



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CAPACIDAD DE DRENAJE DE
TUBERÍAS PERFORADAS COLECTORAS UTILIZADAS EN
BOTADEROS DE RIPIOS LIXIVIADOS – RESULTADOS
PRELIMINARES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

CARLOS MAURICIO MUÑOZ VERGARA

PROFESOR GUÍA

M. Sc. Mauricio Andrés Jara Ortiz

PROFESOR CO-GUÍA

M. Sc. Francisco Rivas Saldaña

Mg. Carlos Moraga Cruz

CURICÓ - CHILE

2021

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

RESUMEN

La estabilidad física en acopios de materiales granulares provenientes de procesos mineros es un tema importante para la ingeniería, y los acopios aterrizados llamados botaderos de rípios no son la excepción. La estabilidad de taludes puede verse afectada por múltiples aspectos, dentro de los cuales se encuentran, alzamientos y fluctuaciones de niveles freáticos en su interior, debido al: tipo de material, riego incorporado, o por un mal funcionamiento del sistema de drenaje.

El funcionamiento del sistema de drenaje en botaderos de rípios contiene una componente de incertidumbre en el sector minero, en relación con el caudal efectivo, tanto encamados de gravas (*cover*) como tuberías perforadas inmersas en el material *post* lixiviación. Debido a esto, el objetivo principal es la evaluación experimental de la capacidad de drenaje de tuberías perforadas colectoras utilizadas en botaderos de rípios lixiviados.

En el presente estudio se abordaron diferentes metodologías de análisis y estimación de infiltraciones a fin de poder evaluar la distribución y capacidad de flujo del sistema de drenaje compuesto por tuberías perforadas espaciadas e inmersas en el interior del botadero. Se consideró para este efecto una caracterización de un suelo con propiedades similares a la matriz fina de un material tipo rípio *post* lixiviación y un modelamiento numérico de infiltraciones en 2 dimensiones. Sumado a lo anterior, se realizó un modelo físico a escala 1:10 que consideró acopios aterrizados de material arcilla - arena arcillosa y las tuberías del sistema de drenaje mediante microtubos con diámetro de 4 mm.

Finalmente, los resultados obtenidos para caudales en modelamiento numérico ($1,22 * 10^{-4} cm^3/s$) y en una de las pruebas del modelo físico ($5 * 10^{-3} cm^3/s$), presentaron una leve diferencia producto de errores que pueden ocurrir durante este último, tanto los taponamientos de tuberías, la componente tasa de riego, homogeneidad del material, entre otros. Estos resultados dieron cuenta del comportamiento de tuberías perforadas y su capacidad en el proceso de drenaje, evidenciando los efectos producidos por la granulometría de este debido a su chancado químico y cómo podría afectar la estabilidad del botadero de rípios.

Palabras claves: Experimental, Botadero, Rípios, Drenaje.

ABSTRACT

Physical stability in stockpiles of granular materials from mining processes is an important issue for engineering, and terraced stockpiles called gravel dumps are no exception. The stability of slopes can be affected by multiple aspects, within which are, elevations and fluctuations of water table levels inside, due to the: type of material, built-in irrigation, or by a malfunction of the drainage system.

The operation of the drainage system in gravel dumps contains a component of uncertainty in the mining sector, in relation to the effective flow, both bedridden gravel(*cover*)and perforated pipes immersed in the post-leaching material. Because of this, the main objective is the experimental evaluation of the drainage capacity of perforated collector pipes used in leachate gravel dumps.

In the present study, different methodologies of analysis and estimation of infiltrations were addressed to be able to evaluate the distribution and flow capacity of the drainage system composed of perforated pipes spaced and immersed inside the dump. It was considered for this purpose a characterization of a soil with properties like the fine matrix of a gravel-type material *post* leaching and a numerical modeling of infiltrations in 2 dimensions. In addition to the above, a physical model was made at 1:10 scale that considered terraced collections of clay-clay sand material and the pipes of the drainage system by means of microtubes with a diameter of 4 mm.

Finally, the results obtained for flow rates in numerical modeling ($1,22 * 10^{-4} cm^3/s$) and in one of the tests of the physical model ($5 * 10^{-3} cm^3/s$), presented a slight difference product of errors that can occur during the latter, both the plugging of pipes, the component irrigation rate, homogeneity of the material, among others. These results showed the behavior of perforated pipes and their capacity in the drainage process, evidencing the effects produced by the granulometry of this due to its chemical crushing and how it could affect the stability of the gravel dump.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes y motivación	2
1.2	Descripción del Problema	2
1.3	Solución propuesta.....	3
1.4	Objetivos	4
1.4.1	Objetivo general.....	4
1.4.2	Objetivos específicos	4
1.5	Alcances.....	4
1.6	Metodología y herramientas utilizadas	4
2	MARCO TEÓRICO	7
2.1	Lixiviación y Botaderos de rípios	8
2.2	Permeabilidad	11
2.2.1	Ensayo de laboratorio para determinar la permeabilidad saturada	14
2.3	Factores que afectan el drenaje de la pila o botadero.	18
2.3.1	Granulometría y permeabilidad del mineral	19
2.3.2	Tasa de riego e infiltración.	22
2.4	Etapas para la formación de Botadero de Rípios	23
2.5	Características de los materiales post lixiviación.....	23
2.6	Problemas geotécnicos en el diseño	24
2.7	Factores que afectan la estabilidad física del botadero	25
2.8	Observaciones en terreno botaderos de rípios.....	26
2.8.1	Recomendaciones al diseño geotécnico	27
2.9	Sistema de drenaje	28
2.10	Movimiento del agua en el suelo.....	29

2.11	Caudal y separación teórica para drenajes paralelos.....	32
3	METODOLOGÍA	34
3.1	Obtención de información	35
3.2	Características del material representativo	35
3.3	Dimensiones modelo físico	36
3.4	Modelamiento numérico de flujos	37
3.5	Descripción del sistema de drenaje	37
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
4.1	Tasa de infiltración residual	40
4.1.1	Parámetros geotécnicos para la matriz fina de un ripio post lixiviación	40
4.2	Caracterización granulométrica del material representativo	42
4.3	Límites de consistencia (Atterberg).....	45
4.4	Determinación del peso específico con picnómetro.....	48
4.5	Ensayos de permeabilidad para el material.....	49
4.6	Determinación de la separación de tuberías y caudal teórico captado por el sistema de drenaje	53
4.7	Modelación numérica.	59
4.8	Construcción de estructura representativa.....	65
4.9	Análisis de resultados del experimento	67
5	CONCLUSIÓN	76
6	BIBLIOGRAFÍA	80
7	ANEXOS	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Valores relativos de permeabilidad y clasificación de suelos.....	41
Tabla 4.2: Materiales y sus rangos de porosidad.....	42
Tabla 4.3: Análisis granulométrico.....	43
Tabla 4.4: Límites de Atterberg.....	46
Tabla 4.5: Resultados de Límite plástico, Límite Líquido y Índice de Plasticidad.	47
Tabla 4.6: Peso específico (PE).....	49
Tabla 4.7: Información muestra.....	50
Tabla 4.8: Resultados obtenidos de Carga Constante.	50
Tabla 4.9: Información para carga variable.....	51
Tabla 4.10: Resultados obtenidos de Carga variable	52
Tabla 4.11: Datos utilizados para la obtención de las variables t y s de la muestra de ensayo.....	54
Tabla 4.12: Relación de raíz (W/k) y Permeabilidad de material.....	57
Tabla 4.13: Resultados de s para su respectivo t	58
Tabla 4.14: Resultados de Caudal para la disposición de tuberías.	58
Tabla 4.15: Dimensiones de estructura.	65
Tabla 4.16: Resultados pruebas de Caudal en experimento.....	74
Tabla 7.1: Análisis granulométrico.....	83

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Geometría modelo físico	6
Figura 2.1: Pilas Dinámicas.....	9
Figura 2.2: Componentes de una Pila de Lixiviación.....	10
Figura 2.3: Influencia de la gradación en la permeabilidad de suelos granulares	12
Figura 2.4: Rango de permeabilidades y drenaje para distintos tipos de suelos	13
Figura 2.5: Ensayo de Carga Constante.....	15
Figura 2.6: Ensayo de Carga variable.....	17
Figura 2.7: Variación de la granulometría debido a “chancado químico”	20
Figura 2.8: Banda granulométrica de ripios.....	21
Figura 2.9: Flujo en medio parcialmente saturado, efecto de la magnitud de la tasa de infiltración.	22
Figura 2.10: Observaciones de apilamiento en terreno botadero de Ripios.....	26
Figura 2.11: Observaciones de solución en terreno Botadero de Ripios.....	27
Figura 2.12: Observaciones de grietas y asentamientos en terreno Botadero de Ripios.....	27
Figura 2.13: Panorámica construcción de drenes basales en Botaderos de Ripios.....	29
Figura 2.14: Experimento movimiento del agua, Suelo texturizado diferente.....	30
Figura 2.15: Experimento movimiento del agua, Suelo saturado.....	31
Figura 2.16: Experimento movimiento del agua, Suelo compuesto de Arcillas.....	31
Figura 2.17: Drenajes paralelos.....	32
Figura 3.1: Representación geométrica del Botadero junto con los niveles de tuberías, en a) Vista general de niveles, en b) Distancia entre tuberías.....	38
Figura 4.1: Representación de una lixiviación en pilas.....	40
Figura 4.2: Muestra representativa para análisis.....	44
Figura 4.3: Curva granulométrica.....	44
Figura 4.4: Cuchara de Casagrande	45
Figura 4.5: Gráfica Límite líquido.....	47
Figura 4.6: Sistema Clasificación USCS, a) Suelos finos, b) Suelos gruesos.....	48
Figura 4.7: Ensayo de permeabilidad.....	50
Figura 4.8: Variación de permeabilidad según densidad.....	53

Figura 4.9: Gráfica variación del espaciamiento de tuberías según diferentes tasas de infiltración.	55
Figura 4.10: Variabilidad de distancia entre tuberías para las tres tasas de infiltración.	56
Figura 4.11: Relación de la raíz (W/k) con las permeabilidades de los distintos materiales.	57
Figura 4.12: Gráfica de caudal versus espaciamiento de tuberías.	59
Figura 4.13: Curva de Succión versus Contenido de agua volumétrico.	60
Figura 4.14: Curva de Succión versus Conductividad $-X$.	61
Figura 4.15: Análisis de infiltración Flujo de Agua.	61
Figura 4.16: Presión intersticial, Cargar total.	62
Figura 4.17: Presión de poros por agua.	62
Figura 4.18: presión intersticial, Carga de presión.	63
Figura 4.19: Caudal de modelamiento numérico.	63
Figura 4.20: Caudal variando flujo de entrada y permeabilidad.	64
Figura 4.21: Microtubo de 4 mm de diámetro.	65
Figura 4.22: Dimensiones propuesta estructura de 40 cm de ancho.	66
Figura 4.23: Componentes de la representación Botadero de Ripios.	67
Figura 4.24: Muestra utilizada con referencia.	67
Figura 4.25: Instalación de geomembrana para el Experimento.	68
Figura 4.26: Armado final del Botadero de Ripios.	69
Figura 4.27: Incorporación de líquido en modelo físico.	69
Figura 4.28: Primer avance del frente humectante en modelo físico.	70
Figura 4.29: Avance del frente humectante.	70
Figura 4.30: 7 cm de avance del frente humectante.	71
Figura 4.31: Saturación completa y superficie del modelo físico.	72
Figura 4.32: Líquido en la superficie del modelo físico.	73
Figura 4.33: Representación con distancia de 10 cm entre tuberías.	73
Figura 4.34: Gráfico comparativo de caudal.	74
Figura 7.1: Ensayo de Limite de Atterberg	83
Figura 7.2: Cuchara de Casagrande.	84
Figura 7.3: Ensayo de permeámetro con suelo Saturado.	84

1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se dan a conocer las principales temáticas que motivan esta memoria, junto con sus objetivos y alcances, así como los antecedentes y metodologías que interesarán para su elaboración.

1.1 Antecedentes y motivación

En minería, los botaderos de ripios corresponden a acopio de materiales que son depositados en una o varias capas aterrazadas, los cuales provienen directamente del proceso de lixiviación. Una vez aterrazado el material, es fundamental recolectar de buena forma las soluciones o volúmenes de soluciones residuales que aún percolan a través de los ripios ya lixiviados, ya que por un lado esto corresponde al principal objetivo del negocio y además es de suma importancia minimizar los riesgos o potenciales inestabilidades químicas y físicas, entre otras problemáticas.

El recolectar estas soluciones con la mayor eficiencia tiene como objetivo garantizar que el nivel freático al interior del cuerpo del botadero o pila sea el menor posible, a modo de no afectar la estabilidad física en especial de los taludes. En el caso de los botaderos de ripios, que pueden alcanzar alturas mayores a 100 m, el diseño del sistema de evacuación de tuberías perforadas colectoras utilizadas como drenaje en depósitos aterrazados debe además garantizar, a largo plazo, que cumpla su función de manera óptima y también garantizar la integridad de las tuberías de recolección de soluciones que se sitúan bajo el cuerpo del botadero.

Debido a lo anterior, es de suma importancia conocer y determinar la capacidad de evacuación de las tuberías perforadas colectoras ya que, al tener este conocimiento, esto nos permitirá mejorar la toma de decisiones en procesos posteriores a este, ya sea una lixiviación secundaria o in situ, o también para tener en cuenta los procesos hidrometalúrgicos que se podrían llevar a cabo más adelante sobre el botadero (Bard & Campaña, 2004)

1.2 Descripción del Problema

El proceso de lixiviación puede clasificarse en pilas estáticas o dinámicas según su utilización, estas últimas también nombradas “*on/off*” son aquellas en donde el mineral una vez pasado el proceso de lixiviación, es removido y trasladado finalmente al botadero de ripios lixiviados.

Los botaderos de ripios corresponden a acopios de materiales ya lixiviados que son transportados mediante camiones o correas transportadoras siendo depositados en una o varias capas de material (terrazas), estos provienen directamente de la lixiviación, proceso hidrometalúrgico en donde se extrae el mineral de interés resultante de las menas que cumplen ciertas características definidas por la empresa. Este mineral es llevado a un proceso de chancado, con el objetivo de llevarlo a una

banda granulométrica para maximizar la extracción, por lo general el tamaño máximo es menor a 1". Otra característica de gran relevancia es tener en cuenta que durante el proceso de lixiviación la granulometría se ve modificada, generando una matriz fina que reduce la permeabilidad afectando a la estabilidad de dicho botadero.

El sistema de drenaje utilizado en los botaderos de ripios tiene principalmente el objetivo de recolectar y conducir las soluciones residuales ricas en el mineral de interés obtenidas del proceso de lixiviación, minimizando problemas de drenaje ácido hacia el suelo de fundación. A su vez, la existencia de un sistema de drenaje adecuado también permite mantener controlado el nivel freático al interior tanto de la pila de lixiviación como del botadero de ripios, en donde es frecuente observar problemas de estabilidad, los que, en mayor o menor grado, pueden comprometer el funcionamiento de los equipos y con ello la continuidad operacional de la mina. Por lo anterior, el funcionamiento del sistema de drenaje pasa a ser crítico en el diseño de estas obras.

Es por esto, que se busca evaluar experimentalmente la capacidad de evacuación de tuberías perforadas colectoras utilizadas como drenaje en depósitos aterrizados de suelos en botaderos de ripios lixiviados, para garantizar el real funcionamiento del sistema de drenaje, ya que muchas veces lo propuesto no coincide con los resultados obtenidos.

1.3 Solución propuesta

El presente estudio consiste en la determinación analítica y experimental de la capacidad de evacuación de tuberías perforadas colectoras utilizadas como drenaje en depósitos aterrizados de suelos en botaderos de ripios lixiviados, utilizando las propuestas clásicas y un modelo físico preliminar, con el fin de evaluar el diseño de construcción de las tuberías de drenaje utilizadas en un botadero de ripios.

El estudio considera un análisis numérico para entender de mejor manera el comportamiento de los flujos al interior de un botadero y una determinación de estos a partir de la construcción de un modelo físico a escala que permita la percolación de los flujos en un medio de grano fino. La comparativa de estos resultados será de utilidad para poder aumentar el nivel de entendimiento y comprensión de la capacidad de evacuación de flujos del sistema de tuberías.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Determinar experimentalmente la capacidad de evacuación que tiene un sistema de tuberías perforadas colectoras utilizadas como drenaje en botaderos de ripios lixiviados.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar el diseño de las tuberías colectoras perforadas utilizadas para el drenaje de los botaderos de ripios lixiviados.
- Definir la cantidad de tuberías según el diseño comprometido del material aterrizado, para corroborar si realmente evacuará la solución esperada.
- Construir un modelo físico a escala del botadero de ripios y lograr identificar sus partes para garantizar su representatividad.
- Analizar y observar si existe alza del nivel freático entre tuberías mediante la representación geométrica, para verificar el funcionamiento de las tuberías.

1.5 Alcances

El alcance de esta de memoria es evaluar experimentalmente la capacidad de drenaje de las tuberías perforadas colectoras utilizadas en depósitos aterrizados de suelos en botaderos de ripios lixiviados.

Se obtuvieron resultados experimentales al evaluar la infiltración en un recipiente de acrílico con dimensiones que permitan una relación a escala de la percolación de los flujos en un medio de grano fino, junto con las tuberías de drenaje inmersas en el interior del botadero, y realizando una observación y cuantificación de la capacidad de drenaje.

1.6 Metodología y herramientas utilizadas

Para la elaboración de esta memoria se realizó una búsqueda de información relacionada a los botaderos de ripios y su sistema de drenaje. Chile cuenta con una gran cantidad de botaderos de ripios, algunos de estos se encuentran en faenas como División Salvador de Codelco, en Gabriela Mistral, entre otros. Con esta información, se llevó a cabo un análisis del material particulado que

controla la velocidad de escurrimiento y además las dimensiones de un botadero de las cuales se realizó una representación geométrica que fue llevada a escala para la construcción de un botadero dentro de un recipiente de volumen controlado.

En cuanto a sus dimensiones, el botadero de ripios en escala real es construido en capas individuales de 10 metros de espesor (plataformas), los cuales serán representados en laboratorio por capas de 10 cm, obteniéndose de esta forma un recipiente de 60 cm x 30 cm x 40 cm como volumen de control para el modelo físico.

Para la realización de este modelo se tomó en cuenta que los botaderos de ripios se acopian generalmente considerando 3 plataformas.

Además, para robustecer el estudio se realizaron análisis de infiltración simple en el *software Geostudio 2012* utilizando la plataforma *SEEP/W*, en donde, con este se busca obtener análisis en cuanto al comportamiento de los flujos y evaluando también las condiciones límites presentes en el diseño.

En cuanto al material a tratar se considera un ripio que ha sufrido desintegración gradual en el tiempo, que habitualmente provee de una matriz fina (limos/arcillas) que condicionan la velocidad de los flujos a través de él (permeabilidad), sobre la base de lo anterior se utilizó material areno arcilloso, el cual previamente fue caracterizado.

Por otro lado, las tuberías en escala real están dispuestas equiespaciadas de 2 a 6 m, aquellas que están dispuestas sobre la geomembrana conducen las soluciones hacia tuberías de mayor diámetro, que captan y conducen en forma controlada, ya sea para su recirculación u otro proceso. Estas tuberías, con diámetros que varían por lo general de 600 mm a 1000 mm, están insertas en zanjas profundas rellenas con material granular seleccionado y compactado. El relleno compactado mejora el comportamiento estructural de las tuberías, puesto que otorga un mayor nivel de confinamiento, además las tuberías se instalan en zanjas para lograr una reducción de la presión vertical que actúa sobre éstas, debido al “efecto de arco”.

Para la ejecución del experimento, estas tuberías serán representadas por microtubos de riego de 4 mm de diámetro las que estarán equiespaciadas por una distancia “s” que permita conducir la solución hacia el exterior de la estructura directamente sin tener que pasar por otra tubería. Para

obtener un mejor planteamiento del experimento se realizó un bosquejo con sus respectivas medidas el cual se verá en la Figura 1.1.

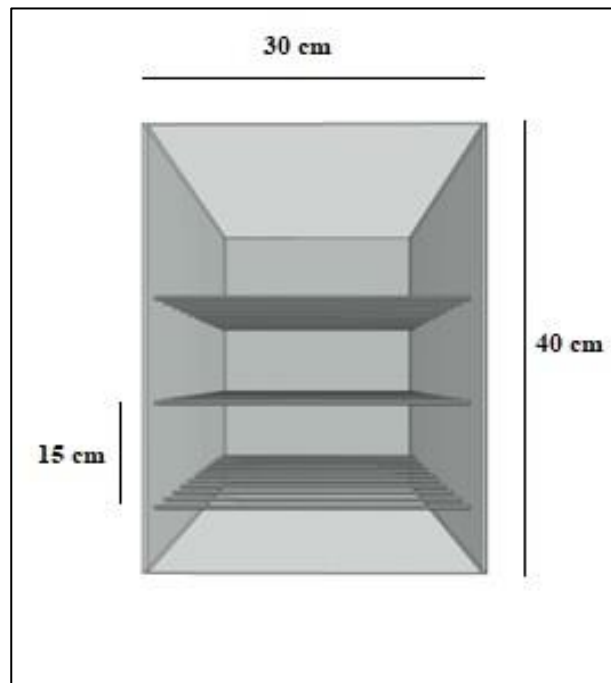


Figura 1.1: Geometría modelo físico

Fuente: Elaboración propia.

2 MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se presentan diversos conceptos, referencias y metodologías necesarias para llevar a cabo la identificación y características del botadero de ripios, las técnicas y los métodos utilizados para caracterizar los materiales.

2.1 Lixiviación y Botaderos de rípios

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales que lo contienen aplicando una solución ácida, formada, principalmente, por ácido sulfúrico y agua. Este proceso está siendo ampliamente utilizado para minerales de cobre de baja ley, debido a su bajo costo.

La lixiviación se desarrolla en pilas, conocidas como pilas de lixiviación, las cuales son terraplenes de gran extensión y, en algunos casos, de gran altura, compuestos de minerales de cobre oxidados o sulfurados. Las pilas son regadas con soluciones ácidas en la parte superior, la cual entra en contacto con los minerales, generándose así una solución rica en cobre hacia la parte inferior de la pila. Esta zona se encuentra impermeabilizada y posee un sistema de colección y drenaje, con el cual la solución es dirigida hacia las piscinas para su eventual proceso (Lopez, 2012).

Hoy en día, el diseño de pilas de lixiviación suele considerar sólo variables metalúrgicas. Bard (Bard & Campaña, 2004) han puesto en evidencia la necesidad de incorporar variables geotécnicas que, en algunos casos, podrían condicionar el diseño, estas pueden ser consideradas tanto para el desarrollo de pilas de lixiviación como para botaderos de rípios lixiviados.

