



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y**  
**METALÚRGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**GEOLÓGICA**



**ESTUDIO GEOTECNICO PARA EL PROCESO CONSTRUCTIVO**  
**DEL DEPÓSITO DE RELAVE FILTRADO - QUEBRADA HONDA -**  
**TACNA**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**HANNEKE PILAR PONCE QUISPE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO GEOLOGO**

**PUNO-PERÚ**

**2024**



# HANNEKE PILAR PONCE QUISPE

## TESIS ESTUDIO GEOTECNICO PARA EL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL DEPÓSITO DE RELAVE FILTRADO-QUEB...

My Files

My Files

Universidad Nacional del Altiplano

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::8254:409870430

Fecha de entrega

26 nov 2024, 7:47 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

26 nov 2024, 8:22 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

BORRADOR DE TESIS FINAL HANNEKE PILAR PONCE.pdf

Tamaño de archivo

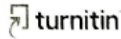
25.9 MB

213 Páginas

48,395 Palabras

236,503 Caracteres





## 17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

### Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

### Fuentes principales

- 17% Fuentes de Internet
- 3% Publicaciones
- 8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

- Caracteres reemplazados**  
102 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
- Texto oculto**  
36 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

**ANDRES OLIVEREA CHURA**  
INGENIERO GEOLOGO  
CIP: N° 45079





## DEDICATORIA

A Dios por iluminar mi camino, guiarme y haberme permitido llegar hasta este momento, brindarme salud y la fuerza necesaria para lograr mis objetivos y superar cada reto.

A mis padres Néstor Ponce Atencio y Bertha Quispe Cahuana por el inmenso amor y dedicación que me dan día a día ser mi fuente de vida e inspiración de lucha incalculable, valentía y superación constante; a mi hermana Estefany Ponce Quispe, por motivarme y darme la fortaleza de ser mejor. A ellos por darme el impulso constante para lograr este objetivo.

A mi familia en general, porque me brindan su apoyo incondicional, y por compartir conmigo buenos y malos momentos.



## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a la UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO, por abrirme las puertas y continuar con mi formación profesional, a los docentes de la ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA por haberme acogido e impartido sus enseñanzas a lo largo de esta maravillosa carrera profesional.

A la empresa SOUTHERN COOPER CORPORATION, que me permitió realizar mis prácticas profesionales en el Área de Geotecnia – Quebrada Honda, de la mano de sus excelentes profesionales pude ampliar y desarrollar mis conocimientos.

Finalmente, a mi familia, quienes son un soporte y motivación esencial en mi vida, que me da la fuerza para continuar y lograr todas mis metas.



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>14</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>16</b>
1.1.1 Problema General.....	17
1.1.2 Problemas Específicos.....	17
<b>1.2 HIPÓTESIS DEL TRABAJO .....</b>	<b>17</b>
1.2.1 Hipótesis.....	17
1.2.2 Hipótesis Específicas.....	17
<b>1.3 OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
1.3.1 Objetivo General. ....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>18</b>

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA



<b>2.1</b>	<b>ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
2.2.1	Estudio Geotécnico. ....	20
2.2.2	Geotecnia.....	20
2.2.3	Elementos de la Geotecnia. ....	22
2.2.4	Análisis Geotécnicos.....	22
2.2.5	Estudio de Suelos. ....	23
2.2.6	Mecánica de Suelos.....	23
2.2.7	Sistemas de Clasificación de Suelo.....	23
2.2.8	Terreno de Fundación.....	24
<b>2.3</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>24</b>
2.3.1	Depósito De Relaves. ....	24
2.3.2	Opciones de Descarga de Relaves.....	27
2.3.3	Efectos de La Razón Sólido/Agua (S:A).....	29
2.3.4	Permeabilidad de los Suelos.....	31
2.3.5	Densidad Relativa. ....	32
2.3.6	Relaves Filtrados.....	33
2.3.7	Tipos de Relave Filtrado .....	36
2.3.8	Aspectos Ambientales para Considerar.....	39
2.3.9	Ventajas Y Desventajas Ambientales De Los Relaves Filtrados .....	42
2.3.10	Propuesta de evaluación ambiental. ....	43
2.3.11	Depósito de Relaves.....	44
2.3.12	Depósitos de Relaves Filtrados. ....	45
2.3.13	Componentes Principales de un Depósito de Relaves y Algunos Otros Conceptos Importantes.....	46



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1</b>	<b>MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>51</b>
3.1.1	Etapa preliminar.....	51
3.1.2	Etapa de campo.....	52
3.1.3	Etapa de gabinete.....	53
<b>3.2</b>	<b>METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>53</b>
3.2.1	Nivel de Investigación.....	54
3.2.2	Tipo de Investigación.....	54
3.2.3	Diseño de Investigación.....	55
3.2.4	Variables de la Investigación.....	56
3.2.4.1	Variable independiente:.....	56
3.2.4.2	Variable dependiente:.....	56
3.2.5	Población.....	57
3.2.6	Muestra.....	57

## CAPÍTULO IV

### CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

<b>4.1</b>	<b>UBICACIÓN.....</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>ACCESIBILIDAD.....</b>	<b>59</b>
<b>4.3</b>	<b>GEOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>60</b>
4.3.1	Estratigrafía.....	60
4.3.1.1	Formación Paralaque (KTi-pa).....	61
4.3.1.2	Formación Moquegua.....	62
4.3.1.3	Moquegua inferior (Ts-moi).....	63
4.3.1.4	Moquegua superior (Ts-mos).....	64





