$$

$$V_{CC} = 0.31 m^3$$

Finalmente, se calcula el total del lixiviado generado por la celda, con la siguiente ecuación:

$$\text{Lixiviado} = P + V_{RS} + V_{CO} - V_{CC}$$

Donde:

P: precipitación

Vrs: volumen generado por residuos sólidos

Vco: volumen generado por suelo de cobertura

Vcc: volumen de capacidad de campo

Cabe aclarar, que la celda a estudiar no cuenta con suelo de cobertura, por tal motivo no se tendrá en cuenta, además no cuenta con precipitación debido a que los tanque se encuentran tapados.

$$\text{Lixiviado} = 0.214m^3 - 0.31m^3$$

$$\text{Lixiviado} = -0.093 m^3$$

Al obtener un dato negativo de $-0.093 m^3$, da a entender que la celda no va a generar el suficiente lixiviado que necesitamos para la recirculación y para la toma de muestras de laboratorio, por tal motivo se realiza una extracción de lixiviado de otra zona que se explica en el siguiente título.

2.1.5. Extracción de lixiviado.

Inicialmente se planteó realizar la recirculación con el lixiviado generado internamente por los residuos de los tanques calculado en el título 2.1.4, sin embargo, este era insuficiente contemplando el volumen de muestra que toma laboratorio para sus análisis (aproximadamente 1 litro para cada análisis).

Por esta razón, se inicia a recircular lixiviado producto de optimización fase II⁸ (ver Figura 2-13). Inicialmente se toman 9 litros de lixiviado de la zona para cada tanque y así garantizar la cantidad de lixiviado pertinente para todo el estudio a realizar.

⁸ Proyecto actual del relleno sanitario Doña Juana, donde se realiza la disposición final de residuos sólidos urbano y que estima una fecha de ocupación en el año 2024.

Figura 2-13 Extracción de lixiviados de la red de conducción de Optimización Fase II



Fuente: Registro fotográfico propio

2.1.6. Recirculación de lixiviado.

La recirculación del lixiviado en cada tanque se realiza manualmente, esta se lleva a cabo en un recipiente totalmente limpio y seco. Para la recirculación se abre la válvula y se extrae totalmente el lixiviado que contiene cada tanque (ver Figura 2-14), luego de extraído el lixiviado, se procede a recircular desde la parte superior del tanque, distribuyendo el volumen en el área superior de los residuos (ver Figura 2-15).

Figura 2-14 Extracción de lixiviado en tanques (izquierda) y control de volumen recirculado (derecha)



Figura 2-15 Recirculación manual sobre residuos



Fuente: Registro fotográfico propio

2.1.7. Tomas de muestra para laboratorio.

El laboratorio cuenta con su respectivo personal calificado y los insumos necesarios para la correcta toma de muestra en los tanques de estudio (ver Figura 2-16). Sin embargo, la cantidad de muestras tomadas está sujeta a la disposición del laboratorio.

Figura 2-16 Toma de muestras para laboratorio



Fuente: Registro fotográfico propio

Para los parámetros analizados, el laboratorio realiza cada prueba con diferentes ensayos y bajo la normativa de la *Resolución 1181/20 ANLA* tal como se muestra en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6 Relación de los métodos y parámetros tomados por laboratorio

Parámetros de ensayo tomados por laboratorio					
Tipo de Ensayo	Método	Referencia	Referencia Normativa	Unidades	Incertidumbre
Temperatura ambiente	Termométrico	SM 2550 B	N/A	°C	0.043 * Temperatura
Temperatura muestra	Termométrico	SM 2550 B	Res. 1181/20 ANLA	°C	0.043 * Temperatura
pH	Potenciométrico	SM 4500 - H+B	Res. 1181/20 ANLA	Unidades	0.037 * pH
Demanda química de oxígeno (DQO)	Reflujo cerrado y colorímetro	SM 5220 D	Res. 1181/20 ANLA	mg O ₂ /L	0.009 * DQO

Continuación de la tabla Tabla 2-6:

Demanda bioquímica de oxígeno (DQO)	Incubación a 5 días y electrodo de membrana	SM 5210 B, SM 4500-OG	Res. 1181/20 ANLA	mg O ₂ /L	0.009 * DBO
Alcalinidad total	Volumétrico	SM 2320 B	Res. 1181/20 ANLA	mg CaCO ₃ /L	0.011 * Alcalinidad
Conductividad	Potenciométrico	SM 2510 B	N/A	mS/cm	0.016 * Conductividad

Fuente: Laboratorio CGR Doña Juana

2.1.8. Resultados de laboratorio.

El laboratorio realiza un análisis fisicoquímico de tipo de agua residual, no doméstica en dos puntos puntuales (ver Figura 2-17, Figura 2-18, Figura 2-19 y Figura 2-20):

- **Tanque No. 1:** residuos nuevos
- **Tanque No. 2:** residuos antiguos

Además, se tomó una muestra inicial del lixiviado de optimización fase II que es recirculado (tal como se explica en el título 0) para tener como base y realizar un análisis más detallado.

Figura 2-17 Primera muestra a tanque No. 1



CGR Doña Juana		GQ. GESTION QSHE - LABORATORIO			INFORME INDIVIDUAL DE RESULTADOS DE MUESTRA		LABORATORIO ACREDITADO NTC ISO/IEC 17025:2005 POR EL IDEAM, SEGUN RESOLUCIÓN VIGENTE		
Código: FR-GG-210	Versión: 2	Fecha: 2018/10/11	Página: 1 de 1						
DATOS GENERALES									
INFORME No.:		3257 -1			MUESTRA No.:		35790		
NOMBRE DEL LABORATORIO:		Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana - CGR Doña Juana S.A. E.S.P.			DIRECCIÓN:		Avenida Boyacá Km 5 vía Llano Relleno Sanitario Doña Juana		
SOLICITANTE:		Johan Mateo Roa Sánchez			TELÉFONO:		384 88 30 EXT. 5019		
INFORMACIÓN GENERAL DE LA MUESTRA									
LUGAR TOMA DE MUESTRA:		Relleno Sanitario - CGR Doña Juana S.A. E.S.P.							
PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:		Tanque 1 Coordenadas N:4°31'13.05 W:74°7'15.85							
CÓDIGO DE MUESTRA:		35790		TIPO DE MUESTRA:		Agua residual no doméstica			
TIPO DE MUESTREO:		Puntual							
MUESTREO REALIZADO POR:		Laboratorio CGR Doña Juana							
FECHA DE TOMA DE MUESTRA:		2020-09-18		HORA DE TOMA DE MUESTRA:		12:15:00			
FECHA DE RECEPCIÓN:		2020-09-18		FECHA DE ANÁLISIS:		2020-09-18 al 2020-09-28			
FECHA DE REPORTE:		2020-10-02							
RESULTADOS									
ENSAYO	MÉTODO	REFERENCIA	UNIDADES	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE	RESULTADO	LÍMITES PERMISIBLES		REFERENCIA NORMATIVA
							MIN	MAX	
* Temperatura Ambiente	Termométrico	SM 2550 B	°C	N/A	0,043 * Temperatura	21,1	-	-	N/A
* Temperatura Muestra	Termométrico	SM 2550 B	°C	N/A	0,043 * Temperatura	21,3	-	20	Res. 1181/20 ANLA
* pH	Potenciométrico	SM 4500-H+ B	Unids.	1,00	0,037 * pH	6,50	6,5	8,5	Res. 1181/20 ANLA
Conductividad	Potenciométrico	SM 2510 B	mS/cm	N/A	0,016 * Conductividad	21,1	-	-	N/A
* Demanda Química de Oxígeno - DQO	Reflujo cerrado y colorimétrico	SM 5220 D	mg O ₂ /L	10,0	0,012 * DQO	46825	-	800	Res. 1181/20 ANLA
* Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO ₅ TOTAL	Incubación a 5 días y electrodo de membrana	SM 5210 B, SM 4500-O G	mg O ₂ /L	2,0	0,036 * DBO	33133	-	100	Res. 1181/20 ANLA
* Alcalinidad Total	Volumétrico	SM 2320 B	mg CaCO ₃ /L	20,0	0,011 * Alcalinidad	14798	-	A Y R	Res. 1181/20 ANLA
OBSERVACIONES									
* VARIABLE ACREDITADA. LOS RESULTADOS REPORTADOS EN ESTE INFORME CORRESPONDEN ÚNICAMENTE A LAS MUESTRAS ENVIADAS Y HACEN REFERENCIA AL PLAN DE MUESTREO DEFINIDO POR EL CLIENTE Y AL PROCEDIMIENTO PARA TOMA Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS									
LOS RESULTADOS CON * INDICAN QUE ESTÁ POR DEBAJO DEL LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN DEL MÉTODO. **A Y R = ANÁLISIS Y REPORTE. *** N/A= NO APLICA									
SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME SIN EL CONSENTIMIENTO Y AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE CGR DOÑA JUANA S.A. E.S.P.									
APROBACIÓN									
 APROBO: CLAUDIA PATRICIA PICO DIAZ CARGO: JEFE LABORATORIO "FIN DEL INFORME"									