Pasando a procesos posteriores a la lixiviación, se tiene que los materiales post lixiviación se denominan rípios los que son trasladados mediante correas o camiones a un botadero. Según estudios realizados por Carolina Vergara (Vergara, 2019) en las pilas de lixiviación y en estos botaderos de rípios es frecuente observar problemas de estabilidad, los que en mayor o menor grado, pueden comprometer el funcionamiento de los equipos y con ellos la continuidad operacional de la mina.

Existen dos tipos de Pilas de lixiviación que corresponden a:

- Pilas permanentes (*Dedicated pads*)
- Pilas dinámicas (*Reusable pads; on/off*)

Las Pilas permanentes son aquellas en que se construyen y riegan por niveles, una vez terminado el proceso de lixiviación de una capa, las nuevas capas se cargan sobre las anteriores, aprovechando o no la impermeabilización existente, lo que depende de la capacidad drenante de la pila.

Por otro lado, si la pila es dinámica, es decir, se remueven los materiales lixiviados, conocidos como rípios, estos se disponen en otro sector denominado botadero, en donde eventualmente, pueden ser sometidos a una lixiviación secundaria, en los mismos botaderos, lugar donde se centra el estudio experimental. Para su traslado se tienen dos opciones: mediante cargadores frontales y camiones, o un sistema totalmente mecanizado (rotopala). La Figura 2.1 representa el caso de la pila dinámica.

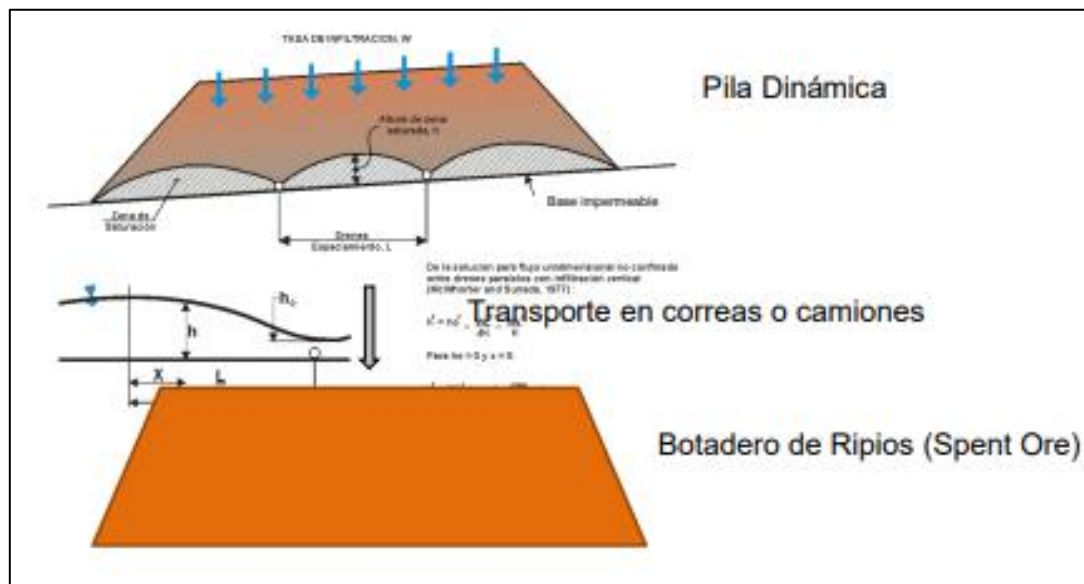


Figura 2.1: Pilas Dinámicas.

Fuente: (Vergara, 2019)

El sector de apilamiento de una planta cobre, por lo general, una gran área, la cual debe cumplir varios requisitos. El terreno donde se instalarán las pilas debe tener una pendiente ojalá no superior a 5,0 %, para asegurar la estabilidad de la pila, y nunca inferior a 0,7 %, de tal manera que las soluciones fluyan fácilmente hacia el sistema de colección basal.

El carguío de las pilas y de los botaderos se realiza, en general, sobre un material granular limpio llamado cover, el cual a su vez es colocado por sobre una geomembrana impermeable de HDPE (*high density polyethylene*) o LLDPE (*linear low density polyethylene*), cuyo espesor debe ser diseñado para evitar el punzonamiento generado por las partículas que están sobre ella, debido a la presión provocada por el peso propio de la pila o botadero. Esto evita la infiltración de soluciones al suelo natural. Sobre la geomembrana, y embebidas en el cover, se suele colocar tuberías que

corresponden a elementos que colaboran en la recolección y conducción de los flujos, es necesario señalar que en el caso de colmatación del material *cover*, las tuberías tendrán la responsabilidad de evacuar la totalidad de los flujos e impedir el alzamiento excesivo del nivel freático. Para entender de mejor manera el diseño, la Figura 2.2 presenta un esquema de una pila de lixiviación con los distintos componentes que la conforman.

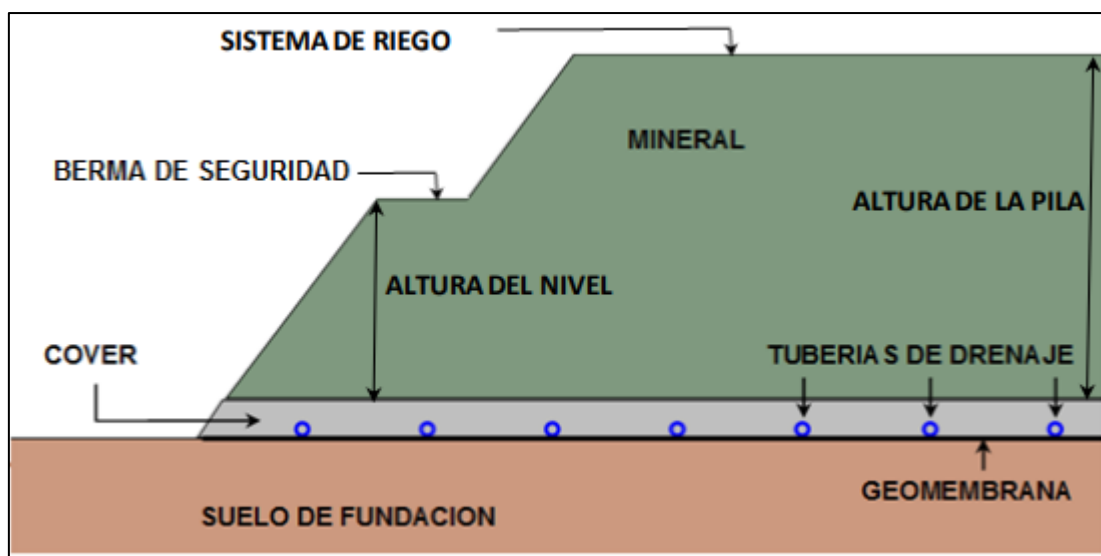


Figura 2.2: Componentes de una Pila de Lixiviación.

Fuente: (Lopez, 2012)

A continuación, se explica cuáles son las principales funciones de cada uno de los componentes de una pila de lixiviación de minerales de cobre ya sea primaria o secundaria.

- Mineral: Es el material pétreo que contiene el mineral de cobre. Estos minerales pueden ser óxidos o sulfuros de cobre.
- Solución ácida: Corresponde al agente lixivante. Sus principales componentes son agua y ácido sulfúrico. El riego también se puede realizar con refino, es decir, con solución que ya ha lixiviado mineral, pero que no contiene cobre suficiente para realizar su extracción.
- Sistema de riego: Corresponde al sistema a través del cual se aplican las soluciones ácidas al mineral. Este sistema se ubica en la parte superior de la pila y se compone de goteros, aspersores o sistemas mixtos. A diferencia de los botaderos de rípios, estos no son regados, sino que su drenaje es producto de la humedad residual del material húmedo.
- Sistema de impermeabilización: Corresponde al sistema encargado de que las soluciones ácidas no escurran hacia el suelo de fundación de la pila. En Chile, en general, se utilizan

geomembranas de HDPE o LLDPE, aunque también se ha utilizado PVC. La no utilización de sistemas de impermeabilización naturales se debe a la dificultad de obtener suelos arcillosos en la zona del norte grande, donde suelen estar ubicadas las pilas de lixiviación.

- Tuberías de drenaje: Corresponde a la red de tuberías ranuradas cuyo fin es mantener controlado el nivel freático dentro de la pila. Éstas transportan las soluciones hasta el sistema de evacuación;
- *Cover*: Material granular que se coloca sobre el sistema de impermeabilización que puede cumplir alguna o todas las siguientes tareas: a) actuar como material drenante; b) proteger la geomembrana; y c) actuar como filtro;
- Sistema de evacuación: Se compone por una red de tuberías ranuradas, y se encarga de conducir las soluciones hacia afuera de la pila. Está conectado al sistema de drenaje y se ubica en la base de la pila. Las soluciones son conducidas hacia el sistema de recolección externo
- Sistema de recolección externo: Suele ser una canaleta ubicada fuera de la pila, desde la cual las soluciones se conducen hacia las piscinas de procesos, donde la solución puede ser devuelta, o bien, transportada hacia la planta de extracción por solventes (SX), donde comienza el proceso de extracción del cobre desde las soluciones ácidas.

2.2 Permeabilidad

Para entender los factores que afectan a los diseños de botaderos de rípios y pilas de lixiviación, es necesario antes profundizar sobre el tema de permeabilidad. La constante de permeabilidad depende considerablemente de los factores del suelo, aquellos que influyen en este son variados, estos se pueden ver a continuación.

El factor con mayor influencia en la permeabilidad es el tamaño de los granos, mientras menor es el tamaño de éstos, mayor es la superficie de contacto con el fluido contenido en los poros; este aumento en el área superficial provoca un incremento en la resistencia friccional al flujo, lo que provoca una disminución en la permeabilidad del suelo.

Otra variable que tiene una alta influencia en la permeabilidad es la gradación del suelo, sin embargo, diversas investigaciones desarrolladas en esta área han concluido que, en un suelo con distintos tamaños de granos, la permeabilidad dependerá principalmente del tamaño de las

partículas más pequeñas. La Figura 2.3 presenta una correlación entre la permeabilidad y el D_5 (Diámetro por el que pasa el 5% del suelo). Aquí se observa que la gradación tiene una influencia pequeña en comparación al tamaño de las partículas más pequeñas. De todos modos, es posible probar que, si seleccionamos un tamaño fijo del diámetro medio de los granos, la permeabilidad del suelo será mayor mientras más uniforme sea el suelo (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996). Lo anterior se debería a que, en suelos bien graduados, los granos de menor tamaño ocuparán parte de los poros del suelo, disminuyendo la permeabilidad de éste.

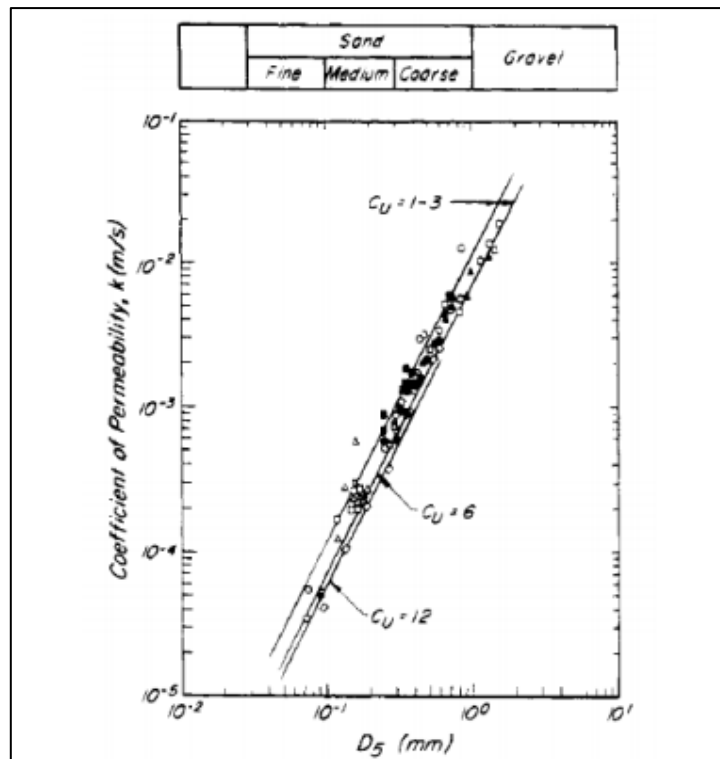


Figura 2.3: Influencia de la gradación en la permeabilidad de suelos granulares

Fuente: (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996)

En suelos parcialmente saturados el grado de saturación también influye en la permeabilidad, las burbujas de aire atrapadas en el suelo bloquean el paso de fluido por los canales de flujo, haciendo disminuir el valor de la permeabilidad. Además, debido a que las burbujas de aire disminuyen su tamaño con la presión del fluido, la permeabilidad también aumenta con el aumento de la presión del fluido.

La forma de los vacíos y la trayectoria del flujo a través de los poros, llamada tortuosidad, corresponden a otros factores del suelo que afectan la permeabilidad.

Diversos autores han llevado a cabo análisis matemáticos y mediciones de flujo a través de medios permeables con el propósito de conocer las propiedades más influyentes. En éstos se ha demostrado que la permeabilidad es determinada, principalmente, por las áreas de los poros individuales normales a la dirección del flujo, la forma de los poros a lo largo de la dirección del flujo, y el área total de poros por unidad de área normal a la dirección del flujo (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996). El tamaño de las partículas de suelo determina el tamaño de los poros individuales. La forma y arreglo de las partículas determinan la forma de los poros. Y el tamaño, forma y arreglo de los poros en conjunto, determinan la porosidad.

En la literatura es posible encontrar valores referenciales para diversos tipos de suelos, la cual debe ser utilizada sólo como referencia debido a la gran variación que puede presentar la permeabilidad de un suelo, con pequeñas variaciones de los parámetros que la afectan. Rangos típicos de valores de permeabilidad para distintos tipos de suelos se presentan en la Figura 2.4, la cual fue desarrollada por Casagrande (Holtz & Kovacs, 1981), donde también se incluyen las características de drenaje para los distintos rangos de permeabilidad.

		Coeficiente de permeabilidad, (cm/s)											
		100	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Drenaje		Bueno					Pobre			Prácticamente impermeable			
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada					Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.					Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición							
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.					
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.								Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia				

Figura 2.4: Rango de permeabilidades y drenaje para distintos tipos de suelos

(Fuente: Holtz and Kovacs, 1981)

De la Figura 2.4, Casagrande destaca ciertos valores del coeficiente de permeabilidad (1.0 , 10^{-4} , y 10^{-9} cm/s). Éstos son conocidos como los puntos de referencia de Casagrande y son bastante útiles al realizar estudios de flujo en suelos. Por ejemplo, 1.0 cm/s es, aproximadamente, la frontera entre flujo laminar y turbulento, y separa las gravas limpias de las arenas limpias y gravas arenosas. Un valor de k de 10^{-4} cm/s, es aproximadamente la frontera entre permeables y suelos de drenaje pobre bajo gradientes pequeños. La siguiente frontera, 10^{-9} cm/s, es aproximadamente el límite inferior de la permeabilidad de suelos, aunque se han encontrado permeabilidades tan bajas como 10^{-11} cm/s para arcillas muy plásticas en el límite de contracción.

2.2.1 Ensayo de laboratorio para determinar la permeabilidad saturada

Existen dos propuestas a la hora de determinar la permeabilidad de los suelos, obtener valores de coeficientes de permeabilidad mediante relaciones teóricas de forma indirecta o a través de intervenciones directas, la cual se divide en dos formas de intervención, siendo la primera el realizar ensayos normados en laboratorios y la segunda el realizar ensayos en terreno.

Los métodos indirectos consisten en varias relaciones empíricas propuestas por diferentes autores, las cuales suelen servir para un determinado número de suelos, por lo que no existen ecuaciones capaces de englobar a todos los materiales.

Por su parte los métodos directos para determinar la permeabilidad corresponden a instancias en donde se trabaja con el suelo o alguna muestra de este para poder obtener conclusiones. Estos métodos se dividen en ensayos de laboratorio y ensayos *in situ* en la que las pruebas se realizan en terreno.

Durante esta investigación se trabajará realizando un estudio de permeabilidad a partir de un ensayo de carga constante y/o variable según corresponda al material representativo.

2.2.1.1 Ensayo de carga constante

Consiste en una prueba para determinar la permeabilidad de materiales porosos y se encuentra detallado en la norma ASTM D 2434. La prueba se resume en el siguiente procedimiento:

1. Se identifican las partes del permeámetro, dejando registro de la altura del recipiente, así como la altura de la muestra y también el diámetro del permeámetro (d), para calcular posteriormente el área (A).

2. Posteriormente se rellena el recipiente con la muestra, asegurando colocar placas o discos permeables bajo y sobre la muestra.
3. Se colocan los tubos que servirán como manómetros y se conecta a la fuente de agua, se dará paso a la fuente de agua solo cuando se haya alcanzado un nivel constante.
4. Dependiendo de que manómetros se usarán se encontrarán los valores de h y L . El valor de h corresponde a la diferencia de lecturas en los manómetros, mientras que L corresponde a la altura de la muestra que se encuentra entre dichos manómetros. Sin embargo, también se puede expresar h como la diferencia de altura entre el nivel de agua constante y el nivel de salida del agua y el valor de L como la altura total de la muestra.
5. Una vez que se alcanza un nivel constante de agua en el reservorio, se da el flujo de agua y se espera que la muestra se sature completamente hasta que el agua comience a fluir por la salida.
6. Posteriormente es necesario colocar un recipiente graduado de volumen conocido (q) y cronometrar el tiempo que se demora en llenar dicho recipiente (t), siendo posible realizar varias mediciones o incrementos en caso de tener algún contenedor tipo probeta.

La Figura 2.5 muestra la estructura de un permeámetro junto a algunos parámetros del ensayo.

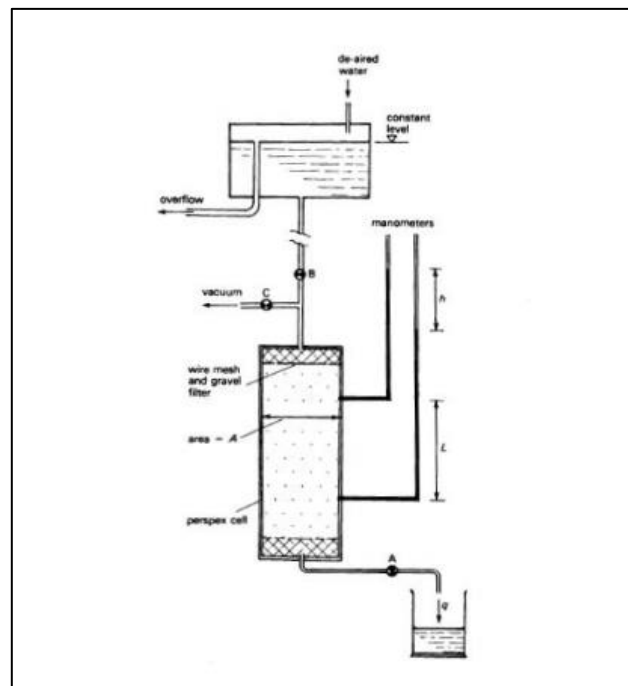


Figura 2.5: Ensayo de Carga Constante.

Fuente: (Whitlow, 1995)

La lógica detrás de este experimento es que mientras más permeable sea el material de estudio más fácil será que el agua lo atraviese, generando un caudal mucho mayor. Al conocer el volumen del permeámetro y la cantidad de muestra a ensayar es posible manipular la densidad a la que se somete la muestra.

El coeficiente de permeabilidad se obtiene de despejar la expresión de caudal como se ve en Ecuación 1:

$$Q = v * A \quad (1)$$

Luego, sustituyendo v se tiene la Ecuación 2:

$$Q = k * i * A \quad (2)$$

En función del gradiente hidráulico se tiene la Ecuación 3:

$$Q = k * \left(\frac{h}{L}\right) * A \quad (3)$$

Reordenando se obtiene la Ecuación 4:

$$k = \frac{q * L}{A * h * t} \quad (4)$$

En donde;

Q: Caudal obtenido al realizar ensayo $\left(\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\right)$

q: Volumen evacuado en el ensayo (cm^3)

v: Velocidad de descarga de ensayo $\left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)$

A: área transversal de la muestra suelo (cm^2)

t: Duración del ensayo (s)

k: Coeficiente de permeabilidad del suelo $\left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)$

i: Gradiente hidráulico debido a diferencias de altura (h) sobre una distancia (L)

2.2.1.2 Ensayo de carga variable

En este ensayo se tiene una configuración parecida en la confinación de la muestra, sin embargo, los cambios están en que la diferencia de carga hidráulica varía según el tiempo y que se utiliza para materiales finos. El objetivo del ensayo es determinar a través de las diferencias del nivel de agua y el gradiente hidráulico que se presentan en el experimento cual es la permeabilidad saturada del material. En la Figura 2.6 se muestra una realización del ensayo.

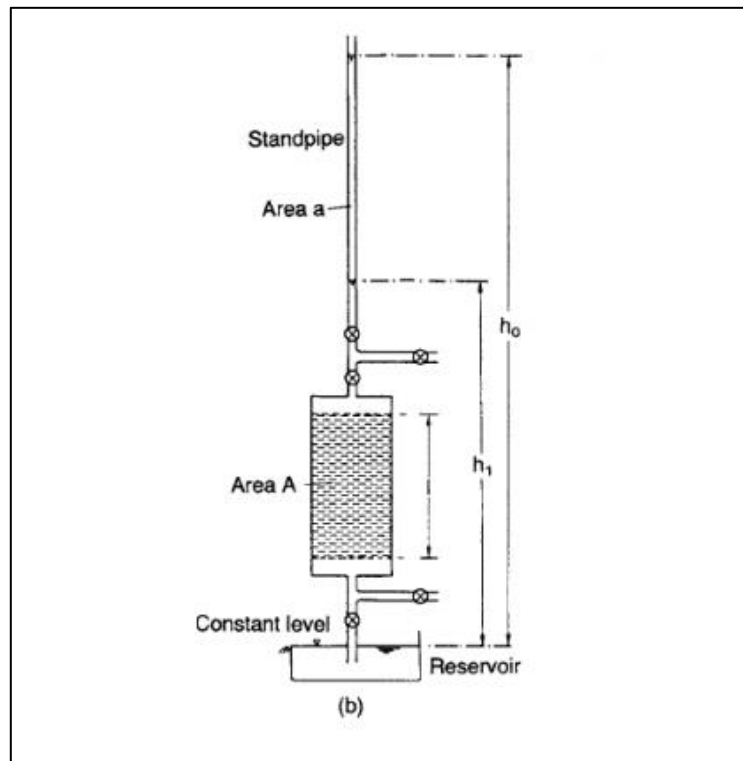


Figura 2.6: Ensayo de Carga variable.