4.3.1.5	Depósitos aluviales antiguos (Qp-al).....	64
4.3.1.6	Depósitos aluviales recientes (Qr-al).....	65
4.3.1.7	Rocas intrusivas.....	67
<b>4.4</b>	<b>TECTONICA .....</b>	<b>68</b>
4.4.1	Fallas .....	68
4.4.1.1	Sistema de fallas Purgatorio.....	69
4.4.1.2	Pliegues.....	69
<b>4.5</b>	<b>GEOLOGÍA HISTÓRICA.....</b>	<b>70</b>
<b>4.6</b>	<b>SISMICIDAD .....</b>	<b>71</b>
<b>4.7</b>	<b>PELIGRO SÍSMICO .....</b>	<b>72</b>

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>5.1</b>	<b>RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS DEL TERRENO DE FUNDACIÓN.....</b>	<b>74</b>
<b>5.2</b>	<b>RESULTADOS DE DENSIDAD DEL TERRENO DE FUNDACIÓN.....</b>	<b>79</b>
<b>5.3</b>	<b>RESULTADOS DE INFILTRACION DE AGUA DEL TERRENO DE FUNDACIÓN.....</b>	<b>80</b>
<b>5.4</b>	<b>PROPUESTA DE DISPOSICION DEL TERRENO DE FUNDACION ....</b>	<b>81</b>
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>VII.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>87</b>

Área: Ingeniería geotécnica

Tema: Geotecnia

Fecha de sustentación: 13 de diciembre del 2024



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Métodos de Construcción de Presas de Relaves .....	29
<b>Figura 2</b> Ubicación Quebrada Honda .....	59
<b>Figura 3</b> Accesibilidad Quebrada Honda .....	59
<b>Figura 4</b> Composición del suelo en función a sus partículas.....	76
<b>Figura 5</b> Contenido de Humedad.....	76
<b>Figura 6</b> Composición del suelo en función a sus partículas.....	77
<b>Figura 7</b> Contenido de Humedad Trincheras.....	78
<b>Figura 8</b> Ensayos de Densidad In Situ.....	79
<b>Figura 9</b> Ensayos de Infiltración de Agua .....	81
<b>Figura 10</b> Diagrama de disposición de Relave Filtrado .....	82



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Variación de la Pendiente Límite con la Concentración De Sólidos en una Pulpa de Relaves.....	30
<b>Tabla 2</b> Operaciones Mineras en el mundo que filtran sus relaves.....	35
<b>Tabla 3</b> Ubicación Política.....	58
<b>Tabla 4</b> Columna Estratigráfica .....	61
<b>Tabla 5</b> Fallas regionales sísmicamente significativas.....	73
<b>Tabla 6</b> Ubicación de Calicatas - Deposito de Relave Filtrado Quebrada Honda ....	74
<b>Tabla 7</b> Ubicación de Trincheras - Deposito de Relave Filtrado Quebrada Honda..	74
<b>Tabla 8</b> Resultados de Ensayos de Caracterización Físico Mecánicas de Calicatas - LMS Quebrada Honda .....	75
<b>Tabla 9</b> Resultados de Ensayos de Caracterización Físico Mecánicas de Trincheras - LMS Quebrada Honda .....	77
<b>Tabla 10</b> Resultados de Densidad In Situ (Reemplazo de Agua) .....	79
<b>Tabla 11</b> Resultados de Ensayo de Infiltración.....	80
<b>Tabla 12</b> Equipos para disposición propuesto.....	82



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1</b> Plano de Ubicación del Depósito de Relaves Filtrados.....	88
<b>ANEXO 2</b> Plano de Investigaciones Geotécnicas del Depósito de Relaves Filtrados	89
<b>ANEXO 3</b> Registro Estratigráfico de Calicatas y Trincheras .....	90
<b>ANEXO 4</b> Ensayos de Densidad In Situ e Infiltración .....	91
<b>ANEXO 5</b> Ensayos de Laboratorio .....	92
<b>ANEXO 6</b> Panel Fotográfico.....	93



## ACRÓNIMOS

SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos American Association of State Highway and Transportation
AASHTO	: Official
SP	: Arenas bien gradadas, arena con gravas, con poco o nada de finos
SM	: Arenas limosas, mezcla de arena y limo
KTPD	: Miles de toneladas por día
GW	: Grava bien graduada con arena
Ts-moi	: Moquegua inferior
Ts-mos	: Moquegua superior
Qp-al	: Depósitos aluviales antiguos
Qr-al	: Depósitos aluviales recientes
ASTM	: American Society for Testing and Materials NTP
OCH	: Optimo Contenido de Humedad
MDS	: Máxima Densidad Seca
IP	: Índice plástico
LL	: Limite líquido
LP	: Limite plástico
NF	: Nivel freático
NP	: No plástico
MTC	: Ministerio de transportes y comunicaciones
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SO	: Suroeste



## RESUMEN

El presente proyecto de investigación “Estudio Geotécnico para el Proceso Constructivo del Depósito de Relave Filtrado - Quebrada Honda - Tacna” se ubica en el depósito de Relaves Quebrada Honda el cual se encuentra en la zona sur del Perú, a 30 km en línea recta de la mina Toquepala, en el departamento de Tacna, en el km 24 de la carretera que une Camiara con Toquepala a una cota promedio de 1200 m.s.n.m. El objetivo principal fue evaluar las propiedades geotécnicas del suelo del terreno de fundación del depósito de relave para garantizar la seguridad y sostenibilidad del depósito, debido a la ocurrencia de eventos no deseados relacionados a la ingeniería geotécnica y a la exigencia de las normas técnicas nacionales e internacionales de suelos. El proyecto se basó en el método descriptivo y analítico por lo cual se realizó quince exploraciones a cielo abierto de donde se obtuvo muestras a partir de los estratos encontrados, los cuales fueron evaluados y clasificados, el primer estrato como gravas bien graduadas (GW) y el segundo estrato como arenas mal graduadas y arenas limosas (SP-SM) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), con un nivel freático mayor a 3.50 m; Adicionalmente se realizó dos ensayo de Remplazo de Agua y dos ensayos de Infiltración de Agua, donde se determinó que el terreno de fundación tiene una densidad seca de 2.60 g/cm<sup>3</sup> y una velocidad de infiltración de agua de 15mm/h promedio. Concluyendo a partir los datos obtenidos de las pruebas físicas y mecánicas que el terreno de fundación es óptimo para el proceso constructivo del depósito de relave filtrado.