Figura 2-18 Segunda muestra a tanque No. 1

CGR Doña Juana		GQ. GESTION QSHE - LABORATORIO			INFORME INDIVIDUAL DE RESULTADOS DE MUESTRA		LABORATORIO ACREDITADO NTC ISO/IEC 17025:2005 POR EL IDEAM, SEGUN RESOLUCIÓN VIGENTE		
Código: FR-GG-210	Versión: 2	Fecha: 2018/10/11	Página: 1 de 1						
DATOS GENERALES									
INFORME No.:		3273 -1			MUESTRA No.:		35890		
NOMBRE DEL LABORATORIO:		Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana - CGR Doña Juana S.A. E.S.P.			DIRECCIÓN:		Avenida Boyacá Km 5 vía Llano Relleno Sanitario Doña Juana		
SOLICITANTE:		Johan Mateo Roa Sánchez			TELÉFONO:		384 88 30 EXT. 5019		
INFORMACIÓN GENERAL DE LA MUESTRA									
LUGAR TOMA DE MUESTRA:		Relleno Sanitario - CGR Doña Juana S.A. E.S.P.							
PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:		Tanque 1 Coordenadas N:4°31'13.05 W:74°7'15.85							
CÓDIGO DE MUESTRA:		35890		TIPO DE MUESTRA:		Agua residual no doméstica			
TIPO DE MUESTREO:		Puntual							
MUESTREO REALIZADO POR:		Laboratorio CGR Doña Juana							
FECHA DE TOMA DE MUESTRA:		2020-10-09		HORA DE TOMA DE MUESTRA:		7:25:00			
FECHA DE RECEPCIÓN:		2020-10-09		FECHA DE ANÁLISIS:		2020-10-09 al 2020-10-19			
FECHA DE REPORTE:		2020-10-27							
RESULTADOS									
ENSAYO	MÉTODO	REFERENCIA	UNIDADES	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE	RESULTADO	LÍMITES PERMISIBLES		REFERENCIA NORMATIVA
							MIN	MAX	
* Temperatura Ambiente	Termométrico	SM 2550 B	°C	N/A	0,043 * Temperatura	17,2	-	-	N/A
* Temperatura Muestra	Termométrico	SM 2550 B	°C	N/A	0,043 * Temperatura	14,3	-	20	Res. 1181/20 ANLA
* pH	Potenciométrico	SM 4500-H+ B	Unids.	1,00	0,037 * pH	6,20	6,5	8,5	Res. 1181/20 ANLA
Conductividad	Potenciométrico	SM 2510 B	mS/cm	N/A	0,016 * Conductividad	20,7	-	-	N/A
* Demanda Química de Oxígeno - DQO	Reflujo cerrado y colorimétrico	SM 5220 D	mg O ₂ /L	10,0	0,012 * DQO	62260	-	800	Res. 1181/20 ANLA
* Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO ₅ TOTAL	Incubación a 5 días y electrodo de membrana	SM 5210 B, SM 4500-O G	mg O ₂ /L	2,0	0,036 * DBO	42017	-	100	Res. 1181/20 ANLA
* Alcalinidad Total	Volumétrico	SM 2320 B	mg CaCO ₃ /L	20,0	0,011 * Alcalinidad	13910	-	A Y R	Res. 1181/20 ANLA
OBSERVACIONES									
* VARIABLE ACREDITADA. LOS RESULTADOS REPORTADOS EN ESTE INFORME CORRESPONDEN ÚNICAMENTE A LAS MUESTRAS ENVIADAS Y HACEN REFERENCIA AL PLAN DE MUESTREO DEFINIDO POR EL CLIENTE Y AL PROCEDIMIENTO PARA TOMA Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS									
LOS RESULTADOS CON * INDICAN QUE ESTÁ POR DEBAJO DEL LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN DEL MÉTODO. **A Y R = ANÁLISIS Y REPORTE. *** N/A= NO APLICA									
SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME SIN EL CONSENTIMIENTO Y AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE CGR DOÑA JUANA S.A. E.S.P.									
APROBACIÓN									
 APROBO: CLAUDIA PATRICIA PICO DIAZ CARGO: JEFE LABORATORIO "FIN DEL INFORME"									

Fuente: Laboratorio CGR Doña Juana

Figura 2-19 Primera muestra a tanque No. 2



CGR Doña Juana		GQ. GESTION QSHH - LABORATORIO			LABORATORIO Acreditado NTC ISO/IEC 17025:2005 POR EL IDEAM, SEGUN RESOLUCION VIGENTE				
INFORME INDIVIDUAL DE RESULTADOS DE MUESTRA									
Código: FR-GQ-210		Versión: 2		Fecha: 2019/10/11		Página: 1 de 1			
DATOS GENERALES									
INFORME No.: 3257 -2				MUESTRA No.: 35791					
NOMBRE DEL LABORATORIO: Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana - CGR Doña Juana S.A. E.S.P.									
DIRECCIÓN: Avenida Boyacá Km 5 vía Llano Relleno Sanitario Doña Juana				TELÉFONO: 384 88 30 EXT. 5019					
SOLICITANTE: Johan Mateo Ríos Sánchez									
INFORMACIÓN GENERAL DE LA MUESTRA									
LUGAR TOMA DE MUESTRA: Relleno Sanitario - CGR Doña Juana S.A. E.S.P.									
PUNTO DE TOMA DE MUESTRA: Tanque 2 Coordenadas N:4°31'59.29 W:74°7'49.82									
CÓDIGO DE MUESTRA: 35791		TIPO DE MUESTRA: Agua residual no doméstica							
TIPO DE MUESTREO: Puntual									
MUESTREO REALIZADO POR: Laboratorio CGR Doña Juana									
FECHA DE TOMA DE MUESTRA: 2020-09-18		HORA DE TOMA DE MUESTRA: 12:17:00							
FECHA DE RECEPCIÓN: 2020-09-18		FECHA DE ANÁLISIS: 2020-09-18		al 2020-09-28					
FECHA DE REPORTE: 2020-10-02									
RESULTADOS									
ENSAYO	MÉTODO	REFERENCIA	UNIDADES	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE	RESULTADO	LÍMITES PERMISIBLES		REFERENCIA NORMATIVA
							MIN	MAX	
* Temperatura Ambiente	Termométrico	SM 2550 B	°C	N/A	0,043 * Temperatura	21,1	-	-	N/A
* Temperatura Muestra	Termométrico	SM 2550 B	°C	N/A	0,043 * Temperatura	21,3	-	20	Res. 1181/20 ANLA
* pH	Potenciométrico	SM 4500-H+ B	Unids.	1,00	0,037 * pH	8,40	6,5	8,5	Res. 1181/20 ANLA
* Conductividad	Potenciométrico	SM 2510 B	mS/cm	N/A	0,016 * Conductividad	26,7	-	-	N/A
* Demanda Química de Oxígeno - DQO	Reflujo cerrado y colorimétrico	SM 5220 D	mg O ₂ /L	10,0	0,012 * DQO	7531	-	800	Res. 1181/20 ANLA
* Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO ₅ TOTAL	Incubación a 5 días y electrodo de membrana	SM 5210 B, SM 4500-O G	mg O ₂ /L	2,0	0,036 * DBO	2175	-	100	Res. 1181/20 ANLA
* Alcalinidad Total	Volumétrico	SM 2320 B	mg CaCO ₃ /L	20,0	0,011 * Alcalinidad	14974	-	A Y R	Res. 1181/20 ANLA
OBSERVACIONES									
* VARIABLE Acreditada. LOS RESULTADOS REPORTADOS EN ESTE INFORME CORRESPONDEN ÚNICAMENTE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS Y HACEN REFERENCIA AL PLAN DE MUESTREO DEFINIDO POR EL CLIENTE Y AL PROCEDIMIENTO PARA TOMA Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS.									
LOS RESULTADOS CON "*" INDICAN QUE ESTÁ POR DEBAJO DEL LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN DEL MÉTODO. "*" A Y R = ANÁLISIS Y REPORTE "" N/A = NO APLICA									
SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME SIN EL CONSENTIMIENTO Y AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE CGR DOÑA JUANA S.A. E.S.P.									
APROBACIÓN									
 APROBO: CLAUDIA PATRICIA RICO DIAZ CARGO: JEFE LABORATORIO "FIN DEL INFORME"									