Fuente: (Craig, 2004)

El coeficiente de permeabilidad se obtiene a partir de la Ecuación 5:

$$k = \frac{aL}{A(t_1 - t_2)} * \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (5)$$

Donde:

a: Área de la sección transversal de la tubería

A: Área de la sección transversal del permeámetro

t: tiempo en segundos

2.3 Factores que afectan el drenaje de la pila o botadero.

El proceso de lixiviación es un proceso químico complejo, donde intervienen diversos factores. El éxito de éste depende, en gran medida, de realizar un diseño que permita obtener la solución rica de manera eficaz y eficiente, ya que para que la lixiviación sea económicamente factible, se debe obtener una gran cantidad de cobre en un limitado periodo de tiempo. En lo relativo a la geotecnia, un drenaje pobre de la pila o también de un botadero es una de las causas más comunes de fracaso de proyectos de lixiviación en pilas o botaderos de ripios lixiviados.

En general, el diseño de la pila y botaderos se basa, principalmente, en variables hidrometalúrgicas, las cuales determinan el ciclo de lixiviación, la altura óptima de la pila, la tasa de infiltración, el porcentaje de cobre recuperado, etc. No obstante, ya se ha puesto en evidencia que para conseguir que un proceso de lixiviación sea exitoso, es necesario incorporar variables geotécnicas en el diseño, relativo al drenaje o flujo de la solución rica en cobre. Las variables geotécnicas que pueden condicionar el diseño son: granulometría y propiedades índices del mineral, permeabilidad del mineral, utilización de material de cover y sus propiedades (granulometría y permeabilidad), homogeneidad de los minerales, humedad de apilamiento y sistema de impermeabilización (Lopez, 2012).

En los siguientes ítems se realiza una descripción de algunos de los factores que pueden afectar el drenaje de la pila, entre estos la granulometría del material, permeabilidad y la tasa de riego o infiltración. La descripción realizada es presentada, principalmente desde un punto de vista geotécnico, no obstante, también se han incluido los criterios de diseño que se utilizan actualmente, los cuales se basan en mayor medida en variables hidrometalúrgicas. De esta forma esto ayuda a comprender de mejor manera la filosofía de diseño de pilas y botaderos, considerando también las variables a tener presente en el momento de construir el experimento principal, y, además, como debe incorporarse en esto la disciplina geotécnica.

2.3.1 Granulometría y permeabilidad del mineral

Normalmente la granulometría es “seleccionada” por las distintas pruebas metalúrgicas que se realizan. Su elección comienza con una selección basada en la experiencia del metalurgista, quien toma en cuenta las características fisicoquímicas del mineral. Es necesario considerar que siempre un menor tamaño de partículas dará mejores resultados en la recuperación de cobre, sin embargo, la disminución de tamaño tiene como consecuencia una disminución de la permeabilidad, lo que puede causar problemas operacionales debido a inundaciones, problemas de estabilidad mecánica estática y sísmica, e incluso la imposibilidad de que la solución se infiltre a través de las capas aterrazadas de los botaderos o pilas. En efecto, los sectores más alterados del cuerpo mineralizado contribuyen con un mayor contenido de arcillas, lo cual afecta en la capacidad de drenaje de los minerales y también en sus propiedades resistentes. También es necesario aclarar que desde el punto de vista metalúrgico no interesa cuantificar el material más fino que malla ASTM #100, y, además, en algunos casos esta caracterización granulométrica se efectúa por tamizado en seco. Al comparar los resultados con los de granulometrías efectuadas por método estándar ASTM, se observan notables diferencias, principalmente en la fracción arenas y finos (Bard & Campaña, 2004).

Otro aspecto de importancia es la posibilidad de que, al penetrar las soluciones por las microfisuras de las partículas más finas, se produzca un “chancado químico”, generando partículas más finas y afectando el drenaje del botadero o pila. Este chancado químico podría sumarse a dos efectos que podrían producir cambios en la granulometría del mineral: el chancado debido a la operación y carguío (chancado mecánico) y la migración de finos desde los sectores más altos de la pila hasta los sectores más bajos.

Bard (Bard & Campaña, 2004) ha presentado evidencia del chancado químico existente en el proceso de lixiviación. La Figura 2.7 presenta la granulometría de minerales antes y después de la lixiviación, observándose que por efecto del chancado químico puede producirse una variación en la fracción de arenas y finos. El chancado químico corresponde a una importante fuente de estudio, debido a que tiene gran relevancia en el comportamiento de la pila en el tiempo, afectando especialmente la permeabilidad del mineral en el tiempo debido al aumento en el porcentaje de finos.

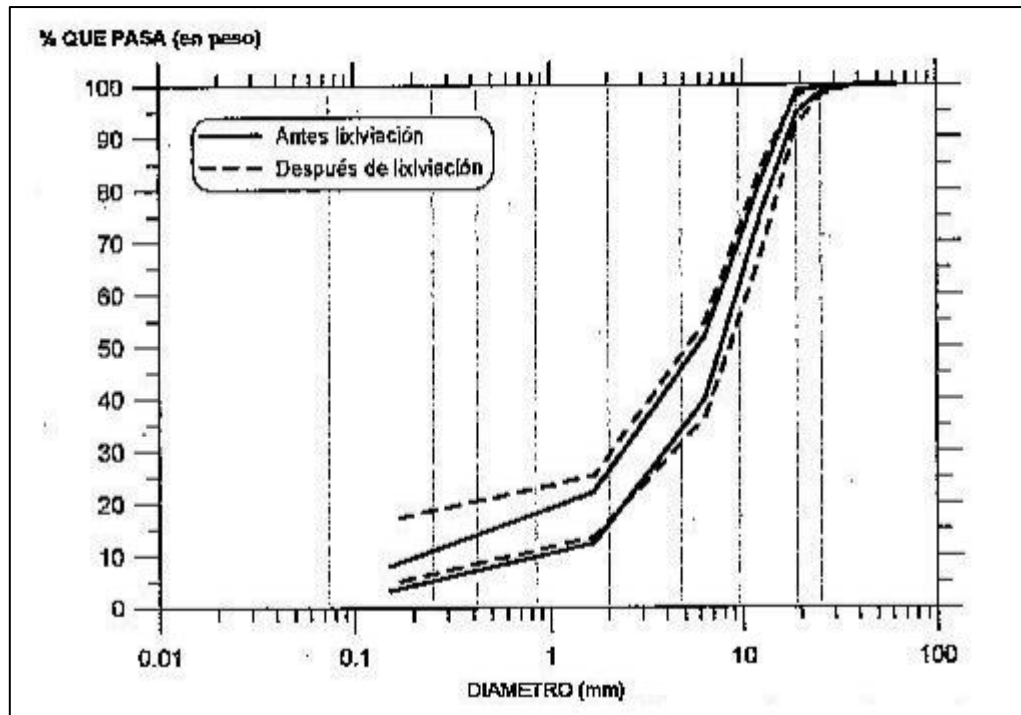


Figura 2.7: Variación de la granulometría debido a “chancado químico”

Fuente: (Bard & Campaña, 2004)

Por otro lado, la permeabilidad de un suelo depende, principalmente, de la granulometría, el porcentaje de finos, la densidad, y la plasticidad de los finos. Si la permeabilidad de la pila es alta, el tiempo de residencia de la solución en la pila es bajo. En este caso, la solución alcanzaría a lixiviar superficial y parcialmente las partículas que constituyen la pila. En caso de que la permeabilidad sea baja, la solución alcanzaría a lixiviar completamente, pero ésta demoraría demasiado en recorrer toda la pila, saturando sectores de ésta y afectando su estabilidad. Por lo tanto, una buena permeabilidad es aquella que permite al flujo de solución descender con facilidad, pero que también permite que la solución reaccione con la mayor cantidad de mineral posible. Por lo tanto, la importancia que tiene la permeabilidad del mineral en el proceso de lixiviación es muy alta y es fundamental para el éxito del proceso.

En el caso de pilas de lixiviación, este parámetro es muy difícil de cuantificar debido a que su valor se ve fuertemente afectado por condiciones de operación. A continuación, se enumeran los principales factores por los que este valor se puede ver afectado en una pila de lixiviación y por consiguiente afectar en un futuro al botadero de rípios:

- Disminución de la permeabilidad por aumento del porcentaje de finos del mineral debido a chancado químico.
- Disminución de la permeabilidad por densificación de los materiales depositados por efecto de peso propio, saturación con ácido o debido a un apilamiento inadecuado.
- Disminución de la permeabilidad en los sectores inferiores, y aumento en los sectores superiores, debido a migración de finos desde la parte superior de la pila hacia la parte inferior.

En cuanto a aspectos operacionales, debe tenerse en cuenta que suelen presentarse áreas con distintas permeabilidades, provocando flujos preferenciales que afectan tanto la operación como la recuperación de cobre. Pudiendo ocurrir debido a la heterogeneidad de los minerales o como resultado de segregación del mineral durante la explotación, chancado o apilamiento (Lopez, 2012).

La Figura 2.8 muestra una banda de distribuciones granulométricas. Las curvas azules corresponden a un ejemplo de mineral chancado aglomerado de un mineral recién puesto en una pila de lixiviación y en la curva roja se ve un mineral ya gastado el cual corresponde a un ripio, aquí se observa un aumento en el porcentaje de finos, en este caso se compara materiales que estaban en un mismo sector. En las curvas azules se ve un porcentaje de finos hasta 15 % y en las curvas rojas se puede llegar hasta un 30 % por efecto del riego en el depósito.

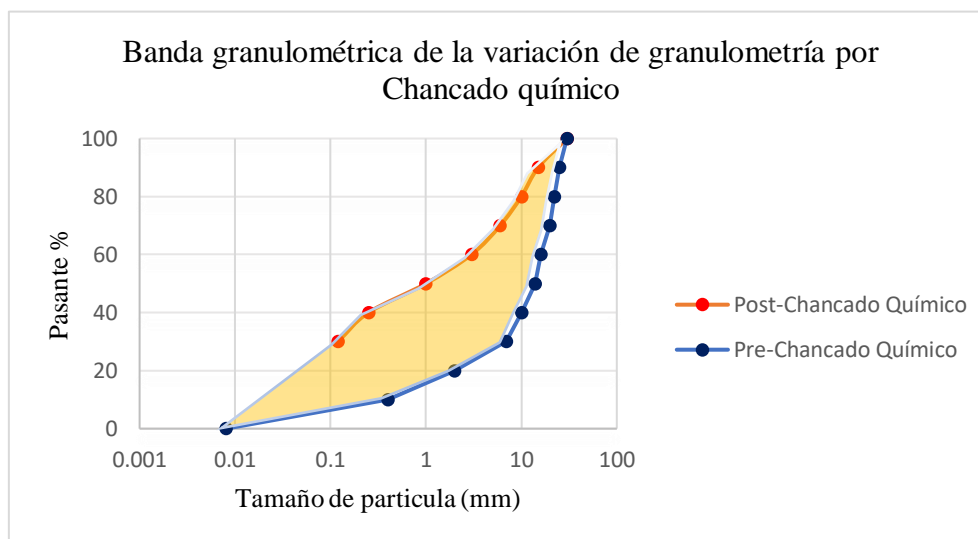


Figura 2.8: Banda granulométrica de ripios.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2 Tasa de riego e infiltración.

Este parámetro es fundamental, ya que determina, en gran medida, el tiempo de lixiviación. Debido a su importancia, siempre se estudia en laboratorios y en plantas piloto y es afectado directamente por la permeabilidad del mineral. En un mineral con alto contenido de finos, normalmente se aplica una tasa de riego entre 6 l/h/m^2 ($1,7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$) y 10 l/h/m^2 ($2,8 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$), mientras que uno más grueso puede tener tasas de hasta 40 L/h/m^2 ($1,1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$) (Schmidt, 2001). Por otro lado, la tasa de infiltración en un botadero de ripios ronda los valores de $1,6 \times 10^{-3} \text{ (mm/h)}$, en estos no se les incorpora una tasa de riego a menos que se requiera por parte de las empresas una lixiviación secundaria.

La tasa de riego también tiene influencia en los flujos preferenciales. Pruebas de irrigación experimentales han indicado que la magnitud de los flujos preferenciales depende de la capacidad de succión del material y de la tasa de riego impuesta (O’Kane Consultants Inc, 2000). La Figura 2.9 presenta resultados experimentales ilustrando esta situación.

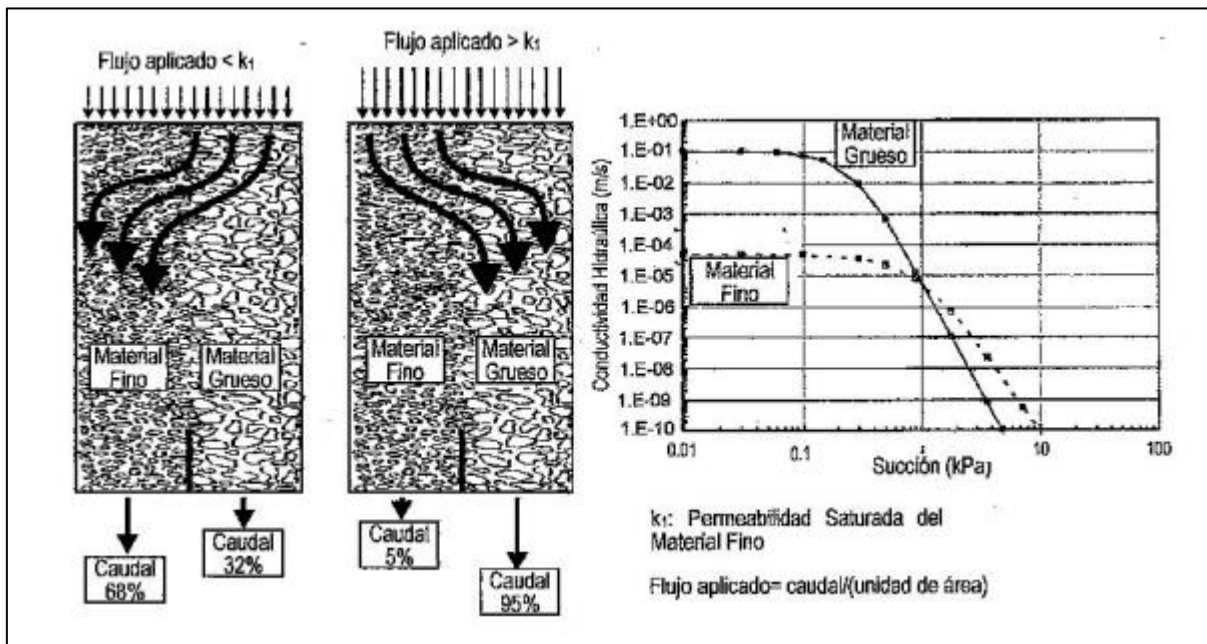


Figura 2.9: Flujo en medio parcialmente saturado, efecto de la magnitud de la tasa de infiltración.

Fuente: (Lopez, 2012)

La principal conclusión que se obtiene de este estudio es que el flujo no necesariamente fluye por el material más grueso. De esta forma, si la tasa de riego es mayor que la permeabilidad saturada de la parte más fina, se obtiene un flujo preferencial por la parte más gruesa. En el caso que la tasa

de riego sea menor que la permeabilidad saturada de la parte más fina, el flujo escurre principalmente por la parte más fina. Cabe señalar que los porcentajes mostrados en la Figura 2.9 son sólo referenciales, ya que dependen de la magnitud de la tasa de riego aplicada. Estos resultados, que son contra intuitivos, y se explican debido a que, para tasas de riego menores a la permeabilidad saturada de la parte más fina, se tiene una mayor succión. Por otra parte, al aumentar la succión, la permeabilidad de la parte fina puede ser mayor que la del material grueso, como se muestra en la Figura 2.9 (Lopez, 2012).

2.4 Etapas para la formación de Botadero de Ripios

Para entender más sobre los botaderos a continuación se presentan las etapas para su formación, estas constan en:

- Ubicación de maquinarias y equipos necesarios para la construcción de las obras, tales como, tractores, motoniveladora, rodillo, retroexcavadora, camiones, y cargadores frontales. Además de una grúa para la instalación de la correa transportadora.
- Preparación del terreno para hacerlo apto para el óptimo desempeño de los equipos que operarán. Se debe retirar fragmentos grandes de roca y compactar la superficie, para cuidar geomembrana además de favorecer escurrimiento de las soluciones.
- Instalación de correas transportadoras, *spreader* y *tripper*.
- Instalación de geomembrana que impermeabiliza el terreno. Por sobre la geomembrana se deposita una capa protectora de drenaje formada de gravas y ripios.
- Instalación de cañerías y redes de goteros para la irrigación de la solución de refino a las parcelas.
- Sistema de drenaje mediante tuberías ranuradas insertas en zanjas profundas en las zonas de gravas de alta permeabilidad y canaletas recolectoras ubicadas en el perímetro del botadero de ripios que transportan la solución hacia las piscinas de PLS.

Una vez instalada la capa protectora de drenaje sobre la geomembrana de la cancha de lixiviación del botadero se inicia la operación industrial de depósito o vaciado de ripios (Molina, 2014).

2.5 Características de los materiales post lixiviación

Las características que es común observar en los materiales lixiviados son las siguientes;

- Mineral chancado con tamaño máximo entre 3/4" y 1".
- En general clasifican como gravas con contenidos de finos (bajo#200) variable, dependiendo de la unidad geotécnica de origen.
- Los materiales se encuentran a una densidad suelta a media, son materiales depositados con apilador.
- Interesa determinar los parámetros de resistencia al corte, permeabilidad saturada, curvas de succión, módulos de deformación, etc (Vergara,2019).

2.6 Problemas geotécnicos en el diseño

En general, el diseño de Pilas y Botaderos de Lixiviación se basa principalmente en variables hidrometalúrgicas, las cuales determinan el ciclo de lixiviación, la altura óptima de la pila, la tasa de infiltración, etc. Sin embargo, la experiencia en la operación de pilas de lixiviación y de botaderos de ripios ha puesto en evidencia que es necesario incorporar variables geotécnicas en el diseño de las obras, con el fin de mantener la estabilidad de estas obras durante todo el período de la operación. Entre las variables geotécnicas a incorporar en el diseño se encuentra la granulometría del material, la permeabilidad, licuación estática, estabilidad, sistema de drenaje y carpeta impermeable.

En el caso de la granulometría y sus propiedades índices, el diseño de las pilas y botaderos se basa en pruebas piloto sobre muestras discretas obtenidas. Sin embargo, estas pruebas no siempre reflejan variaciones en el mineral. En efecto, los sectores más alterados del cuerpo mineralizado contribuyen con un mayor contenido de finos (arcillas), lo cual produce un deterioro en la capacidad de drenaje de los minerales y también de sus propiedades resistentes. Por otra parte, al penetrar las soluciones de lixiviación en las microfisuras de las partículas y disolver el material de relleno, se produce un “chancado químico” generando partículas más finas.

Por otro lado, como se ha visto antes, la permeabilidad depende, por lo general, del contenido de finos y de la densidad del mineral; su disminución afecta la recuperación del mineral a extraer al no ser “mojadas” en forma homogénea por parte de las soluciones de lixiviación. Además, al presentarse áreas con diferentes permeabilidades, se producen flujos preferenciales que afectan tanto la operación como la recuperación del mineral (Bard & Campaña, 2004).

La licuación estática, en el caso de los botaderos, los ripios específicamente se depositan en estado suelto con la humedad remanente del proceso de lixiviación. Por acción de la densificación, debido al peso propio del material depositado, los ripios pueden llegar a una condición próxima a la saturación y, en determinadas condiciones, ser afectados por licuación estática.

En cuanto al sistema de drenaje, es fundamental recolectar las soluciones de lixiviación. No obstante, el recolectarlas con la mayor eficiencia también lleva consigo garantizar que el nivel freático al interior del cuerpo de la pila sea el menor posible, de modo de no afectar la estabilidad del botadero.

Por último, la carpeta impermeable, tanto por razones de negocio, como ambientales, es imprescindible recuperar las soluciones de lixiviación, razón por lo cual se opta por apoyar las pilas y, en general, los botaderos sobre una superficie impermeable, conformadas mediante geomembranas de HDPE (*High Density Polyethylene*), o similares. Estas geomembranas no solo tienen que ser estables químicamente, sino que también sus propiedades mecánicas deben permitir una adecuada resistencia a punzonamientos, a esfuerzos de cizalles, etc.

2.7 Factores que afectan la estabilidad física del botadero

Con el objetivo de tener en cuenta en el diseño las variables mencionadas, debido a que existen múltiples factores que pueden impactar en la estabilidad física, es necesario efectuar análisis en los siguientes parámetros claves durante la etapa de diseño (Vergara,2019):

- Características geotécnicas del mineral/ripio y degeneración del material en contacto con solución en el tiempo.
- Condición de la fundación.
 - Topografía del terreno (pendiente y forma)
 - Tipo y espesor de fundación (Suelos gruesos o finos; rellenos antropicos, espesor de suelo/relleno)
 - Características roca basal (profundidad, tipo, resistencia, alteración, degradación)
 - Agua subterránea (profundidad, presiones de poro en fundación)
- Sistema liner basal.
 - Angulo fricción interfaz suelo/geomembrana (tipo de suelo basal y dren, Tipo de geomembrana)

- Infiltraciones y deficiencias en sistema de drenaje.
 - Solución
 - Precipitaciones intensas
 - Ciclos hielo-deshielo
 - Colmatacion sistema drenaje
 - Capa Remanente
- Secuencia constructiva.
- Sismicidad.

2.8 Observaciones en terreno botaderos de ripios

Algunas observaciones presentes en los botaderos de ripios que han puesto en duda el funcionamiento de dichas tuberías de drenaje se muestran en las Figuras 2.10, 2.11 y 2.12 junto con sus respectivas características:

- El material descargado en el botadero se observa con altos contenidos de humedad. Causas posibles: mal drenaje en los pad de lixiviacion o ripios con exceso de material fino.



Figura 2.10: Observaciones de apilamiento en terreno botadero de Ripios.

Fuente: (Vergara, 2019)

- Se observa solucion en la superficie de los botaderos (Vergara,2019).



Figura 2.11: Observaciones de solución en terreno Botadero de Ripios.

Fuente: (Vergara, 2019)

- Se observan grietas y asentamientos cerca del borde del frente de avance de los depositos.



Figura 2.12: Observaciones de grietas y asentamientos en terreno Botadero de Ripios.