**Palabras Clave:** Estudio Geotécnico, Infiltración, Relave Filtrado.



## ABSTRACT

The present research project "Geotechnical Study for the Construction Process of the Filtered Tailings Deposit - Quebrada Honda - Tacna" is located in the Quebrada Honda tailings deposit which is located in the southern part of Peru, 30 km in a straight line from the Toquepala mine, in the department of Tacna, at km 24 of the highway that connects Camiara with Toquepala at an average elevation of 1200 m a.s.l. The main objective was to evaluate the geotechnical properties of the soil of the foundation ground of the tailings deposit to guarantee the safety and sustainability of the deposit, due to the occurrence of unwanted events related to geotechnical engineering and the requirements of national and international technical standards for soils. The project was based on the descriptive and analytical method, for which fifteen open-air explorations were carried out, from which samples were obtained from the strata found, which were evaluated and classified, the first stratum as well-graded gravel (GW) and the second stratum as poorly graded sands and silty sands (SP-SM) according to the Unified Soil Classification System (SUCS), with a water table greater than 3.50 m; Additionally, two Water Replacement tests and two Water Infiltration tests were carried out, where it was determined that the foundation soil has a dry density of 2.60 g/cm<sup>3</sup> and a water infiltration rate of 15 mm/h on average. Concluding from the data obtained from the physical and mechanical tests that the foundation soil is optimal for the construction process of the filtered tailings deposit.

**Keywords:** Geotechnical Study, Infiltration, Filtered Tailings.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desafíos para la Ingeniería Geotécnica, es evitar la ocurrencia de fallas en estructuras; cuyo reto es diseñar estos depósitos con la capacidad de soportar condiciones límite. La minería hoy en día apunta al diseño, construcción y operación de depósitos de relaves con menor contenido de agua, así mismo la máxima recuperación de este recurso. El manejo de relaves es una operación clave en la recuperación de agua y para evitar filtraciones hacia el suelo y napas subterráneas, ya que su almacenamiento es la única opción, más si esta permite asegurar su disposición final y reutilizar el agua de las operaciones al ser recirculada, otorgará un beneficio adicional que protege el medio ambiente y minimiza los impactos en la zona. Lo que busco este trabajo de investigación fue garantizar la calidad del terreno para la depositación de los relaves filtrados, en base a los distintos comportamientos del terreno y el relave filtrado enmarcados a las normas técnicas, para que no presente fallas posteriores.

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es importante considerar los estudios Geotécnicos para realizar obras de ingeniería, que son aplicados durante la etapa del proceso constructivo.

En la ocurrencia de muchos problemas en ingeniería geotécnica y con el pasar de los años se ha ido observando las distintas fallas ocasionadas por procesos naturales o ya sean debido a un inadecuado proceso constructivo.

El presente proyecto de investigación permitió garantizar el comportamiento del terreno mediante la aplicación de ensayos de mecánica de suelos.





### **1.1.1 Problema General.**

- ¿Cuáles serán las condiciones geotécnicas óptimas para el proceso constructivo del depósito de relave filtrado?

### **1.1.2 Problemas Específicos.**

- ¿Qué características geotécnicas tiene el terreno de fundación para el proceso constructivo del depósito de relave filtrado?
- ¿Las características geomecánicas del terreno de fundación serán óptimas para el proceso constructivo del depósito de relave filtrado?

## **1.2 HIPÓTESIS DEL TRABAJO**

### **1.2.1 Hipótesis.**

- El Estudio Geotécnico influye en el Proceso Constructivo del Depósito de Relave Filtrado - Quebrada Honda – Tacna.

### **1.2.2 Hipótesis Específicas.**

- Se concluirá satisfactoriamente con el proceso de caracterización geotécnica del terreno de fundación.
- Las características geotécnicas del del terreno de fundación son óptimas para el depósito del Relave Filtrado.



## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General.**

- Evaluar las condiciones geotécnicas del terreno de fundación para el proceso constructivo del depósito de relave filtrado

### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Determinar las características físicas y mecánicas del terreno de fundación para el proceso constructivo del depósito de relave filtrado.
- Determinar si las características físicas y mecánicas del terreno de fundación son óptimas para el proceso constructivo del depósito de relave filtrado.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Este estudio se centró en la evaluación de las características geotécnicas del terreno de fundación ya que es importante dar a conocer las propiedades físico-mecánicas de los diferentes tipos de materiales existentes in situ, para evaluar las condiciones que se encuentra los diferentes tipos de suelos. Se analizaron las muestras obtenidas en laboratorio y fueron descritas según sus características y propiedades físicas.