Figura 2-20 Segunda muestra a tanque No. 2

CGR Doña Juana		GQ. GESTION QSHH - LABORATORIO			LABORATORIO Acreditado NTC ISO/IEC 17025:2005 POR EL IDEAM, SEGUN RESOLUCION VIGENTE				
INFORME INDIVIDUAL DE RESULTADOS DE MUESTRA									
Código: FR-GQ-210		Versión: 2		Fecha: 2019/10/11		Página: 1 de 1			
DATOS GENERALES									
INFORME No.: 3273 -2				MUESTRA No.: 35891					
NOMBRE DEL LABORATORIO: Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana - CGR Doña Juana S.A. E.S.P.									
DIRECCIÓN: Avenida Boyacá Km 5 vía Llano Relleno Sanitario Doña Juana				TELÉFONO: 384 88 30 EXT. 5019					
SOLICITANTE: Johan Mateo Ríos Sánchez									
INFORMACIÓN GENERAL DE LA MUESTRA									
LUGAR TOMA DE MUESTRA: Relleno Sanitario - CGR Doña Juana S.A. E.S.P.									
PUNTO DE TOMA DE MUESTRA: Tanque 2 Coordenadas N:4°31'59.29 W:74°7'49.82									
CÓDIGO DE MUESTRA: 35891		TIPO DE MUESTRA: Agua residual no doméstica							
TIPO DE MUESTREO: Puntual									
MUESTREO REALIZADO POR: Laboratorio CGR Doña Juana									
FECHA DE TOMA DE MUESTRA: 2020-10-09		HORA DE TOMA DE MUESTRA: 7:30:00							
FECHA DE RECEPCIÓN: 2020-10-09		FECHA DE ANÁLISIS: 2020-10-09		al 2020-10-19					
FECHA DE REPORTE: 2020-10-27									
RESULTADOS									
ENSAYO	MÉTODO	REFERENCIA	UNIDADES	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE	RESULTADO	LÍMITES PERMISIBLES		REFERENCIA NORMATIVA
							MIN	MAX	
* Temperatura Ambiente	Termométrico	SM 2550 B	°C	N/A	0,043 * Temperatura	17,2	-	-	N/A
* Temperatura Muestra	Termométrico	SM 2550 B	°C	N/A	0,043 * Temperatura	14,6	-	20	Res. 1181/20 ANLA
* pH	Potenciométrico	SM 4500-H+ B	Unids.	1,00	0,037 * pH	8,20	6,5	8,5	Res. 1181/20 ANLA
* Conductividad	Potenciométrico	SM 2510 B	mS/cm	N/A	0,016 * Conductividad	25,9	-	-	N/A
* Demanda Química de Oxígeno - DQO	Reflujo cerrado y colorimétrico	SM 5220 D	mg O ₂ /L	10,0	0,012 * DQO	6032	-	800	Res. 1181/20 ANLA
* Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO ₅ TOTAL	Incubación a 5 días y electrodo de membrana	SM 5210 B, SM 4500-O G	mg O ₂ /L	2,0	0,036 * DBO	1008	-	100	Res. 1181/20 ANLA
* Alcalinidad Total	Volumétrico	SM 2320 B	mg CaCO ₃ /L	20,0	0,011 * Alcalinidad	11955	-	A Y R	Res. 1181/20 ANLA
OBSERVACIONES									
* VARIABLE Acreditada. LOS RESULTADOS REPORTADOS EN ESTE INFORME CORRESPONDEN ÚNICAMENTE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS Y HACEN REFERENCIA AL PLAN DE MUESTREO DEFINIDO POR EL CLIENTE Y AL PROCEDIMIENTO PARA TOMA Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS.									
LOS RESULTADOS CON "*" INDICAN QUE ESTÁ POR DEBAJO DEL LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN DEL MÉTODO. "*" A Y R = ANÁLISIS Y REPORTE "" N/A = NO APLICA									
SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME SIN EL CONSENTIMIENTO Y AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE CGR DOÑA JUANA S.A. E.S.P.									
APROBACIÓN									
 APROBO: CLAUDIA PATRICIA RICO DIAZ CARGO: JEFE LABORATORIO "FIN DEL INFORME"									

Fuente: Laboratorio CGR Doña Juana

Los resultados de las muestras son suministrados por el laboratorio mediante informes técnicos y resumidos en las siguientes tablas, junto con los resultados del lixiviado base de optimización fase II:

Tabla 2-7 Resumen de resultados para el Tanque No. 1

Resultados de muestras para el Tanque No. 1									
	Fecha	Día Desde Muestra	T Ambiente (°C)	T Muestra (°C)	pH (und s.)	Conductividad (mS/cm)	DQO (mgO ₂ /L)	DBO ₅ (mgO ₂ /L)	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)
Tanque 1 Residuos Celda Nueva	09-sep-20	1	12.7	27.7	8.3		7720	5681	
	18-sep-20	10	21.1	21.3	6.5	21.1	4682	3313	14798
	09-oct-20	31	17.2	14.3	6.2	20.7	6226	4201	13810

Fuente: Laboratorio CGR Doña Juana

Tabla 2-8 Resumen de resultados para el Tanque No. 2

Resultados de muestras para el Tanque No. 2									
	Fecha	Día Desde Muestra	T Ambiente (°C)	T Muestra (°C)	pH (und s.)	Conductividad (mS/cm)	DQO (mgO ₂ /L)	DBO ₅ (mgO ₂ /L)	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)
Tanque 2 Residuos Celda Antigua	09-sep-20	1	12.7	27.7	8.3		7720	5681	
	18-sep-20	10	21.1	21.3	8.4	26.7	7531	2175	14974
	09-oct-20	31	17.2	14.6	8.2	25.9	6032	1006	11995

Fuente: Laboratorio CGR Doña Juana

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en los resultados obtenidos por el laboratorio, descritos en el título 2.1.8, se logra evidenciar los beneficios de la recirculación con respecto a los parámetros medidos (alcalinidad, conductividad, DBO, DQO, entre otros). Además, en la Tabla 3-1 se cuenta con la información de algunos parámetros para un punto antes de la entrada del lixiviado a la planta de tratamiento de lixiviados (PTL) luego de su conducción desde la zona de descargue, pasando por un SBR, almacenamiento en pondajes y su llegada final, el cual, será punto base para varios análisis.