Fuente: (Vergara, 2019)

2.8.1 Recomendaciones al diseño geotécnico

Resulta importante indicar que no existe un diseño de un Botadero de Ripios capaz de admitir todos los tipos de materiales que arriban al deposito. En efecto es necesario respaldar el diseño con un control operacional permanente, de tal forma de definir un plan de accion junto con el diseño del

Botadero, frente al arribo de Ripios de “mala calidad geotécnica” (exceso de material Fino con alta plasticidad, o materiales con exceso de humedad > 15 %) (Vergara, 2019).

Para un obtener buenos resultados es necesario tener en cuenta ciertos parametros de control en Botaderos de ripios lixiviados. El monitoreo de parametros de control geotecnico permite identificar variaciones que podrian inducir eventuales asentamientos o fallas en los depositos.

Para esto es necesario realizar las preguntas ¿Qué parámetros podemos medir en terreno? y ¿Qué parámetros son importantes medir? Como respuesta a esto, en un Botadero de ripios especificamente, es necesario enfocarse y tener en cuenta la Granulometria del material (Incluir material #200) e IP, ademas una constante revisión de taludes de frente de avance, la humedad de Ripios, la altura cordilleras versus agrietamientos y realizar una exploración geofísica y geotécnica profunda y periodica.

2.9 Sistema de drenaje

Para un buen drenaje de la pila y también para el botadero de ripios, es necesario realizar un diseño adecuado de las tuberías que conforman el sistema de drenaje y evacuación. Para pilas y botaderos de gran altura es necesario estudiar la deformación que se produce en las tuberías ante la carga del mineral y su capacidad para seguir transportando las soluciones. En este ámbito según literatura hay pocos estudios que sean concluyentes acerca del comportamiento que tendrán las tuberías sometidas a la carga del mineral.

El diseño de un adecuado sistema de drenaje y evacuación, junto a la utilización de un *cover* adecuado, permite mantener controlado el nivel freático al interior de estos procesos, a un nivel en que la estabilidad de ésta no se vea afectada y no se produzcan fallas por deslizamiento (Lopez, 2012).

El sistema de drenaje tiene por principal objetivo recolectar y conducir las soluciones ácidas ricas en cobre obtenidas del proceso de lixiviación. A su vez, la existencia de un sistema de drenaje adecuado permite mantener controlado el nivel freático al interior de la pila de lixiviación o del botadero de ripios, a un nivel compatible con la estabilidad global de estas obras y, junto con ello, disminuir el riesgo de ocurrencia de una falla por licuación estática. Por lo anterior, el

funcionamiento del sistema de drenaje pasa a ser crítico en el diseño de estas obras (ARCADIS, 2010).

En las últimas décadas, la industria minera del cobre ha requerido cada vez con mayor frecuencia la construcción de pilas de lixiviación permanentes o depósitos de ripios lixiviados de gran altura, para una operación de lixiviación primaria o secundaria. Estas estructuras, que pueden superar 100 m de altura, cuentan habitualmente con un sistema de impermeabilización basal que comprende una geomembrana y un sistema de drenaje compuesto por tubos flexibles de HDPE dispuestos sobre esta lámina. Las tuberías de drenaje se cubren, mayoritariamente, con materiales granulares permeables con baja compactación. En consecuencia, las tuberías quedan sometidas a niveles de carga y de deformación muy superiores a las que usualmente se presentan en las obras civiles (ARCADIS, 2010). La Figura 2.13 muestra una panorámica de una construcción de drenes basales en botaderos de ripios.



Figura 2.13: Panorámica construcción de drenes basales en Botaderos de Ripios.

Fuente: (ARCADIS, 2010)

2.10 Movimiento del agua en el suelo

Para entender el movimiento del agua en suelos es necesario realizar un análisis de las distintas situaciones a las que esta se puede ver enfrentada.

El movimiento del agua puede estar en cualquier dirección dependiendo de las condiciones, ya sea hacia abajo después de la lluvia, y también hacia arriba producto de la evaporación de la superficie del suelo, así como también de manera horizontal como se puede ver en ríos o fluidos. Por otro

lado, el agua también puede fluir a través de los poros abiertos entre las partículas del suelo, por ejemplo, en un suelo limoso ordinario, donde la mitad del volumen del suelo es espacio de poros, y el agua junto con el aire comparten este espacio.

El agua que normalmente se define bajo el término humedad corresponde al agua que se dice que es absorbida por un material poroso, y es el agua que se presenta con una curvatura negativa en la interfaz aire-agua, esta agua en materiales porosos bajo presión negativa es arrastrada por fuerzas atractivas que existen entre el agua y las paredes del material poroso asociado a ella.

Al llevar este análisis a un suelo en capas, el agua no se moverá a un suelo texturizado diferente hasta que se produzca la saturación y la gravedad afecte al movimiento del agua, que es lo que pasará en algún momento en el experimento a realizar, tal como se ilustra en la Figura 2.14.

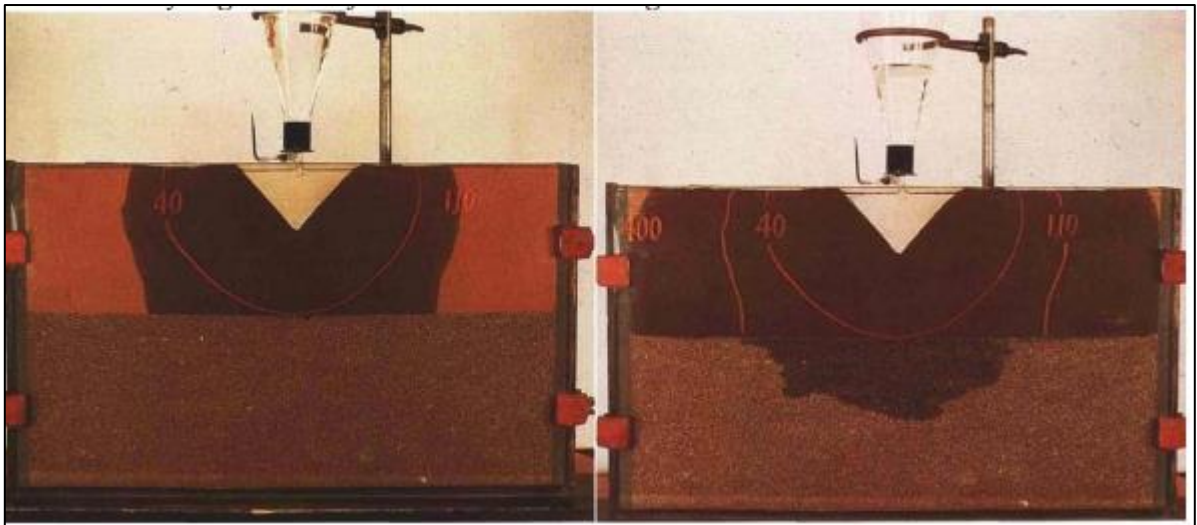


Figura 2.14: Experimento movimiento del agua, Suelo texturizado diferente.

Fuente: (Gardner, 1988)

En el experimento el agua se moverá hasta que las fuerzas se equilibren, momento en el que la curvatura de las interfaces agua-aire será la misma, excepto por algunas diferencias verticales que existen debido a la gravedad. Si el suelo no es uniformemente homogéneo, es decir, presenta más de un tipo de suelo, las porciones del suelo que tienen los poros más pequeños retienen el agua con más fuerza, esto se pudo ver en el experimento, en donde el agua no se filtró tan uniformemente debido a que no existía tanta homogeneidad en el material utilizado.

En el caso de los suelos estratificados, suelos con varias "capas", el tamaño de los poros en los estratos afecta el flujo de agua, debido a que, si existe un frente humectante avanzando y se encuentra materiales finos, la resistencia en los poros extremadamente finos puede ralentizar el movimiento, pero sin detenerlo por completo. Por el contrario, si el frente humectante encuentra materiales gruesos, el movimiento del agua se detiene hasta que el suelo casi se sature como se puede observar en la Figura 2.15.

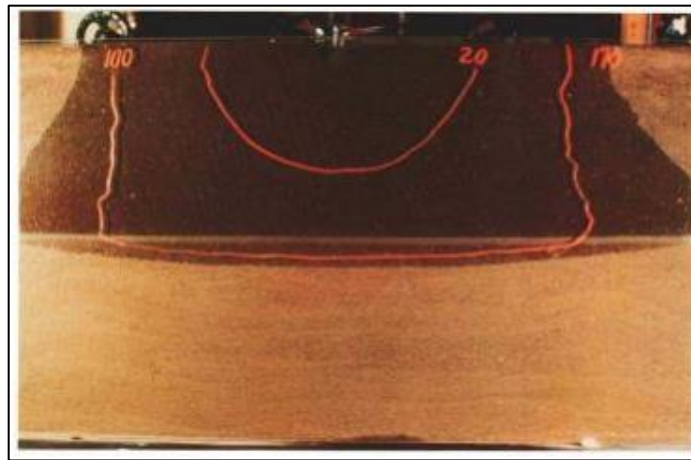


Figura 2.15: Experimento movimiento del agua, Suelo saturado.

Fuente: (Gardner, 1988)

Cuando el agua llega a la arcilla, por ejemplo, caso mostrado en la Figura 2.16, los poros más finos de esta capa resisten el flujo de agua. Aunque el agua pasa a través de la arcilla, su penetración es tan lenta que las masas de agua a menudo se acumulan por encima de la arcilla.

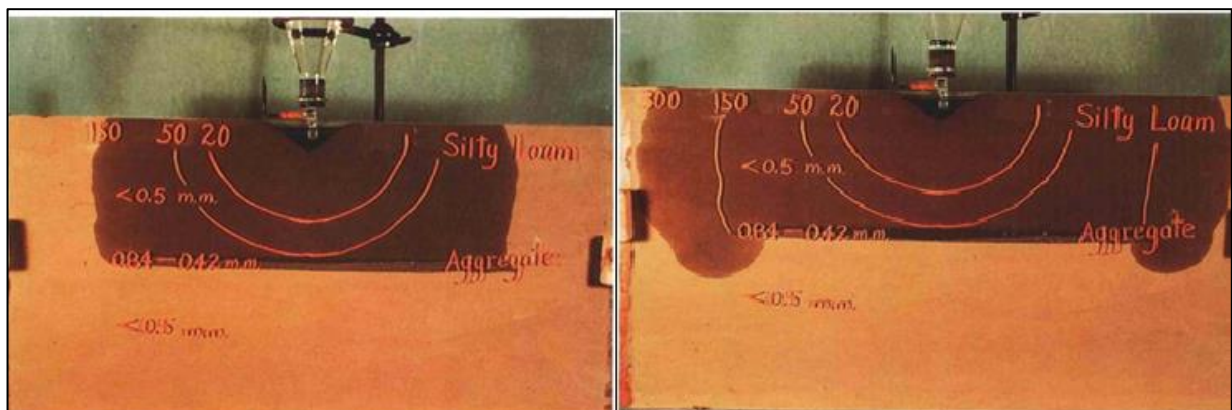


Figura 2.16: Experimento movimiento del agua, Suelo compuesto de Arcillas.

Fuente: (Gardner, 1988)

Cualquier cambio en la porosidad del suelo encontrado por una orilla humectante afecta el movimiento del agua, por ejemplo, una capa de áridos de suelo grueso actúa como una capa de arena, con una diferencia importante: el agua puede moverse a través del interior de los propios agregados, pero el número relativamente pequeño de contactos entre los agregados limita la cantidad de agua que realmente se mueve a través de esta capa. Sólo cuando el suelo está casi saturado el agua se mueve rápidamente a través de la capa agregada del suelo dejando en claro que el movimiento del agua depende exclusivamente del tipo de material en donde estén dispuestas (Gardner, 1988).

2.11 Caudal y separación teórica para drenajes paralelos

El diseño de botaderos o pilas a partir de drenajes en paralelo esta compuesta por; material lixiviado, solución lixivante, tuberías, las cuales están equiespaciadas a una distancia s y una capa impermeable dispuestas bajo estas, la Figura 2.17 muestra la composición de este tipo en particular.

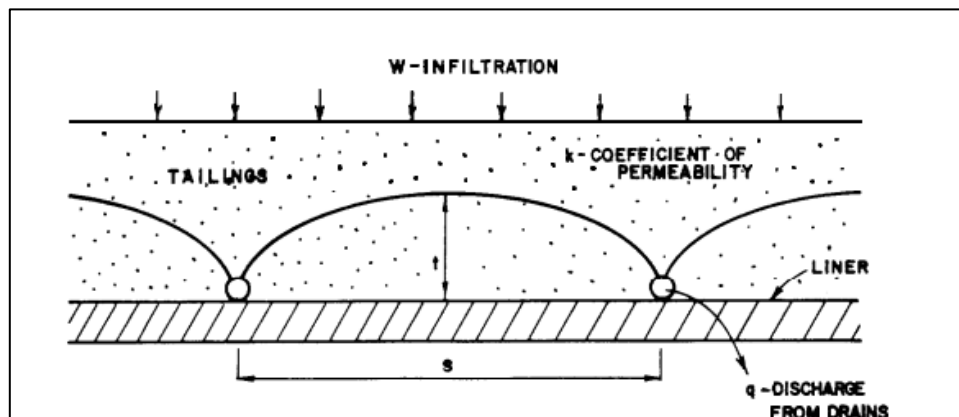


Figura 2.17: Drenajes paralelos.

Fuente: (Van Zyl's & Robertson, 1980)

En este caso en particular se considerará exclusivamente soluciones para suelos isotrópicos homogéneos sujetos a flujos en estado estacionario. El drenaje q , viene dado por el coeficiente de permeabilidad multiplicado por una cantidad geométrica, se supone que el caudal por unidad de longitud de agua se infiltra desde un estanque en los materiales acumulados en condiciones de saturación parcial hasta una superficie freática, como se muestra en la Figura 2.17 (Van Zyl's & Robertson, 1980).

El caudal q en cada drenaje se puede estimar a partir de la Ecuación 6:

$$q = 4 * \frac{kt^2}{s} \quad (6)$$

Donde k es el coeficiente de permeabilidad del material.

La relación simplificada entre t y s se puede expresar de acuerdo con la Ecuación 7:

$$t^2 = \frac{WS^2}{4k} \quad (7)$$

Donde:

t = máxima amplitud del nivel freático entre tuberías.

s = espaciamiento entre tuberías.

La magnitud de k puede tomarse como el coeficiente de permeabilidad horizontal que es aproximadamente igual a la permeabilidad de la capa más gruesa. Además, la tasa de infiltración, W es controlada por la capa con el coeficiente de permeabilidad más bajo. Dependiendo de la magnitud del coeficiente de permeabilidad más bajo, se puede asumir la relación de la Ecuación 8 (Van Zyl's & Robertson, 1980):

$$0,001 k \leq W \leq 0,1 k \quad (8)$$

Sustituyendo el valor inferior ($W=0.001k$) en la ecuación, se obtuvo que:

$$t = 0,016 S$$

Lo que implica que si $s = 300$ ft; $t = 4,8$ ft.

3 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se muestra la metodología aplicada para resolver y representar el problema, de forma detallada, se indican los distintos procedimientos necesarios para la caracterización del material y modelamiento.

El presente estudio contempla un acercamiento al dimensionamiento y evaluación de la capacidad de flujo en tuberías embebidas en botaderos de ripios lixiviados. El objetivo principal del estudio corresponde a evaluar experimentalmente la capacidad de evacuación que tiene un sistema de tuberías perforadas colectoras utilizadas como drenaje luego del proceso de lixiviación. Para cumplir con dicho objetivo, es necesario dividir el estudio en etapas las cuales permitirán definir si la solución propuesta por el estudio es viable o no. Las etapas corresponden al levantamiento de información, caracterización del material representativo, generación de dimensiones para la construcción de la estructura, modelamiento numérico a través del *software SEEP/W*, descripción del sistema de drenaje y finalmente la construcción y ejecución del experimento.

3.1 Obtención de información

Para la elaboración de esta memoria se realizó una búsqueda en cuanto a datos e información relacionada a los botaderos de ripios y su sistema de drenaje. Con esto se llevó a cabo un análisis simplificado para establecer dimensiones con las cuales se realizó una representación geométrica que fue llevada a escala para la construcción de materiales aterrazados dentro de un recipiente de volumen controlado.

3.2 Características del material representativo

La caracterización del material permite identificar y conocer con qué tipo de suelo se estará trabajando, lo cual sería de gran importancia al momento de realizar dicho experimento, debido a que en base a la caracterización de este se obtendrán los datos en cuanto a su comportamiento.

Para la caracterización del material, se realizó un análisis granulométrico al material dispuesto por la Universidad de Talca, este material contuvo un alto porcentaje de finos ya que se tiene como fin el trabajar con un material que se asemeje a un ripio que ha sido desintegrado por el tiempo, por lo tanto, la matriz fina del material es la que finalmente va a controlar la permeabilidad. Con esto, se llegó a la conclusión de que material representativo correspondía a una arena arcillosa, la cual, luego de realizar estudios de laboratorio a través del permeámetro posee una permeabilidad de $1,22 \times 10^{-4} (cm/s)$, magnitud que está dentro de los rangos observados para los ripios lixiviados.

3.3 Dimensiones modelo físico

Se considera que la geometría real de un botadero de ripios es construida en capas individuales simulando bancos de 10 metros de espesor, con el objetivo de acercarnos a un modelo físico experimental en donde se entiende que estas medidas proporcionan mayor seguridad durante la operación ante la ocurrencia de deslizamientos locales.

Para realizar la elección de las medidas se tomaron algunos datos de referencia de un botadero a escala real, de los cuales se obtuvieron los siguientes datos:

- Superficie total $180.000 m^2$ aprox.
- Altura de bancos 10 m.

Estos ripios se acopian formando plataformas de 10 cm llevados a escala, que servirán como nivel inicial para la siguiente plataforma de ripios agotados.

Además, para entender bien el funcionamiento de las tuberías, se realizó un cálculo del espaciamiento con el fin de que el nivel freático del botadero de ripios no sobrepasara los 100 cm (1 cm en el modelo físico), a fin de controlar los alzamientos internos del nivel freático que pudiesen afectar la estabilidad física del botadero.

Para la obtención de las medidas correspondientes al espaciamiento de las tuberías que serán dispuestas en el botadero de ripios se utilizó como referencia los drenajes paralelos, para entender esto de mejor manera se tiene la Figura 2.17 presente en el capítulo 2 de esta investigación, en donde se puede observar datos importantes presentes en el diseño, entre estos están; una tasa de infiltración, la permeabilidad del material presente, tuberías dispuestas de forma paralela, las cuales están separadas por una distancia dada que variaría según la altura del nivel freático y una variable “ q ” correspondiente al caudal de las tuberías.

El caudal q , estará dado por el coeficiente de permeabilidad multiplicado por una cantidad geométrica, se supone que el caudal por unidad de longitud de agua se infiltra desde un estanque en los materiales acumulados en condiciones de saturación parcial hasta una superficie freática, como se describe en la sección 2.11.

Se utilizó la Ecuación 6 para la obtención del caudal q , no obstante, antes se debe considerar la relación simplificada entre t y s tal como se expresa en la ecuación 7, los cuales serían datos claves

para conseguir las medidas y lograr la construcción del diseño representativo de la geometría de un botadero de rípios.

La elaboración del modelo físico simplificado considera una escala de 1:10 (modelo físico: geometría real), teniendo en cuenta las dimensiones originales:

Medidas propuestas en escala real.

- Largo 600 metros.
- Ancho 300 metros.
- Altura máxima 30 metros.
- 3 capas de 10 metros.

Medidas a escala 1:10.

- Largo 60 cm.
- Ancho 30 cm.
- Altura 30 cm.
- 3 capas de 10 cm

En este caso se realizaron varias propuestas en cuanto a dimensiones, de las cuales se seleccionó solo una según sus características, buscando que estas fueran lo más acorde a las propuestas señaladas.

3.4 Modelamiento numérico de flujos

Asociado a poder tener un mayor entendimiento y comprensión del comportamiento de los flujos al interior del ripio aterrazado, se realizará una modelación numérica a través del *software SEEP/W* de *Geostudio*.

3.5 Descripción del sistema de drenaje

Las tuberías en escala real están dispuestas en forma equiespaciada de 2 a 6 m. Aquellas que están dispuestas sobre la geomembrana conducen las soluciones hacia tuberías de mayor diámetro, que captan y conducen en forma controlada, ya sea para su recirculación u otro proceso. Estas tuberías,

con diámetros que varían por lo general de 600 mm a 1000 mm, están insertas en zanjas profundas rellenas con material granular seleccionado y compactado.

Para la ejecución del experimento, estas tuberías serán representadas por tuberías de PVC de 4 mm de diámetro las que estarán equiespaciadas según la variable s - lo indique. Estas estarán dispuestas de un extremo a otro, y constarán con pequeñas perforaciones (< 1 mm) para poder coleccionar los flujos del proceso de lixiviación, dirigiéndolos hacia el exterior y poder obtener cálculos del volumen extraído a partir del experimento. Para obtener un mejor planteamiento del experimento se realizó un bosquejo con sus respectivas medidas el cual se verá en la Figura 3.1, en esta se pueden observar los microtubos que cruzan de extremo a extremo el recipiente construido.

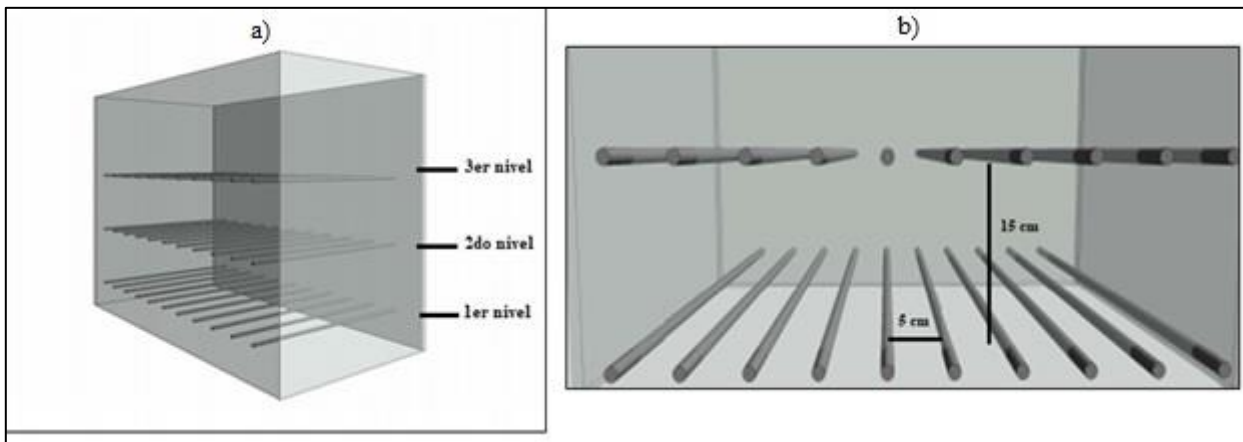


Figura 3.1: Representación geométrica del Botadero junto con los niveles de tuberías, en a) Vista general de niveles, en b) Distancia entre tuberías.