Dada la importancia que tiene la caracterización del lugar, es fundamental para la ingeniería contar con un conocimiento detallado y estudios relacionados con el diseño de puentes. Estos conocimientos fueron esenciales para determinar si el terreno de fundación es óptimo para el depósito de relave filtrado, y posteriormente realizar un el diseño adecuado para su proceso constructivo.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

ANA (2015) Según la Autoridad Nacional del Agua en el Perú, existen 743 presas registradas en el inventario de presas del país. En este mismo estudio, se concluyó que en su mayoría son presas destinadas al riego (442) y, seguidas a estas, las presas de relave (113). Una presa de relave es una estructura, usualmente construida a base de tierra, destinada al almacenamiento de los residuos materiales (i.e. relaves) producto de la operación minera (CDA, 2014).

(MEM) El Ministerio de Energía y Minas establece que: “En el diseño de un depósito de relaves, debe emplearse un evento sísmico con período de retorno de 475 años y avenida máxima probable con período de retorno de 500 años. Para condiciones de operación se solicita un periodo de retorno de 150 años”.

Calderon & Umiña, (2015) Menciona: Que el almacenamiento del relave minero posee gran área en espacio de superficie induciendo a un elevado costo económico, ambiental y ecológico.

Calderon & Umiña, (2015) Menciona: Que, en otro sentido, los volúmenes excesivos de materiales en son usados en la construcción y es escaso los materiales de construcción en el interior de país. Si se reciclaran los relaves mineros y utilizasen como parte o material de construcción, cabe lo posibilidad de prescindir de áreas de superficie que es necesarios para su depositacion, por consiguiente; es posible reducir el costo económico de mantener el pasivo minero y también riesgos ambientales.



Lara, (2013) Menciona: La humedad de compactación de los relaves filtrados es determinada por sus características geotécnicas y mineralógicas.

Lara, (2013) Menciona: La compactación de relaves filtrados a la humedad del área seca de la curva de compactación permite la traficabilidad sobre los relaves depositados.

## **2.2 MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1 Estudio Geotécnico.**

Estas actividades engloban la inspección in situ, la exploración del subsuelo, los análisis pertinentes y las recomendaciones ingenieriles requeridas para diseñar y construir las estructuras que entran en contacto con el suelo. Esto abarca edificios, puentes, torres, silos y otras instalaciones, con el objetivo de asegurar que estas estructuras (tanto la superestructura como la subestructura) funcionen de manera adecuada, garantizando la seguridad humana y previniendo cualquier daño a estructuras cercana (Aulestia, 2014).

### **2.2.2 Geotecnia.**

Es una rama de la geología encargada o destinado a velar por la aplicar principios geológicos en las investigaciones de material natural que componen la corteza terrestre, como las rocas, construcciones, diseño y funcionamiento de proyectos de área ingenieras con especialidad de construcción y diseño de puentes, carreteras, presas, ferrocarriles, acueductos, oleoductos y tuberías de guas, viviendas, centros de detención y estructuras diversas (SGM, s.f).

Pérez y Gardey, (2018) menciona que “la geotecnia, o geotécnica, es aplicar principios de la ingeniería a construcciones de obras públicas basándose



en las propiedades de los materiales presentes en la corteza planetaria, por lo tanto, muchos determinan como una rama de ingeniería civil o geológica, que consiste en el estudio de materias que conforman la corteza terrestre para diseñar y ejecutar adecuadamente los proyectos de ingeniería civil”.

Por tanto, es considerado como una rama que investiga y desarrolla métodos para el desarrollo de estructuras en relación con el suelo. La geología, la mecánica de rocas y del suelo, la hidrogeología, la ciencia de los materiales y la ingeniería estructural son subdisciplinas de la geotecnia o ingeniería geotécnica. Se ocupa de la composición y el comportamiento de los suelos, así como de la forma en que reaccionan ante diversas condiciones que podrían provocar un derrumbe o un deslizamiento. Mediante el análisis de las formas del terreno y el lecho de roca, por tanto, aporta a los ingenieros a prevenir catástrofes naturales como los desprendimientos (GeoBiental, 2021).

“La geotecnia podría describirse como aquellas acciones y conocimientos que facilitan entender de manera racional las alternativas de solución de los factores causales que permiten modificar el medio geológico, por tanto, su objetivo es estudiar el suelo” (Gens, s.f).

La geotecnia es tratada como una rama que se encuentra vinculada con áreas de construcción cuyo objeto de estudio es comprender, indagar los componentes naturales que se localizan en la corteza terrestre utilizando principios geológicos, que son fundamentales de comprender al momento de construir puentes, presas, carreteras y edificios (Calderón, 2018).



### **2.2.3 Elementos de la Geotecnia.**

Berdugo, (1999) menciona que “el tipo de suelo, condiciones del agua subterránea, momento del inicio e historia de esfuerzo y extensiones de la excavación son algunos de los elementos de la geotecnia” (pág.56).

Morilla, (2014) Menciona que “el suelo se utiliza como en su mayoría de casos para la cimentación, asimismo se considera como parte de componentes estructurales, como un elemento de paisajes circundantes, materiales de construcción, que puedo conllevarse a la alteración en las construcciones” (pág.78).

### **2.2.4 Análisis Geotécnicos.**

Es importante considera la identificación adecuada de las propiedades del terreno de rocas donde se construirá la obra es por eso que este examen en profundidad del suelo es necesario para comprender los comportamientos asociados con las alteraciones que se producirán en si situación de tensión. En consecuencia, el análisis geotécnico es un instrumento importante para recoger todos los propiedades geotécnicos y geológicos de áreas de trabajo, así como para definir las sugerencias de diseño de las estructuras a construir y los taludes a excavar (Geoquantics, 2018).