Tabla 3-1 Resultados de muestras para punto antes de la PTL

Resultados de muestras para punto antes de PTL									
	Fecha	Día Desde Muestra	T Ambiente (°C)	T Muestra (°C)	pH (unds .)	Conductividad (mS/cm)	DQO (mgO ₂ /L)	DBO ₅ (mgO ₂ /L)	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)
Entrada PTL	07-oct-20	29	14.7	17.0	8.3		18390	10650	

Fuente: Laboratorio CGR Doña Juana

Los análisis de estos resultados se relacionan a continuación:

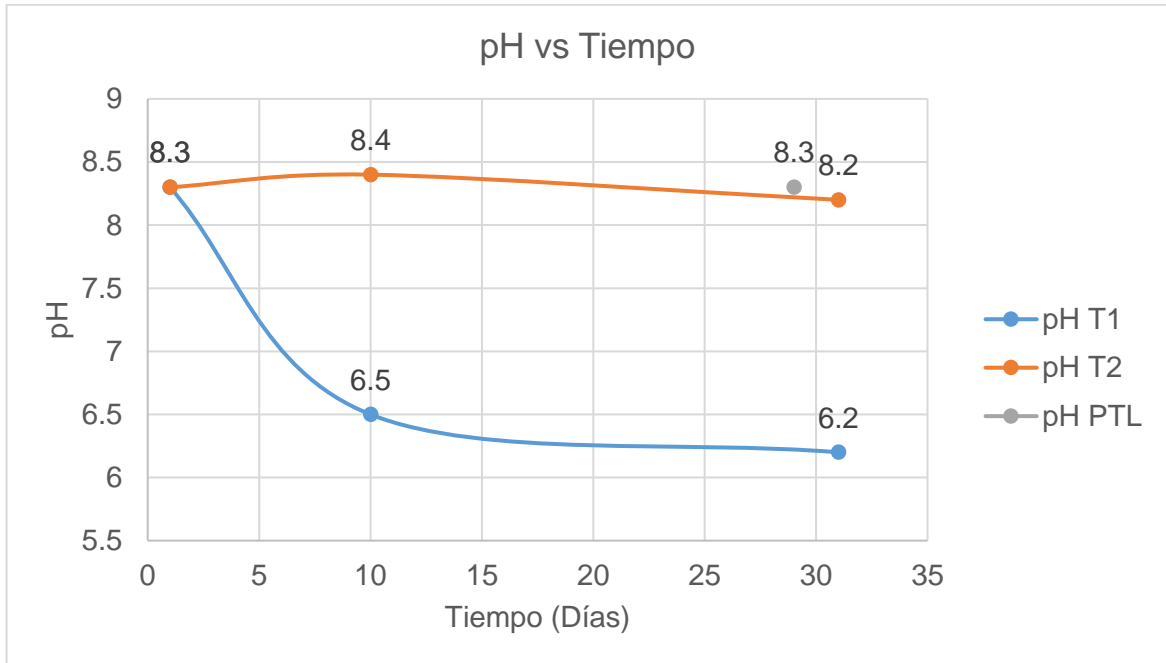
3.1. TEMPERATURA

En primer lugar, observamos que la temperatura no tiene grandes variaciones para las muestras tomadas, por lo que no juega una parte importante en la disminución de los parámetros medidos.

3.2. PH

Uno de los parámetros medidos que presentó cambio es el pH, tal como se observa en la Gráfica 3-1. En el tanque No. 1, debido a la recirculación, el nivel de pH disminuye a través del tiempo, pasando de un estado base a uno neutro, estos se deben a que los residuos nuevos se encuentran en pleno proceso de descomposición y a su vez con la recirculación el lixiviado pierde algunos iones hidrogenados. Para el tanque No. 2, no se presentaron cambios significativos.

Gráfica 3-1 pH vs. Tiempo

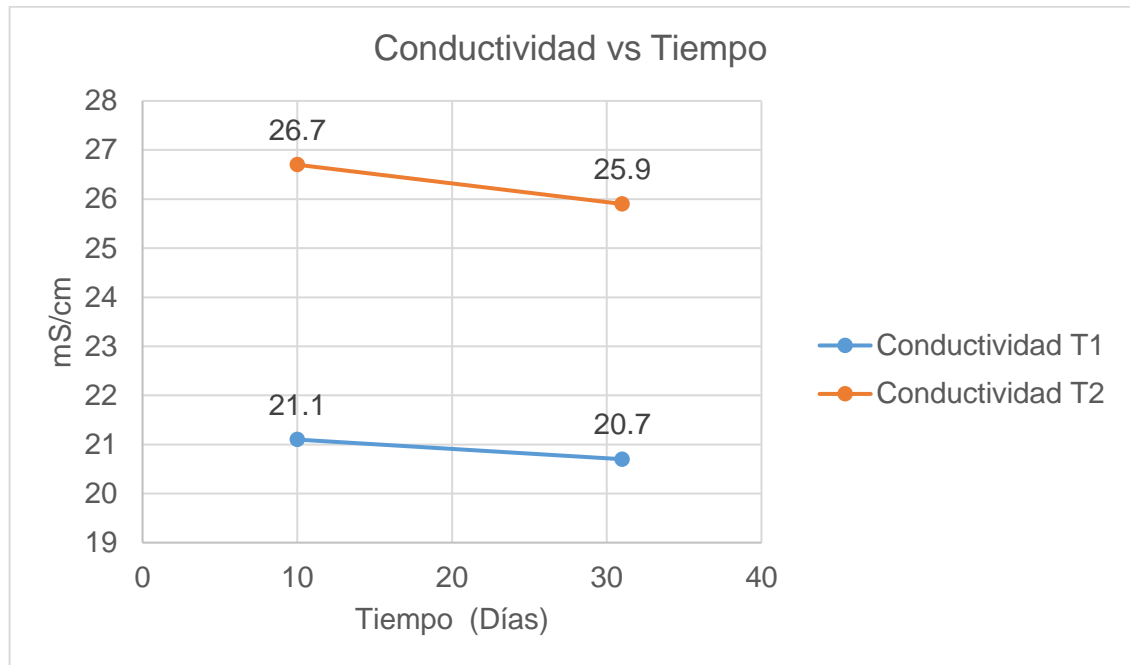


Fuente: Elaboración propia

3.3. CONDUCTIVIDAD

La conductividad presenta una disminución del 1,9% y un 3% con respecto a la muestra inicial tomada, aun así, los resultados reflejan una baja conductividad del lixiviado, esto manifiesta una baja concentración de sólidos totales suspendidos en el fluido, la recirculación permite que la presencia de sales vaya disminuyendo a medida que se sigue recirculando con el tiempo. (ver Gráfica 3-2)

Gráfica 3-2 Conductividad vs. Tiempo

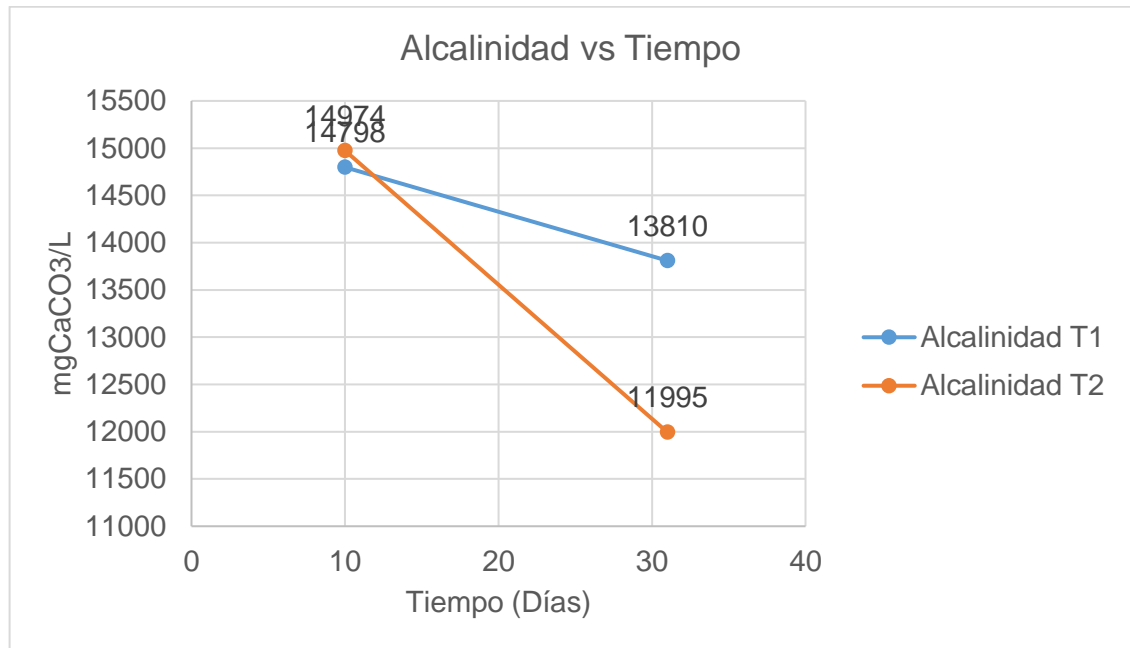


Fuente: Elaboración propia

3.4. ALCALINIDAD

Debido a que el lixiviado tiende a perder iones hidrogenados, la alcalinidad se ve directamente afectada, disminuyendo entre el 6,7% y el 19,9% con respecto a la lectura inicial. (ver Gráfica 3-3)

