

**MODELO DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN LOS RESIDUOS
SOLIDOS DE ACUERDO CON EL NIVEL DE COMPACTACIÓN**



CORPORACION UNIVERSITARIA
AUTONOMA
DEL CAUCA

**YENNY ALEJANDRA ORTEGA CUAJIBOY
LUDY YURLEY PERAFAN DAZA**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYAN
2020**

**MODELO DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN LOS RESIDUOS
SOLIDOS DE ACUERDO CON EL NIVEL DE COMPACTACIÓN**



CORPORACION UNIVERSITARIA
AUTONOMA
DEL CAUCA

**YENNY ALEJANDRA ORTEGA CUAJIBOY
LUDY YURLEY PERAFAN DAZA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y
Sanitario**

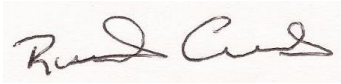
Director

M.S.C RONALD EDINSON CERÓN

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYAN
2020**

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado “Modelo de conductividad hidráulica en los residuos sólidos de acuerdo con el nivel de compactación”; una vez revisado el escrito final y aprobado la sustentación del mismo, lo autorizan para que realicen la gestión administrativa correspondiente para optar el título de: Profesional en Ingeniería Ambiental y Sanitaria.



Director
Ronald Edinson Cerón



Jurado
Cesar Julián Muños De La Rosa



Jurado
Arnold Arias Hoyos

DEDICATORIA

Dedico mi tesis a Dios por permitirme tener vida, salud y poder realizar uno más de mis propósitos.

A mis padres quienes han creído en mí siempre, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo lo que tengo, lo que ha contribuido a la consecución de este logro.

A mis amigos, compañeros y todas aquellas personas que de una otra manera ha contribuido para el logro de mis objetivos

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias.

Le doy gracias a mis padres por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

Le agradezco el apoyo y dedicación a mi director Ronald Cerón M.S.C en ingeniería ambiental por su constante ayuda incondicional, la cual fue fundamental para la elaboración del proyecto.

A mis amigos por confiar y creer en mí y haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidare.

Ludy Perafan

DEDICATORIA

Dedico de manera especial a Dios, por haberme dado la vida, por sus bendiciones y permitir este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre, por ser el pilar mas importante y demostrarme siempre su amor y apoyo incondicional. Te amo mami.

Dedico con mucho cariño a mis hermanas(os) por el apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida, por el amor brindado y apoyo moral.

A mis amigos, compañeros y todas aquellas personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

AGRADECIMIENTOS

El principal agradecimiento a Dios por ser la luz incondicional que ha guiado mi camino, por ser mi fortaleza para seguir adelante y por estar presente siempre en mi vida.

Te agradezco a ti madre por confiar siempre en mí, por estar cuando más te necesito, por cada palabra, consejos, regaños y por brindarme tanto amor.

Agradezco a mi director Ronald Cerón M.S.C quien con su experiencia y conocimiento nos orientó en la investigación, por sus consejos, enseñanzas, apoyo y sobre todo amistad brindada.

A mis amigos con todos los que compartí dentro y fuera de las aulas. Aquellos que se convierten en amigos de vida y aquellos que serán mis colegas, gracias por todo su apoyo y diversión.

Yenny Ortega

Tabla de contenido

RESUMEN.....	12
INTRODUCCION	14
1. CAPITULO I: PROBLEMA.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 JUSTIFICACION	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
2. CAPITULO II: MARCO TEORICO Y REFERENTES CONCEPTUALES	19
2.1 ESTADO DEL ARTE	19
2.2 BASES TEORICAS	21
2.2.1 Relleno sanitario.....	21
2.2.2 Residuo sólido o desecho	21
2.2.3 Lixiviados de un relleno sanitario	22
2.2.4 Conductividad hidráulica saturada	22
2.2.5 Zona Saturada o Zona de Presiones Intersticiales Positivas	23
2.2.6 Zona Parcialmente Saturada o Zona de Presiones Intersticiales Negativas	23
2.2.7 Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados.....	23
2.2.8 Conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados.....	24
2.2.9 Ley de Darcy. Conductividad hidráulica	24
2.2.10 Modelación de la producción de lixiviados.....	25
2.2.10.1 Modelo Thornthwaite.....	26

2.2.10.2	Modelo de Help.....	26
2.2.10.3	Modelo FILL.....	28
3.	CAPITULO III: METODOLOGIA.....	29
3.1	FASE 1: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN:.....	30
3.1.1	Actividad 1: Recolección de información:.....	30
3.1.2	Actividad 2: Determinar las dimensiones y características de las columnas.....	31
3.1.3	Actividad 3: Construcción de las columnas.....	31
3.1.4	Actividad 4: Determinar el tipo de residuo.....	32
3.1.5	Actividad 5: Relleno de las columnas para una densidad de 0,1 ton/m ³ 33	
	Fuente: propia.....	34
3.1.6	Actividad 6: Construcción del alimentador.....	34
3.2	FASE 2: MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	35
3.2.1	Actividad 1: Armado de sistema.....	35
3.2.2	Actividad 2: Medición de caudales de entrada y salida.....	36
3.2.3	Actividad 3: Variación de las densidades de compactación.....	38
3.2.3.1	Variación de la densidad a 0,127 tonm³	38
3.2.3.2	Variación de la densidad a 0,163 tonm³	39
3.2.3.3	Variación de la densidad a 0,2 tonm³ ;.....	40
3.3	FASE 3: FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	41
3.3.1	Actividad 1: Regresión matemática.....	41
3.3.2	Actividad 2: Formulación del modelo matemático.....	46
3.3.3	Actividad 3: Comparación estadística de las columnas.....	48
4.	CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS.....	52

4.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS	52
4.2	DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	53
4.3	FORMULACIÓN DE MODELO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA. ...	58
4.4	COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS COLUMNAS	66
5.	CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
5.1	CONCLUSIONES.....	69
5.2	RECOMENDACIONES.....	70
	Bibliografía.....	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Formato para consignación de datos de la medición de la conductividad hidráulica	38
Tabla 2. Corrección por viscosidad	47
Tabla 3. Tabla F para 95%de probabilidad.....	50
Tabla 4. Tabla T para el 95% de probabilidad	51
Tabla 5. Consignación de datos para la medición de la conductividad hidráulica a densidad de 0,1ton/m ³	54
Tabla 6. Consignación de datos para la medición de la conductividad hidráulica a densidad de 0,127 ton/m ³	55
Tabla 7. Consignación de datos para la medición de la conductividad hidráulica a densidad de 0,163 ton/m ³	56
Tabla 8. Consignación de datos para la medición de la conductividad hidráulica a densidad de 0,2 ton/m ³	57
Tabla 9. Resultados de (T1 y T2)	58
Tabla 10. Caudal promedio de cada ensayo	59
Tabla 11. Carga hidráulica para cada ensayo	60
Tabla 12. Consignación de datos - regresión matemática.....	61
Tabla 13. Conductividad hidráulica para cada densidad	61
Tabla 14. Modelo de conductividad hidráulica.....	65
Tabla 15. Modelo con una densidad de 0,5 ton/m ³	65
Tabla 16. Modelo con una densidad de 0,2 ton/m ³	65
Tabla 17. Comparación estadística de las columnas de residuos	66
Tabla 18. Resultado F tabulado.....	67
Tabla 19. Resultado T tabulado.....	68

LISTA FIGURAS

Figura 1. Dispositivo de conductividad hidráulica.....	25
Figura 2. Simulación modelo Help	27
Figura 3. Tubería 6" para columnas piloto	31
Figura 4. Construcción de las columnas piloto.....	32
Figura 5. Determinación del tipo de residuos	33
Figura 6. Pesaje de grava	34
Figura 7. Llenado de las columnas	34
Figura 8. Construcción del alimentador.....	35
Figura 9. Instalación de las columnas y el alimentador.....	36
Figura 10. Recolección de agua lluvia	37
Figura 11. Medición de líquido expulsado de la columna.....	37
Figura 12. Esquema área piloto	43
Figura 13. Esquema carga hidráulica.....	44
Figura 14. Construcción e instalación de las columnas piloto.....	52
Figura 15. Regresiones matemáticas.....	62

RESUMEN

Los lixiviados generados en sitios de disposición final representan un riesgo en la contaminación de las aguas freáticas y la inestabilidad de la masa de residuos. Estos líquidos representan un problema ambiental que preocupa al hombre debido a los impactos negativos generados al tener contacto con el suelo y el agua, por esta razón se considera esencial tener conocimiento sobre el manejo adecuado de los lixiviados y gases.

El presente trabajo se enfoca en formular un modelo matemático para estimar la velocidad de percolación del lixiviados en residuos sólidos de acuerdo con el nivel de compactación. Hoy en día, los métodos más conocidos y usados se basan en el balance hidrológico, tendiendo cada vez hacia la descripción más puntual de los procesos hidráulicos dentro del relleno.

La metodología empleada radica en la construcción y ubicación de dos columnas de residuos sólidos con diferentes medios de soporte a escala piloto, abastecidas por un alimentador de agua lluvia, luego de armar el sistema se realiza la medición de caudales y variación de las densidades de compactación. Una vez obtenido los resultados se formula el modelo matemático y se realiza una comparación estadística de las columnas.

De acuerdo con los resultados de coeficiente de relación de las columnas 1 y 2 fueron 0,997 y 0,9841 respectivamente, se establece el resultado más cercano a 1, y por correlación de datos se adopta el modelo de la columna 1. Se realizó la comparación estadística con las dos columnas con el fin de saber si el comportamiento del líquido dentro de cada columna es similar o no, lo cual concluirá que el modelo se puede aplicar en condiciones reales de un sitio de disposición final.

Palabras claves: Conductividad hidráulica, lixiviados, presión de poros, compactación, cohesión, percolación.

ABSTRACT

Leachates generated in final disposal sites represent a risk in groundwater contamination and instability of the waste mass. These liquids represent an environmental problem that worries man due to the negative impacts generated by having contact with the soil and water, for this reason it is considered essential to have knowledge about the proper management of leachates and gases

The present work focuses on formulating a mathematical model to estimate the percolation rate of leachate in solid waste according to the level of compaction. Today, the best known and most widely used methods are based on the hydrological balance, tending increasingly towards a more precise description of the hydraulic processes within the landfill.

The methodology used was based on the construction and location of two columns of solid waste with different means of support on a pilot scale, supplied by a rainwater feeder, after assembling the system, the flow measurement and variation of the compaction densities is carried out. . Once the results are obtained, the mathematical model is formulated and a statistical comparison of the columns is made.

According to the results of the coefficient of relationship of columns 1 and 2 were 0.997 and 0.9841 respectively, the result closest to 1 is established, and the model of column 1 is adopted by correlation of data. statistics with the two columns in order to know if the behavior of the liquid within each column is similar or not, which will conclude that the model can be applied in real conditions of a final disposal site.

KEYWORDS: Hydraulic conductivity, leachate, pore pressure, compaction, cohesion, percolation.

INTRODUCCION

Uno de los problemas ambientales que ocasiona grandes afectaciones sobre el suelo y el recurso agua, es la generación de lixiviados procedentes de la disposición final de los residuos sólidos en los sitios de disposición final. Estos lixiviados procedentes generalmente por la carga orgánica presente en los residuos sólidos; el volumen de este líquido aumenta por la influencia de factores climáticos como la precipitación y la temperatura [1].

Los lixiviados procedentes de un sitio de disposición final deben ser captados y tratados periódicamente, mediante la ubicación de tuberías dentro de las cárcavas, en este proceso se presentan algunas fallas como la infiltración de lixiviados al suelo, o la carencia de un pretratamiento de estos líquidos antes de ser vertidos a una fuente hídrica o al alcantarillado. Por esto se generan los principales impactos ambientales sobre el agua, y se alteran las condiciones normales de una cobertura vegetal y la muerte de especies [2].

Las malas prácticas de manejo y control en los sitios de disposición final pueden convertirlos en una potencial fuente de contaminación hidrogeológica, debido al riesgo que existe en el caso de que los lixiviados se infiltren y lleguen al agua subterránea, representando una alta fuente de toxicidad y un alto riesgo de contagio de enfermedades cancerígenas, por lo que sería oportuna su reducción hasta un mínimo posible, para lo cual es necesario conocer el balance de agua en un sitio de disposición final [3].

Para la descripción del balance de agua y la estimación de la probable cantidad de lixiviados generados, existen diferentes métodos y formulas. sin embargo, por la complejidad y gran número de factores influyentes, los modelos siempre representan una simplificación, por lo que los resultados obtenidos serán una estimación o aproximación de la realidad hasta cierto limites, cuyo éxito debe aprobarse después, con la aplicación en el relleno sanitario en función.

1. CAPITULO I: PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los vectores de contaminación que se originan en los vertederos y rellenos sanitarios señalan que las causas principales de la contaminación ambiental en sitios de disposición final son los lixiviados; son líquidos contaminantes que se producen durante la descomposición y fermentación de la materia orgánica, debido a la propia humedad del residuo y al agua de lluvia siendo los dos factores principales que aceleran la generación de lixiviados [4]. La problemática que estos generan son dos; la contaminación de las aguas freáticas [5] y la inestabilidad de la masa de residuos [6].

Los problemas más frecuentes de contaminación de las aguas freática se dan por la filtración de lixiviados que contienen compuestos potencialmente contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos, compuestos nitrogenados, bacterias y virus [7]. Limitando su uso y generando consecuencias en la salud humana [8]. El contenido de humedad de los residuos sólidos varía según muchos factores, como las condiciones climáticas, composición inicial de los residuos, el proceso de operación del relleno, la tasa de descomposición biológica, la capacidad y funcionamiento de los sistemas de recolección de lixiviados y el sistema de recubrimiento. [9]

Estudios indican que en el 71 % de los casos los lixiviados escapan de un sitio de disposición final durante el ciclo anual. El problema es más grave durante la estación de lluvias donde 46 % de un sitio de disposición final pierden el control y se escapan los lixiviados. Esto es además del 15 % de los casos en que los lixiviados escapan a diario y del 10 % de los casos que “a veces” tienen escapes. Es decir, el lixiviado escapa de un sitio de disposición final de manera constante, pero con periodos irregulares. Se puede afirmar que 7 de cada 10 sitios de disposición final tiene un problema de escape de lixiviados durante al menos 3 meses por cada año. Se tiene

que tomar en cuenta que aproximadamente 80 % de la producción anual de lixiviados se genera de manera concentrada en los meses de la temporada de lluvias en cada localidad [10].