Según Castro, (2021) El análisis geotécnico es considerado un proceso de estudio de los componentes del área geográfica investigada. Esto implica una investigación geotécnica del suelo, que requiere dividir homogéneamente el área de estudio según su potencial de licuefacción y tener en cuenta el perfil estratigráfico, la resistencia de penetración y la vulnerabilidad sísmica del terreno.



### **2.2.5 Estudio de Suelos.**

“El estudio del suelo permite a los investigadores identificar y comprender las características químicas, físicas y mecánicas del terreno, así como sus componentes estratigráficos, es decir los estratos de diversas calidades que conforman la profundidad, la localización de masas de aguas, etc.” (Pacheco, 2016)

### **2.2.6 Mecánica de Suelos.**

Villanueva, (2021) menciona que en las construcciones de carreteras la mecánica de suelos permite identificar las características del suelo como son químicas, físicas y mecánicas, asimismo busca investigar la viabilidad técnica de la alineación vertical como horizontal, agrupar materiales de corteza, determinar la localización de grado freático y ubicar los materiales de canteras. Por lo tanto, la mecánica del suelo es fundamental en la construcción de carreteras, tanto para determinar las cualidades del terreno para diseñar estructuras de pavimentación, lo que conduce a ejecución adecuada de la construcción de la carretera.

La mecánica del suelo es “una rama de la ingeniería que se ocupa de estudiar las fuerzas y tensiones aplicadas a la superficie terrestre. La aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a las dificultades de construcciones implican consolidar elementos como sedimentos, particular subatómicas que se conocer como mecánica del suelo” (Arqhys Arquitectura, 2012).

### **2.2.7 Sistemas de Clasificación de Suelo.**

Platero, (2017) menciona que “actualmente, los ingenieros civiles y geotécnicos emplean dos esquemas de clasificación, que utilizan la distribución



por tamaño de grano y la plasticidad de los suelos, los cuales son AASHTO y SUCS”

### **2.2.8 Terreno de Fundación**

Se denomina suelo de fundación a la capa del suelo bajo la estructura del pavimento o construcción, preparada y compactada como fundación para él pavimento. Se trata del terreno natural o la última capa del relleno de la plataforma sobre la que se asienta el pavimento o se realiza la construcción.

## **2.3 MARCO CONCEPTUAL**

### **2.3.1 Depósito De Relaves.**

Uno de los temas importantes asociados a las empresas mineras corresponde, a todo aquello relacionado con las obras constructivas de disposición final en la superficie de la tierra de los “Depósitos de Relaves”; cuyos residuos que contienen provienen de Plantas de Concentración de minerales por Flotación. Esto se debe a que en la Industria Minera estos depósitos han ido adquiriendo mayor relevancia, debido principalmente a que las leyes de los minerales en los yacimientos en explotación han disminuido, lo que ha obligado a las empresas mineras, extraer grandes volúmenes de minerales para lograr mantener los niveles de producción de finos, y se han incrementado así, la cantidad de desechos que deben ser dispuestos ya sea como material estéril o en la forma de pulpas de relaves. Por lo tanto, se hace necesario tener muy presente los riesgos asociados a los pequeños, medianos y grandes depósitos de relaves, en cuanto a los ámbitos técnicos constructivos como los ambientales.





Hasta hace algunas décadas atrás era común en varios países de tradición minera, deshacerse de los relaves derivados de las operaciones minero metalúrgicas, arrojándolos en lechos de ríos, lagunas, quebradas, valles o al mar próximo y cuando en las cercanías de alguna faenas mineras no se disponía de estos sectores naturales tan "convenientes", los empresarios mineros solían acumular los relaves en áreas de contención, que amurallaban con terraplenes levantados con los mismos relaves y una vez que se agotaba el yacimiento, estos depósitos quedaban abandonados. Afortunadamente actualmente, debido a la regulación legal minera y ambiental; se hace más complejo el proceso de deposición de los desechos mineros con sólo hacerlos desaparecer de la vista y gran parte de las reglamentaciones que se imponen al respecto, se refieren en forma específica a la industria minera, además las comunidades también hacen oír hoy su voz con fuerza y claridad sobre los problemas de protección de las personas y el medio ambiente. La normativa vigente que regula todo lo relacionado con los "Depósitos de Residuos Masivos Mineros", en lo técnico y ambiental exige que se cumplan diversos requerimientos de seguridad, destinados a la protección de las personas y el medio ambiente, por ello todos los esfuerzos que se hagan para establecer criterios a tener en cuenta sobre el control de los riesgos son muy importantes.

Toda planta minera cuyo proceso de concentración es Flotación, produce residuos sólidos que se denominan relaves y que corresponden a una "Suspensión fina de sólidos en líquido", constituidos fundamentalmente por el mismo material presente insitu en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso, conformando una pulpa, que se genera y desecha en las plantas de concentración húmeda de especies minerales y estériles que han experimentado



una o varias etapas en circuito de molienda fina; esta "pulpa o lodo de relaves" fluctúa en la práctica con una razón aproximada de agua/sólidos que van del orden de 1:1 a 2:1. Las características y el comportamiento de esta pulpa dependerá de la razón agua/sólidos y también de las características de las partículas sólidas. Esto puede ilustrarse si se consideran los siguientes ejemplos:

- Una masa de relaves con un gran contenido de agua escurrirá fácilmente, incluso con pendientes pequeñas.
- Una masa de relaves con un contenido de agua suficientemente bajo (por ejemplo, relaves filtrados) no escurrirá gravitacionalmente.
- Si las partículas sólidas son de muy pequeño tamaño (equivalentes a arcillas), se demorarán un gran tiempo en sedimentar, manteniéndose en suspensión y alcanzando grandes distancias respecto al punto de descarga antes de sedimentar.
- Si las partículas sólidas son de gran tamaño (equivalentes a arenas) sedimentarán rápidamente y se acumularán a corta distancia del punto de descarga.