Gráfica 3-3 Alcalinidad vs. Tiempo



Fuente: Elaboración propia

3.5. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

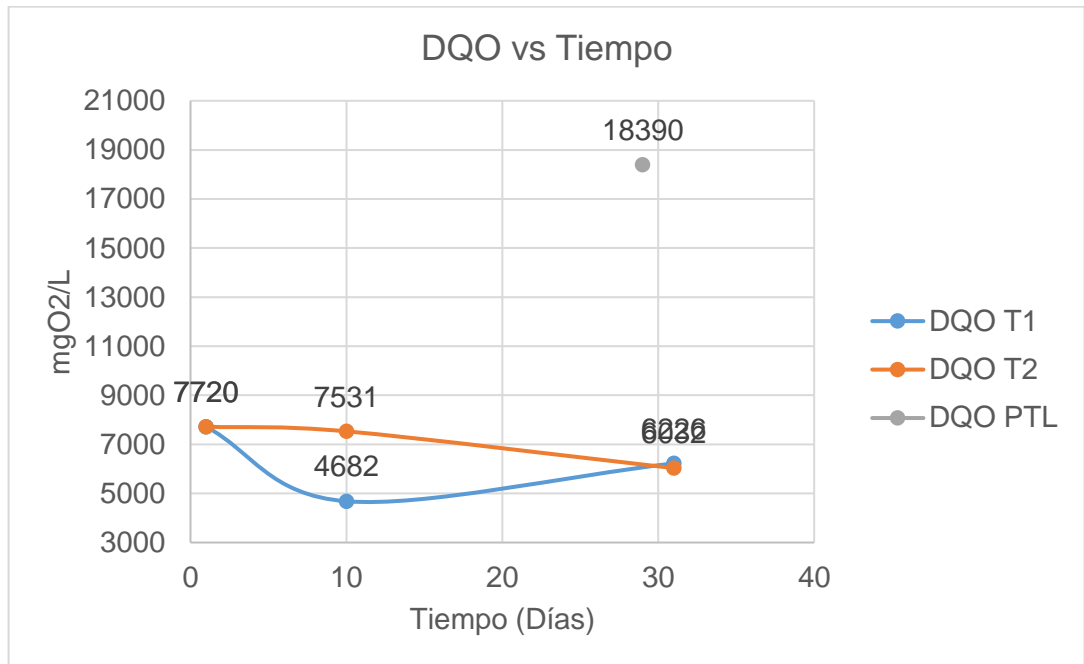
Dentro de los parámetros importantes de esta investigación se encuentra la demanda química de oxígeno (DQO), donde se evidencia gran depreciación de DQO, llegó a tener una disminución hasta del 21.9% en la muestra final con respecto a la primera muestra en los dos tanques. (ver Gráfica 3-4)

Cabe anotar que, el tanque No. 1 (residuos nuevos), en su segunda lectura logró disminuir un 39.4% y luego aumenta en su tercera lectura. Esto se debe a que los residuos que arriman al relleno sanitario Doña Juana presentan una alta presencia de materia orgánica, lo que presenta una descomposición más rápida respecto al tiempo, aumentando niveles de demanda química de oxígeno.

Por el contrario, el tanque No. 2 (residuos antiguos), en la Gráfica 3-4 se observa una disminución casi de tendencia lineal en cuando a la DQO. Lo anterior se debe a que estos residuos tienen más tiempo de descomposición, lo que significa que han logrado eliminar la alta presencia de materia orgánica con la que arribaron inicialmente.

En la Gráfica 3-4 se realiza una comparación de los datos tomados en la tercera prueba frente a la demanda química de oxígeno que presenta el lixiviado antes de ingresar a la planta de tratamiento de lixiviados (PTL), en el cual, se evidencia una diferencia de 238.2% con respecto a la lectura inicial del lixiviado de optimización fase II.

Gráfica 3-4 DQO vs. Tiempo



Fuente: Elaboración propia

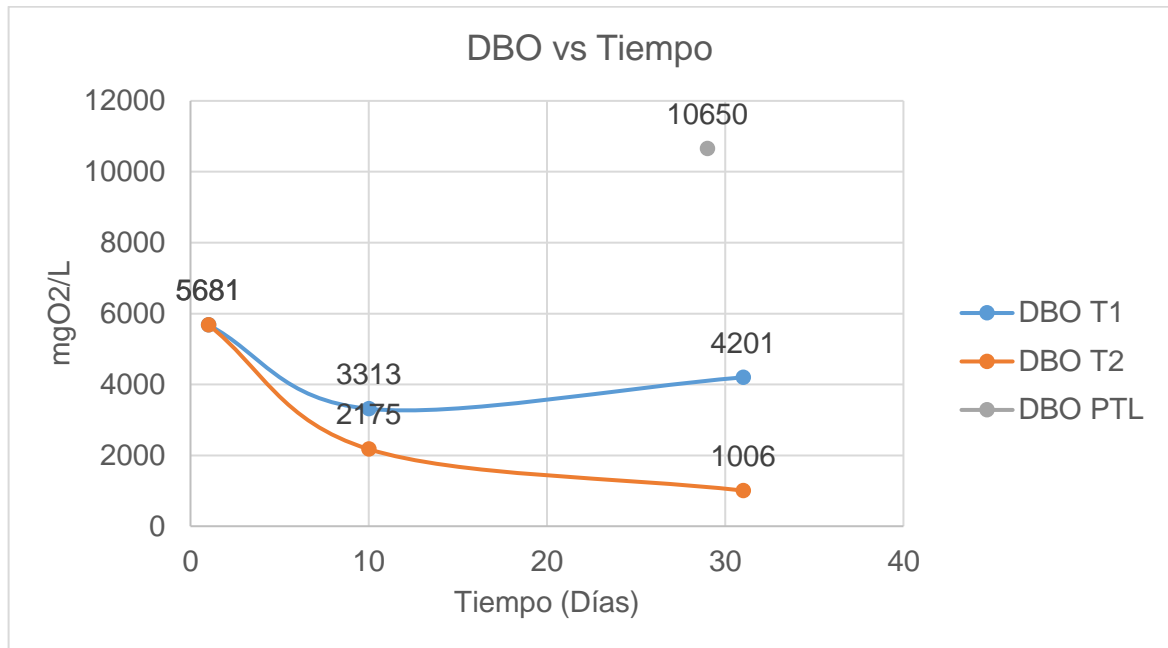
3.6. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DQO)

El segundo parámetro significativo dentro de esta investigación es la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), el cual presenta una disminución en los resultados obtenidos después de la recirculación. Llegó presentar hasta un 82.3% de disminución de DBO en el tanque No. 2 y un 26.1% en el tanque No. 1, respecto a la tercera prueba del estudio.

Como primera instancia, se evidencia que las lecturas de DBO son inferiores a las lecturas de DQO, lo que significa un buen procedimiento en los análisis presentados.

En el Tanque No 1 se evidencia una correlación entre los datos del DQO y el DBO, el cual en su segunda lectura tiene una disminución mayor que en la tercera lectura, llegando a tener una disminución hasta del 41.7% con respecto a la lectura inicial y luego aumentando el DBO.

Gráfica 3-5 DBO vs. Tiempo



Fuente: Elaboración propia

3.7. ASENTAMIENTOS

Durante el tiempo de estudio, se evidenció asentamientos mayores en el tanque No. 1 (residuos nuevos), ver Figura 3-2, mientras que en el tanque No. 2, no se presentaron asentamientos significativos.