Estos líquidos que escapan pueden afectar directamente a zonas que se encuentran en predios cercanos al vertedero y provocar contaminación en las fuentes de aguas subterráneas, ríos y costas, ocasionando problemas serios al medio ambiente y representan un grave e irreversible peligro para la salud humana, sumándose a los anteriores problemas la saturación de líquido dentro de la masa de residuos ocasiona problemas técnicos. [11]

La inestabilidad que generan los lixiviados en los rellenos sanitarios puede conllevar a la reducción de la estabilidad de la masa de residuos por el aumento de la presión de poros, lo que genera una disminución en la cohesión de los residuos sólidos disminuyendo el esfuerzo cortante sobre las capas de residuos, generando una línea de falla que ocasiona el desplazamiento de estos y derrumbes como los ocasionados en el relleno sanitario de Doña Juana en abril del presente año [12]. Estos fenómenos se pueden generar por las sobrepresiones ocasionadas como consecuencia de la inadecuada captación y conducción de los gases producto de la descomposición de los residuos sólidos [13].

En septiembre de 2001 sucedió en Cali un derrumbe de 350.000 toneladas de desechos sobre el canal de la C.V.C sur, generando un aumento en los niveles de contaminación del río Cauca [14]. El problema radica en el indebido tratamiento de los lixiviados que están contaminando las aguas subterráneas [15]. Popayán no ha sido ajeno a esta problemática ya que en el año 1991 en el relleno municipal El Ojito ubicado en la vereda cajete se presentó un desplazamiento en masa de 150000 ton de residuos sólidos debido a la saturación de estos por el inadecuado sistema de evacuación y drenaje de lixiviados, lo que generó un aumento en la presión de poros [16]. Esto se puede presentar nuevamente en el relleno sanitario Los Picachos

ubicado en la vereda La Yunga, debido a que en febrero de 2019 la CRC logró evidenciar a partir de resultados de laboratorio que las aguas que afloran por debajo del sistema de impermeabilización fueron contaminadas por un escape de lixiviados [17].

1.2 JUSTIFICACION

La humedad de los residuos debido a la falta de una separación en la fuente y el inadecuado almacenamiento que ponen los residuos en contacto con la lluvia son los dos factores principales que aceleran la generación de lixiviados, este líquido arrastra todo tipo de sustancias nocivas que en ellas se han encontrado hasta 200 compuestos diferentes [18]. Esto preocupa al hombre debido a los alcances negativos que estos contaminantes generan al tener contacto con el suelo y agua, por esta razón los lixiviados son reconocidos como un importante problema ambiental y su evaluación y gestión de riesgos se considera esencial.

El lixiviado es considerado como el principal y gran contaminante generado en un relleno sanitario donde se liberan diferentes compuestos debido a la degradación de los residuos sólidos entre ellos los lixiviados y gases, los cuales representan una amenaza ambiental. Se han realizado numerosos estudios relacionados con la afectación significativa de la infiltración de los lixiviados al subsuelo [19].

Por esto es necesario tener el conocimiento sobre las condiciones actuales y futuras de la distribución de los líquidos y gases contenidos en el interior de la masa de los rellenos sanitarios; esta es una de las razones por la cual se da la necesidad de realizar una investigación a nivel de laboratorio, que permita medir velocidades de percolación dentro de una masa de residuos sólidos de acuerdo con su nivel de compactación y generar un modelo de conductividad hidráulica que permita medir el tiempo, tipo y nivel de evacuación de los lixiviados producidos por la descomposición de los residuos sólidos.

De acuerdo con los antecedentes se ha logrado identificar que en un sitio de disposición final la masa de residuos es una masa inestable debido a las diferentes porosidades de los residuos, deficiencias de la operación, compactación de los residuos, acumulación de gases ocasionadas por una inadecuada evacuación donde se empieza acumular bolsas de aire e inestabilidad de los taludes, aumento de los lixiviados por las precipitaciones y aumento de residuos sólidos orgánicos. se desconocen muchas variables tales como, el grado de homogeneidad y continuidad de las diferentes capas construidas, los drenajes filtrantes, tanto de líquidos como de gases por eso es necesario tratar correctamente los gases y lixiviados para reducir la presión de poros y así generar una mejor cohesión de los residuos sólidos y de esta manera evitar la alteración de las condiciones externas de estabilidad. [20]

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Realizar un modelo de predicción de la conductividad hidráulica de los lixiviados generados en una masa de residuos sólidos teniendo en cuenta el nivel de compactación.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir las columnas de residuos sólidos con diferentes niveles de compactación
- Medir la conductividad hidráulica dentro de las columnas de residuos de acuerdo con la compactación.
- Formular un modelo matemático para la estimación de la velocidad de percolación del lixiviado en las masas de residuos.

2. CAPITULO II: MARCO TEORICO Y REFERENTES CONCEPTUALES

2.1 ESTADO DEL ARTE

La conductividad hidráulica de los suelos constituye un parámetro de gran importancia ya que describe la movilidad del agua subsuperficial o subterránea, representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. El flujo de agua en medios porosos está gobernado por la ley experimental descubierta por Henry Darcy en 1856 [21]. En los sitios de disposición final; la conductividad hidráulica es supremamente importante, ya que esta dicta el flujo y la distribución de lixiviado infiltrado en los residuos. En general la conductividad hidráulica de cualquier medio poroso es primordialmente una función de la interconexión entre los vacíos [22].

En Antioquia Colombia en el año 2009 se revisaron y analizaron los modelos desarrollados para estimar los caudales de lixiviados que se generan en un relleno sanitario. Los modelos analizados fueron de tipo hidrológico, de biodegradación de residuos sólidos e integrados. Se seleccionaron los modelos de mayor aplicación y aceptación para modelar las condiciones operativas del relleno sanitario El Guacal (Heliconia – Antioquia, Colombia). Igualmente, se identificaron las limitaciones y desventajas de los modelos desarrollados. Teniendo en cuenta las debilidades de los modelos seleccionados, se desarrolló un modelo de balance hídrico para estimar los aportes de escorrentías y lixiviados generados en cada una de las etapas de evolución del relleno sanitario El Guacal, desde su construcción hasta su clausura. [23].

El modelo funciona como una hoja de cálculo donde se ingresan los datos recopilados en cada una de las etapas las cuales representan la evolución constructiva y operativa del relleno y los procesos determinantes en los aportes

de líquidos. A partir de ecuaciones de balance se da la estimación de la cantidad de líquidos y se logra la modelación para analizar las variaciones de los caudales de lixiviados y escurrientías a lo largo de todo el proceso evolutivo del relleno sanitario [23].

Según un estudio realizado en Tingo María - Perú en el año 2016 se utilizó el modelo de HELP (evaluación hidrológica de rellenos sanitarios) para la estimación de la producción de lixiviados y el movimiento de agua a través del relleno sanitario Huayna Cápac desarrollado por la Estación Experimental Waterways del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para la Agencia de Protección Ambiental Federal (USEPA). [24].

Este modelo simula el balance hídrico de un relleno sanitario, basado en un modelo cuasi bidimensional, se logró la simulación de producción de lixiviado para el relleno sanitario durante cinco años y se determinó que el porcentaje de agua, producto de la precipitación que se convierte en lixiviado es superior al 50% [24].

En el año 2019 en Toluca México se realizó un estudio sobre la cuantificación del volumen de lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos los cuales están ubicados en la cuenca del Valle de Toluca. Además, con el propósito de tener una visión más amplia del comportamiento de la producción de lixiviados se realizó el análisis tomando como referencia tres escenarios diferentes de años hidrológicos. se seleccionaron dos métodos: el Modelo de Balance Hidrológico (WBM, por sus siglas en inglés) y el modelo de Evaluación Hidrológica de Rellenos Sanitarios (HELP, por sus siglas en inglés). [25].

Se realizó la recopilación, análisis y tratamiento de la información meteorológica necesaria para la estimación del volumen de lixiviados. Se eligieron 8 sitios de estudio; 5 de ellos no controlados y 3 rellenos sanitarios a partir de los cuales se

tienen los resultados de la cuantificación de la generación de los lixiviados, con los que se puede apreciar como es el comportamiento de la aparición de los lixiviados y como varía su cantidad con relación a la precipitación registrada. Los resultados reflejan que la producción de lixiviados presenta una similitud para los ocho sitios, ya que la producción de lixiviados está en función de la precipitación registrada. Por otra parte, el modelo HELP refleja una clara distinción entre los sitios no controlados y los rellenos sanitarios, dichas diferencias se atribuyen principalmente al acomodo y número de capas que presentan los rellenos sanitarios. Se tiene que los resultados obtenidos por el modelo WBM se encuentran aproximadamente un 50% arriba de lo estimado por el modelo HELP [25].

2.2 BASES TEORICAS

2.2.1 Relleno sanitario

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 sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.

2.2.2 Residuo sólido o desecho

Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en aprovechables y no aprovechables. Igualmente, se consideran como residuos sólidos, aquellos provenientes del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda

de árboles [26].

2.2.3 Lixiviados de un relleno sanitario

Los lixiviados son un líquido que se forma por la descomposición de los materiales que constituyen los residuos sólidos, ya sea por las mismas características de los componentes de los residuos y/o por el contacto de estos con el agua que logra infiltrar en el relleno, dando como resultado una sustancia con elevadas cargas orgánicas, metales pesados, ácidos, sales y microorganismos, convirtiéndolos en un contaminante altamente agresivo para el ambiente. La composición media de estos líquidos varía según la localización geográfica, edad y el tipo de residuo depositado en el vertedero; sin embargo, todos los lixiviados coinciden en presentar una alta carga orgánica contaminante [27].

Con relación a la localización geográfica, los caudales de lixiviados y su concentración de contaminantes están estrechamente relacionados con la precipitación, la escorrentía superficial, la infiltración, las pérdidas por evaporación y la intrusión de aguas subterráneas que se filtran a través del vertedero. La edad del relleno sanitario también influye en la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos en los lixiviados.

Los parámetros básicos de caracterización de un lixiviado son, entre otros: carga orgánica, pH, concentración de sólidos disueltos y en suspensión, dureza, concentración en fosfatos y nitratos, etc.

2.2.4 Conductividad hidráulica saturada

La conductividad tiene unidades $[L T^{-1}]$, la cual es equivalente a la movilidad que es definida como la relación entre la permeabilidad, k y la viscosidad cinemática, que tiene unidades $[L^3 M^{-1} T]$. La conductividad hidráulica ($K = \rho g k / \mu$) puede ser dividida en dos términos, la fluidez ($\rho g / \mu$) y la permeabilidad intrínseca (k). La permeabilidad intrínseca es función de la estructura del poro y su geometría y es una propiedad

solamente del medio, con unidades [L-2]. [28]

2.2.5 Zona Saturada o Zona de Presiones Intersticiales Positivas

Es aquella limitada superiormente por la superficie freática y en donde el agua llena todos los espacios vacíos o poros existentes en el medio, y se encuentra experimentando presiones positivas en relación con la presión atmosférica. [29]

2.2.6 Zona Parcialmente Saturada o Zona de Presiones Intersticiales Negativas

Está limitada inferiormente por la superficie freática y superiormente por la superficie del terreno, usualmente se le conoce como zona vadosa o zona de aireación y en ella se pueden distinguir tres subzonas: la primera de ellas es la sometida a evapotranspiración la cual está comprendida entre la superficie del terreno y los extremos radiculares de la vegetación; la segunda es la intermedia que se ubica debajo de la anterior pero que no presenta formaciones radiculares y, la tercera es la capilar en la cual los poros se hallan saturados pero el agua de poros presenta una succión (presión inferior a la atmosférica) por efecto del ascenso capilar desde la zona saturada (cuya superficie se encuentra a presión atmosférica). El límite entre las subzonas capilar e intermedia puede ser o no claramente apreciable dependiendo de las características del suelo. [29]

2.2.7 Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados

El movimiento del agua en el suelo se controla por dos factores: la resistencia de la matriz del suelo para fluir agua, y las fuerzas que actúan en cada elemento o unidad de agua del suelo [30]. La ley de Darcy, la ecuación fundamental que describe el movimiento de agua en el suelo, relaciona la proporción de flujo con estos dos factores. El flujo saturado ocurre cuando la presión del agua de poros es positiva; es decir, cuando el potencial matricial del suelo es el cero. En la mayoría de los suelos esta situación tiene lugar cuando aproximadamente el 95% del espacio del poro total está lleno con agua. El restante 5% está lleno con el aire

atrapado. [31]

2.2.8 Conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados

Es bien reconocido y confirmado experimentalmente el hecho de que la ley de Darcy es válida para flujo de agua en medios parcialmente saturados siempre y cuando se tenga en cuenta la dependencia de la conductividad hidráulica con el contenido de humedad. Algunos científicos como Childs y Collis – George Juang y Holtz, (1986) encontraron experimentalmente que el valor de K es función de la humedad volumétrica del suelo, θ . La validez de esta teoría radica en la suposición que el arrastre de fluido en la interfase aire – agua es despreciable. El comportamiento general de la función $K(\theta)$ está bien establecido, gracias a investigaciones de Richards, Moore, Childs y Collis-George, Juang & Holtz, (1986) entre otros investigadores en el área de la hidráulica de suelos y extracción de petróleo. Se ha encontrado que K decrece muy rápidamente a medida que el contenido de humedad disminuye respecto al valor de saturación. Algunas de las razones para este comportamiento son las siguientes:

- La sección transversal disponible para el flujo decrece con θ .
- Los poros de mayor tamaño son los primeros que se desocupan al disminuir la humedad. El cambio de la conductividad hidráulica de un medio poroso es directamente proporcional al cuadrado del radio de los poros, mientras que la humedad es proporcional a la primera potencia de dicho radio, por lo que se puede esperar que K decrezca mucho más rápidamente que θ .
- A medida que θ decrece, se incrementa la posibilidad de que parte del agua quede atrapada en poros y cuñas aisladas de la red tridimensional general de agua. Una vez la continuidad ha sido rota, no puede haber flujo en fase líquida [32].