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los resultados analíticos estos serán comparados con los resultados del modelo numérico para finalmente evaluar ambos con los datos obtenidos a través del modelo experimental.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y los posteriores análisis y conclusiones acorde a los objetivos planteados.

4.1 Tasa de infiltración residual

Es necesario tener en cuenta que al contrario del sistema de lixiviación los botaderos de ripios no cuentan con una tasa de riego ni sistemas de distribución por goteros o aspersores continuos, sino que con una tasa de infiltración y de percolación de soluciones remanentes en los ripios por lo general cercana a 0,0016 (mm/h).

La recolección de las soluciones se realiza por un sistema de gravedad y se recolectan en piscinas, para luego ser enviadas a la planta de recuperación. Estas operaciones se caracterizan por tener ciclos temporales muy largos, generalmente mayor a un año, presentar bajas recuperaciones bordeando entre el 40 y 60 % y además por presentar uno de los costos operacionales más bajos entre los métodos de lixiviación existentes. La Figura 4.1 muestra cada parte que conforma un botadero de ripio según corresponda.

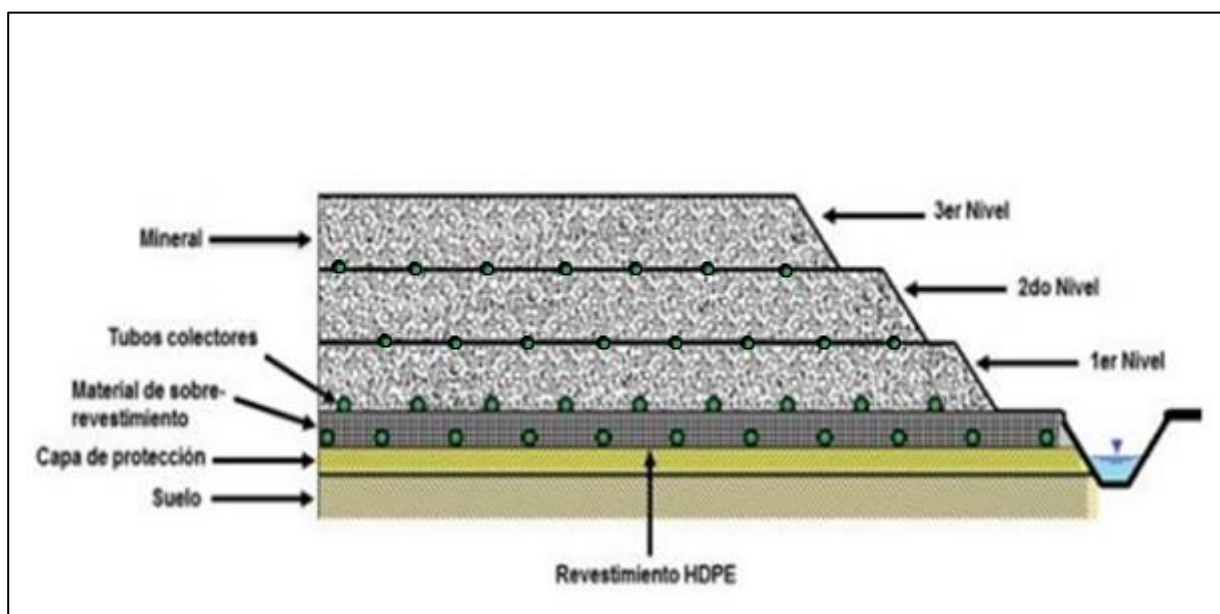


Figura 4.1: Representación de una lixiviación en pilas.

Fuente: (Lopez, 2012)

4.1.1 Parámetros geotécnicos para la matriz fina de un ripio post lixiviación

El material utilizado corresponde a una arena arcillosa, con granulometría mostrada en la sección 4.2, y las magnitudes utilizadas para permeabilidad fueron obtenidas a través de ensayos en laboratorio.

La permeabilidad es un parámetro que no solo varía por las propiedades del material, sino que también puede sufrir modificaciones por las propiedades del líquido que fluye a través de este, para el caso del experimento a realizar, la permeabilidad del material corresponde a un valor cercano a $1,22 \times 10^{-4}$ (cm/s), debido a que cerca del 50 % de su composición correspondía a arcillas, este puede ser considerado como un material poco permeable debido a su valor, esto pasa a ser una de las dificultades del análisis de botaderos de ripios, ya que el material que lo compone normalmente contiene una alta cantidad de material con granulometría fina producto de la desintegración de esta a través de los líquidos utilizados en los procesos de lixiviación.

La permeabilidad es un factor relevante en operaciones con lixiviados y también con botaderos de ripios. Una baja permeabilidad induce saturaciones en la pila lo que se traduce en posibles problemas de estabilidad (Bard & Campaña, 2004).

Algunos valores de permeabilidad utilizados para el análisis de comportamiento según el tipo de material se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Valores relativos de permeabilidad y clasificación de suelos

Fuente: Poblete Palma, 2019.

Permeabilidad relativa	Valores de k [cm/s]	Suelo típico
Muy permeable	$> 1 * 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente permeable	$1 * 10^{-1} a 1 * 10^{-3}$	Arena, Arena fina
Poco permeable	$1 * 10^{-3} a 1 * 10^{-5}$	Arena limosa, Arena sucia
Muy poco permeable	$1 * 10^{-5} a 1 * 10^{-6}$	Limo y arenisca fina
Impermeable	$< 1 * 10^{-6}$	Arcilla

Por otro lado, la porosidad se define como el volumen o espacio vacío en el interior de una determinada roca o material. Para un fluido que atraviesa un lecho, menores porosidades implican menores espacios por los cuales circular, por ende y en base a la continuidad de flujos, la velocidad del fluido será mayor. En base a la porosidad se puede deducir la cantidad de compactación que se puede producir en la pila de lixiviación.

En términos del proceso de lixiviación, la porosidad afecta directamente a este proceso, siendo una variable importante para considerar en la permeabilidad del material. Una mayor porosidad significa mayor cantidad de espacios vacíos por los cuales puede circular la solución lixivante. Por otro lado, menor porosidad se traduce en menos permeabilidad y por ende mayores posibilidades de saturación de la pila o, en el caso de estudio, de un botadero de ripios.

Como consecuencia de los mecanismos difusionales de la pila y las partículas que la componen, la razón de riego es inversamente proporcional a la porosidad de las partículas, ya que una difusión fácil disminuye la razón y una difícil la aumenta.

La Tabla 4.2 muestra los rangos de porosidad para sus respectivos materiales.

Tabla 4.2: Materiales y sus rangos de porosidad.

Fuente: Poblete Palma, 2019.

Material	Porosidad [%]
Grava (Gruesa)	24-36
Grava (Fina)	25-38
Arena (Gruesa)	31-46
Arena (Fina)	26-53
Limo	34-61
Arcilla	34-60

Además, se logró obtener muestras de material por medio de la Facultad de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Talca, teniendo presente la referencia de arcilla, y cumpliendo con condiciones de similitud sobre esta. El material utilizado en este caso cuenta con un 47 % de material fino, y luego de los estudios realizados se clasificó como una arena arcillosa.

4.2 Caracterización granulométrica del material representativo

Mediante el análisis granulométrico se puede obtener información importante como: su origen, propiedades mecánicas y el cálculo de la abundancia de cada uno de los granos según su tamaño

dentro de la escala granulométrica. Es por esto que para entender mejor el comportamiento del experimento fue necesario realizar este análisis al material utilizado.

Para llevar a cabo este proceso se tomaron los tamices mencionados en la Tabla 4.3 realizando un tamizado en húmedo con la muestra presente en la Figura 4.2. Cuando en el laboratorio se necesita analizar y separar un material seco que es demasiado difícil de manipular, no entrega resultados reproducibles en el tamiz en seco o si éste simplemente no está separando las fracciones individuales de manera aceptable para el ensayo, entonces se recurre al tamizado húmedo. La Tabla 7.1 muestra todos los resultados obtenidos a partir del análisis granulométrico.

Tabla 4.3: Análisis granulométrico.

Fuente: Elaboración propia

Malla	Abertura	Pasante acumulado (%)
10	2	98,76
20	0,84	91,75
30	0,595	83,90
40	0,42	78,59
50	0,297	70,01
70	0,25	67,31
100	0,149	61,21
200	0,074	47,26
270	0,053	40,91
325	0,044	39,93
400	0,037	38,98
< 400	< 0,037	0,00



Figura 4.2: Muestra representativa para análisis.

Fuente: Elaboración propia

Este análisis se llevó a cabo utilizando una muestra de 306,8 g del material que fue previamente roleado y pasado por las pruebas de selección de muestras obteniendo los resultados dispuestos en la Tabla 4.3, de aquí se desprende que cerca del 50 % de los materiales presentes están bajo la malla #200 tal como se menciona anteriormente, clasificando la muestra como un material con alto contenido de fino, según clasificación de Figura 4.6, como normalmente se ve en los rípios lixiviados, la curva granulométrica se puede observar en la Figura 4.3.

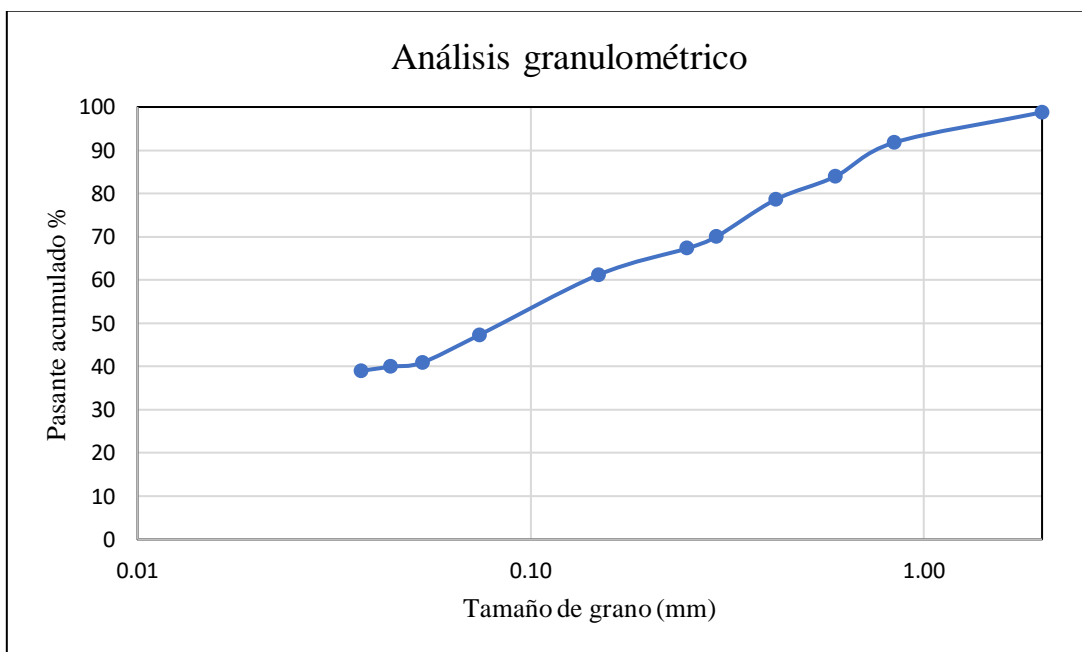


Figura 4.3: Curva granulométrica

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Límites de consistencia (Atterberg)

Una vez realizado el análisis granulométrico, el siguiente objetivo es tomar una muestra representativa del material a utilizar y realizar la segunda etapa correspondiente a los límites de Atterberg.

Generalmente los suelos, dependiendo del contenido de humedad que tengan, pueden ser encontrados en estado líquido, plástico, semisólido y sólido. Los límites entre estos estados de consistencia son conocidos en la mecánica de suelos como los límites de Atterberg, en reconocimiento al agrónomo sueco quien los definió, siendo luego adaptados para la mecánica de suelos por el austriaco Arthur Casagrande. Estos corresponden a ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los contenidos de humedad a los cuales una muestra de suelo cambia su estado de consistencia, y por ende clasificarlos.

Para el desarrollo de esta sección se colocó entre 50 y 70 gramos de la pasta de suelo en la cuchara de Casagrande, aislando la superficie a una altura de 1 cm con espátula, cuidando de no dejar burbujas de aire en la masa de suelo y que esté completamente esparcida de manera uniforme.

Luego se procedió a realizar un surco con el acanalador a través del eje de simetría de la cuchara de Casagrande. Una vez hecho el surco se puso el contador de la cuchara de Casagrande en cero, y se comenzó a girar la manivela de manera uniforme, con una velocidad de 2 golpes por segundo, continuando hasta que la abertura en la muestra de suelo cerró aproximadamente 13 mm. En la Figura 4.4 y 7.2 se puede observar parte del desarrollo en la cuchara de Casagrande.



Figura 4.4: Cuchara de Casagrande

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se tomó una porción de muestra del lugar donde se cerró el surco al cual se le medirá el contenido de humedad. Para esto fue necesario tomar 5 datos para poder llevarlos a una curva de flujo y obtener finalmente el índice de plasticidad (Todos los ensayos obtenidos se encuentran en la Figura 7.1).

En la Tabla 4.4 se puede observar los resultados obtenidos a partir del ensayo.

Tabla 4.4: Limites de Atterberg

Fuente: Elaboración propia

Capsula N.º	Limite Plástico			Limite Liquido				
	x	7	vidrio	14	6	2	1	13
N.º Golpes	-	-	-	15	23	28	38	44
Peso Cap. + Suelos húmedo (g)	28,38	29,48	52,20	34,45	37,61	37,76	36,71	37,01
Peso Cap. + Suelos Seco (g)	27,61	28,58	51,54	31,58	33,90	34,18	33,43	33,77
Peso Cápsula (g)	24,81	25,31	49,17	24,68	24,52	24,88	24,76	24,82
Peso Agua (g)	0,77	0,90	0,66	2,87	3,71	3,58	3,28	3,24
Peso Muestra Suelo Seca (g)	2,80	3,27	2,37	6,90	9,38	9,30	8,67	8,95
% Humedad	27,5%	27,5%	27,8%	41,6%	39,6%	38,5%	37,8%	36,2%

Con los datos obtenidos fue posible obtener el límite plástico, límite líquido y finalmente el índice de plasticidad. En la Tabla 4.5 se muestra los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas, en donde también se pudo obtener la gráfica del límite líquido, la cual se presenta en la figura 4.5.

Tabla 4.5: Resultados de Límite plástico, Límite Líquido y Índice de Plasticidad.

Fuente: Elaboración propia

LP	28%
LL	38%
IP	11%

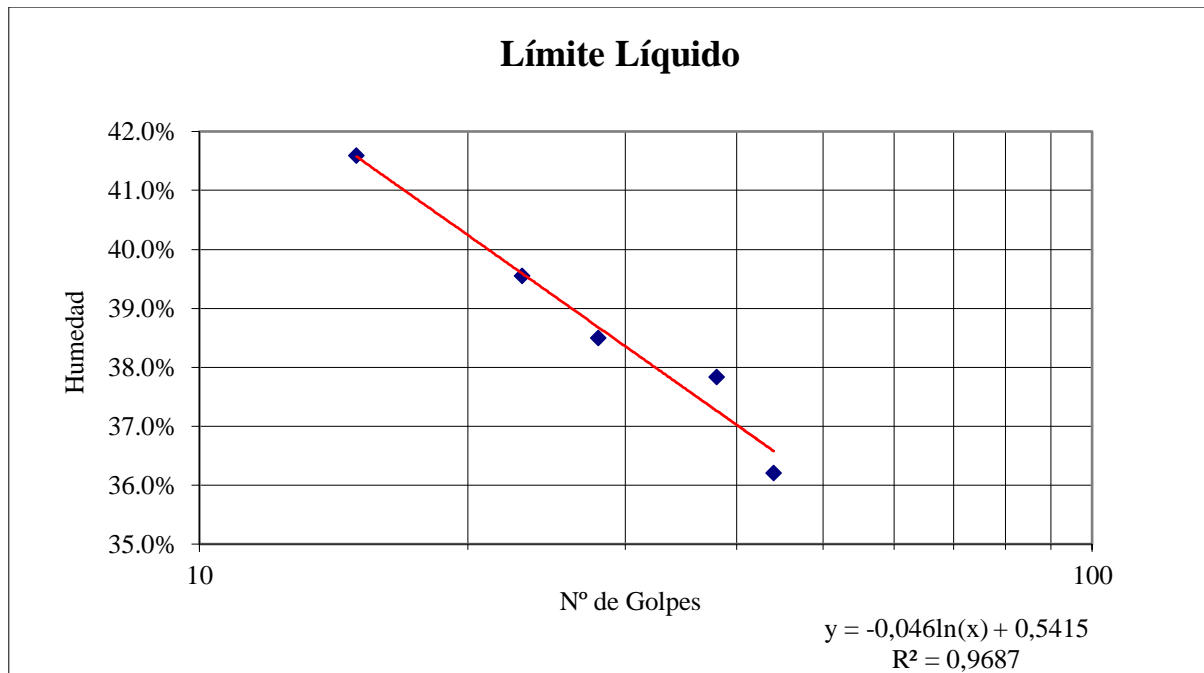


Figura 4.5: Gráfica Límite líquido.

Fuente: Elaboración propia

Luego de los ensayos realizados, los datos fueron llevados a la tabla de clasificación USCS para determinar y corroborar el tipo de suelo con el que se trabajará para llevar a cabo el modelo físico de la investigación, la Figura 4.6 muestra el sistema de clasificación USCS.

a				b								
SISTEMA CLASIFICACION USCS				SISTEMA CLASIFICACION USCS								
FINOS (≥ 50% pasa 0,08 mm)				GRUESOS (< 50% pasa 0,08 mm)								
Tipo de Suelo	Simbolo	Lim. Liq WI	Indice de Plasticidad IP	Tipo de suelo	Simbolo	% Ret. En 5 mm	% Pasa* 0,08 mm	CU	CC	**IP		
Limos Inorganicos	ML	< 50	< 0,73 (wL - 20) ó <4	Gravas	GW	≥ 50% de los Ret. En 0,08 mm	< 5	> 4	1 a 3			
	MH	> 50	< 0,73 (wL-20)		Si no cumple requisitos de GW es GP							
Arcillas Inorganicas	CL	< 50	> 0,73 (wL-20) y > 7		GM			> 12				< 0,73 (wL - 20) ó <4
	CH	> 50	> 0,73 (wL-20)		GC							> 0,73 (wL-20) y > 7
Limos o Arcillas Inorganicas	OL	< 50	**wL seco al horno ≤ 75% de wL seco al aire	Arenas	SW	< 50% de los Ret. En 0,08 mm	< 5					
	OH	> 50			Si no cumple requisitos de SW es SP							
Altamente Organicos	Pt	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente			SM			> 12				< 0,73 (wL - 20) ó <4
					SC							> 0,73 (wL-20) y > 7
* Si Ip ≥ 0,73 (wL-20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0,73 (wL-20), usar simbolo doble: CL-ML, CH-OH				* Entre 5 y 12% usar simbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC								
**Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente wL seco al horno				** Si IP ≥ 0,73 (wL - 20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0,73 (wL-20), usar simbolo doble Ej.: GW-GM en vez de GW-GC								
En casos dudosos favorecer clasificacion mas plástica Ej.: CH-MH en vez de CL-ML				$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$		$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$						
Si wL = 50; CL-CH ó ML-MH												

Figura 4.6: Sistema Clasificación USCS, a) Suelos finos, b) Suelos gruesos.

Fuente: (Burgos, 2017)

Según el sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), luego de los ensayos realizados en laboratorio, se determinó que el tipo de suelo con el que se está trabajando corresponde a SC (Arena arcillosa).

4.4 Determinación del peso específico con picnómetro

Para detallar más la clasificación del material utilizado se obtuvo también el peso específico de dicho material a través del picnómetro. El picnómetro permite la determinación del peso específico de minerales que se presentan en partículas finas. Para su desarrollo la operación requiere de cuatro masas diferentes.

El primer paso fue pesar el picnómetro vacío con su tapa (W1), Luego se introdujeron en el picnómetro una porción de la muestra utilizada (aproximadamente 1/3 del volumen del recipiente), se colocó la tapa y se pesó el conjunto (W2).

El siguiente paso fue llenar parcialmente el picnómetro con agua destilada calentando un poco para poder sacar las burbujas de aire, se completó el frasco con agua destilada y se colocó la tapa, el agua sube por su perforación, que debe quedar llena hasta arriba, se seca exteriormente y se pesó (W3). Por último, se vació el picnómetro, se volvió a llenar con agua, se tapó y pesó.

Una vez obtenidos los pesos de los 4 pasos, los cuales se encuentran adjuntos en la Tabla 4.6, se obtuvo el Peso específico con un valor de 2,331.

Tabla 4.6: Peso específico (PE)

Fuente: Elaboración propia

Picnómetro vacío (W1)	42,23 g	PE	2,331
Picnómetro + muestra (W2)	57,66 g		
Picnómetro + muestra y agua (W3)	101,08 g		
Picnómetro + agua (W4)	92,27 g		

4.5 Ensayos de permeabilidad para el material

En primera instancia se realizaron ensayos de permeabilidad considerando solo un tipo de material en el permeámetro, de manera que se pueda terminar de caracterizar el material. Las densidades que se utilizaron para los experimentos fueron de 1,5, 1,6 y 1,7 (g/cm^3) y porosidades de 30, 25 y 20 % respectivamente. Se eligieron estos valores ya que el material de los botaderos es apilado sin ningún sistema de apisonamiento por lo que muchas veces estos se encuentran sueltos. Además, se decidió realizar diversas mediciones de permeabilidad para un mismo nivel de densidad, esto se logró al cronometrar cuánto volumen generaba para diferentes tiempos definidos el caso de carga constante, para esto se definieron tiempos de 5, 8 y 10 minutos. Estas mediciones se hicieron para detectar posibles equivocaciones en las mediciones, así como para poder observar de mejor manera la variación de la permeabilidad que puede alcanzar el material, finalmente también permite el poder estimar valores promedios para cada valor de densidad analizada. La Figura 4.7 muestra la ejecución del ensayo en el permeámetro y la Figura 7.3 el momento cuando el permeámetro se encuentra totalmente saturado.



Figura 4.7: Ensayo de permeabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.7 se muestra la información pertinente para la preparación de muestras para los 3 valores de densidad.