Esto se debe a varios factores como los son: **1.** al tratarse de residuos nuevos con alta concentración de material orgánico, este se descompone con mayor rapidez, lo que disminuye el volumen de los residuos y permite un mayor asentamiento, **2.** al momento de llenar los tanques, los residuos nuevos no están lo suficientemente compactados, por el contrario, los residuos antiguos, ya han sido sometido a cargas dinámicas como lo son el paso de vehículos pesados y maquinaria, lo que permite una mayor compactación.

Figura 3-1 Asentamientos presentados en el tanque No. 1



Figura 3-2 Asentamientos presentados en el tanque No. 2



Fuente: Registro fotográfico propio

3.8. VOLUMEN DE LIXIVIADO AL MOMENTO DE LA RECIRCULACIÓN

Otro cambio evidenciado durante el estudio es el volumen que se toma al momento de realizar la recirculación, esto debido a dos situaciones particulares: .1. el laboratorio al momento de tomar la prueba requiere de 1 litro de lixiviado para sus

análisis y, por otro lado, **2.** parte del lixiviado queda retenido en los residuos. (ver Gráfica 3-6)

En la Tabla 3-2 y la Tabla 3-3, se relaciona el volumen tomado para cada tanque al momento de realizar la recirculación.

Tabla 3-2 Volumen tomado para recircular en el tanque No. 1

	Fecha	Día Desde Muestra	Volumen Relacionado (L)
Tanque 1 Residuos Celda Nueva	9-sep-20	1	7
	18-sep-20	10	5,1
	9-oct-20	31	3,7

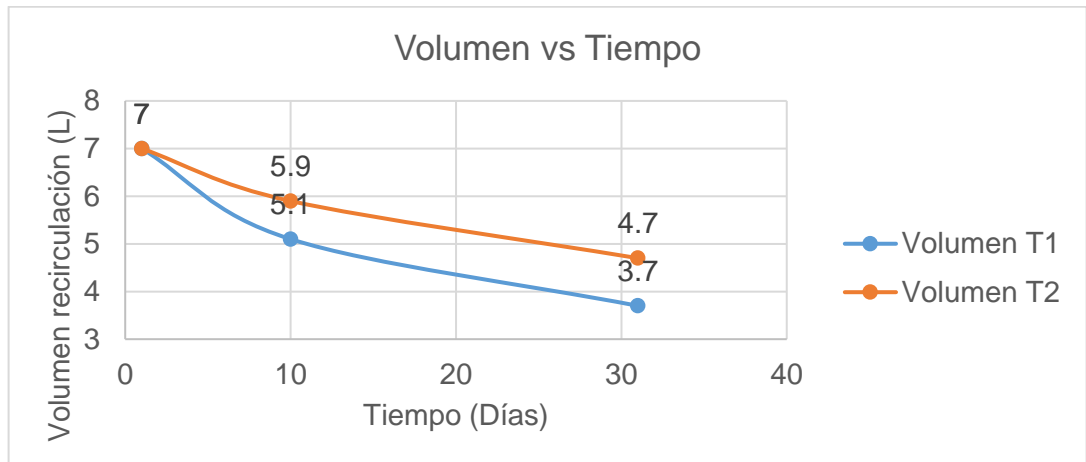
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-3 Volumen tomado para recircular en el tanque No. 2

	Fecha	Día Desde Muestra	Volumen Relacionado (L)
Tanque 2 Residuos Celda Antigua	9-sep-20	1	7
	18-sep-20	10	5,9
	9-oct-20	31	4,7

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3-6 Volumen recirculación vs. Tiempo



Fuente: Elaboración propia

3.9. MANÓMETROS

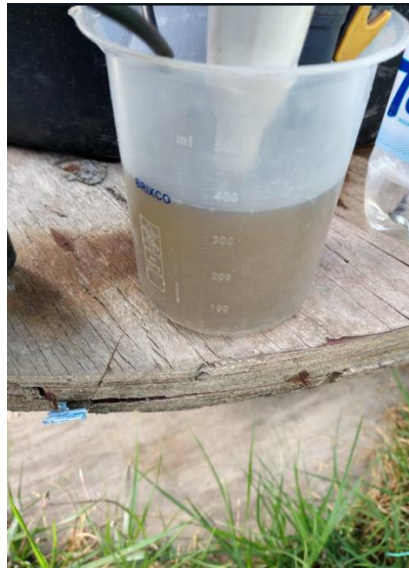
Los manómetros de glicerina, tanto para el tanque No. 1, como para el tanque No. 2 en ningún momento marcaron alguna diferencia, esto se puede asociar a que los tanques no fueron sellados herméticamente, por lo que los gases generados pueden salir hacia la atmosfera.

Además, la presión hidrostática del tanque que cuenta con una altura de alrededor 90cm, termina siendo despreciada para que el manómetro obtenga un valor en su medición.

3.10. COLOR

Finalmente, el color es parte de los parámetros del lixiviado que obtuvieron cambios significativos con el proceso de recirculación, como se puede apreciar en la Figura 3-3. Si bien es cierto, los lixiviados poseen tonos que van del café-pardo-grisáceo cuando provienen de residuos nuevos, hasta un color negro-viscoso cuando es de residuos antiguos, colores totalmente diferentes al presentado después de la recirculación.

Figura 3-3 Color del lixiviado en la muestra 3



Fuente: Registro fotográfico propio

4. RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADO PARA DISMINUIR EL CAUDAL QUE LLEGA A LA PTL

Finalmente, dando alcance al objetivo general de este trabajo de investigación, se analizará la recirculación directamente dentro del relleno sanitario Doña Juana para disminuir el caudal que llega a la planta de tratamiento de lixiviado.

Se usará el mismo método usado en el título 2.1.4 para la generación de lixiviado, sin embargo, para este análisis si se tomará en cuenta de la precipitación y del suelo de cobertura para tener un cálculo aproximado a la realidad.

Para la precipitación, se toman los datos de la estación meteorológica ubicada en el relleno sanitario relacionada con la cuenca del río Tunjuelo. Son datos históricos desde el año 2010 y se tomará el promedio por año.

Tabla 4-1 Datos históricos de estación meteorológica desde el 2010

DATOS HISTÓRICOS													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	Sumatoria
2010	0.3	27.1	25.8	193.1	144.3	91.6	104.1	40.8	42.9	89.7	158.7	82.1	1000.5
2011	27.7	60.9	119.2	202.5	115.3	60.9	96.5	21.8	44.2	120.5	194.4	98.5	1162.4
2012	45.5	55.7	106.7	152.7	43.8	44.1	81.0	52.6	21.8	145.0	65.7	51.2	865.8
2013	0.5	91.4	64.2	86.0	97.3	56.4	83.1	42.4	22.7	58.5	105.3	35.4	743.2
2014	10.0	22.1	26.5	58.5	69.6	107.6	87.5	44.5	28.6	57.7	90.5	26.3	629.4
2015	19.2	43.7	66.7	34.4	34.3	108.0	73.5	39.5	35.3	17.7	25.5	3.7	501.5
2016	4.4	18.5	45.0	89.4	104.4	40.5	47.4	68.6	46.1	59.3	112.8	25.1	661.5
2017	18.9	48.0	109.0	48.5	126.5	97.5	84.5	55.5	28.0	26.6	77.7	52.3	773.0
2018	44.7	11.3	50.7	128.9	156.3	39.7	94.1	42.4	37.1	42.3	75.0	0.2	722.7
2019	5.5	18.2	46.7	95.4	70.8	103.8	121.6	69.1	62.7	96.9	66.5	25.6	782.8
2020	35.1	35.2	27.8	47.9	60.2	93.4	91.6	33.5	76.1	27.7	36.2	0.0	564.7
Histórico	19.3	39.3	62.6	103.4	93.0	76.7	87.7	46.4	40.5	65.4	71.7	37.8	459.2
Máximo	45.5	91.4	119.2	202.5	156.3	108.0	121.6	69.1	62.7	145.0	194.4	98.5	1162.4

Fuente: CGR Doña Juana

Como se observa en la Tabla 4-1, el promedio anual de precipitación para Doña Juana es de 459.2 mm/año, es decir, 0.4592 (m³/m²)/año, que, a su vez, para este análisis equivaldría a 167.608 (m³/m²)/día.