2.2.9 Ley de Darcy. Conductividad hidráulica

Henry Darcy Ingeniero Francés realizó un experimento sobre el movimiento del

de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua.

Para poder prever y cuantificar la generación, composición y comportamiento de los lixiviados, y cómo controlarlos o tratarlos, se requiere saber el tiempo que tardan los lixiviados en aparecer y la cantidad aproximada que se genera a lo largo de la vida del relleno sanitario. Esta información resulta ser muy útil para diseñar los dispositivos de manejo de lixiviados, tales como líneas de conducción o sistemas de recirculación, laguna de evaporación o plantas de tratamiento.

Existen diferentes métodos para el cálculo de la producción de lixiviado, los cuales son aplicados para el diseño y proyección de los sistemas de captación, conducción y tratamiento de lixiviados [34].

2.2.10.1 Modelo Thornthwaite

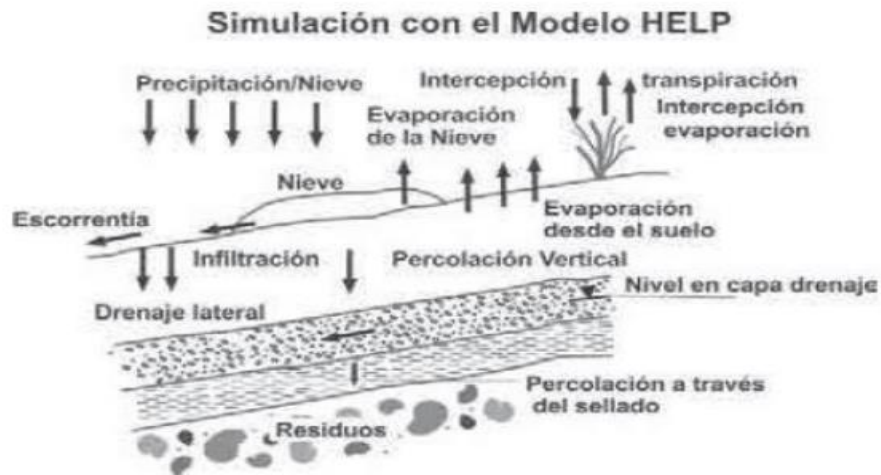
Metodología ampliamente conocida desarrollada por Thornthwaite y Mather (1957). plantean para la Environmental Protection Agency (EPA) una adaptación para estimar la producción de lixiviados en vertederos. En esta aproximación se establecen coeficientes de escorrentía específicos para vertederos y valores de almacenamientos de humedad para los residuos. En síntesis, el agua de precipitación se acumula de forma continua en la masa de residuos durante años. Así, la producción de lixiviado en vertederos jóvenes es menor, existen caminos preferenciales y gran parte del drenaje se produce por estos caminos. En vertederos viejos, esos macroporos o caminos preferenciales están parcial o totalmente obstruidos. Por tanto, el agua probablemente percola a través del residuo hasta alcanzar su nueva capacidad de campo y fluye a través de la matriz. La descarga no muestra fuertes oscilaciones [35].

2.2.10.2 Modelo de Help

(Hydrological Environmental Landfill Performance) HELP (Hydrological Environmental Landfill Performance) es un modelo cuasi-bidimensional desarrollado por la EPA, para la simulación de los procesos hidrológicos en rellenos sanitarios,

la evaluación de los diseños para vertederos y la estimación de las tasas de recarga de las aguas subterráneas. El carácter cuasi-bidimensional se debe a que combina un modelo unidimensional de flujo vertical con otro de drenaje horizontal/lateral, cuyos resultados se aúnan en las salidas de los sistemas de drenaje lateral. La mayoría de los modelos existentes que simulan el balance hídrico de un vertedero evalúan únicamente el flujo en una dimensión (flujo vertical a través de las distintas capas del vertedero) obviando el cálculo de flujos laterales. Se trata de un modelo determinista y cuantitativo que permite estimar los distintos componentes del balance hidráulico que se produce en un vertedero, incluyendo el volumen de lixiviados producidos en un determinado periodo de tiempo, o el espesor saturado en las capas [36].

Figura 2. Simulación modelo Help



Fuente: Universidad Sergio Robledo, Postgrado de Recursos Naturales (2002)

Los resultados proporcionados por el modelo permiten comparar la generación potencial de lixiviados de distintas alternativas de diseño, con el fin de poder seleccionar aquellos sistemas de drenaje o de recogida de lixiviados más apropiados. Además, la predicción de los volúmenes de lixiviados generados permite dimensionar adecuadamente la balsa de lixiviados [37].

2.2.10.3 Modelo FILL

Es un modelo de dos dimensiones, para simular el flujo de humedad en estado transitorio. Esta herramienta es aplicable a la predicción de los caudales de lixiviados a través de los vertederos. El modelo utiliza una ecuación de onda cinemática para calcular la escorrentía, teniendo en cuenta la pendiente y la rugosidad de la superficie. El análisis de la infiltración se basa en los métodos de solución de Philip (1969). Varios documentos de Demtracopoulos (1984; Korfiatis y Demtracopoulos, 1986; Demtracopoulos et al., 1986; Demtracopoulos, 1988) describen técnicas utilizadas para calcular la cabeza hidráulica del lixiviado en la zona saturada de un vertedero. La ecuación principal del modelo FULLFIL se basa en el principio de conservación de masa de usos, y éste utiliza el movimiento de la cabeza hidráulica de lixiviados para calcular el caudal de estos líquidos [38]

3. CAPITULO III: METODOLOGIA

El desarrollo del trabajo presentado tiene un enfoque investigativo cuantitativo, y se logra realizar en tres fases.

Enfoque de la investigación:

Para el desarrollo de la investigación se utilizó el enfoque cuantitativo, teniendo que este es aquel que utiliza datos cuantitativos para recopilar información concreta, como cifras que permiten obtener resultados estructurados y estadísticos. La investigación cuantitativa ofrece la capacidad de sacar conclusiones generales de la investigación y tomar decisiones basadas en la información.

Alcance de la investigación:

Esta investigación se enmarca en el tipo correlacional debido a que se desarrolló mediante la construcción de dos columnas de residuos sólidos, teniendo una fuente en común para la determinación de dos variables con resultados distintos, los cuales conllevarán a relacionar la variable de la densidad de los residuos sólidos y la velocidad de percolación en estos, con el fin de brindar una modelo predictivo sobre los caudales generados por percolación de agua lluvias sobre un área determina en los depósitos de residuos.

Metodología de la investigación:

La investigación de este proyecto se desarrolló de acuerdo con la metodología, la cual consiste principalmente en alcanzar los objetivos planteados, donde el proyecto se realizó en tres fases, en la fase 1 se diseña y construyen dos columnas de residuos sólidos con diferentes niveles de compactación a escala piloto, en la fase 2 se realiza la medición de la conductividad hidráulica y por último en la fase 3 se formuló el modelo matemático.

fase 1: Diseño y construcción	fase 2: Medición de la conductividad hidráulica	Fase 3: formulación del modelo matemático
<ul style="list-style-type: none"> • Busqueda de informacion bibliografica • Determinar las dimensiones y características de las columnas • construcción de las columnas • determinar el tipo de residuos • llenado de columnas • construcción del alimentador 	<ul style="list-style-type: none"> • Armado de sistema • Medición de caudales de entrada y salida • Variación de las densidades de compactación. 	<ul style="list-style-type: none"> • regresión matemática • formulación del modelo matemático • comparación estadística de las columnas

Fuente: Propia

3.1 FASE 1: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN:

El diseño y construcción data del proceso que se llevó a cabo para la construcción e implementación de las columnas de residuos. Para el desarrollo de esta fase se llevó a cabo las siguientes actividades.

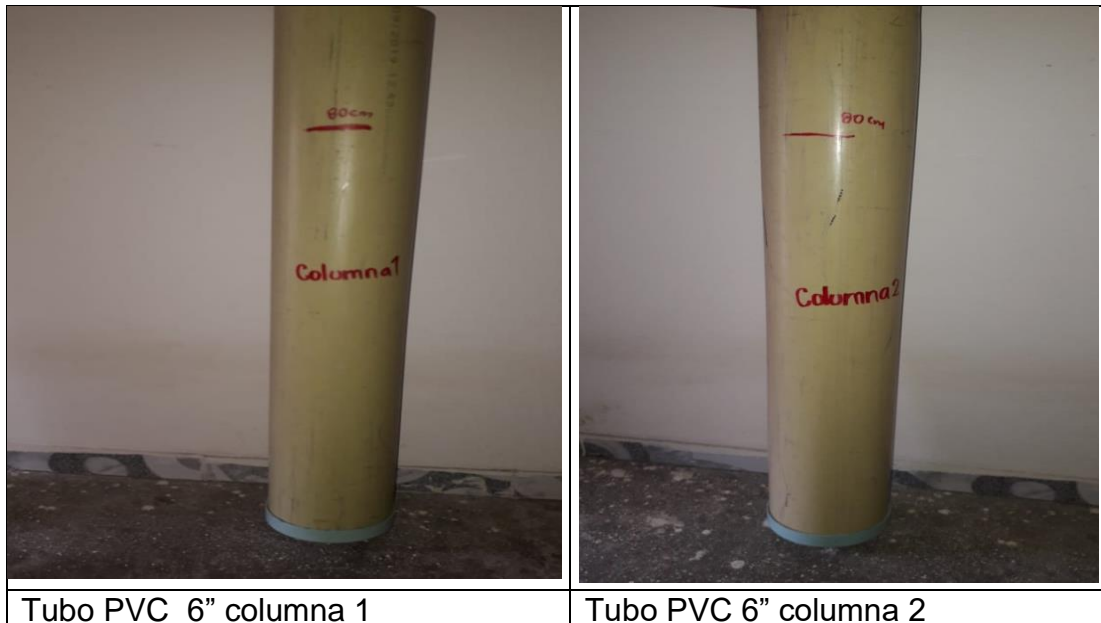
3.1.1 Actividad 1: Recolección de información:

En esta actividad se realiza las consultas bibliográficas pertinentes para el correcto desarrollo del proyecto de investigación, donde se tuvo en cuenta información relacionada con modelos que permiten estimar la cantidad de lixiviados generados en un sitio de disposición final con diferentes medios de soporte en Colombia, Latino América y el mundo, con el fin de establecer la importancia que tienen para asistir a diseñadores y evaluadores de rellenos sanitarios. Se recolecto información bibliográfica de revistas científicas, tesis, libros, páginas web, blogs, lo cual permitió obtener mayor conocimiento en el área de diseño y construcción de la planta piloto.

3.1.2 Actividad 2: Determinar las dimensiones y características de las columnas.

Con el propósito de lograr el análisis estadístico se construyeron dos columnas de residuos con tubos de PVC de 6" de diámetro y 1 m de longitud cada una, las cuales se llenaron de residuos sólidos inorgánicos.

Figura 3. Tubería 6" para columnas piloto



Fuente: propia

3.1.3 Actividad 3: Construcción de las columnas

Las columnas se construyeron con 2 tubos de PVC, dos tapones de pruebas de PVC que fueron utilizados para sellar una entrada a cada tubo y se le realizó en la parte central un pequeño orificio para la conexión de una manguera de 35 cm de largo y 3/8" de diámetro, con el fin de permitir el paso del líquido, estos tres elementos se unieron para formar las columnas como se muestra a continuación.

Figura 4. Construcción de las columnas piloto



Fuente: propia

3.1.4 Actividad 4: Determinar el tipo de residuo

Los residuos utilizados en la investigación serán de tipo inorgánicos generados en 15 viviendas del barrio ciudad futuro las guacas en la ciudad de Popayán durante un tiempo de 15 días, estos residuos fueron necesarios para llenar las columnas 1 y 2. Debido a que en los sitios de disposición final la fracción de residuos biodegradables son los primeros que se deshidratan a medida que se sigue instalando residuos en la parte superior, por ende, la percolación en mayor forma se realiza en los residuos inorgánicos. La razón por la cual no se trabaja con residuos orgánicos es porque estos generan gases y un conducto aislado como es un tubo PVC estos interfieren en la velocidad del líquido.

Figura 5. Determinación del tipo de residuos



Fuente: propia

3.1.5 Actividad 5: Relleno de las columnas para una densidad de 0,1 ton/m³

La densidad se obtiene mediante la relación:

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa de residuos (g)}}{\text{volumen de residuos (cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

Para el relleno de las columnas se realizaron los siguientes pasos:

- Se realizó el pesaje de los residuos y la grava con una balanza de peso digital colgante de 5,0 kg, con el fin de asignar la cantidad necesaria para cada densidad. Figura 6.
- Se llenó cada columna con 500 g grava (triturado) que alcanzo una altura de 2 cm con el fin de evitar que los residuos obstruyan el paso del líquido en la tubería de salida. Figura 6.
- La altura máxima de llenado de los residuos es de 80cm. Figura 7. Lo que genera un volumen de 14,13 L.

$$\text{Volumen (cm}^3\text{)} = \frac{D^2\pi}{4} * H \quad (2)$$

- Cada columna se llenó con 1400g de residuos sólidos inorgánicos obteniendo una densidad de 0,1 $\frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$, que va a permitir obtener los datos de la primera prueba.