Tabla 4.7: Información muestra.

Fuente: Elaboración propia

Volumen permeámetro (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad	Índice de vacíos	Masa requerida (g)
1016,11	1,5	0,30	0,427	1524,165
1016,11	1,6	0,25	0,337	1625,776
1016,11	1,7	0,21	0,259	1727,387

La Tabla 4.8 resume los resultados de los ensayos, en donde se ve las permeabilidades del material según su densidad. Estos resultados fueron obtenidos a partir de la ecuación (4)

Tabla 4.8: Resultados obtenidos de Carga Constante.

Fuente: Elaboración propia.

Densidad Material	Gradiente Hidráulico	Volumen evacuado (cm ³)	Tiempo (s)	Q (cm ³ /s)	k sat (cm/s)	Promedio k sat (cm/s)
1,5	10	1	300	0,00333	5,76* 10 ⁻⁷	3,58* 10 ⁻⁷
	10	1,3	480	0,00271	2,94* 10 ⁻⁷	
	10	1,4	600	0,00233	2,03* 10 ⁻⁷	

1,6	10	0,8	300	0,00267	$4,63 * 10^{-7}$	$3,07 * 10^{-7}$
	10	1,2	480	0,00250	$2,72 * 10^{-7}$	
	10	1,3	600	0,00217	$1,88 * 10^{-7}$	
1,7	10	0,6	300	0,002	$3,47 * 10^{-7}$	$2,19 * 10^{-7}$
	10	0,8	480	0,00167	$1,81 * 10^{-7}$	
	10	0,9	600	0,0015	$1,30 * 10^{-7}$	

Debido a que el ensayo de carga constante se realiza específicamente para granulometrías correspondientes a arenas o materiales granulares más gruesos, los resultados obtenidos no se consideraron relevantes para la investigación debido que para estos suelos el flujo de agua que los atraviesa es demasiado pequeño para permitir mediciones precisas con el permeámetro de carga constante, de todas formas, estos fueron realizados.

Para el caso de ensayo de carga variable se utilizó el mismo sistema de variación de tiempo para obtener el diferencial hidráulico, tomando 3 tiempos diferentes con el fin de detectar posibles equivocaciones en las mediciones y para finalmente poder estimar un valor promedio de permeabilidad para cada densidad analizada.

La Tabla 4.9 muestra la información pertinente para la obtención de datos correspondiente a la permeabilidad.

Tabla 4.9: Información para carga variable.

Fuente: Elaboración propia

Densidad Material (g/cm ³)	h1	h2	Δh	Δt
1,5	20	19	1	60
	25	22,6	2,4	180
	15	11,2	3,8	300
1,6	18	17,1	0,9	60
	25,5	23,4	2,1	180

	21,5	18,5	3	300
1,7	17,5	16,7	0,8	60
	22	20,1	1,9	180
	26	23,1	2,9	300

La Tabla 4.10 resume los resultados del ensayo según la densidad utilizada. Dichos resultados se obtuvieron a partir de la Ecuación 5 presentes en la sección 2.2.1.2.

Tabla 4.10: Resultados obtenidos de Carga variable

Fuente: Elaboración propia

Densidad Material (g/cm ³)	k sat (cm/s)	promedio k sat (cm/s)
1,5	0,000171282	0,000159575
	0,000112339	
	0,000195104	
1,6	0,000171282	0,000122436
	$9,56614 \cdot 10^{-5}$	
	0,000100366	
1,7	0,000156251	0,000111924
	0,000100537	
	$7,89828 \cdot 10^{-5}$	

De los resultados obtenidos se puede observar en la gráfica el decaimiento de la permeabilidad según la densidad en la que se puede encontrar el material, esta densidad como se dijo en la sección 2 va a depender de las condiciones del material debido a que este es apilado sin apisonamiento, por lo tanto, no cuenta con una densidad específica.

La Figura 4.8 muestra la curva de variación de permeabilidad según las densidades designadas.

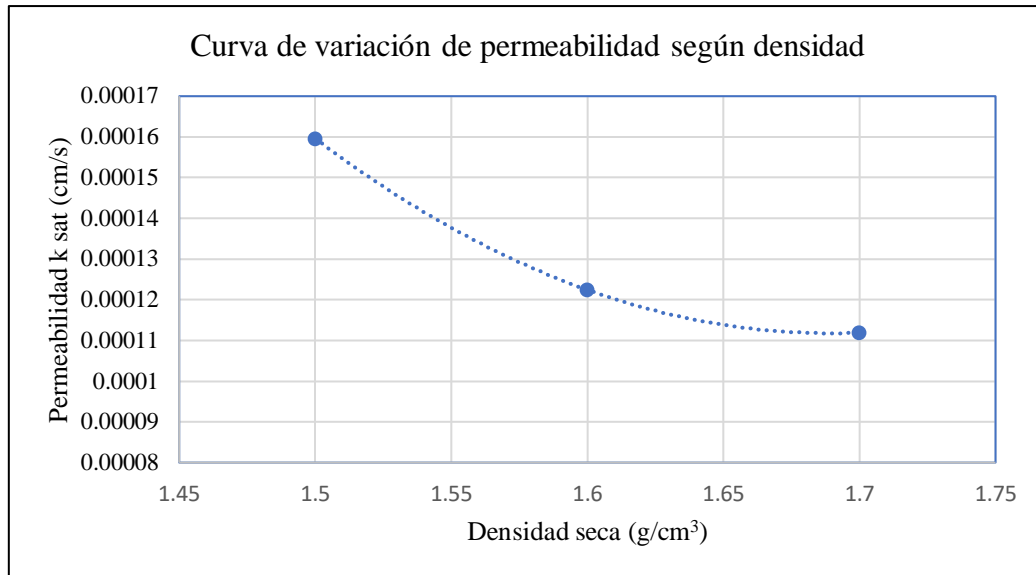


Figura 4.8: Variación de permeabilidad según densidad.

Una vez obtenidos los resultados de los promedios de permeabilidad saturada para cada valor de densidad se tomó como decisión utilizar el valor de densidad correspondiente a 1,6 (g/cm³), valor intermedio a los calculados para tener una aproximación entre estos, por lo tanto, la permeabilidad utilizada para el desarrollo de la investigación es la de $1,22 * 10^{-4} \left(\frac{cm}{s}\right)$.

4.6 Determinación de la separación de tuberías y caudal teórico captado por el sistema de drenaje

Para llevar a cabo la construcción de la estructura representativa del botadero, fue necesario obtener resultados a partir de las relaciones propuestas.

A través de la relación simplificada entre t y s como se muestra en la ecuación 7, y representando la situación de drenajes en paralelo ilustrado en la Figura 2.17 se obtuvo el espaciamiento adecuado para permitir que el nivel freático no sobrepasara las dimensiones establecidas para no producir inestabilidad en el botadero.

Para asegurar, como se menciona anteriormente, para la estabilidad de los botaderos se deben realizar estudios de las diferentes componentes, sus propiedades de resistencia al corte, permeabilidad, densidad, tasa de infiltración, entre otras cosas. Además, es necesario tener en cuenta que, como consecuencia de un estado de suelos saturados, esto podría implicar un aumento en la presión de poros, considerando también la alta carga de material con matriz fina, provocando

un flujo más lento lo que resultaría un grave problema en la estabilidad de las obras. Es por esto, que el drenaje de la pila y/o botadero y el nivel freático generado por la acumulación de soluciones en la parte inferior de estas obras son factores críticos al momento del diseño y desarrollo.

Una vez analizada la estabilidad de botaderos, se obtuvieron los resultados a partir de la Ecuación 7, donde t corresponde a la amplitud máxima del nivel freático y s a la distancia entre tuberías donde el objetivo era aplicar una distancia entre tuberías la cual permitiría mantener controlado el nivel freático al interior de la pila, a un nivel en que la estabilidad de ésta no se vea afectada y no se produzcan fallas.

La obtención de dichos resultados fue realizada a partir de los datos dispuestos en la Tabla 4.11. Donde se definió como tasa de infiltración un valor de 0,0016 mm/h.

Tabla 4.11: Datos utilizados para la obtención de las variables t y s de la muestra de ensayo

Fuente: Elaboración propia.

Variable	Valor	Unidad
Tasa de infiltración W	0,0016	mm /h
W	$4,4 \cdot 10^{-8}$	cm/s
Permeabilidad Muestra	$1,22 \cdot 10^{-4}$	cm/s
$\sqrt{(W/k)}$	0,0095	ratio
\varnothing (6")	15,24	cm

De esta forma, también se decidió realizar un análisis del comportamiento de distintos materiales, desde las arcillas hasta las gravas, con el fin de darle mayor entendimiento a la relación del espaciamiento de tuberías y permeabilidad de los distintos materiales y como esto influye en sus resultados.

Para esto se realiza un análisis de sensibilidad para los valores de tasa de infiltración:

- $W1 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ (mm/h)
- $W2 = 1,4 \cdot 10^{-3}$ (mm/h)
- $W3 = 1 \cdot 10^{-3}$ (mm/h)

Abarcando todos los materiales posibles y para poder ver su comportamiento en la variabilidad de distancia según las diferentes tasas de infiltración mencionadas anteriormente, obteniendo la Figura 4.9 para los materiales correspondientes a Arcilla, Limo, Arena y Grava.

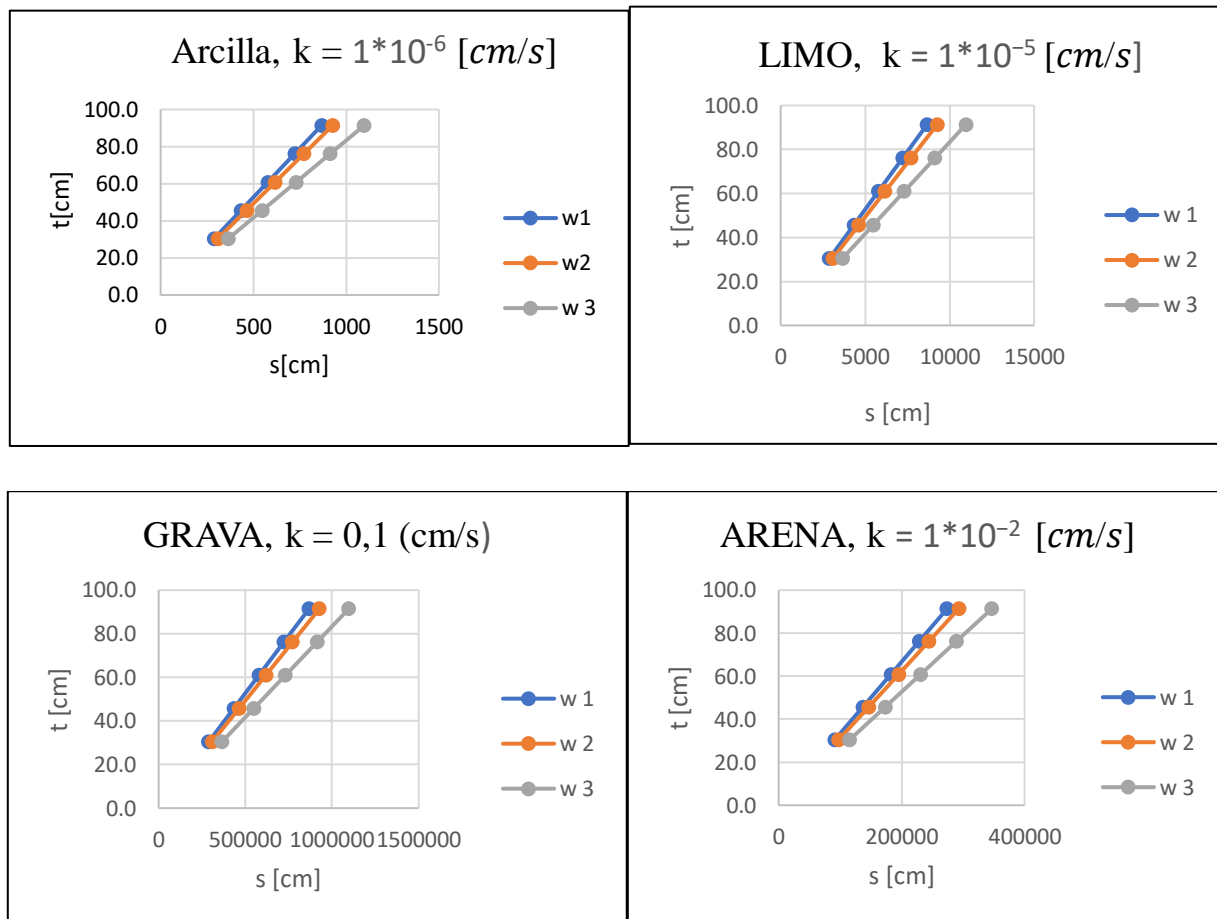


Figura 4.9: Gráfica variación del espaciamiento de tuberías según diferentes tasas de infiltración.

Fuente: Elaboración propia

De la Figura 4.9 se demuestra que la permeabilidad del material provoca cambios en cuanto al distanciamiento de las tuberías, disponiéndolas más separadas mientras mayor sea la permeabilidad del material.

También se realizó un análisis de la variabilidad de distancia entre tuberías para una tasa infiltración determinada (0,0016, 0,0014 y 0,001) y su efecto en los distintos materiales (Arcilla, Limo, Arena y Grava), las cuales se muestran a continuación en la Figura 4.10.

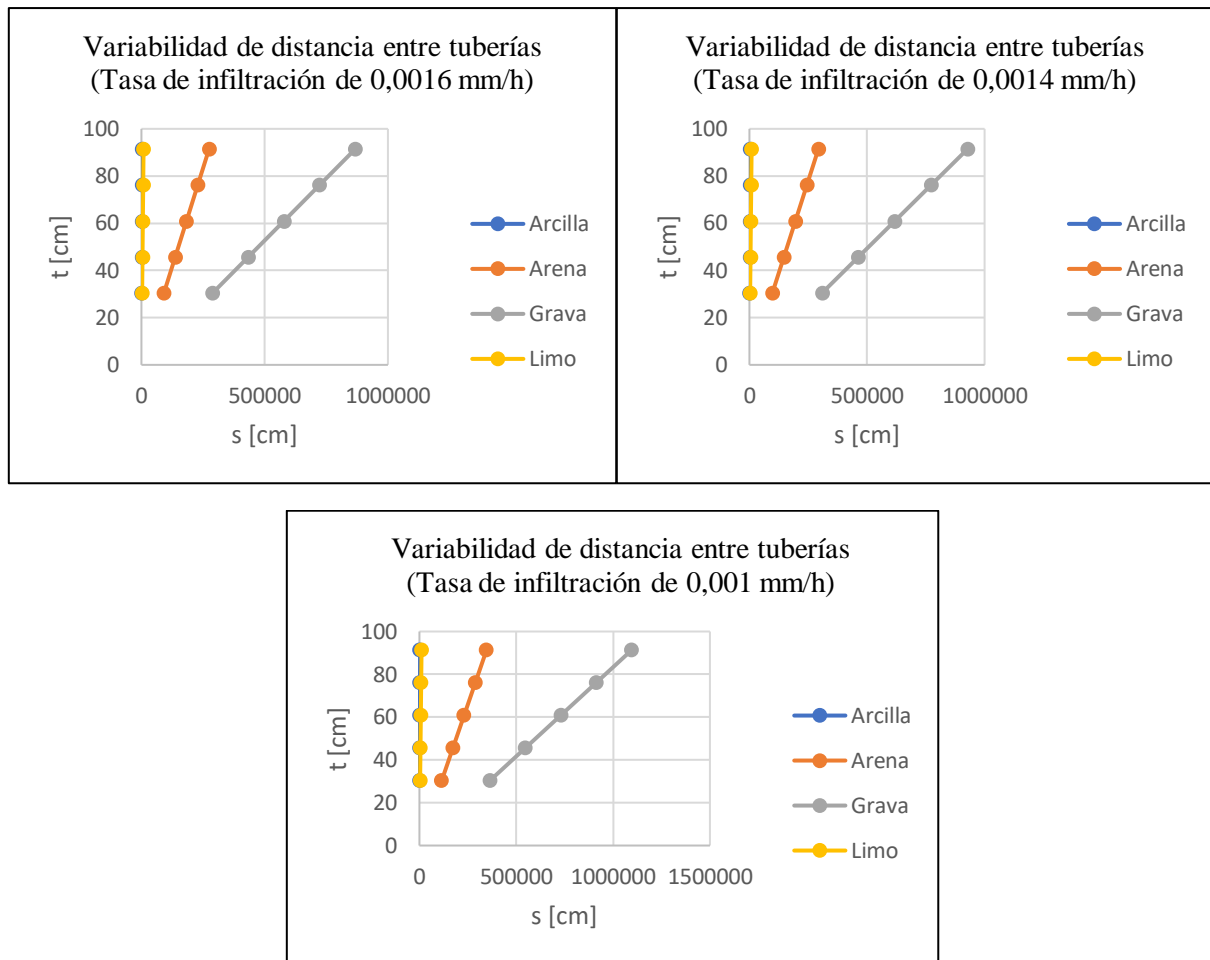


Figura 4.10: Variabilidad de distancia entre tuberías para las tres tasas de infiltración.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que la variación de distancia también va a depender de la tasa de infiltración que se le aplique al botadero, obteniendo mayores distancias entre tuberías para una tasa de infiltración menor.

La Figura 4.11 muestra la variación de la raíz (W/k) utilizada para el cálculo de t y s , la cual se analizó según las permeabilidades de los materiales correspondientes a Arcilla (0,000001), Limo (0,00001), Arena (0,001) y Grava (0,1), las cuales se pueden observar en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Relación de raíz (W/k) y Permeabilidad de material.

Fuente: Elaboración propia.

raíz (W/k)	k material (cm/s)	Material
0,00033333	0,1	Grava
0,00105409	0,01	Arena
0,03333333	0,00001	Limo
0,10540926	0,000001	Arcilla

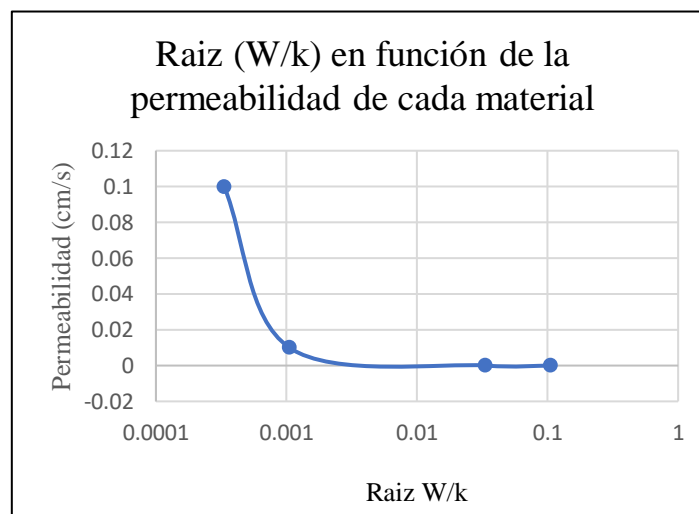


Figura 4.11: Relación de la raíz (W/k) con las permeabilidades de los distintos materiales.

Fuente: Elaboración propia

En donde se puede apreciar que a medida que la permeabilidad disminuye la razón de la raíz (W/k) aumenta para una tasa de infiltración definida (0,0016 mm/h).

Una vez analizadas las variables, se decidió trabajar con la tasa de infiltración $w = 0,0016$ mm/h aplicadas al material correspondiente representante al material, la cual presenta una permeabilidad de $1,22 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

A partir de esto se obtuvo que t y s correspondían a los resultados expuestos en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Resultados de s para su respectivo t .

Fuente: Elaboración propia.

t (cm)	s (cm)
30,5	365,8
45,7	548,6
61,0	731,5
76,2	914,4
91,4	1097,3
106,7	1280,2

Dicho esto, con la obtención de la variable s , la cual corresponde a la distancia entre tuberías para mantener controlado el nivel freático representado por t , se puede iniciar la construcción del modelo experimental.

La Tabla 4.14 muestra los resultados de t y s con su respectivo caudal obtenido a partir de la Ecuación 6:

Tabla 4.14: Resultados de Caudal para la disposición de tuberías.

Fuente: Elaboración propia.

t (cm)	s (cm)	q (cm^3/s)
30,5	365,8	$1,02 * 10^{-5}$
45,7	548,6	$1,52 * 10^{-5}$
61,0	731,5	$2,03 * 10^{-5}$
76,2	914,4	$2,54 * 10^{-5}$
91,4	1097,3	$3,05 * 10^{-5}$

La Figura 4.12 corresponde al análisis de caudal según la variación de espaciamiento de tuberías dispuestas en el botadero de rípios.

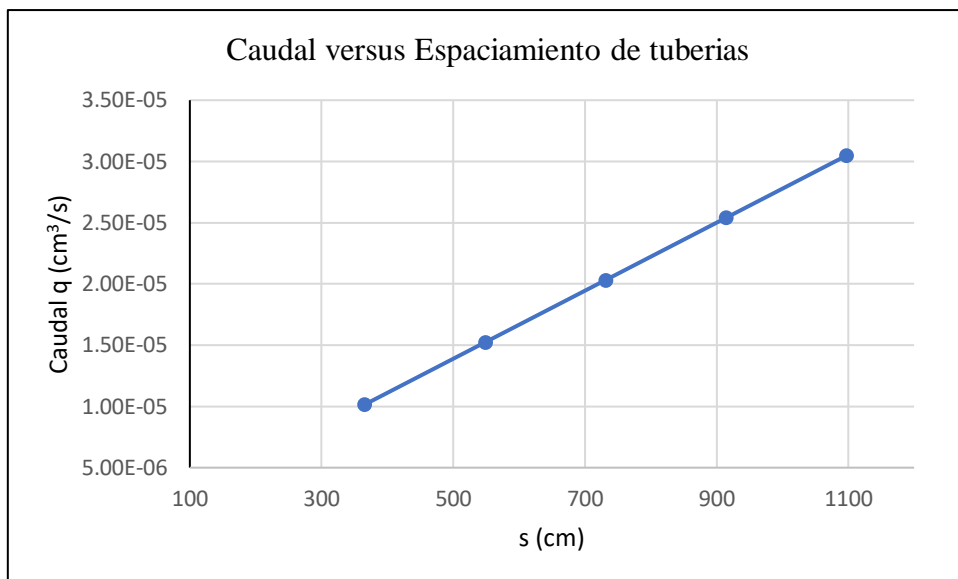


Figura 4.12: Gráfica de caudal versus espaciamiento de tuberías.

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que el caudal de las tuberías aumentará a medida que el espaciamiento de tuberías es mayor.

4.7 Modelación numérica.

Se realizaron distintos análisis a través de un modelamiento en el *software SEEP /W* de la *suite Geostudio 2012*.