Siendo 6,368 ton/día (UAESP, 2020), es decir alrededor de 5'776,954 kg/día, el promedio de residuos que ingresan al relleno, se procede a calcular el peso de los residuos individualmente según el porcentaje de la caracterización de estos. Seguidamente, se calcula la humedad de los residuos, con el peso húmedo de los

residuos teóricos, tomados del libro “*Gestión Integral de Residuos Sólidos*” (Tchobanoglous et al., 1994).

Tabla 4-2 Humedad total de residuos en RSDJ

Material	W _{RS}	Composición RS	kg/día 2020	kg/día Agua RS	W _{RS}
Orgánicos	70%	56.20%	3,246,648.19	2272653.74	39%
Papel y cartón	6%	16.82%	971,683.68	58301.02	1%
Vidrio	2%	1.00%	57,769.54	1155.39	0%
Plástico	2%	24.87%	1,436,728.48	28734.57	0%
Metales	2%	1.11%	64,124.19	1282.48	0%
TOTAL		100%	5,776,954.08	2362127.20	40.89%

Fuente: Elaboración propia

Para calcular el caudal del lixiviado producido por la celda de disposición, se debe calcular la capacidad de campo que tiene esta, en función del porcentaje de humedad de los residuos, el peso específico de estos y las dimensiones de la celda.

Se hallan las dimensiones con base en el promedio de ingreso diario (6,368 ton/día), y con una densidad contractual de 1.07 ton/m³ (UAESP, 2019), de tal manera que se requiere alrededor de 5,951 m³ por día. Teniendo una altura promedio de celda de 7m se halla el largo y ancho de la celda suponiendo que es un cuadrado, obteniendo los siguientes resultados:

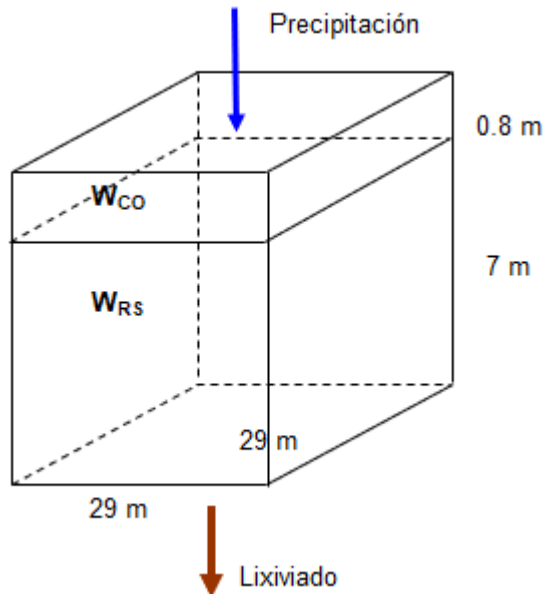
Tabla 4-3 Dimensiones de celda diaria en el RSDJ

Dimensiones de celda diaria		
Promedio de residuos x día	6368	ton/día
Densidad contractual	1.07	ton/m ³
Volumen de residuos al mes	5951	m ³
Altura promedio de celda	7.0	m
Área en planta	850	m ²
Dimensiones laterales	29	m

Fuente: Elaboración propia

Además, teniendo una altura promedio de cobertura en arcilla de 0.80 m, se obtiene unas dimensiones como las de la Figura 4-1.

Figura 4-1 Dimensión de celda de disposición con cobertura en arcilla



Fuente: Elaboración propia

Con la información consignada anteriormente, se calcula el volumen de los residuos húmedos, teniendo en cuenta el volumen de la celda (5,951 m³) y la humedad total de los residuos sólidos (40.89 %):

$$V_{RS} = \text{Volumen} * W_{RS}$$

$$V_{RS} = 5,951 \text{ m}^3 * 40.89\%$$

$$V_{RS} = 2,433.36 \text{ m}^3$$

También se calcula el volumen del suelo de cobertura, teniendo en cuenta el volumen del suelo de cobertura (672.8 m³) y la humedad total del suelo que es de alrededor (25 %):

$$V_{CO} = \text{Volumen} * W_{RS}$$

$$V_{CO} = 672.8 \text{ m}^3 * 25\%$$

$$V_{CO} = 168.20 \text{ m}^3$$

En cuanto a la capacidad de campo se debe calcular el peso dentro de la celda de residuos sólidos más la cobertura. Para este cálculo, se multiplica el volumen de la celda por el peso específico de los residuos que es de 1 ton/m³. De igual manera para la cobertura, se multiplica el volumen de la cobertura por el peso específico de esta que es de alrededor de 1.7 ton/m³; los dos valores se multiplican por mil para cambiar sus unidades a kilogramos:

$$W_{RS} = V_{celda} * \gamma * 1000$$

$$W_{RS} = \left(5,951 \text{ m}^3 * \frac{1 \text{ Ton}}{\text{m}^3} \right) * 1000$$

$$W_{RS} = 5'951,000 \text{ kg}$$

$$W_{CO} = V_{cobertura} * \gamma * 1000$$

$$W_{CO} = \left(672.8 \text{ m}^3 * \frac{1.7 \text{ Ton}}{\text{m}^3} \right) * 1000$$

$$W_{CO} = 1'143,760 \text{ kg}$$

Para el peso total, se debe tener en cuenta que es el valor de media celda más el peso de la cobertura

$$W_{TOTAL} = \frac{W_{RS}}{2} + W_{CO}$$

$$W_{TOTAL} = \frac{5'591,000}{2} + 1'143,760$$

$$W_{TOTAL} = 4'1119,260 \text{ kg} * 2.204622$$

$$W_{TOTAL} = 9'081,411.22 \text{ Lb}$$

Para el cálculo de la capacidad de campo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$cc = 0.6 - 0.55 * \left(\frac{W_{TOTAL} \text{ Lb}}{10000 + W_{TOTAL} \text{ Lb}} \right)$$

$$cc = 0.6 - 0.55 * \left(\frac{9'081,411.22 \text{ Lb}}{10000 + 9'081,411.22 \text{ Lb}} \right)$$

$$cc = 0.0506$$

Para el cálculo de volumen por capacidad de campo se multiplica la capacidad de campo por el volumen de la celda incluyendo la cobertura en arcilla:

$$V_{CC} = cc * Volumen$$

$$V_{CC} = 331.99 \text{ m}^3$$

Finalmente, se calcula el total del lixiviado generado por la celda, con la siguiente ecuación:

$$Lixiviado = P + V_{RS} + V_{CO} - V_{CC}$$

Donde:

P: precipitación

Vrs: volumen generado por residuos sólidos

Vco: volumen generado por suelo de cobertura

Vcc: volumen de capacidad de campo

$$\text{Lixiviado} = 0.1971 \text{ m}^3 + 2,435 \text{ m}^3 + 168.20 \text{ m}^3 - 331.99 \text{ m}^3$$

$$\text{Lixiviado} = 2,271.41 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Lixiviado} = 2'271,410 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

$$\text{Lixiviado} = 26.29 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Es decir, que una celda de disposición con una capacidad para un día produce alrededor de 26.29 L/s, que teniendo en cuenta el análisis realizado en el título 3 **ANÁLISIS DE RESULTADOS**, perfectamente se podría realizar la recirculación en alguna zona cerrada para evitar que este llegue directamente a la planta y a su vez tener los beneficios que trae este tratamiento anaerobio.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Partiendo de los resultados arrojados por el laboratorio, se puede observar que la recirculación de lixiviado en zonas cerradas (con residuos antiguos), trae grandes beneficios como lo son la disminución de DBO y DQO en porcentajes significativos.
- La recirculación en zonas operativas (con residuos nuevos), aunque en menor porcentaje, disminuye de igual manera parámetros como DBO y DQO, sin embargo, se evidencia que la recirculación se debe realizar aproximadamente dentro de los 10 primeros días, ya que después por la descomposición de los residuos adquiere más demanda química y bioquímica de oxígeno. Como se observa en la Gráfica 3-4 y Gráfica 3-5.
- Al comparar los datos de estudio de la recirculación y los datos de estudio antes del ingreso del lixiviado a la planta de tratamiento de lixiviados (PTL), se observa que los beneficios que traería la recirculación para la planta, ya que al tener menos carga contaminante reduce su tiempo de retención dentro de ella, lo que significa la optimización del tiempo y a su vez de costos.
- El lixiviado es un fluido con pH alcalina, ya que, en la mayoría de los datos, su pH es mayor a 8, pero al realizar la recirculación en residuos nuevos, el pH llega por debajo de 7, lo que tiende a ser un fluido ácido con tendencia a neutro.
- Teniendo en cuenta el análisis realizado para los beneficios que trae la recirculación de lixiviados, para el relleno sanitario Doña Juana se podría recircular alrededor de 26.29 L/s, caudal que no llegaría directamente a la planta de tratamiento de lixiviados y que a su vez mejora sus parámetros de llegada a la planta mediante este proceso anaerobio.