- El llenado de las columnas y compactación de los residuos de forma manual.

Figura 6. Pesaje de grava



Fuente: propia

Figura 7. Llenado de las columnas



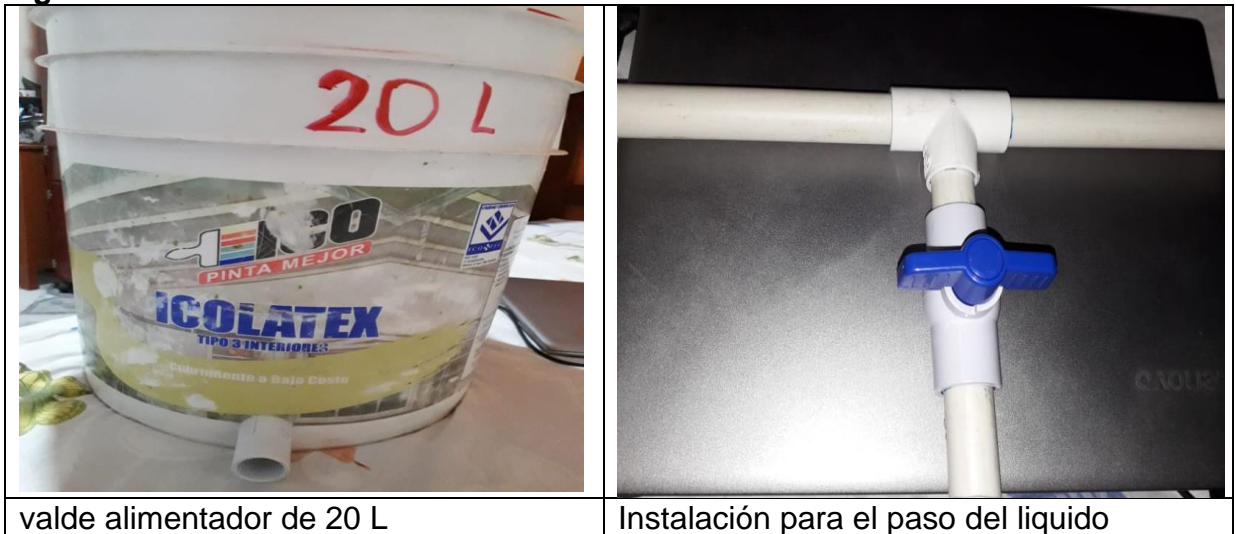
Fuente: propia

3.1.6 Actividad 6: Construcción del alimentador

Para construir el alimentador de las columnas fue necesario un valde de 20 L que fue perforado en la parte inferior con el fin de permitir el paso del líquido, para poder

distribuir de manera equitativa el líquido a cada columna se realizó una instalación en forma de T para esto se utilizó tres tubos de PVC de 1/2" de diámetro y 10 cm de largo, 1 llave de 1/2" de paso, unión roscada macho y unión roscada hembra, 1 tes de PVC 1/2".

Figura 8. Construcción del alimentador



Fuente: propia

3.2 FASE 2: MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.

3.2.1 Actividad 1: Armado de sistema

Después de construir las columnas y el alimentador se realizaron los siguientes pasos para armar el sistema y posteriormente recolectar datos.

- Ubicar e instalar las columnas y el alimentador. El alimentador fue ubicado en la parte superior de las columnas este fue sostenido con alambres asegurando su estabilidad.
- Para el soporte de las columnas se utilizó una mesa de madera y dos tiras de neumático.
- En la parte inferior de las columnas se ubicó dos recipientes de 4.32 L que almacenaban el líquido de salida.

Figura 9. Instalación de las columnas y el alimentador



Fuente: propia

3.2.2 Actividad 2: Medición de caudales de entrada y salida

En este proyecto investigativo se ejecutaron 4 pruebas a diferentes densidades de $0,1 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$, $0,127 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$, $0,163 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$ y $0,2 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$; a cada prueba se le realiza 1 repetición para garantizar mayor precisión en la obtención de resultados. Las densidades alcanzadas fueron variadas de acuerdo con la compactación que se podía lograr de forma manual, ya que las dimensiones de las columnas no daban para realizar una compactación mecánica y alcanzar una mayor compactación.

Para iniciar la medición de caudales, con ayuda de una probeta se llenó el alimentador con 20 L de agua lluvia. Figura 10. Se realiza una marcación en la válvula de salida para generar una derivación del caudal similar (en ambas columnas) y con un cronometro y una probeta se realiza el aforo de salida de este.

Figura 10. Recolección de agua lluvia



Fuente: propia

Las columnas llenas de residuos se saturaron de agua y posteriormente se instala un recipiente para la recolección de líquido expulsado de las columnas. Este líquido obtenido se mide con la ayuda de una probeta de 1000 cm³.

Figura 11. Medición de líquido expulsado de la columna



Fuente: propia

La consignación de datos se realizó en la siguiente tabla.

Tabla 1. Formato para consignación de datos de la medición de la conductividad hidráulica

Densidad de residuos	ΔH	COLUMNA 1		COLUMNA 2
V1	T ₀ =	T ₁ =		
V2	T _f =	T ₂ =		
		V=		

Fuente: propia

Donde:

ΔH : carga hidráulica

V₁: volumen inicial del alimentador lleno

V₂: volumen final del alimentador vacío

T₀: tiempo inicial, cuando se abre la válvula de salida

T_f: tiempo final cuando alimentador vacío

T₁: Tiempo inicial cuando el líquido sale de cada columna

T₂: Tiempo cuando termina el vaciado del líquido de cada columna

V: volumen expulsado de cada columna

El caudal se obtiene mediante la relación

$$caudal = \frac{volumen}{tiempo} \quad (3)$$

3.2.3 Actividad 3: Variación de las densidades de compactación.

3.2.3.1 Variación de la densidad a $0,127 \frac{ton}{m^3}$

Para la segunda compactación se pesaron 400 g de residuos inorgánicos para aumentar la masa de residuos a 1800 g y obtener una densidad de $0,127 \frac{ton}{m^3}$. Ya obtenida la cantidad a compactar se realiza lo siguiente:

- se desinstalaron las columnas para realizar la compactación de 400g de residuos y al terminar se vuelven a instalar las columnas.
- se llena el alimentador con 20 L de agua lluvia.
- Se abre la válvula tomando en cuenta una marcación para generar una derivación del caudal similar en ambas columnas y permitir que el caudal de salida del alimentador sea equivalente en las 4 pruebas.
- Se realiza la toma de datos y se consigna en la tabla.

A la misma densidad $0,127 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$ se realizan 2 repeticiones:

Repetición 1:

- Se llena el alimentador con 20 L de agua lluvia.
- Se abre la válvula tomando en cuenta una marcación para generar una derivación del caudal similar en ambas columnas.
- Se realiza la toma de datos y se consigna en la tabla.

Repetición 2:

- Se llena el alimentador con 20 L de agua lluvia.
- Se abre la válvula tomando en cuenta una marcación para generar una derivación del caudal similar en ambas columnas.
- Se realiza la toma de datos y se consigna en la tabla.

3.2.3.2 Variación de la densidad a $0,163 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$

En la tercera compactación se pesaron 500 g de residuos inorgánicos para aumentar la masa de residuos a 2300 g y obtener una densidad de $0,163 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$. Ya obtenida la cantidad a compactar se realiza lo siguiente:

- Se desinstalaron las columnas para realizar la compactación de 500g de residuos y al terminar se vuelven a instalar las columnas.
- Se llena el alimentador con 20 L de agua lluvia.
- Se abre la válvula tomando en cuenta una marcación para generar una derivación del caudal similar en ambas columnas y permitir que el caudal de salida del alimentador sea equivalente en las 4 pruebas.
- Se realiza la toma de datos y se consigna en la tabla.

A la misma densidad $0,163 \frac{ton}{m^3}$ se realizan 2 repeticiones:

Repeticón 1:

- Se llena el alimentador con 20 L de agua lluvia.
- Se abre la válvula tomando en cuenta una marcación para generar una derivación del caudal similar en ambas columnas.
- Se realiza la toma de datos y se consigna en la tabla.

Repeticón 2:

- Se llena el alimentador con 20 L de agua lluvia.
- Se abre la válvula tomando en cuenta una marcación para generar una derivación del caudal similar en ambas columnas.
- Se realiza la toma de datos y se consigna en la tabla.

3.2.3.3 Variación de la densidad a $0,2 \frac{ton}{m^3}$,

En la cuarta compactación se pesaron 525g de residuos inorgánicos para aumentar la masa de residuos a 2825g y obtener una densidad de $0,2 \frac{ton}{m^3}$. Ya obtenida la cantidad a compactar se realiza lo siguiente:

- Se desinstalaron las columnas para realizar la compactación de 500g de

residuos y al terminar se vuelven a instalar las columnas.

- Se llena el alimentador con 20 L de agua lluvia.
- Se abre la válvula tomando en cuenta una marcación para generar una derivación del caudal similar en ambas columnas y permitir que el caudal de salida del alimentador sea equivalente en las 4 pruebas.
- Se realiza la toma de datos y se consigna en la tabla.

A la misma densidad $0,2 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$; se realizan 2 repeticiones:

Repetición 1:

- Se llena el alimentador con 20 L de agua lluvia.
- Se abre la válvula tomando en cuenta una marcación para generar una derivación del caudal similar en ambas columnas.
- Se realiza la toma de datos y se consigna en la tabla.

Repetición 2:

- Se llena el alimentador con 20 L de agua lluvia.
- Se abre la válvula tomando en cuenta una marcación para generar una derivación del caudal similar en ambas columnas.
- Se realiza la toma de datos y se consigna en la tabla.

3.3 FASE 3: FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

3.3.1 Actividad 1: Regresión matemática

El modelo se desarrolla en la aplicación hoja de cálculo (Excel), donde se ingresó información obtenida de las pruebas realizadas sobre las dos columnas de residuos sólidos (columna1, columna 2), las hojas de cálculo se desarrollaron para observar el comportamiento del líquido dentro de la masa de residuos y el cálculo de la

conductividad hidráulica bajo diferentes densidades de compactación de los residuos, se presenta de forma similar o igual para los cálculos de la columna 1 y columna 2.

Los datos consignados en las hojas de cálculo son:

Densidad: Este parámetro es necesario para observar la variación de la conductividad hidráulica.

Se obtiene de la siguiente relación →

$$densidad = \frac{masa\ de\ residuos\ (g)}{volumen\ de\ residuos\ (cm^3)} \quad (4)$$

Tiempo: Esta variable se tomó cada dos minutos, debido a que la compactación es baja y la velocidad de percolación será alta, lo que garantiza una toma de datos con valores más sesgados.

Volumen acumulado: para obtener este volumen se utilizó el tiempo inicial cuando el líquido sale de cada columna(T_1), el tiempo cuando termina el vaciado del líquido de cada columna(T_2) y el volumen expulsado de cada columna(V). con estos datos se planteó la siguiente formula:

$$volumen\ acumulado = \frac{V}{T_2 - T_1} * 2 \quad (5)$$

Se multiplico por 2 (se multiplica por dos por que los intervalos de tiempo de filtración son a dos minutos) teniendo en cuenta la secuencia de la columna tiempo y para el resultado de las siguientes filas se suma el volumen parcial.

Volumen parcial: es el volumen expulsado en cada intervalo de tiempo (2 minutos)

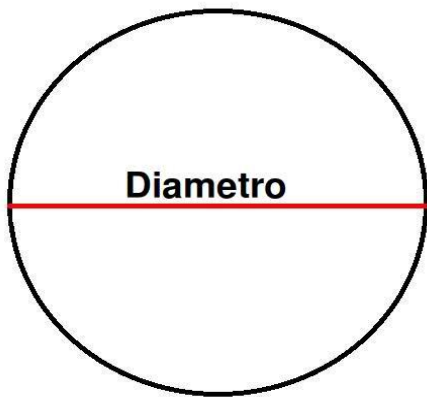
Tiempo parcial: Tiempo que dura cada intervalo es dos minutos en las primeras

pruebas con densidades bajas y en el último ensayo cada 5 minutos debido a que la velocidad de percolación será menor ya que la densidad es más alta y brindara mayor tiempo entra la entrada de agua al medio y la salida de este.

Caudal: El caudal se obtiene de la siguiente relación $\rightarrow \frac{v}{T}$, volumen y tiempo parciales.

Área piloto: se obtiene de la siguiente formula $\rightarrow A = \frac{D^2 * \pi}{4}$ (6)

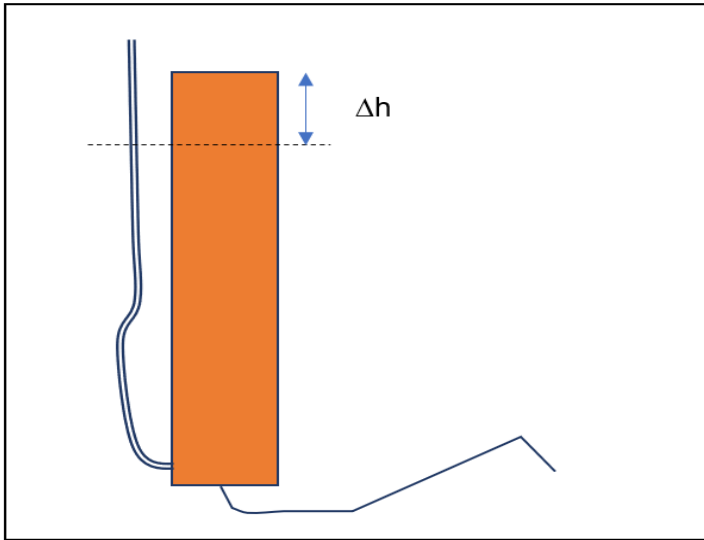
Figura 12. Esquema área piloto



Fuente: Google imágenes

ΔH (carga hidráulica): Se obtiene de la siguiente relación, la diferencia entre a cota de la lámina de agua y la cota de la lámina de agua de salida (ya que la manguera de salida es una manguera de niveles y de una vez funciona como piezómetro).