Las alternativas a utilizar en la depositación de un material de relaves, dependerá de las características de los relaves que produce la planta (cantidad suficiente de material tamaño arena), del costo del agua (si es escasa, se justifican inversiones en equipos para optimizar su recuperación) y, de las características del lugar de emplazamiento del depósito de relaves. Para conseguir estructuras estables con los relaves, deben determinarse sus características, similares a lo que se hace con los suelos (granulometría, densidad relativa, razón de vacíos,



relaciones de fase, etc.). Estas determinaciones permiten también evaluar el cumplimiento de las disposiciones legales contenidas en el D.S. N°248 (2006) “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relaves”, del Ministerio de Minería.

### **2.3.2 Opciones de Descarga de Relaves.**

#### **A. Descarga del Relave Completo.**

Se requiere disponer de un volumen suficientemente grande para permitir almacenar todos los relaves que se producirán durante la vida útil de la planta. Pueden utilizarse cavidades "pre- existentes" como: rajos mineros abandonados, depresiones naturales en superficie, cavernas naturales, antiguas minas subterráneas abandonadas, etc. En cualquiera de estos casos, si bien en el pasado se pudieron darse la posibilidad de ser considerados, hoy debido a la legislación ambiental vigente resulta difícil de ser aceptados por su alta connotación ambiental y deberían realizarse estudios muy completos y detallados para demostrar que no se afectará el medio ambiente. Por ello, para la descarga de relaves completos, resulta técnica y ambientalmente más aceptable construir un muro perimetral con talud interno impermeabilizado hecho con material grueso de empréstito y generar así una cubeta de depositación. Este tipo de depósito de relaves se denomina “Embalses de Relaves” y han sido aceptados como alternativa de depositación de relaves en nuestro país.

#### **B. Construcción del Muro Resistente con Parte del Relave.**

Esta opción corresponde a tratar los relaves provenientes de la planta, de manera de separar la fracción gruesa (arenas de relaves) de la fracción fina (lamas), para poder utilizar la primera como material para la construcción del

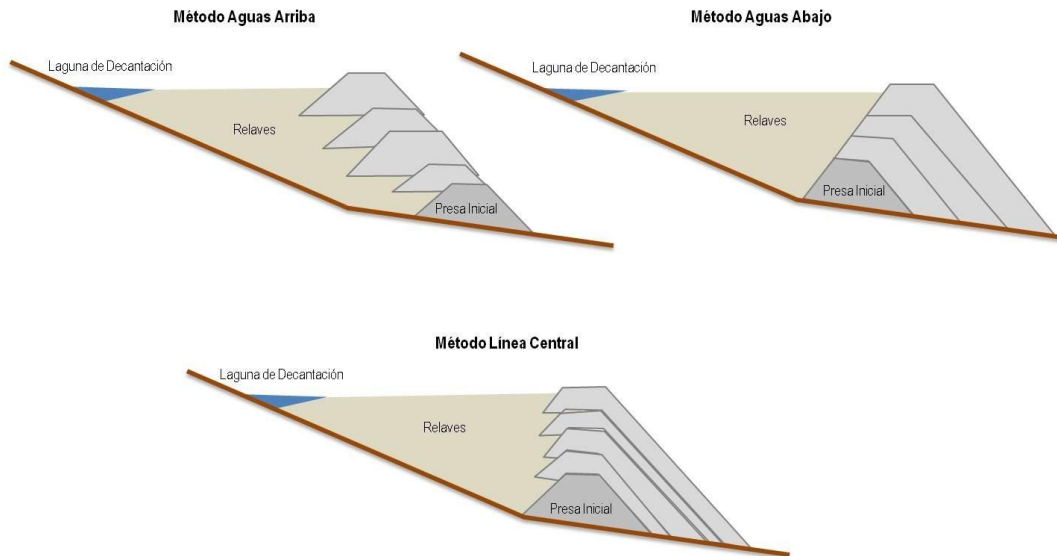


muro perimetral y descargar la segunda a la cubeta de embalse. Al construir el muro utilizando las arenas de los relaves, es posible hacerlo de 3 formas o métodos de crecimiento distintas:

- **Método Aguas Arriba:** Es el método más común de construcción de presas de relaves por su bajo costo, supone una construcción por etapas que se desplaza sobre el material depositado (relaves), de modo que este es incorporado a la estructura de la presa. Desventajas: baja resistencia sísmica, alta permeabilidad y baja estabilidad. Ventajas: bajo costo.
- **Método Aguas Abajo:** Consiste en la construcción por etapas aguas abajo de la presa en la que se adiciona material de baja permeabilidad, en el se puede incluir drenajes para mantener bajo control el nivel piezométrico y geomembranas. Desventajas: costo elevado. Ventajas: baja permeabilidad, alta resistencia sísmica, estabilidad.
- **Método Línea Central:** Es un método intermedio entre los anteriores. Sus ventajas y desventajas también están en términos medios entre los métodos de construcción aguas abajo y aguas arriba.

**Figura 1**

*Métodos de Construcción de Presas de Relaves*



*Nota.* Esta figura muestra los distintos métodos de construcción de Presas de Relave según Alejandro Padrino.

**C. Material de Relaves Equivalente a un Suelo Húmedo.**

Esta opción requiere tratar los relaves provenientes de la planta, de manera de extraerle la mayor cantidad de agua, obteniendo así un material equivalente a un suelo húmedo el cual puede ser depositado sin necesidad de un muro perimetral para su contención. Para este propósito existen distintos métodos: “Espesar los Relaves”, “Filtrar los Relaves” y la alternativa más reciente es la de crear lo que se denomina “Pasta de Relaves”.