5.2. RECOMENDACIONES

- En caso de realizar un sistema de recirculación de lixiviados, ya sea superficial o interno, se debe plantear un buen mantenimiento a la línea de recirculación, el taponamiento de esta podría causar grandes problemas dentro de un relleno sanitario.
- A pesar de los beneficios que trae la recirculación, el mal uso de esta podría llevar a generar problemas en la estabilidad del relleno por la saturación que podría generar el líquido.
- Es conveniente mantener un programa de monitoreo y seguimiento a las diferentes zonas donde se realice la recirculación y poder tener un adecuado control del caudal que evacua la zona. Esto para controlar que el lixiviado no quede retenido en los residuos y provoque saturación en estos.
- Dentro del estudio realizado con la simulación de las dos celdas, los gases emitidos por los residuos como amoníaco (NH_3), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), entre otros, no fueron estudiados ni eran el objetivo de este trabajo de investigación. Sin embargo, es importante estudiar cómo la recirculación puede empeorar o mejorar la emisión de gases de los residuos, y si esta afecta la recolección de biogás.
- Otro aspecto importante que estudiar son las presiones. Qué tan profundo puede afectar la recirculación en las presiones bajo las que se encuentra un relleno sanitario, y si estas aumentan o disminuyen.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bilgili, M. S., Demir, A., & Özkaya, B. (2007). Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1–2), 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.012>
- Caicedo, B., Giraldo, E., Yamin, L., & Soler, N. (2002). The landslide of Dona Juana landfill in Bogota. A case study. *Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics (4th ICEG), Rio de Janeiro, Brazil, January*, 11–15.
- CAR. (2015). *Resolución 0827 de 2015*.
- Collazos, H. (1998). Deslizamiento de basura en el relleno sanitario Doña Juana. *Cepis*, 1998. https://rds.org.co/apc-aa-files/ba03645a7c069b5ed406f13122a61c07/deslizamiento_relleno_sanitario_do_a_juana.pdf
- Díaz Aliaga, S., & Reyes Huanchaco, A. M. (2006). *Evaluación de la recirculación de lixiviados producidos e un relleno sanitario a escala, para determinar el grado de incidencia en el asentamiento y el mejoramiento de su calidad*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Díaz, L. Y., & Vallejo, A. C. (2017). *Propuesta para el diseño del nuevo relleno sanitario para el municipio de Aguachica - Cesar*. Universidad Católica de Colombia.
- Francois, V., Feuillade, G., Matejka, G., Lagier, T., & Skhiri, N. (2007). Leachate recirculation effects on waste degradation: Study on columns. *Waste Management*, 27(9), 1259–1272. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.028>
- Garrido, J. L., Martínez, J. P., & Acosta, R. R. (1980). *Eliminación de los residuos sólidos urbanos*. Editores Técnicos Asociados. <https://books.google.com.co/books?id=IUpeSu-Y8WcC>
- Hernández-Berriel, M. C., Mañón-Salas, M. C., Buenrostro-Delgado, O., Sánchez-Yáñez, J. M., & Márquez-Benavides, L. (2014). Landfill leachate recirculation. Part I: Solid waste degradation and biogas production. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(10), 2687–2695. <https://doi.org/10.30638/eemj.2014.299>
- Jesús García Barcala. (2014). *La historia de la basura. ¿Hemos cambiado? - Ciencia Histórica*. Ciencia Historica. <http://www.cienciahistorica.com/2014/09/25/la-historia-de-la-basura-hemos-cambiado/>
- Jiménez, C. A. (2007). *Análisis de la recirculación de lixiviados en Doña Juana*.

Universidad Nacional de Colombia.

- Ledakowicz, S., & Kaczorek, K. (2004). Laboratory Simulation of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 39(4), 859–871. <https://doi.org/10.1081/ESE-120028398>
- López, M. E., & Santos, R. (2017). *La recirculación de lixiviados de rellenos sanitarios en biodigestores a escala de laboratorio*.
- Medina A., A. (2006). *La recirculación de los lixiviados y sus efectos en la compactación de Rellenos Sanitarios*. 94. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/997/MEDINAAREVALO.pdf?sequence=1>
- Mendoza, E. A., Márquez, L., Sánchez, J. M., Buenrostro, O., & Rutiaga, J. G. (2013). *Efectos de la recirculación de lixiviados sobre las propiedades físicas y químicas de los RSU sometidos a digestión anaeróbica*. 7.
- Decreto 0838 de 2005, Pub. L. No. 0830 de 2005 (2005).
- Montenegro, D. (2013). Estimación del efecto del lixiviado del Relleno Doña Juana sobre la calidad del agua Río Tunjuelo y su posible tratamiento en la PTAR Canoas. *Universidad Nacional de Colombia*, 1–136. <http://www.bdigital.unal.edu.co/45405/1/52480760.2013.pdf>
- NoticiasUnoColombia. (2017). *Sobrecarga en la planta de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana*. <https://www.youtube.com/watch?v=pkpHQA7zKCs>
- Palma H., J. H., Valenzuela T., P. I., & Espinace A., R. H. (2000). *Reducción de los tiempos de estabilización en rellenos sanitarios operados con recirculación de lixiviados tratados*. 10.
- R. Espinace A., J. Palma G., M. S. N., & M. C. Schiappacasse D., R. C. (1997). *Asentamientos en un vertedero controlado a escala con recirculación de líquidos lixiviados*.
- Reinhart, D. R. (1996). Full-Scale Experiences With Leachate Recirculating Landfills: Case Studies. *Waste Management & Research*, 14(4), 347–365. <https://doi.org/10.1177/0734242x9601400403>
- Reinhart, D. R., & Al-Yousfi, A. B. (1996). The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics. *Waste Management and Research*, 14(4), 337–346. <https://doi.org/10.1006/wmre.1996.0035>
- Šan, I., & Onay, T. T. (2001). Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 87(1–3), 259–271. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00290-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00290-4)
- Schiappacasse, M. C., Chamy, R., & Poirrier, P. (2008). Efecto de la recirculación

de lixiviado tratado en el comportamiento del relleno sanitario. *Revista AIDIS*, 1, 8.

Suna Erses, A., & Onay, T. T. (2003). Accelerated landfill waste decomposition by external leachate recirculation from an old landfill cell. *Water Science and Technology*, 47(12), 215–222. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0649>

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos* (2 vol.).

UAESP. (2019). *Informe de Disposición Final - Primer Semestre 2019*.

UAESP. (2020). *Relleno Sanitario Doña Juana*. Especiales UAESP - Relleno Sanitario Doña Juana. <http://www.uaesp.gov.co/especiales/relleno/>



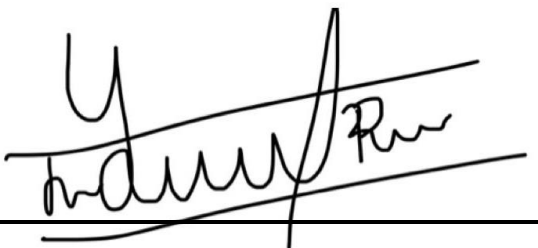
Firma del Estudiante.

Nombre del estudiante: Johan Mateo
Roa Sánchez

Código: 506853

**Firma del Asesor del Trabajo de
Grado**

Nombre: Felipe Santamaría Alzate



Firma del Estudiante.

Nombre del estudiante: José Yesit
Ardila Rodríguez

Código: 507068

FECHA: 17/11/2020