Figura 13. Esquema carga hidráulica



Fuente: propia

Longitud del lecho: es la longitud que debe atravesar el líquido dentro de las columnas de residuos sólidos.

K: la velocidad se obtiene con el caudal(Q), altura de las columnas(h), área piloto(A) y carga hidráulica (ΔH).

Con estos datos se reemplaza en la siguiente fórmula:

$$K(\text{conductividad hidráulica}) = \frac{(Q * h)}{A * \Delta H} \quad (7)$$

Una vez obtenido las densidades y sus correspondientes conductividades hidráulicas se realiza cuatro regresiones matemáticas con el fin de verificar cuál de ellas se ajustan más al comportamiento del flujo dentro de la columna de residuos en función de la densidad de compactación.

Apoyando se en 5 tipos de regresiones que se pueden efectuar en Excel, se realiza la aplicación de cuatro de estas (Potencial, exponencial, lineal y logarítmica), con el fin de verificar cuál de ellas se ajusta más a la tendencia de los datos de

conductividad hidráulica vs densidad de compactación.

Método Potencial: Es aquella en la que la función de ajuste sea una función potencial del tipo:

$$Y = a \cdot x^b$$

También en este caso se resuelve linealizando la función tomando logaritmos ya que:

$$\text{Log } y = \log a + b \log x$$

Considerando las nuevas variables $v = \log y$ y $u = \log x$ resolveríamos la regresión lineal entre ellas de forma que si el resultado fuera: $v^* = A + B u$

La solución final quedaría como $a = \text{antilog } A$ y $b = B$ [39].

Método exponencial: Una regresión exponencial es el proceso de encontrar la ecuación de la función exponencial que se ajuste mejor a un conjunto de datos.

Como un resultado, obtenemos una ecuación de la forma $y = ab^x$ donde $a \neq 0$.

La potencia predictiva relativa de un modelo exponencial está denotada por R^2 . El valor de R^2 varía entre 0 y 1. Mientras más cercano el valor esté de 1, más preciso será el modelo [40].

Método lineal: La ecuación de regresión lineal se puede usar para predecir el valor de la variable dependiente basado en la variable o variables predictoras.

Este modelo puede ser expresado como:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

donde:

Y_t : variable dependiente, explicada o regresando.

X_1, X_2, \dots, X_p : variables explicativas, independientes o regresores.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$: parámetros, miden la influencia que las variables explicativas tienen sobre el regresión. Donde β_0 es la intersección o término "constante", las β_i ($i > 0$) son los parámetros respectivos a cada variable independiente, y p es el número de

parámetros independientes a tener en cuenta en la regresión [41].

Método logarítmico: La función que define el modelo es la siguiente:

Este modelo de regresión es una alternativa cuando el modelo lineal no logra un coeficiente de determinación apropiado, o cuando el fenómeno en estudio tiene un comportamiento que puede considerarse potencial o logarítmico. La forma más simple de tratar de establecer la tendencia es a través de un diagrama de dispersión o nube de puntos.

$$Y_i = A * X_i^{B_i} * E$$

En la cual:

Y_i : Variable dependiente, i -ésima observación

A, B: Parámetros de la ecuación, que generalmente son desconocidos

E: Error asociado al modelo

X_i : Valor de la i -ésima observación de la variable independiente

Al sustituir los parámetros por estimadores, el modelo adopta la siguiente forma:

$$y_i = a * x_i^b$$

la ecuación se transforma aplicando logaritmos de ambos lados, con lo cual se convierte a una forma lineal:

$$\ln y_i = \ln a + b * \ln x_i \text{ [42].}$$

3.3.2 Actividad 2: Formulación del modelo matemático

Ya teniendo el modelo de regresión que más se ajusta a los datos obtenidos en los ensayos, se realiza el modelo en hoja de cálculo (Excel) para lo cual se tuvo en cuenta los siguientes parámetros.

Caudal promedio: Ya que este modelo es con el fin de proyectar cuanto sería el caudal del lixiviado generado por la percolación de aguas lluvias sobre la masa de residuos es necesario tener en cuenta el caudal de lixiviado generado por la masa de residuos, debido a la humedad propio de estos y la deshidratación de los residuos orgánicos. Este caudal es propio del sitio, de acuerdo con la humedad relativa de la región de producción de los residuos, a la composición y fracción orgánica. Para el modelo se supone valores para la prueba y esta solo se suma a el caudal producido por la percolación del agua lluvia.

Temperatura: La temperatura es indispensable, ya que esta influye en la viscosidad cinemática del lixiviado, lo que genera reducción o disminución en la velocidad de percolación, por ende, el modelo incluye la corrección de la conductividad por temperatura.

$$Fact_{tem\ amb\ (^{\circ}C)} = \frac{Visc\ a\ 20^{\circ}}{Visc\ a\ T_{amb}} \quad (8)$$

Para hallar este valor se tiene en cuenta la siguiente tabla

Tabla 2. Corrección por viscosidad

Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)
0	0,001792	34	0,000734	68	0,000416
1	0,001731	35	0,000720	69	0,000410
2	0,001674	36	0,000705	70	0,000404
3	0,001620	37	0,000692	71	0,000399
4	0,001569	38	0,000678	72	0,000394
5	0,001520	39	0,000666	73	0,000388
6	0,001473	40	0,000653	74	0,000383
7	0,001429	41	0,000641	75	0,000378
8	0,001386	42	0,000629	76	0,000373
9	0,001346	43	0,000618	77	0,000369
10	0,001308	44	0,000607	78	0,000364
11	0,001271	45	0,000596	79	0,000359
12	0,001236	46	0,000586	80	0,000355
13	0,001202	47	0,000576	81	0,000351
14	0,001170	48	0,000566	82	0,000346
15	0,001139	49	0,000556	83	0,000342
16	0,001109	50	0,000547	84	0,000338
17	0,001081	51	0,000538	85	0,000334
18	0,001054	52	0,000529	86	0,000330
19	0,001028	53	0,000521	87	0,000326
20	0,001003	54	0,000512	88	0,000322
21	0,000979	55	0,000504	89	0,000319
22	0,000955	56	0,000496	90	0,000315
23	0,000933	57	0,000489	91	0,000311
24	0,000911	58	0,000481	92	0,000308
25	0,000891	59	0,000474	93	0,000304
26	0,000871	60	0,000467	94	0,000301
27	0,000852	61	0,000460	95	0,000298
28	0,000833	62	0,000453	96	0,000295
29	0,000815	63	0,000447	97	0,000291
30	0,000798	64	0,000440	98	0,000288
31	0,000781	65	0,000434	99	0,000285
32	0,000765	66	0,000428	100	0,000282
33	0,000749	67	0,000422		

Fuente: Google imágenes

Precipitación: La precipitación es parte fundamental en el modelo, ya que es el que nos proporciona la carga hidráulica (ΔH), en la generación del caudal de lixiviados.

En cualquier época del año, ya que el modelo tiene como caudal inicial el generado por los residuos orgánicos y la humedad de los residuos sumado a el caudal aportado por el agua lluvia sobre la zona de depósito de residuos.

Área de residuos: Esta área es la encargada de permitir el paso del agua lluvia a la masa de residuos, está determinada dentro de un sitio de disposición final como el área descubierta.

Densidad de los residuos: Es la relación de masa de residuos sobre el espacio que la contiene, también es conocida como compactación. Esta también es típica de cada relleno sanitario o sitio de disposición final y varía de acuerdo las técnicas de compactación (mecánica o manual), esta es necesaria dentro del modelo ya que este es una variable fundamental para la conductividad hidráulica.

Columna de residuos: Dentro del modelo de Darcy, esta equivale a la longitud del medio filtrante o espesor de la columna a atravesar por el líquido. Este también depende de cada sitio y su correspondiente diseño.

Caudal del modelo:

$$Caudal\ de\ lixiviado = \frac{F * K_{20^{\circ}C} * Area\ resid * precipitacion}{Columna\ de\ residuos} \quad (9)$$

Q Tot lixiviado (l/s) = Q promedio + Q de la masa.

$$\begin{aligned} Caudal\ totalde\ lixiviado \\ = Q_{masa} + \frac{F * K_{20^{\circ}C} * Area\ resid * precipitacion}{Columna\ de\ residuos} \end{aligned} \quad (10)$$

3.3.3 Actividad 3: Comparación estadística de las columnas

En la comparación estadística de las columnas se utilizó un ensayo estadístico para comparar las pendientes de 2 rectas de calibrado cuando las varianzas son

homogéneas o no homogéneas, con el fin de verificar si las condiciones del piloto y su réplica son similares, lo que puede garantizar si es necesario realizar la calibración en campo del modelo con la siguiente condición: Si es homogéneo el piloto es semejado a la réplica y no será necesario la calibración, si no es homogéneo es necesario realizar la calibración del modelo en campo ya que los valores del piloto no son similares a la réplica. Este ensayo estadístico nos permite estudiar la reproducibilidad de un método de análisis de manera que se puedan comparar pendientes de rectas obtenidas en momentos diferentes, también pueden utilizarse para estudiar la robustez del método cuando las rectas se obtienen en condiciones diferentes y también nos puede servir para comprobar si la muestra tiene o no efecto matriz comparando la recta de calibrado de patrones con la de la recta de adición estándar.

Para aplicar este ensayo se necesitan los siguientes datos:

Regresión líneal de los datos del ensayo 1 (columna 1) y el ensayo 2 (columna 2), y de cada recta es necesario conocer:

Numero de datos para cada recta: n_1 y n_2 .

Pendientes de las 2 rectas: b_1 y b_2 .

Varianzas de las pendientes: $s_{b_1}^2$ y $s_{b_2}^2$

Pasos para comparar las pendientes de 2 rectas de calibrado:

Paso 1. Aplicar un ensayo F:

permitirá distinguir si las varianzas son homogéneas o no.

Paso 2. Aplicar un ensayo T:

Permitirá distinguir si las pendientes son similares o no; el ensayo t será diferente en función de lo que te haya salido en el ensayo f.

Aplicación de los ensayos:

Paso 1. Ensayo F

obtener estadístico F calculado (F_{calc})

$$F_{calc} = \frac{S_{b_1}^2}{S_{b_2}^2} > 1 \quad (11)$$

Es muy importante que este parámetro sea mayor que 1.

A continuación, se busca el valor de F tabulado: tabla F para 95% de probabilidad, grados de libertad del numerador v_1 , grados de libertad del denominador v_2 .

$F_{tab95\%, v_1, v_2}$ donde $v_1=n_1-2$, $v_2=n_2-2$

$v_1=n_1-2 \rightarrow$ filas, grados de libertad numerador

$v_2=n_2-2 \rightarrow$ columnas, grados de libertad denominador

Tabla F

Tabla 3. Tabla F para 95%de probabilidad

	Grados de libertad en el numerador																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	25	30	40	
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	246	248	249	250	251		
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	91.5
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	

Fuente: Adaptada (Humberto Gutiérrez pulido- Román de la vara Salazar, 2008)

Una vez obtenido los datos estadísticos F_{calc} y F_{tab} se compara y se deduce si las varianzas de las dos pendientes son homogéneas o no.

Si $F_{calc} < F_{tab} \rightarrow$ varianzas homogéneas

Si $F_{calc} > F_{tab} \rightarrow$ varianzas NO homogéneas

Paso 2. Ensayo T

Se realiza para comparar las dos pendientes y decir si son estadísticamente similares o no y se tienen en cuenta los siguientes casos:

2.1. Ensayo t para varianzas homogéneas

Calcular el estadístico t_{calc}

$$t_{calc} = \frac{(b_1 - b_2)}{\sqrt{s_{b_1}^2 + s_{b_2}^2}} \quad (12)$$

Buscar el valor de t tabulado: tabla t 95% de probabilidad, grados de libertad $n_1 + n_2 - 2$

$T_{tab95\%, n_1+n_2-2, g.l.}$

Tabla 4. Tabla T para el 95% de probabilidad

Grados de libertad	Área a la derecha de los puntos, $P(X > x)$			
	0.10	0.05	0.025	0.015
1	3.0776835	6.3137515	12.706205	21.204949
2	1.8856181	2.9199856	4.3026527	5.6427784
3	1.6377444	2.3533634	3.1824463	3.8960459
4	1.5332063	2.1318468	2.7764451	3.2976297
5	1.475884	2.0150484	2.5705818	3.002875
6	1.4397557	1.9431803	2.4469119	2.8289279
7	1.4149239	1.8945786	2.3646243	2.714573
8	1.3968153	1.859548	2.3060041	2.6338144
9	1.3830287	1.8331129	2.2621572	2.573804
10	1.3721836	1.8124611	2.2281389	2.5274842

Fuente: Adaptada (Humberto Gutiérrez pulido- Román de la vara Salazar, 2008)

una vez calculado t_{calc} y t_{tab} se compara los dos valores y se deducen conclusiones.

Si $t_{calc} < t_{tab}$: pendientes estadísticamente similares: $b_1 = b_2$

Si $t_{calc} > t_{tab}$: pendientes estadísticamente diferentes: $b_1 \neq b_2$

Ensayo t varianzas NO homogéneas

Calculado el estadístico t'_{calc}

$$t'_{calc} = \frac{t_1 * s_{b_1}^2 + t_2 * s_{b_2}^2}{s_{b_1}^2 + s_{b_2}^2} \quad (13)$$

Donde: $t_1 = t_{tab\ 95\%}^{n_1-2}$ y $t_2 = t_{tab\ 95\%}^{n_2-2}$

Comparar t_{calc} y t'_{calc} y deducir conclusiones

Si $t_{calc} < t'_{calc}$: pendientes estadísticamente similares: $b_1 = b_2$

Si $t_{calc} > t'_{calc}$: pendientes estadísticamente diferentes: $b_1 \neq b_2$ [43].

4. CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS

En este capítulo se presentan los resultados y análisis generados por el modelo propuesto.

4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS

A continuación, se muestra los resultados del diseño y construcción de la planta piloto (fase 1). Una vez determinada las dimensiones, características de las columnas, determinación del tipo de residuo, llenado de las columnas y la construcción del alimentador se logró obtener el armado del sistema piloto.

Figura 14. Construcción e instalación de las columnas piloto



Fuente: propia

La construcción de las columnas se realiza sobre la casa de habitación, estas fueron construidas con tubería PVC sanitaria de 6", con una apertura superior similar a su diámetro, la parte inferior de estas fueron selladas con tapón de prueba de PVC 6", sobre el eje de este fue instalada una manguera de silicona (manguera de niveles cristal), que cumplía la función de conducto de salida del agua percolada y para medir la presión piezométrica de salida, en la base de la columna se deposita grava de 1/2" de diámetro con el fin de que los residuos no obstruyera el conducto de salida.

El relleno de las columnas se realiza de forma manual, realizando la variación de la densidad para realizar las diferentes mediciones.

Estas columnas fueron ubicadas verticalmente para simular la penetración del agua lluvia sobre la masa de residuos.

La alimentación se ubica sobre las dos columnas, y se realiza el desfogue de agua por medio de una tubería dividida de 1/2".

4.2 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Después del diseño y construcción del sistema se procede a desarrollar la fase 2, se presentan los resultados de la medición de la conductividad hidráulica de las cuatro pruebas realizadas para el planteamiento y construcción del modelo.

En los cuatros ensayos de percolación a diferentes densidades de $0,1 \frac{ton}{m^3}$, $0,127 \frac{ton}{m^3}$, $0,163 \frac{ton}{m^3}$ y $0,2 \frac{ton}{m^3}$; donde se realizan 2 repeticiones, los valores fueron ingresados inicialmente en la tabla de los resultados para su respectivo análisis.

A continuación, en la tabla 4 se presentan los resultados de la medición de volumen y tiempo de salida del líquido percolado, cuya relación aportan los caudales de

entrada y salida de la primera prueba con densidad $0,1 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$.

La densidad se obtiene mediante el pesaje de los residuos y volumen de la columna aplicando la siguiente formula:

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa de residuos (g)}}{\text{volumen de residuos (cm}^3\text{)}}$$

El volumen de la columna de residuos se obtuvo de la siguiente forma:

$$\text{Volumen (cm}^3\text{)} = \frac{(15 \text{ cm})^2 \pi}{4} * 80 \text{ cm} = 14137 \text{ cm}^3$$

Y el peso de los residuos se midió mediante balanza electrónica.

$$\text{densidad} = \frac{1400 \text{ g}}{14137 \text{ cm}^3} = 0,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \rightarrow 0,1 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

Tabla 5. Consignación de datos para la medición de la conductividad hidráulica a densidad de $0,1 \text{ ton/m}^3$.

Densidad: $0,1 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$.	$\Delta H = 12,3 \text{ cm}$	COLUMNA 1		COLUMNA 2
V=20 L	$T_0=0,0 \text{ s}$	$T_1 =$	4,15 s	3,00 s
V=0,0 L	$T_f=20,54 \text{ s}$	$T_2 =$	25,50 s	27,10 s
		V=	8,03 L	6,36 L
Repetición 1				
V=20 L	$T_0=0,0 \text{ s}$	$T_1 =$	3,42 s	2,47 s
V=0,0 L	$T_f=21,30 \text{ s}$	$T_2 =$	26,10 s	27,08 s
		V=	8,28 L	6,61 L
Repetición 2				
V=20 L	$T_0=0,0 \text{ s}$	$T_1 =$	4,00 s	3,51 s
V=0,0 L	$T_f=20,53 \text{ s}$	$T_2 =$	24,37 s	23,08 s
		V=	7,95 L	7,63 L

Fuente: propia

En la tabla 5 se presentan los resultados de la segunda prueba con densidad de $0,127 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$

La densidad para la segunda prueba es incrementada aumentando la cantidad de residuos dentro de la columna, esta se obtiene mediante el pesaje de los residuos y volumen de la columna aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{densidad} = \frac{1800g}{14137\text{cm}^3} = 0.127 \frac{g}{\text{cm}^3} \rightarrow 0,127 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

Tabla 6. Consignación de datos para la medición de la conductividad hidráulica a densidad de $0,127 \text{ ton/m}^3$.

Densidad: $0,127 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$	$\Delta H = 15,62 \text{ cm}$	COLUMNA 1		COLUMNA 2
V=20 L	$T_0=0,0 \text{ s}$	$T_1 =$	4,30 s	5,56 s
V=0,0 L	$T_f=21,20 \text{ s}$	$T_2=$	43,23 s	42,01 s
		V=	8,64 L	8,1 L
Repetición 1				
V=20 L	$T_0=0,0 \text{ s}$	$T_1 =$	4,33 s	2,20 s
V=0,0 L	$T_f=20,46 \text{ s}$	$T_2=$	36,12s	33,01 s
		V=	11,84 L	9,64 L
Repetición 2				
V=20 L	$T_0=0,0 \text{ s}$	$T_1 =$	4,40 s	2,40 s
V=0,0 L	$T_f=20,50 \text{ s}$	$T_2=$	35,08 s	37,01 s
		V=	7,63 L	8,64 L

Fuente: propia

En la tabla 6 se presentan los resultados de la tercera prueba con densidad de $0,163 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$

La densidad para la tercera prueba es incrementada aumentando la cantidad de residuos dentro de la columna, esta se obtiene mediante el pesaje de los residuos y volumen de la columna aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{densidad} = \frac{2300g}{14137cm^3} = 0.163 \frac{g}{cm^3} \rightarrow 0,163 \frac{ton}{m^3}$$

Tabla 7. Consignación de datos para la medición de la conductividad hidráulica a densidad de 0,163 ton/m³.

Densidad: 0,163 $\frac{ton}{m^3}$	$\Delta H = 20,49$ cm	COLUMNA 1		COLUMNA 2
V=20 L	T ₀ =0,0 s	T ₁ =	7,50 s	6,01 s
V=0,0 L	T _f =21,08 s	T ₂ =	42,57 s	45,30 s
		V=	6,14 L	8,18 L
Repetición 1				
V=20 L	T ₀ =0,0 s	T ₁ =	5,44 s	6,11 s
V=0,0 L	T _f =21,10 s	T ₂ =	42,12 s	39,59 s
		V=	8,82 L	7,32 L
Repetición 2				
V=20 L	T ₀ =0,0 s	T ₁ =	5,46 s	4,53 s
V=0,0 L	T _f =20,52 s	T ₂ =	41,21 s	42,34 s
		V=	7,71 L	8,99 L

Fuente: propia

En la tabla 7 se presentan los resultados de la cuarta prueba con densidad de $0,2 \frac{ton}{m^3}$

La densidad para la cuarta prueba es incrementada aumentando la cantidad de residuos dentro de la columna, esta se obtiene mediante el pesaje de los residuos y volumen de la columna aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{densidad} = \frac{2825g}{14137cm^3} = 0.2 \frac{g}{cm^3} \rightarrow 0,2 \frac{ton}{m^3}$$

Tabla 8. Consignación de datos para la medición de la conductividad hidráulica a densidad de 0,2 ton/m³.

Densidad: 0,2 $\frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$	$\Delta H = 24,6 \text{ cm}$	COLUMNA 1		COLUMNA 2
V=20 L	T ₀ =0,0 s	T ₁ =	5,10 s	5,22 s
V=0,0 L	T _f =21,10 s	T ₂ =	74,57 s	74,35 s
		V=	8,05 L	8,96 L
Repetición 1				
V=20 L	T ₀ =0,0 s	T ₁ =	6,18 s	5,48 s
V=0,0 L	T _f =20,58 s	T ₂ =	68,30 s	72,20 s
		V=	7,80 L	8,1 L
Repetición 2				
V=20 L	T ₀ =0,0 s	T ₁ =	5,45 s	8,12 s
V=0,0 L	T _f =21,08 s	T ₂ =	70,28 s	74,50 s
		V=	9,8 L	9,3 L

Fuente: propia

En las tablas formato para consignación de datos de la medición de la conductividad hidráulica, tabla 5, tabla 6, tabla 7 y tabla 8 se puede evidenciar el tiempo de salida del líquido, notado con (T1) y tiempo cuando termina el vaciado del líquido de cada columna, notado con (T2), el comportamiento de estos para cada densidad es similar en la columna 1 y 2 en cada ensayo, ya que la diferencia de tiempo fue de 4 a 3 s.

Una vez que se varia la densidad se puede observar en las tablas, que al agregar masa de residuos sólidos y aumentar la densidad dentro de las columnas, tiende a aumentar a los tiempos de T1 o tiempos de salida del líquido percolado, así mismo el aumento en el tiempo de vaciado del líquido de cada columna (T2). (En la siguiente tabla indica resultados de T1 y T2). Esto es debido a que los espacios entre residuos o espacios internos son más reducidos, lo que obliga a que el líquido

genere más fricción entre los residuos y este, generando una disminución en la energía total del sistema.

Tabla 9. Resultados de (T1 y T2)

Ton/ m3	Columna 1		Repetición 1	Repetición 2	Columna 2		Repetición 1	Repetición 2
	T ₁	T ₂			T ₁	T ₂		
0.1	T ₁	4,15 s	3,42 s	4,00 s	3,00 s	2,47 s	3,51 s	
	T ₂	25,50 s	26,10 s	24,37 s	27,10 s	27,08 s	23,08 s	
0.127	T ₁	4,30 s	4,33 s	4,40 s	5,56 s	2,20 s	2,40 s	
	T ₂	43,23 s	36,12s	35,08 s	42,01 s	33,01 s	37,01 s	
0.163	T ₁	7,50 s	5,44 s	5,46 s	6,01 s	6,11 s	4,53 s	
	T ₂	42,57 s	42,12 s	41,21 s	45,30 s	39,59 s	42,34 s	
0.2	T ₁	5,10 s	6,18 s	5,45 s	5,22 s	5,48 s	8,12 s	
	T ₂	74,57 s	68,30 s	70,28 s	74,35 s	72,20 s	74,50 s	

Fuente: propia

El incremento del tiempo cuando termina el vaciado del líquido de cada columna (T2) no altera la cantidad de líquido expulsado de las columnas, lo que significa que los residuos estaban saturados y no absorbieron agua, lo que favorece una mayor precisión en el cálculo de la conductividad hidráulica. Presuntivamente el fenómeno de importancia en la modelación a plantear, ya que, si el líquido satura los poros estos realizando un llenado del intersticio y no de conducción entre los poros de los residuos, aportando una falsa conductividad hidráulica.

La corroboración de lo afirmado se puede evidenciar en el cálculo de las conductividades hidráulicas para cada ensayo.

4.3 FORMULACIÓN DE MODELO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.

En los resultados de la Fase 3 formulación del modelo matemático, se desarrollaron los siguientes cálculos que permitieron la regresión matemática y la aplicación de los datos en las hojas de cálculo para el funcionamiento del modelo.

Como primera instancia es necesario obtener cuatro parámetros para el cálculo de la conductividad hidráulica (k), esto son el caudal, el área de percolación, la altura o longitud del medio filtrante y la carga hidráulica.

Caudal: Esta es la cantidad volumétrica del fluido que atraviesa el lecho poroso por unidad de tiempo, este es calculado mediante el siguiente ensayo de campo reportados en la tabla 5, tabla 6, tabla 7 y tabla 8.

Tiempo → se tomó cada 2 minutos

$$volumen\ acumulado = \frac{V}{T_2 - T_1} * 2$$

$$volumen\ acumulado = \frac{8030cm^3}{26min - 4min} * 2 = 730 \frac{cm^3}{min}$$

El numero 2 es la secuencia de la columna tiempo y para el resultado de las siguientes filas se suma el volumen parcial es igual al volumen acumulado.

Caudal promedio → $\frac{v}{T} = \frac{730cm^3}{2\ min} = 365 \frac{cm^3}{min}$

Para obtener el caudal promedio de cada ensayo de realizo el mismo procedimiento. En la siguiente tabla se indica el caudal promedio de cada ensayo.

Tabla 10. Caudal promedio de cada ensayo

	Volumen parcial(cm3)	Tiempo parcial(min)	Caudal promedio (cm3/min)
Ensayo 1	730	2	365
Ensayo 2	432	2	216
Ensayo 3	340	2	170
Ensayo 4	575	5	115

Área de percolación: esta es el área por donde atraviesa el líquido el medio filtrante, para nuestro caso el área de la columna.

$$\text{Área piloto} \rightarrow A = \frac{D^2 * \pi}{4} = \frac{15^2 * \pi}{4} = 176,71 \text{ cm}^2$$

El área de percolación para los cuatro ensayos es constante, ya que los diámetros de las columnas son fijas (15 cm).

Carga hidráulica (ΔH): está dada por la pérdida de la presión o carga hidráulica dentro de la columna de residuos. Por la altura inicial de la lámina de agua en la columna y la altura de salida del líquido. Esta varía de acuerdo con la porosidad y densidad del medio, y se obtienen cuatro para los cuatro ensayos las cuales se encuentran reportadas en las tablas de datos.

Tabla 11. Carga hidráulica para cada ensayo

Ensayo	Carga hidráulica (cm)
$\Delta H \rightarrow 1$	12,3
$\Delta H \rightarrow 2$	15,62
$\Delta H \rightarrow 3$	20,49
$\Delta H \rightarrow 4$	24,6

Fuente: propia

Longitud del lecho: se da por la longitud que debe atravesar el líquido, está dado por la altura o longitud de la columna, el cual es constante con una distancia de 80 cm para los cuatro ensayos.