El modelamiento considera la geometría del botadero de ripios lixiviado, el cual cuenta con la siguiente información;

- Botadero de ripios con 3 bancos, con altura de 10 m cada uno.
- Permeabilidad saturada de $1,22 * 10^{-4}$ (cm/s), dato obtenido en los ensayos de laboratorio para el ripio lixiviado, con humedad inicial de 12%.
- Separación s de tuberías ($\emptyset = 6''$) para mantener t menor a 100 cm, y un ancho modelo igual a $5xs + 5$ m por cada lado.

En la Figura 4.13 y 4.14 se muestran las curvas de succión obtenidas, en donde la relación existente entre el grado de saturación y la succión del suelo es una parte esencial de las propiedades hidráulicas del suelo, en este caso del material que representa al ripio lixiviado, esta relación se

conoce como curva característica. Para esto se definió un valor de succión máxima de 1000 debido a las altas tensiones que en él se desarrollan por la expansión que presenta con las saturaciones estudiadas. La curva de retención del agua en el suelo puede ser definida como la variación de la succión con la capacidad de retención del agua en los macros y microporos del ripio.

Esta relación está directamente asociada a la granulometría y mineralogía del material. Los cambios en el contenido volumétrico de agua están relacionados con los cambios en la succión y también con la trayectoria de secado o humedecimiento.

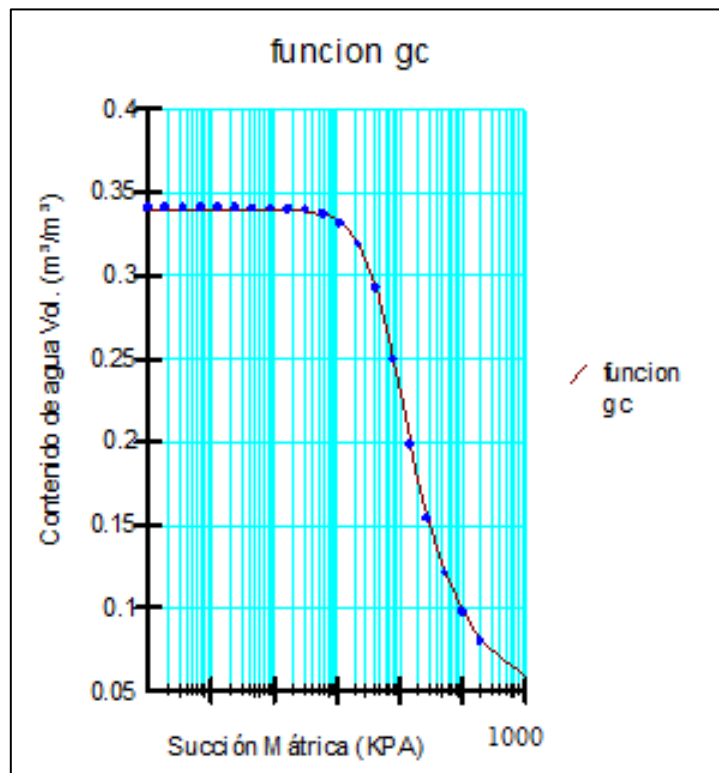


Figura 4.13: Curva de Succión versus Contenido de agua volumétrico.

Fuente: Elaboración propia

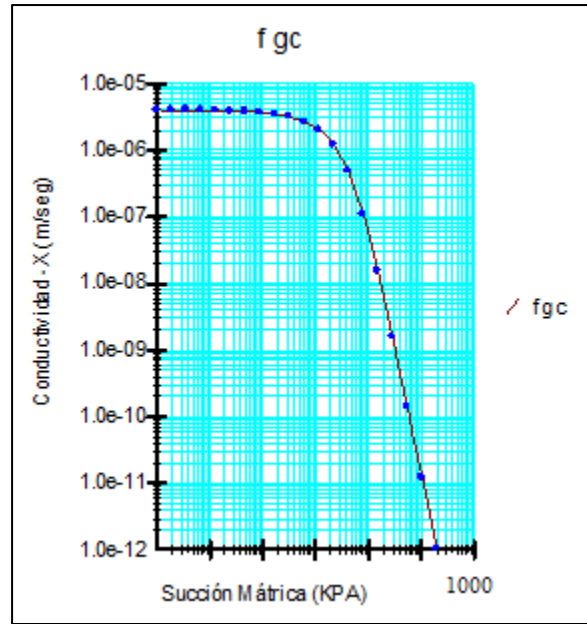


Figura 4.14: Curva de Succión versus Conductividad -X

Fuente: Elaboración propia

Al ejecutar se obtuvieron los siguientes resultados para un banco por separado, el cual se presenta a través de las Figuras desde la 4.15 a 4.20:

De la figura 4.15 se pueden obtener los análisis respecto al flujo del agua que realizara la solución o humedad presente en el botadero de ripios, en donde las rutas de flujo representadas por flechas indican la dirección que tomaran hacia las tuberías colectoras cuya función es drenar el material.

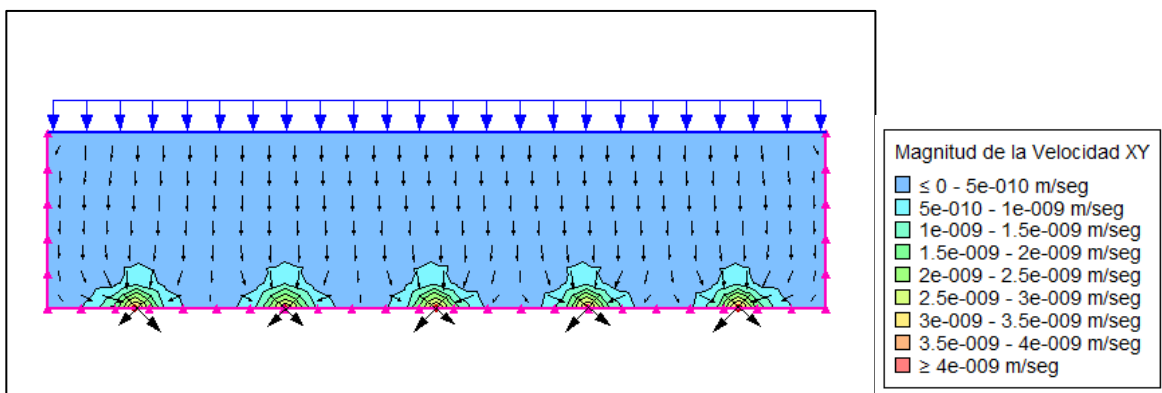


Figura 4.15: Análisis de infiltración Flujo de Agua.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.16 presenta una mayor carga total encima del ripio producto de la condición límite de caudal unitario ingresada sobre el material, por lo tanto, en el sector de las tuberías (abajo) la carga total será menor y cercana a cero.

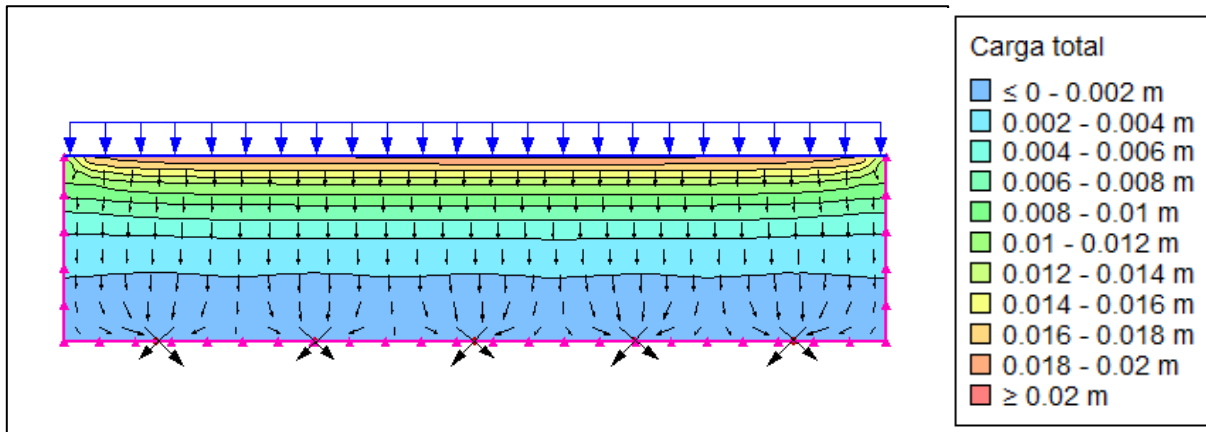


Figura 4.16: Presión intersticial, Carga total.

Fuente: Elaboración propia.

Sucede el mismo caso para la Figura 4.17, pero a partir de la presión de poros por agua debido al generar una condición de limite sobre el material generara mayor presión de poros por agua en el fondo de la estructura.

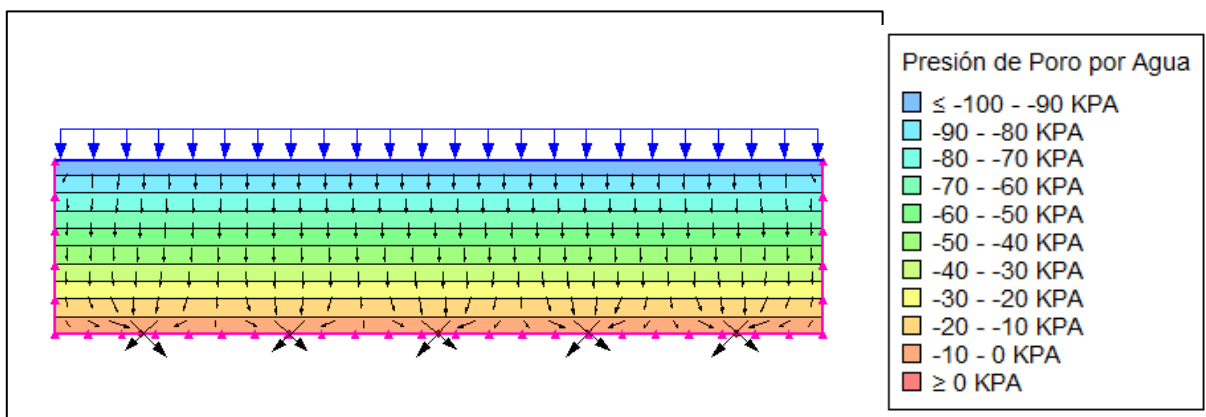


Figura 4.17: Presión de poros por agua.

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la Figura 4.18 la carga de presión será generada mayoritariamente al fondo del recipiente, obteniendo una carga mínima en la superficie debido al material incorporado sobre estos.

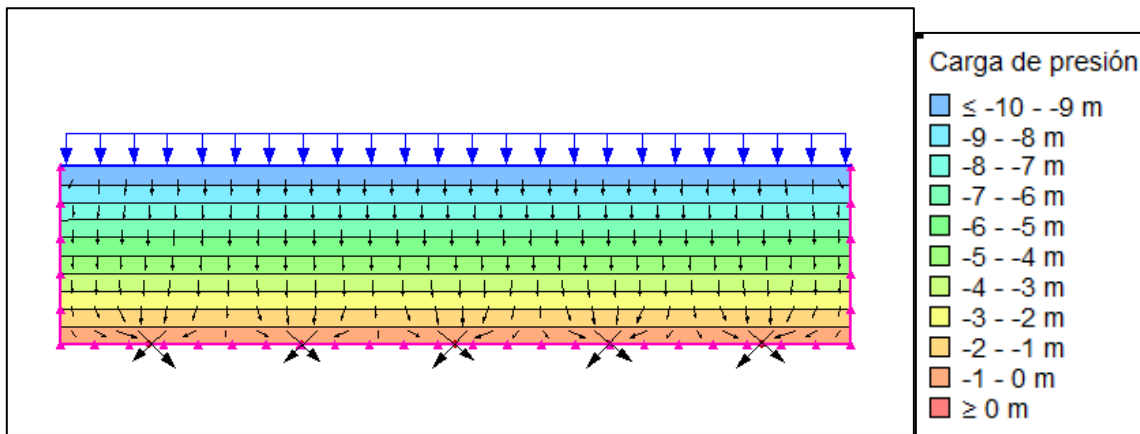


Figura 4.18: presión intersticial, Carga de presión.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.19 se observa el caudal obtenido por parte del modelamiento numérico, con un resultado de $1,5311 \times 10^{-10} (m^3/s)$, este será necesario al momento de comparar el caudal que se obtendrá en el desarrollo del experimento.

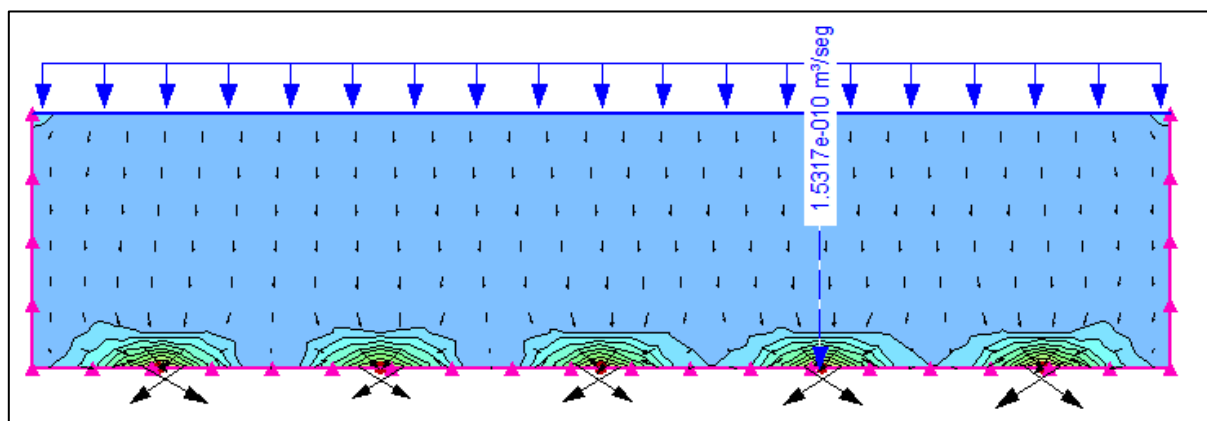


Figura 4.19: Caudal de modelamiento numérico.

Fuente: Elaboración propia.

Al modificar los datos correspondientes a la permeabilidad, aumentándolo a $1 \times 10^{-4} \left(\frac{cm}{s}\right)$, y el flujo de agua incorporado al modelo numérico se obtiene un aumento de caudal y un alza del nivel freático de 0,5 m como se puede observar en la Figura 4.20, lo cual demuestra que la permeabilidad y el flujo incorporado tiene gran influencia en los factores que afectan las estabildades de los botaderos.

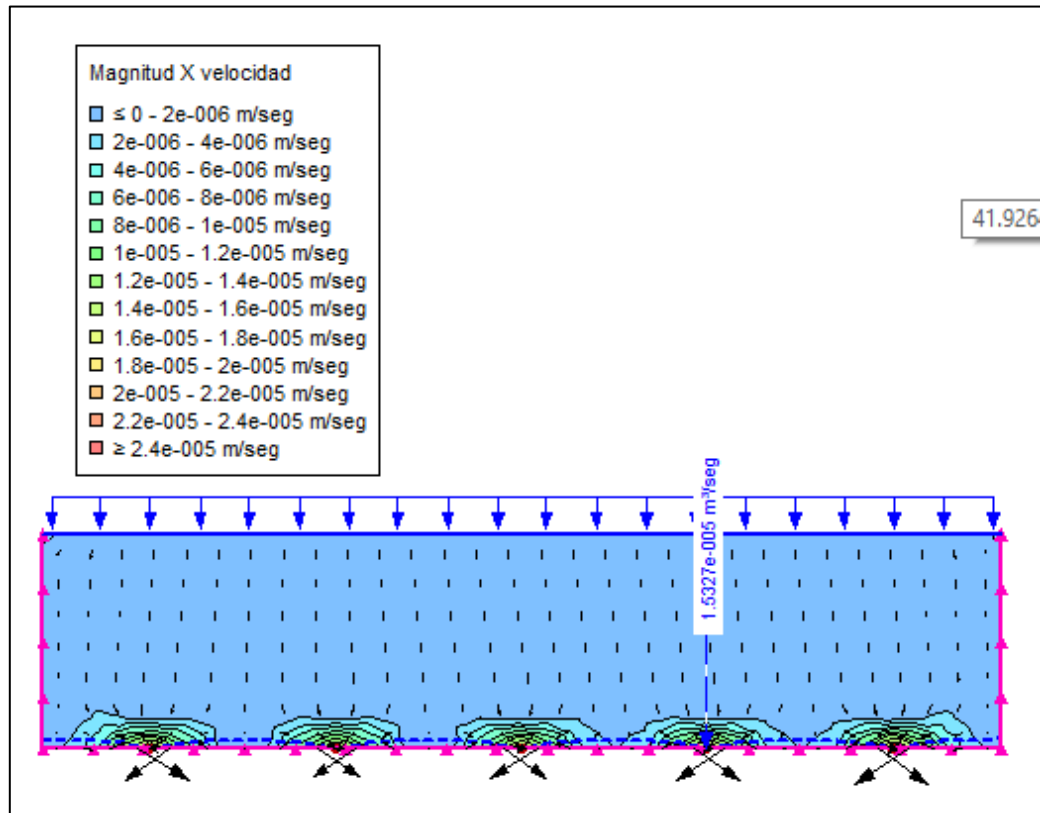


Figura 4.20: Caudal variando flujo de entrada y permeabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Este análisis fue generado a partir de un banco, ya que este se va a comportar de forma similar en los 2 bancos que se dispondrán sobre este, obteniendo como diferencia posiblemente mayor carga al fondo del recipiente al agregar más material sobre la primera. El diseño con 3 bancos no es posible realizar en el *software* debido a que la representación de tuberías es a partir de una condición límite de presión cero, permitiendo el paso de la solución, por lo que si se agrega la misma estructura sobre la primera, esta necesitará drenar el líquido y que éste finalmente no sea

traspasado al banco número uno debido a que por motivos de diseño el botadero de ripios consta con una geomembrana la cual impide el paso de las soluciones.

4.8 Construcción de estructura representativa

Una vez analizado las distintas áreas que puedan influir en la construcción de la estructura, se corroboraron las medidas utilizadas para su elaboración, tal como aparece en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15: Dimensiones de estructura.

Fuente: Elaboración propia

Estructura		
Dimensiones	Valor	Unidad
Ancho	20-30-40	cm
Largo	60	cm
Altura	50	cm

Para la representación del sistema de drenaje se definieron finalmente tuberías representadas por microtubos de riego de 4 mm de diámetro, ver Figura 4.21.



Figura 4.21: Microtubo de 4 mm de diámetro.

Fuente: Sodimac.

En la Figura 4.22 se puede observar las estructuras propuestas con sus respectivas dimensiones y tuberías.

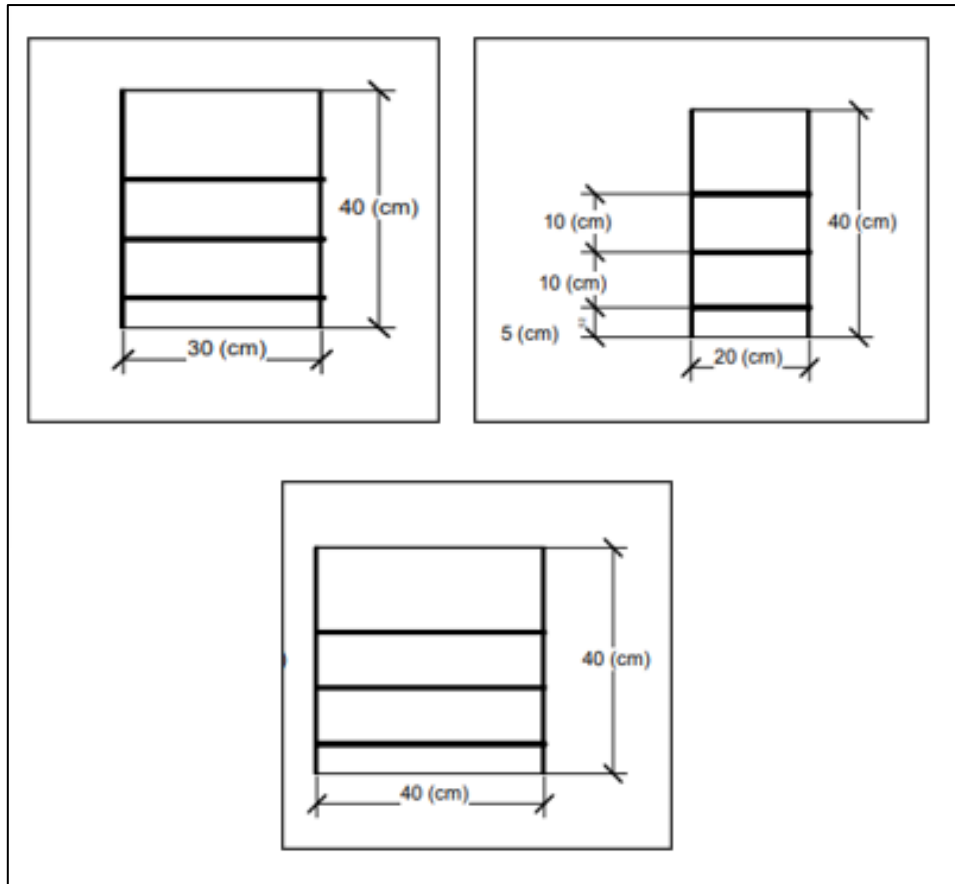


Figura 4.22: Dimensiones propuesta estructura de 40 cm de ancho.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.23 representa las dimensiones variando el ancho de estas con una vista lateral, pero manteniendo el mismo largo correspondiente a 60 cm.

Para la selección se presentaron tres diseños distintos variando su ancho en 20, 30 y 40 cm, para ver cual se adecuaba y daba mayor estabilidad y seguridad para posteriormente incorporar materiales y tuberías dentro de este. Finalmente se optó por la estructura de 30 cm de ancho debido a que sus dimensiones darían mayor firmeza a la estructura.

Con todos los parámetros analizados, se ejecutó la construcción de la representación del botadero de ripios, con el microtubo correspondiente a las tuberías de drenaje y el material representativo a la matriz fina de un ripio lixiviado, dispuestas con la altura de un banco de 10 cm, como se muestra en la Figura 4.23.