**2.3.3 Efectos de La Razón Sólido/Agua (S:A).**

Una pulpa de relaves con suficiente agua se comportará como una suspensión acuosa, cuya viscosidad aumenta si disminuye el agua, hasta que, para

contenidos de agua suficientemente bajos se comportará como un lodo espeso y eventualmente, como un suelo húmedo.

Experimentalmente podemos señalar que:

- Si la razón S:A es menor que 50%, la pulpa de relaves se comporta como suspensión acuosa, y escurrirá incluso con pendiente menores al 2% y se produce segregación de las partículas con la distancia al punto de descarga.
- Si la razón S:A es mayor o igual que 55% la pulpa de relaves comienza a tener comportamiento de un lodo viscoso; disminuye fuertemente la segregación de partículas y se necesitará pendientes mayores al 2% para escurrir.

La siguiente tabla nos indica el pendiente límite que admite una pulpa de relaves para distintas concentraciones de sólidos en peso (pendientes mayores producirán su escurrimiento)

**Tabla 1**

*Variación de la Pendiente Límite con la Concentración De Sólidos en una Pulpa de Relaves.*

<b>VARIACIÓN DE LA PENDIENTE LÍMITE CON LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN UNA PULPA DE RELAVES</b>	
<b>Pendiente Límite %</b>	<b>Porcentaje de Sólidos en Peso %</b>
<2	<50
2-3	55-66
3-5	60-63
4-6	63-65
>6	>65

*Nota.* Esta tabla muestra la relación entre el porcentaje de pendiente limite y solido de peso.



#### 2.3.4 Permeabilidad de los Suelos.

Se dice que un material es permeable cuando tiene huecos continuos e interconectados de modo tal que el agua pueda escurrir por ellos. Al movimiento del agua a través del material se le denomina “Infiltración o filtración” y a su medida “Permeabilidad”.

La circulación del agua a través del suelo se debe a la diferencia de presión hidrostática entre dos puntos.

En forma muy resumida podemos decir que se cumple la relación

$$v = k \cdot i$$

Donde

$v$  = es la velocidad de descarga

$i$  = es el gradiente hidráulico

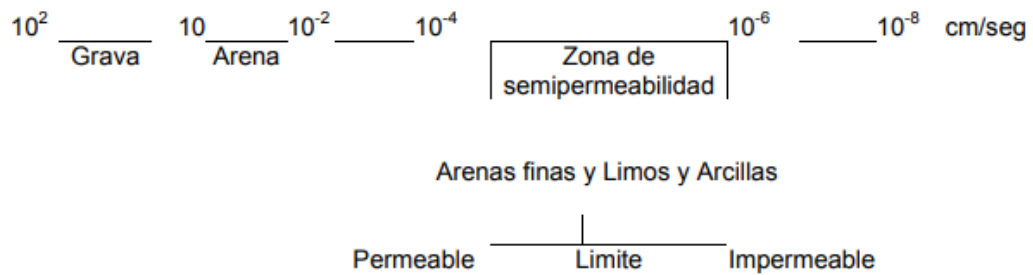
$k$  = es el coeficiente de permeabilidad.

Las unidades en que “ $k$ ” se expresa, comúnmente son cm/seg.

Determinando el coeficiente de permeabilidad se puede determinar el volumen de las filtraciones, el que depende del tamaño y granulometría de las partículas gruesas, de la cantidad de finos y de la densidad de la muestra.

El coeficiente de permeabilidad varía en un amplio margen para los distintos suelos naturales, desde 10<sup>2</sup> cm/seg. (permeable) hasta 10<sup>-9</sup> cm/seg (impermeable).

Los especialistas clasifican los suelos con respecto a la permeabilidad de la siguiente manera:



### 2.3.5 Densidad Relativa.

El grado de compactación que se requiere para una arena de relave, con el fin de minimizar el riesgo de licuefacción, es expresado en términos de la llamada densidad relativa  $D_r$ , la que se define según la siguiente expresión:

$$D_r = \frac{(e_{\text{máx}} - e)}{(e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}})} \times 100\%$$

Donde:

$D_r$  = densidad relativa

$e_{\text{máx}}$  = relación de vacíos de la arena en la condición más suelta.

$e_{\text{mín}}$  = relación de vacíos de la arena en la condición más densa.

Otra forma de calcular la densidad relativa es mediante la expresión:

$$D_r = \frac{\rho_{\text{máx}} (\rho_{\text{in situ}} - \rho_{\text{mín}})}{\rho_{\text{in situ}} (\rho_{\text{máx}} - \rho_{\text{mín}})} \times 100\%$$

Siendo:

$\rho_{\text{máx}}$  = densidad máxima de las arenas

$\rho_{\text{mín}}$  = densidad mínima de las arenas

$\rho_{\text{in situ}}$  = densidad en el lugar de las arenas





Todos los parámetros indicados en las expresiones anteriores se deben determinar a nivel de laboratorio mediante ensayos normalizados.

Además, cuando las arenas poseen entre el 10% y de 20% de finos (-200 malla Tyler) las medidas de densidad relativa pueden dejar de ser representativas y es más conveniente la utilización de densidades expresadas como porcentaje de la densidad máxima alcanzada en ensayos de compactación Proctor (estándar y modificado)

### **2.3.6 Relaves Filtrados.**

El filtrado es un proceso de separación sólido-líquido, que permite una mayor recuperación de agua que la depositación convencional y el espesamiento de relaves; del orden de dos veces. El proceso de separación se realiza, ya sea por medio de presión o mediante el vacío, lo que determina el tipo de filtro a utilizar. Para la elección de la tecnología a aplicar (presión o vacío) es necesario conocer, entre otros factores: las propiedades de la pulpa, las características del sólido, el tonelaje a tratar, etc.