Conductividad Hidráulica: Esta es la relación entre la resistencia del medio al flujo y la carga del flujo. Y se calcula para cada ensayo ya que esta varía de acuerdo con los espacios e intersticios del medio filtrante.

$$K \rightarrow K(\text{conductividad hidraulica}) = \frac{(Q \cdot h)}{A \cdot \Delta H}$$

$$K(\text{conductividad hidraulica}) = \frac{(365 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} * 80\text{cm})}{176,71\text{cm}^2 * 12,3 \text{ cm}} = 13,43 \text{ cm/min}$$

Tabla 12. Consignación de datos - regresión matemática

Tiempo (min)	Volumen acumulado (cm ³ /min)	Volumen parcial (cm ³)	Tiempo parcial (min)	Caudal prom (cm ³ /min)	K (cm/min)	Area Piloto (cm ²)	Vol alim (cm ³)	ΔH (cm)	Densidad (ton/m ³)
0	0					176,71	10000	12,3	0,1
2	0	0	2	0	0				
4	0	0	2	0	0				
6	730	730	2	365	13,43				
8	1460	730	2	365	13,43				
10	2190	730	2	365	13,43				
12	2920	730	2	365	13,43				
14	3650	730	2	365	13,43				
16	4380	730	2	365	13,43				
18	5110	730	2	365	13,43				
20	5840	730	2	365	13,43				
22	6570	730	2	365	13,43				
24	7300	730	2	365	13,43				
26	8030	730	2	365	13,43				

Fuente: propia

Para el resto de los ensayos se adoptó la misma metodología, con los resultados reportados en la siguiente tabla.

Tabla 13. Conductividad hidráulica para cada densidad

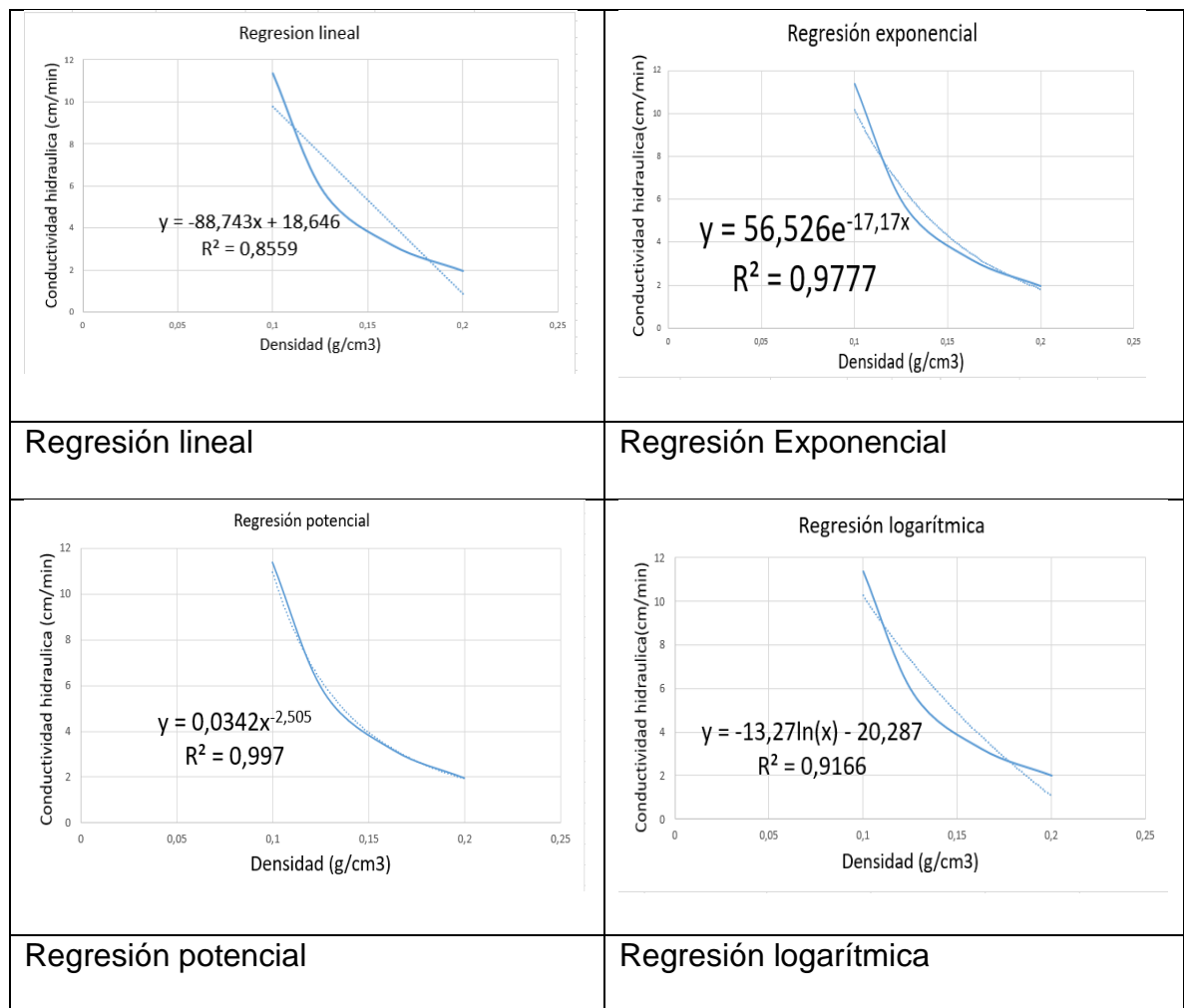
Densidad (ton/m ³)	Conductividad (cm/min)
0,1	11,36752573
0,127	5,691266161
0,163	3,192675274
0,2	1,975278652

Fuente: propia

La tabla 13 muestra los resultados obtenidos a partir de información mostrada en el numeral 4.2, donde se afirma que cada vez que incrementa la densidad, el paso del líquido se vuelve más lento, debido a la disminución del área entre los espacios de la columna de residuos.

Con los datos de la tabla 13 se realiza las correspondientes regresiones expuestas en la fase 3 de la metodología, de esta manera se obtuvieron los resultados para las siguientes pruebas y permitieron realizar las cuatro regresiones matemáticas.

Figura 15. Regresiones matemáticas



Fuente: propia

Se realiza las cuatro regresiones citadas, (lineal, exponencial, potencial y logarítmica), con el fin de verificar como es el comportamiento de la conducción del líquido dentro de los residuos en función a su compactación.

De acuerdo con los ajustes de los datos mediante coeficiente de relación (R^2) se puede notar que el método potencial es el que más se ajusta al comportamiento de la conductividad hidráulica en la masa de residuos de acuerdo con el incremento de la densidad.

Función

$$\text{Conductividad (K cm/min)} = 0,0342 * \text{densidad}^{-2,505} \quad (14)$$

Una vez determinada la regresión matemática potencial se realizó el modelo en hoja de cálculo (Excel). Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros.

Densidad de residuos: Es la relación masa de los residuos y volumen ocupado, para el caso a presentar se escoge una densidad o compactación de $1,0 \text{ ton/m}^3$.

Conductividad hidráulica: esta se calcula en función de la densidad de los residuos, y es específico de este modelo, se determina mediante la función

$$K = 0,0342 * \left(1,0 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}\right)^{-2,505} = 0,0342 \text{ cm/min} = 0,000342 \text{ m/min} \quad (15)$$

Caudal promedio: Este es el caudal es el aportado por la humedad compuesta de los residuos dispuestos, para la demostración del ejercicio se coloca un caudal de 24 L/min o $0,4 \text{ L/seg}$.

Temperatura: Esta altera la viscosidad de los fluidos, por ende, es necesario realizar la corrección de la K de acuerdo con la temperatura. Para el ejercicio se realiza con una temperatura ambiente de 20°C .

$$Fact_{tem \text{ amb } (^{\circ}\text{C})} = \frac{0.01 \text{ cm}^2/\text{seg}}{0.01 \text{ cm}^2/\text{seg}} = 1$$

Área de infiltración: Esta área es el área descubierta de la celda en operación la cual permite que el agua lluvia percole sobre la masa de residuos. Para nuestro ejercicio el área será de 1600 m².

Precipitación: Esta dada por la lámina de agua acumulada sobre el área de disposición, en el caso a realizar se opta por una precipitación de 12 mm en columna de agua. (este valore es arbitrario, no es un valor que indique una precipitación de algún lugar o zona).

Columna de residuos: Esta es la columna de residuos sólidos dispuestos, se debe estimar la altura que existe en la cota máxima de la celda en el área descubierta hasta donde se encuentre los filtros o tuberías de captación del lixiviado, para el ejercicio de adopta una altura de 5 m.

$$Q \text{ de lix} = \frac{F * \text{conductividad } T^{\circ}_{amb} (m/min) * \text{Area resid}(m^2) * \text{precipitacion}(m)}{\text{Columna de residuos}(m)}$$

$$Q \text{ de lix} = \frac{1 * 0,000342(m/min) * 1600(m^2) * 0,012(m)}{5(m)} = 0,00131(m^3/min) \rightarrow 1,31328 (l/min)$$

El resultado anterior sería el caudal generado bajo esas condiciones, para el cálculo del lixiviado total que saldría de la masa de residuos es necesario sumarle el caudal generado por la masa de residuos, en nuestro caso 24 l/min.

Q Tot lixiviado (l/s) → Q promedio + Q del modelo

Caudal total de lixiviado

$$= Q_{prom} + \frac{F * \text{conductividad } T^{\circ}_{amb} (m/min) * \text{Area resid}(m^2) * \text{precipitacion}(m)}{\text{Columna de residuos}(m)}$$

$$Q \text{ lix} \left(\frac{l}{min} \right) = 24 \frac{l}{min} + \frac{0,000342 \frac{m}{min} * 1600_{m^2} * 0,012_m}{5_m} = 25.31328 \frac{l}{min}$$

Tabla 14. Modelo de conductividad hidráulica

Lixiviado de Residuos		Lixiviado por lluvia					
Q.promedio (l/min)	Temperatura (°C)	Precipitacion (mm)	Area Residuos (m2)	densidad de residuo (ton/m3)	Columna de residuo	Q.lixiviados (l/min)	Lix Total (l/min)
24	20	12	1600	1	5	1,31328	25,31328
0,4						0,021888	0,421888 L/s

Fuente: propia

Para verificar que el caudal de lixiviados es inverso a la densidad se realiza dos cálculos con diferentes densidades, 0,5 ton/m³ y 0,2 ton/m³.

Tabla 15. Modelo con una densidad de 0,5 ton/m³

Lixiviado de Residuos		Lixiviado por lluvia					
Q.promedio (l/min)	Temperatura (°C)	Precipitacion (mm)	Area Residuos (m2)	densidad de residuo (ton/m3)	Columna de residuo	Q.lixiviados (l/min)	Lix Total (l/min)
24	20	12	1600	0,5	5	7,454825285	31,45482528
0,4						0,124247088	0,524247088 L/s

Fuente: propia

Tabla 16. Modelo con una densidad de 0,2 ton/m³

Lixiviado de Residuos		Lixiviado por lluvia					
Q.promedio (l/min)	Temperatura (°C)	Precipitacion (mm)	Area Residuos (m2)	densidad de residuo (ton/m3)	Columna de residuo	Q.lixiviados (l/min)	Lix Total (l/min)
24	20	12	1600	0,2	5	74,00774836	98,00774836
0,4						1,233462473	1,633462473 L/s

Fuente: propia

En la tabla 15 y 16 se puede observar que a medida que la densidad de los residuos se disminuye, el caudal de lixiviados se incrementa ya que el paso de líquido por unidad de área es mayor, cuya área es representada por el espacio o poros de los residuos sólidos, además que los ensayos a diferentes densidades demuestran que el líquido atraviesa más rápido los residuos entre menor compactación se tiene.

$$Caudal = Velocidad * area$$

Y la ecuación de continuidad comprueba la afirmación ya que a mayor velocidad (en nuestro caso la conductividad hidráulica) y a mayor área (en nuestro caso los espacio o poros entre los residuos) se generará mayor caudal.

4.4 COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS COLUMNAS

Con el fin de verificar la calidad y la precisión del modelo se realiza una réplica de la fase experimental o de ensayo, con una columna similar con el fin de verificar la variación de los resultados. Esta apoyado del “método de comparar las pendientes de las 2 rectas de calibrado cuando las varianzas son homogéneas o no”

La comparación estadística de las columnas se realizó a partir del ensayo estadístico para comparar las pendientes de las 2 rectas de calibrado cuando las varianzas son homogéneas o no. Esto con el fin de saber si el comportamiento del líquido dentro de cada columna es similar o por el contrario se comporta diferente, lo cual concluirá que el modelo se puede aplicar en otras condiciones o si debe calibrarse para cada condición específica.