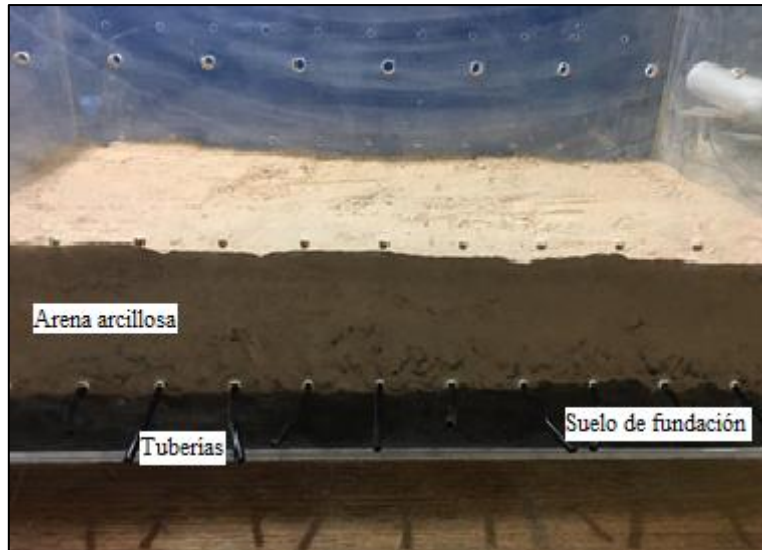


Figura 4.23: Componentes de la representación Botadero de Ripios.

Fuente: Elaboración propia

4.9 Análisis de resultados del experimento

En la Figura 4.24 se muestra el material representativo a la matriz fina del ripio lixiviado, el cual fue homogeneizado a partir de las dos muestras obtenidas por la Universidad de Talca.



Figura 4.24: Muestra utilizada con referencia.

Fuente: Elaboración propia.

Para su mayor aproximación o semejanza a un botadero de ripios real, se emplean generalmente tanto en las pilas de lixiviación como en los mismos botaderos, geomembranas de HDPE, texturadas en ambas caras, Desde el punto de vista de la estabilidad de estas obras, las interfaces “carpeta drenante o ripios – geomembrana – suelo de fundación” pueden constituir un plano preferencial de deslizamiento, ya que presentan, por lo general, propiedades de resistencia al corte menores a la de los materiales granulares que las confinan, por otro lado estas también proporcionan impermeabilización, por lo tanto evitan que las soluciones se filtren al suelo de fundación. Debido a esto se utilizó una capa de plástico utilizada como geomembrana para detener la infiltración de la solución y esta no afectara el suelo de fundación del experimento (ver Figura 4.25).



Figura 4.25: Instalación de geomembrana para el Experimento.

Fuente: Elaboración propia.

El armado final se contextualiza en la representación de un botadero con un banco de altura de 10 cm, tal como se presenta en la Figura 4.26.



Figura 4.26: Armado final del Botadero de Rípios.

Fuente: Elaboración propia.

Al verificar que todas las condiciones evaluadas en la representación del botadero de rípios lixiviados estaban correctas, se procedió a introducir líquido de forma homogénea para humedecer el botadero.

Las Figuras 4.27 y 4.28 representan la condición del botadero a las 18:00 horas, momento exacto de la fotografía.

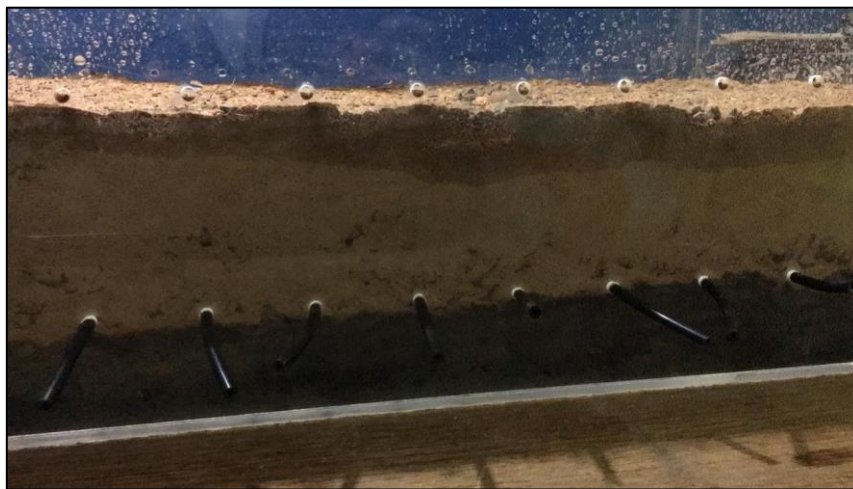


Figura 4.27: Incorporación de líquido en modelo físico.

Fuente: Elaboración propia.

Cualquier cambio en la porosidad del suelo encontrado por una orilla humectante afecta el movimiento del agua, al no presentar una granulometría homogénea el movimiento del agua se propagó por aquellas zonas donde presentaba mayor porosidad.

Cuando el suelo está casi saturado, el agua se mueve rápidamente a través de este, esto deja en claro que el movimiento del agua depende exclusivamente del tipo de material. Esto se logró ver durante el desarrollo del experimento, debido que en sectores donde estaba más saturado, el agua avanzaba más rápido, llegando antes a las tuberías inmersas y obteniendo un flujo de agua antes en comparación con otros sectores.



Figura 4.28: Primer avance del frente humectante en modelo físico.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.29 se puede observar como el frente humectante fue abriendo paso en el material representativo, avanzando hasta la zona delimitada por las tuberías perforadas de drenaje, ambas corresponden a las tomas realizadas a las 18:00 horas.



Figura 4.29: Avance del frente humectante.

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 4.30 se refleja un avance de 7 cm de diferencia del frente humectante, avanzando 0,001 cm por segundo, estas fotografías fueron tomadas a las 18:30 horas y 20:00 horas respectivamente.



Figura 4.30: 7 cm de avance del frente humectante.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez alcanzada la zona de drenaje por tuberías colectoras, se comenzó a ver el funcionamiento de estas, siendo capaz de drenar, como primera instancia, un caudal muy bajo y sin el funcionamiento de todas las tuberías dispuestas, resultando un volumen de 4 ml.

Al finalizar el primer drenaje se decidió agregar más líquido al experimento obteniendo como resultado una filtración de 20 ml de agua en el segundo análisis. Observando así un mejor funcionamiento de las tuberías tal como se había planteado, debido a que estas comenzaron a trabajar cada vez que se le agregaba mayor cantidad de agua al recipiente.

La Figura 4.31 corresponde al momento exacto en donde el frente humectante llega a la zona en donde se encuentran las tuberías de drenaje, hora exacta 21:30 horas.



Figura 4.31: Saturación completa y superficie del modelo físico.

Fuente: Elaboración propia.

Cuando el agua se agregó al material, los poros más finos de esta capa resistieron el flujo de agua. Aunque el agua pasa a través de la arcilla, su penetración es tan lenta que las masas de agua a menudo se acumularon por encima del material. La solución acumulada en la superficie del botadero tal como se aprecia en la Figura 4.31, representa una de las características de los botaderos cuando estos cuentan con un alto contenido de material fino.

Una vez realizadas las primeras pruebas, se procedió a agregar mayor cantidad de agua para comprobar si el comportamiento del nivel freático del botadero representativo no provocaba desestabilidad, en donde se observó que las tuberías de drenaje dispuestas en la estructura cumplieron con su función de drenaje, sin embargo, las propiedades del material representativo de la matriz fina del ripio lixiviado, provocó que la filtración de solución se llevara a cabo de forma muy lenta lo que llevo a formar un estancamiento de agua en la superficie de la maqueta.

En la Figura 4.32 se muestra el estancamiento del agua en la superficie de la estructura producto de la granulometría del material, debido a que durante el desarrollo de la última prueba se introdujo un mayor flujo de agua durante un tiempo más prolongado. Esto ocurre cuando la capacidad de infiltración es inferior a la intensidad del flujo agregado a la representación, quedando en la superficie del terreno, por lo tanto, se forma una capa delgada de agua.



Figura 4.32: Líquido en la superficie del modelo físico.

Fuente: Elaboración propia.

Otra prueba que se analizó fue variando la separación de las tuberías inmersas, dejándolas a una distancia de 10 cm cada una, durante este experimento los resultados que arrojó el caudal fue un aumento debido que al disminuir la cantidad de tuberías en la representación del botadero el flujo se concentró totalmente en estas, obteniendo finalmente un mayor caudal para cada una y un total de $4,8 \times 10^{-2} \left(\frac{cm^3}{s}\right)$. La Figura 4.33 muestra la disposición de tuberías espaciadas por 10 cm.



Figura 4.33: Representación con distancia de 10 cm entre tuberías.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se dio a conocer los caudales de las tres pruebas realizadas, mostrando un progreso en el funcionamiento de las tuberías colectoras perforadas, y demostrando que cumplen el ejercicio

de drenar, evitando un posible levantamiento de material, el cual en el caso de un botadero de rípios real sería un grave problema de estabilidad, estos resultados se pueden observar en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16: Resultados pruebas de Caudal en experimento.

Fuente: Elaboración propia.

Prueba	Caudal ($\frac{cm^3}{s}$)
Prueba 1	6×10^{-4}
Prueba 2	5×10^{-3}
Prueba 3	$1,22 \times 10^{-2}$
SEEP/W	$1,53 \times 10^{-4}$
Teórico	$1,52 \times 10^{-5}$

Con los resultados obtenidos se construyó un gráfico comparativo abarcando las pruebas 1,2, *SEEP/W* y prueba teórica, el cual se muestra en la Figura 4.34.

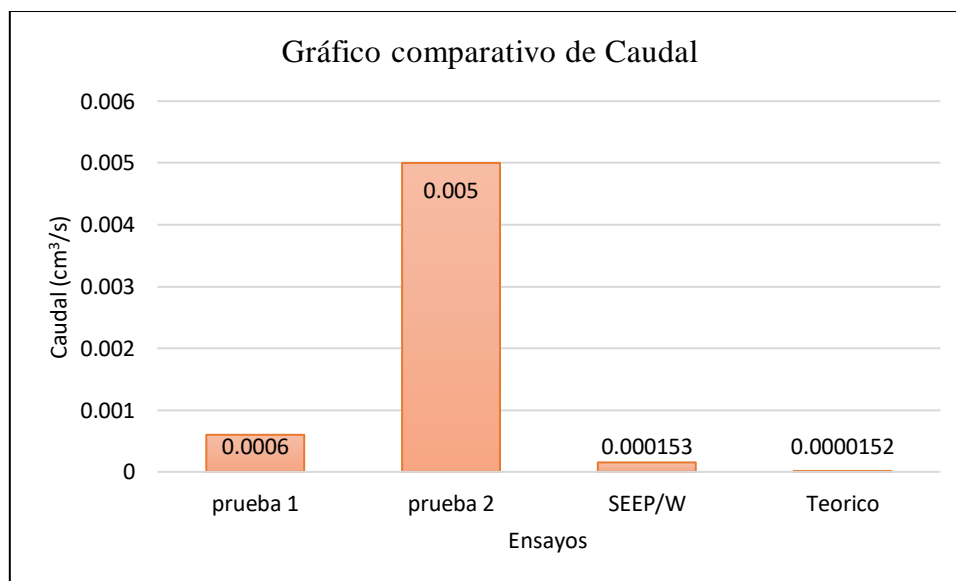


Figura 4.34: Gráfico comparativo de caudal.

Fuente: Elaboración propia

Al comparar estos valores con el caudal obtenido a partir del modelamiento numérico en donde se obtuvo un caudal de $1,53 \times 10^{-4} \left(\frac{cm^3}{s}\right)$ se observa una diferencia de aproximadamente 5 veces por debajo de la prueba 1 y con una diferencia mucho mayor con la prueba 2. Uno de los factores por los que existe una diferencia en el caudal del modelamiento numérico y el modelo físico, es debido a que el material, producto de las perforaciones de las tuberías, ingresaba a estas, acumulándose y obstaculizando el flujo del material, provocando una disminución o simplemente impidiendo el paso total del flujo a diferencia del *SEEP/W* en donde el dren o presión cero en este modelo numérico no presenta dificultades de colmatación. Otro factor es la tasa de infiltración debido a que en el modelamiento numérico fue ingresada con un valor fijo, a diferencia del modelo físico en donde fue introducida manualmente incorporando al ensayo un grado de error relevante. Por otro lado, en el modelamiento numérico, el material ingresado corresponde a un material específico, a diferencia del material utilizado en el experimento, el cual según granulometría pertenece a una arena arcillosa la cual contenía un 47 % aproximadamente de contenido fino, por lo tanto, el flujo incorporado, tal como se explica en la sección 2.10 del movimiento del agua en el suelo, se verá ralentizado por el alto porcentaje de material de granulometría fina obteniendo resultados diferentes a los mostrados en el modelamiento numérico y teórico. También es importante mencionar que la modelación numérica al ser transitoria no es representativa de los primeros instantes mientras el material en el modelo físico se está saturando.

Otro motivo de por qué existe diferencias en los caudales de los ensayos realizados, es la densidad a la cual estaba sujeta el material, si bien durante los análisis se trabajó con densidades fijas de material, al momento de armar las pruebas la densidad pudo variar dependiendo de la forma en que fue ingresado el material a la estructura, también esto tiene gran relevancia en el modelo numérico ya que aquí la densidad será uniforme en todo el diseño, no así en las pruebas del modelo físico.

Durante la prueba 3, el caudal obtenido fue de $1,22 \times 10^{-2} \left(\frac{cm^3}{s}\right)$, este valor se diferencia de los demás debido a que para su desarrollo se decidió incorporar mayor líquido al recipiente con el fin de ver el comportamiento del material al interior, y ver si en este caso las tuberías cumplían con su función de drenaje sin afectar la estabilidad ni provocar levantamiento en el material. Resultando de esto un caudal mucho mayor en comparación al resto de las pruebas realizadas.

5 CONCLUSIÓN

En este capítulo se realizan las conclusiones respecto a lo desarrollado en la memoria junto con lo planteado en los objetivos, además de sugerir recomendaciones para aquellos que quieran continuar un estudio o investigar en un tema similar.

La experiencia ha demostrado y dejado en evidencia que es de vital importancia complementar dichos análisis con otras consideraciones geotécnicas para su diseño, como, por ejemplo: licuación estática, sistema de drenaje, carpeta impermeable, evolución de las propiedades de los minerales, etc.

Por medio de la recopilación de información uno de los objetivos específicos fue analizar el diseño de las tuberías colectoras perforadas utilizadas para el drenaje de los botaderos de ripios lixiviados, con el fin de evaluar la construcción de un botadero representativo, cumpliendo con lo propuesto se evaluó el desempeño del sistema de drenajes en botaderos de ripios, además de sus características y funcionamientos en base a su construcción y sus operaciones. Con esto fue posible construir un modelo geométrico a escala del botadero de ripios y finalmente lograr identificar sus partes para garantizar su representatividad y obtener resultados cercanos a los reales. La identificación del sistema geotécnico y su posterior caracterización permitió entender cómo se comportarían las estructuras del sistema de drenaje y como sería mejor la disposición de éstas dadas las características propias que posee la propiedad del botadero. Respecto al material utilizado como representante de la matriz fina de los ripios lixiviados, se trabajó con arena arcillosa debido a su composición granulométrica, con la que se pretendía simular la matriz fina de un ripio que ha sido desintegrado por los agentes químicos en el tiempo, la cual contenía un alto porcentaje de fino.

Otro de los puntos para tener en cuenta dentro de los resultados obtenidos a partir del experimento realizado, era analizar y observar si existía alza del nivel freático entre tuberías mediante la representación geométrica, para verificar el funcionamiento de las tuberías. Este por medio de una tercera prueba realizada en el experimento para ver cómo se comportaba, en donde se aplicaba un mayor flujo de agua, se logró observar que el funcionamiento de las tuberías fue el óptimo, asegurando su estabilidad a una distancia dada y por ende compatibilizando la altura máxima del nivel freático factible de alcanzar con la estabilidad global de la representación, sin embargo, al aumentar esta distancia de espaciamiento entre tuberías el material comenzaba a levantarse, dando cuenta que la distancia entre tuberías es un factor importante en el sistema de drenaje.

Finalmente, durante el transcurso de esta investigación se consiguió abarcar todos los puntos propuestos, resultando en el modelamiento numérico un caudal de $1,53 * 10^{-4} (\frac{cm^3}{s})$ y caudales para tres pruebas distintas en el modelo físico de $6 * 10^{-4} (\frac{cm^3}{s})$, $5 * 10^{-3} (\frac{cm^3}{s})$ y $1,22 * 10^{-2} (\frac{cm^3}{s})$

respectivamente, no obstante, el desarrollo de este, al ser una representación llevada a una escala pequeña los resultados pueden presentar un grado de margen de error, ya sea por las perforaciones realizadas en los microtubos correspondientes a las tuberías colectoras, las cuales por las dimensiones no se pudo lograr una similitud a las reales, como también el material representativo a la matriz fina del ripio lixiviado, el cual puede tener variaciones en cuanto a su granulometría y poca homogeneidad. También otro factor importante es el soporte de la estructura de acrílico, la cual le da una mayor estabilidad inhibiendo cualquier problemática presente en la construcción de la representación del ripio lixiviado. Sin embargo, al comparar estos resultados por parte del modelamiento numérico, teórico y del modelo físico, muestran diferencias en razón 4:1 principalmente la primera prueba experimental con el resultado del modelamiento numérico, dejando en evidencia el funcionamiento de las tuberías, considerando los errores sistemáticos y aleatorios presentes dentro del experimento.

En función con el diseño y los parámetros considerados en los botaderos de ripios lixiviados cabe destacar la gran importancia de cada uno de estos, en donde cualquier variación generaría un cambio en la estabilidad, por lo tanto, es necesario tener un sistema de drenaje óptimo y redundante en función de los materiales en donde se trabajará, como también evaluar los potenciales riesgos y proponer medidas de mitigación correspondientes.

Recomendaciones

Tanto dentro como fuera de los alcances que competen a esta memoria, se pueden dar algunas recomendaciones para próximas investigaciones en donde deseen profundizar en temáticas similares a las planteadas a lo largo de este escrito.

En cuanto a la caracterización del material utilizado como representante de la matriz fina de un ripio post lixiviación, a modo de alcanzar mayor similitud en la representación del modelo físico realizado experimentalmente, sería ideal poder realizar ensayos que ayuden a caracterizar de forma más certera las propiedades de los materiales que componen un botadero de ripios lixiviados real, considerando para esto la obtención de muestras directas de ripios. Además, se recomienda realizar ensayos de permeabilidad in situ con equipos estandarizados en periodos de tiempo adecuados considerando tanto las permeabilidades horizontales como las verticales.

Referente a las infiltraciones, se recomienda llevar a cabo el experimento con distintos materiales, con granulometrías desde arcillas hasta gravas, con esto además de obtener resultados teóricos en cuanto a la variación del caudal según el material que lo compone, sería ideal llevar a cabo análisis de forma experimental, teniendo una comparativa mayor y más detallada. En cuanto a las tuberías utilizadas se recomienda utilizar tuberías de mayor tamaño y que estas cubiertas con una malla para evitar el taponamiento de estas, producto del material representativo de la matriz fina del ripio lixiviado, lo que provocaría un resultado más limpio y cercano al real.

6 BIBLIOGRAFÍA

- ARCADIS. (2010). *Análisis de deformaciones de túberias enterradas bajo depositos de gran altura*. Informe Interno.
- Bard, & Campaña. (2004). *Aspectos geotecnicos en el diseño de pilas y botaderos*. V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica: ARCADIS.
- Burgos, S. (2017). *Desarrollo de base de datos como apoyo a la selección de soluciones constructivas para fundaciones en viviendas serviu, Region de Aysen*. Santiago de Chile: Universidad Tecnica Federico Santa Maria.
- Craig, R. F. (2004). *Craig´s Soil Mechanics*. London: Spoon press.
- Gardner, W. (1988). *Water Movement in Soils*. Washington: Washington State University.
- Holtz, R., & Kovacs, W. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall Civil Engineering an Engineering Mechanics Series. .
- Lopez, E. J. (2012). *Estudio experimental de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de lixiviación*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Molina, E. (2014). *Maximizacion de cobre fino recuperado de botaderos de ripios y oxidos de baja ley en mina Radomiro Tomic*. Santiago de Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE.
- O´Kane Consultants Inc. (2000). *Demonstration of the Application of Unsaturated Zone Hidrology for Heap Leach Optimization*. Industrial Research Assistance Program Contract #332407.
- Poblete, R. (2019). *Lixiviación cianurada de mineral de oro en columnas a nivel de planta piloto*. Santiago, Chile.: Universidad Tecnica Federico Santa Maria.
- Rojas, F. (2010). *Análisis del efecto de arcillas-finos en el proceso de lixiviación de Radomiro Tomic*. Valparaiso, Chile.: Pontificia Universidad Catolica de Valparaiso.
- Schmidt. (2001). *Criteria de diseño de un proceso hidrometalúrgico para minerales de cobre oxidados*. Universidad de Chile: memoria de título para optar al grado de Ingeniero civil en Minas.

- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering*. New York: Inc.
- Van Zyl's, D., & Robertson, A. (1980). *Subsurface drainage of tailings impoundments: some desing, construction and management considerations*. Colorado State University: Geotechnical Engineering Program, Civil Engineering Departament.
- Vergara, C. (2019). *Diseño geotecnico y operación de depositos de lixiviación y botaderos de ripios*. Santiago de Chile: SRK consulting.
- Wallace, M. (1948). *Experimental investigation of the effect of degree ofsaturation on the permeability of sand*. Cambbridge: Thesis, Dept. of Civil Engr., M.I.T.
- Whitlow, R. (1995). *Basic soil mechanics (third edition)*. Addison Wesley Longman Limited.

7 ANEXOS

Tabla 7.1: Análisis granulométrico.

Fuente: Elaboración propia

Malla	Abertura	Retenido (g)	Pasante (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
10	2	38	303	1,24	1,24	98,76
20	0,84	21,5	281,5	7,01	8,25	91,75
30	0,595	24,1	257,4	7,86	16,10	83,90
40	0,42	16,3	241,1	5,31	21,41	78,59
50	0,297	26,3	214,8	8,57	29,99	70,01
70	0,25	8,3	206,5	2,71	32,69	67,31
100	0,149	18,7	187,8	6,10	38,79	61,21
200	0,074	42,8	145	13,95	52,74	47,26
270	0,053	19,5	125,5	6,36	59,09	40,91
325	0,044	3	122,5	0,98	60,07	39,93
400	0,037	2,9	119,6	0,95	61,02	38,98
< 400	< 0,037	119,6	0	38,98	100,00	0,00



Figura 7.1: Ensayo de Limite de Atterberg

Fuente: Elaboración propia



Figura 7.2: Cuchara de Casagrande.

Fuente: Elaboración propia



Figura 7.3: Ensayo de permeámetro con suelo Saturado.

Fuente: Elaboración propia