Para comparar las dos rectas se necesitaron los siguientes datos:

Tabla 17. Comparación estadística de las columnas de residuos

Densidad (gr/cm ³)	Columna 1	Columna 2
0,1	11,368	8,360
0,127	5,691	7,098
0,163	3,193	5,121
0,2	1,975	4,397
Varianza	17,39966517	3,293674993
Pendiente	-88,74	-40,96
F Calculada	5,282751094	
F Tabulada 95%	19	
Como FT>FC	Por ende las varianzas son homogeneas	
T Calculado	10,503	
T Tabulado	1,943	
TC > TT	Por ende la pendientes son diferentes	

Fuente: propia

F calculado (F_{calc}) $F_{calc} = \frac{s_{b_1}^2}{s_{b_2}^2} > 1$

$$F_{calc} = \frac{17,3996}{3,2936} = 5,28$$

F tabulado: $F_{tab95\%, v_1, v_2}$ $v_1=n_1-2$, $v_2=n_2-2$

$$v_1=4-2=2, v_2=4-2=2$$

en la tabla F se halla $F_{tabulado}= 19$

Tabla 18. Resultado F tabulado

		Grados de libertad en el numerador																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	25	30	40
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246	248	249	250	251	
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	

Fuente: Adaptada (Humberto Gutiérrez pulido- Román de la vara Salazar, 2008)

Se observa que $F_{calc} < F_{tab}$, por lo tanto, se puede deducir que las varianzas son homogéneas. A continuación, se aplica el ensayo T cuando las varianzas son homogéneas

Calculo el estadístico t_{calc}

$$t_{calc} = \frac{(b_1 - b_2)}{\sqrt{s_{b_1}^2 + s_{b_2}^2}}$$

$$t_{calc} = \frac{(88,74 - 40,96)}{\sqrt{17,3996 + 3,2936}} = 10,50$$

valor de t tabulado: tabla t 95% de probabilidad, grados de libertad n_1+n_2-2

$$T_{\text{tab}95\%, n_1+n_2-2\text{g.l.}} \rightarrow 4 + 4 - 2 = 6$$

Tabla 19. Resultado T tabulado

Grados de libertad	Área a la derecha de los puntos, $P(X > x)$			
	0.10	0.05	0.025	0.015
1	3.0776835	6.3137515	12.706205	21.204949
2	1.8856181	2.9199856	4.3026527	5.6427784
3	1.6377444	2.3533634	3.1824463	3.8960459
4	1.5332063	2.1318468	2.7764451	3.2976297
5	1.475884	2.0150484	2.5705818	3.002875
6	1.4397557	1.9431803	2.4469119	2.8289279
7	1.4149239	1.8945786	2.3646243	2.714573
8	1.3968153	1.859548	2.3060041	2.6338144
9	1.3830287	1.8331129	2.2621572	2.573804
10	1.3721836	1.8124611	2.2281389	2.5274842

Fuente: Adaptada (Humberto Gutiérrez pulido- Román de la vara Salazar, 2008)

Se observa que $t_{\text{calc}} > t_{\text{tab}}$, por lo tanto, se puede deducir que las pendientes son diferentes.

Al determinar que las pendientes de las rectas son diferentes afirma que las conductividades hidráulicas en las dos columnas son diferentes así se estén manejando las mismas condiciones de densidad y caudal infiltrado. Esto indica que el modelo no se puede aplicar directamente sobre otras masas de residuos sin antes realizar un proceso de calibración de este de acuerdo con las condiciones.

5. CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el desarrollo de los objetivos durante la investigación, se establecen las siguientes conclusiones.

- Se logra la construcción de 2 columnas de residuos con similares condiciones de longitud, diámetros y acumulación de residuos, además de un sistema de alimentación que realiza las distribuciones homogéneas de caudal para garantizar la replicación de datos y un análisis estadístico.
- Los datos obtenidos en los cuatro ensayos a densidades diferentes, muestra que los tiempos de paso del líquido a través de la columna de residuos va aumentado a medida que la densidad aumenta, debido a la disminución de los caminos o espacio de tránsito para el líquido.
- Se puede concluir que para aplicar el modelo en un sitio de disposición final se deben tener en cuenta los factores como la precipitación, temperatura, viscosidad y columna de residuos
- Los resultados obtenidos en el modelo muestran que las columnas 1 y 2 arrojan datos diferentes, teniendo en cuenta que ambas estaban en las mismas condiciones, por lo tanto, se concluye que el modelo no puede ser confiable debido a la variación de los resultados.

5.2 RECOMENDACIONES

- En primer lugar, para crear un mejor modelo en sitios de disposición final, es necesario contar con la suficiente información para simular las condiciones reales del entorno y características del relleno.
- El modelo propuesto en este trabajo puede ser confiable si se realiza una mejor calibración con condiciones reales de un sitio de disposición final teniendo en cuenta la variación climática, características propias de los residuos y compactación.
- Es necesario la mayor toma de datos y repeticiones de los ensayos con el fin obtener una mejor confiabilidad en los resultados.
- Evaluar el funcionamiento del sistema de tratamiento de lixiviados existente en el sitio de disposición final, estimando la generación de caudales de estos líquidos haciendo uso del modelo propuesto.

Bibliografía

- [1] E. Gomez Vasquez, «Afectaciones ambientales de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios sobre el recurso agua,» Bucaramanga , 2018.
- [2] M. D. J. Corena Luna , «Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios,» Sincelejo, 2008.
- [3] A. Quintero Ramirez , Y. Valencia Gonzales y L. A. Lara Valencia , «Efecto de los lixiviados de residuos solidos en un suelo tropical,» *DYNA*, vol. 84, nº 203, pp. 283-290, Diciembre 2017.
- [4] A. Fernandez Muerza , «consumer,» 13 octubre 2006. [En línea]. Available: <https://www.consumer.es/medio-ambiente/contaminacion-por-lixiviados.html>. [Último acceso: 30 septiembre 2019].
- [5] M. Polo y E. Guevara , «Contaminación de acuíferos por efecto de los lixiviados en el área adyacente al vertedero de desechos solidos la Guasima municipio libertador, estado de Carabobo,» *Revista INGENIERIA UC*, vol. 8, nº 2, Diciembre 2001.
- [6] D. C. Diosa Velasquez , «Comportamiento geotecnico de los taludes conformados por residuos solidos en rellenos sanitarios,» Bogota D.C., 2016.
- [7] S. Castaño Castaño, «vertedero e impacto sobre las aguas subterranas,» [En línea]. Available: <https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259.4/2495/Casta%F1o-Vertederos.pdf;jsessionid=68DF672B2FB205C0CD04F01C660CAD5D?sequence=1>. [Último acceso: 28 septiembre 2019].
- [8] R. Gonzales Herrera y R. Rodriguez Castillo, «Contaminación del acuífero yucateco por lixiviado de residuos,» *climate variability and change* , pp. 635-640, 2006.
- [9] L. A. Moreno Pradera, «repobib,» diciembre 2013. [En línea]. Available: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1404/1/Moreno_Pradena

_Luis_Alfredo.pdf.

- [10] G. Bernache Perez , «Riesgo de contaminación por disposición final de residuos.un estudio de la region centro occidente de Mexico,» *Int. Contam. Ambie*, vol. 28, nº 1, pp. 97- 105, 2012.
- [11] [En línea]. Available: https://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/3_1.pdf.
- [12] Relleno doña juana: Emergencia por derrumbes , «El tiempo,» 29 abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/bogota/relleno-dona-juana-fotos-de-emergencia-por-un-derrumbe-de-basura-489940>. [Último acceso: 5 Diembre 2020].
- [13] Suspensión preventiva en una de las terrazas de Doña Juana, «autoridad Nacional de Licencias Ambientales,» [En línea]. Available: <http://www.anla.gov.co/Noticias-ANLA/suspension-preventiva-una-las-terrazas-dona-juana>. [Último acceso: 28 septiembre 2019].
- [14] «Basurero de navarro,» 30 abril 2007. [En línea]. Available: <http://basurodenavarro.blogspot.com/2007/04/el-sitio-de-disposicin-final-se.html>. [Último acceso: 25 10 2019].
- [15] «¿Por qué los lixiviados de Navarro están contaminando las aguas del río Cauca?,» *Elpais.com*, 16 mayo 2011. [En línea]. Available: <https://www.elpais.com.co/calipor-que-los-lixiviados-de-navarro-estan-contaminando-las-aguas-del-rio-cauca.html>. [Último acceso: 25 octubre 2019].
- [16] medio ambiente, «no cesa la problemática de las basuras en Popayán,» 30 09 2014. [En línea]. Available: <http://www.colombiainforma.info/no-cesa-la-problematica-de-las-basuras-en-popayan/>. [Último acceso: 29 septiembre 2019].
- [17] *resolucion No 00168 por el cual se impone una medida preventiva y se ordena el inicio de un procedimiento sancionatorio ambiental*, 2019.

- [18] A. Fernandez Muerza, «Contaminación por lixiviados,» 13 octubre 2006. [En línea]. Available: <https://www.consumer.es/medio-ambiente/contaminacion-por-lixiviados.html>. [Último acceso: 24 abril 2020].
- [19] J. Ullca, «los rellenos sanitarios,» *La Granja*, nº 4, pp. 2-17, 2006.
- [20] W. M. Chavez Montes, «cimav.repositorioinstitucional,» noviembre 2011. [En línea]. Available: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/858/1/Wendy%20Margarita%20Ch%C3%A1vez%20Montes%20MCTA.pdf>.
- [21] J. G. Barbecho Chuisaca y J. E. Calle Ortiz, «Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del río Tarqui,» Cuenca , 2012.
- [22] J. Ramos Rivera , «Geotecnia de rellenos sanitarios,» Colombia , 2011.
- [23] M. Vargas Guerrero, «Modelo de balance hídrico para la estimación de los caudales de lixiviados generados en la operación del relleno sanitario del centro industrial del sur-El Guacal, Heliconia - Antioquia,» Medellín, 2009.
- [24] J. L. Tito Hurcaya, «Aplicación del modelo help para la predicción de producción de lixiviado en el área propuesta para el relleno sanitario Huayna Capac - Tingo Maria,» Tingo Maria, 2016.
- [25] J. Martínez Arias , «Cuantificación del volumen de percolación de lixiviados mediante el balance de humedad de los residuos sólidos,» Toluca , 2019.
- [26] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, *Decreto número 0838*, Bogotá D.C., 2005, pp. 1-17.
- [27] G. R. Agudelo, «Tratamiento de lixiviados producidos en el relleno sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín utilizando reactores UASB y filtros anaerobios FAFA». En: Memorias IV Seminario Taller Latinoamericano sobre Tratamientos de Aguas residuales,» Bucaramanga, 1998.
- [28] j. Sanchez San Roman, «ley de Darcy,» enero 2008. [En línea]. Available: <http://agronomia.criba.edu.ar/carreras/ia/archivos/Materias/579/archivos/agu>

assubterraneas/DARCY.pdf.

- [29] V. E. Meza Ocha, «suelos parcialmente saturados,» 18 junio 2012. [En línea]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/download/31251/43362#:~:text=Los%20suelos%20que%20se%20encuentran,estado%20seco%20o%20parcialmente%20saturado.&text=En%20esta%20zona%2C%20el%20agua,20%25%20y%20el%2080%25..>
- [30] R. Bragado Alcaraz, «conductividad hidraulica saturada,» 3 mayo 2017. [En línea]. Available: [https://www.tiloom.com/conductividad-hidraulica-saturada/#:~:text=La%20capacidad%20de%20infiltraci%C3%B3n%20de,tiempo%20\(mm%2Fh\)..](https://www.tiloom.com/conductividad-hidraulica-saturada/#:~:text=La%20capacidad%20de%20infiltraci%C3%B3n%20de,tiempo%20(mm%2Fh)..)
- [31] J. Barbecho y J. Calle, «universidad de cuenca,» [En línea]. Available: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/771/1/ti897.pdf>.
- [32] Y. Boñon Chunque, D. Cholan Becerra, A. Guevara Idrogo, K. Mejia Mejia , R. Mendoza Delgado y H. Mines Manosalva, «Conductividad hidraulica y transmisividad,» Cajamarca, 2019.
- [33] H. Darcy, «Ley de Darcy. Conductividad Hidraulica,» febrero 2013. [En línea].
- [34] m. EL FAdel , U. Findikakis y J. Leckie, «Modeling leachate generation and transport in solid waste landfills,» *Environmental technology*, vol. 18, nº 1997, pp. 669-686, 11 mayo 2010.
- [35] J. Martinez Arias, «Cuantificación del volumen de percolación de lixiviados mediante el balance de humedad de los residuos solidos,» Toluca, 2019.
- [36] R. Lopez Velasco, «Evaluacion de la produccion de lixiviados en vertederos de residuos solidos urbanos: Metodos disponibles y aplicacion a vertederos de cuencas mediterraneas,» España, 2015.
- [37] S. Giraldo Atehortua y P. A. Rodriguez Henao, «core,» 2005. [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/11051404.pdf>.
- [38] A. L. Garcia De Cortazar, «Modelos hidrológicos y de biodegradación del

- vertedero,» 2005. [En línea]. Available: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10616/2de9.ALGcap2.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. [Último acceso: 30 julio 2020].
- [39] I. Lejarza y J. Lejarza, «regresion,» [En línea]. Available: <https://www.uv.es/ceaces/pdf/regre.pdf>.
- [40] Hotmath, «Regresion exponencial,» 2020. [En línea]. Available: https://www.varsitytutors.com/hotmath/hotmath_help/spanish/topics/exponential-regression#:~:text=Una%20regresi%C3%B3n%20exponencial%20es%20el,a%20un%20conjunto%20de%20datos.&text=La%20potencia%20predictiva%20relativa%20de,m%C3%A1s%20preciso%20ser%C3%A1%20. [Último acceso: 20 agosto 2020].
- [41] F. Tusell, «Análisis de regresion.introduccion teorica y practica basada en R,» octubre 2011. [En línea]. Available: <http://www.et.bs.ehu.es/~etptupaf/nuevo/ficheros/estad3/nreg1.pdf>.
- [42] A. Novales , «Análisis de regresion,» 20 septiembre 2010. [En línea]. Available: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis%20de%20Regresion.pdf>.
- [43] H. Gutierrez Pulido y R. De la Vara Salazar, Análisis y diseño de experimentos, Mexico: McGraw-Hill Interamericana, 2008.
- [44] Doña Juana: 20 años de una tragedia que no se supera, «El espectador,» 27 septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/dona-juana-20-anos-de-una-tragedia-que-no-se-supera-articulo-715126>. [Último acceso: 25 octubre 2019].
- [45] Fundacion Terram, «Terram,» 7 noviembre 2011. [En línea]. Available: https://www.terram.cl/2011/11/zonas_saturadas_y_latentes/#:~:text=Las%20zonas%20saturadas%20son%20aquellas,respectiva%20norma%20de%20c

alidad%20ambiental..