En la industria minera, históricamente para el filtrado de concentrados se han utilizado tanto filtros de bandas como de prensa, considerando que los tonelajes a filtrar son pequeños. Para filtrado de relaves, hasta unas décadas atrás los filtros de vacío eran más utilizados, principalmente debido a que sus capacidades eran mayores a los filtros de prensa y cubrían las necesidades de la industria minera, pero sólo hasta capacidades bajas de producción de relaves. En el mundo, las instalaciones más grandes de filtrado de relaves en operación son del orden de 35 ktpd. Los filtros de banda permiten operaciones máximas por unidad del orden de 4 a 5 ktpd de relaves, dependiendo de las características de



estos. Esto implica una gran cantidad de filtros en el caso de proyectos de gran capacidad, y por lo tanto, la necesidad de grandes superficies, y un número importante de operadores y mantenedores, con los costos asociados. Por otra parte, los filtros de banda presentan limitaciones importantes para altas producciones son el máximo gradiente de presión disponible para el proceso, debido a la ubicación geográfica de las instalaciones, y el alto consumo de energía requerida. En las últimas décadas los filtros de prensa han tenido importantes avances tecnológicos, con relevantes aumentos de capacidad, de hasta 13 ktpd, dependiendo de las características de los relaves. Esto los ha transformado en una tecnología de gran interés en la actualidad. Es así como se están desarrollando proyectos de gran magnitud de filtrado de relaves en el mundo, y todos ellos consideran filtros de prensa. Otras características de los filtros de prensa que lo hacen atractivo con respecto a los filtros de banda para grandes producciones de relaves, con el desarrollo tecnológico actual, es el menor consumo de energía, y el área requerida para sus instalaciones es mucho menor. Además, el filtrado de los finos del relave es eficiente, por lo que no requiere obligatoriamente la separación previa mediante ciclones, y se puede filtrar relave integral con buenos rendimientos. Sin embargo, existen dudas sobre la disponibilidad y mantenibilidad de los filtros de prensa de gran capacidad, por su alta complejidad técnica.

**Tabla 2**

*Operaciones Mineras en el mundo que filtran sus relaves.*

Mina	Ubicación	Año Inicio Operación	Mineral	Relave (tpd)	Tecnología	Referencia
<b>Operaciones</b>						
Alcoa	Australia	s/i	Aluminio	35.500	s/i	Presentación Paste 2013 Considerations for tailings facility desgn and operation using filtered tailing. B. Ulrich J.Coffin Kninght Pésold Consulting
Chingola	Zmabia	s/i	Cobre	24.000	Banda	
La Coipa	Chile	1998	Oro y plata	16.000	Banda	
Vaal Reef	Sudáfrica	s/i	Oro y uranio	10.000	s/i	
Randfontein estates	Sudáfrica	s/i	Oro y uranio	10	s/i	
Lihir Island	Papua Nueva Guinea	s/i	Oro	7.500 (est)	s/i	
El Sauzal	Chihuahua, Mexico	s/i	Plata y oro	5.300	Banda	
Gecamines	Zaire	s/i	Cobre	5.000	s/i	
Nabalco	Australia	s/i	Alumnia	5.000	s/i	
Mantos Blancos	Chile	s/i	Cobre	4.000	Banda	
Alamo Dorado	Sonora, Mexico	s/i	Plata y oro	3.500	Banda	
Pogo	Alaska, EEUU	s/i	Oro	2.500	Prensa	
Raglan	Quebec, Canadá	s/i	Plomo/zinc	2.000	Prensa	
Greens Creek	Alaska, EEUU	s/i	Oro, plata y zinc	1.500	Prensa	
Eskay creek	BC, Canada	s/i	Cobre	300	s/i	
Nixon Fork	Alaska, EEUU	s/i	Oro	150	Tambor	
El Peñon	Chile	s/i	Oro y plata	2.600	Banda	Presentación paste2013, Geotechnical-geochemical and operational considerations for the application of dry stacking tailings deposits - state-of-art.Golder Perú
La Florida	Chile	s/i	Oro	2.700	Banda	Yamana
Karara	Australia	2011	Hierro	22.000	Prensa	Outotec
Pino Altos	Mexico	2009	Oro	4.000	Prensa	
El Dorado	Turquia	2010	Oro	1.440	Prensa	
Mach Mining	EEUU	2009	Carbón	8.400	Prensa	FLSmidth
Mt Thorley	Australia	s/i	Carbón	s/i	Banda	ATC Williams
South Bulli	Australia	s/i	Carbón	s/i	Banda	
Bengalla	Australia	s/i	Carbón	s/i	Prensa	
San Rafael	Guatemala	s/i	Zinc y Plomo	3.500	Prensa	Bilfinger Diemme
La Encantada	Mexico	s/i	Oro y plata	5.000	Prensa	
Real del Monte	Mexico	s/i	Oro y plata	2.500	Prensa	
El Toro	Mexico	2012	Oro y plata	4.000	Prensa	
Guanacevi	Mexico	s/i	Plata	1.000	Prensa	
Media Luna	Mexico	2013	Oro y plata	14.000	Prensa	
Bariq Mining	Arabia Saudita	2010	Cobre	4.707	Prensa	
<b>En Montaje</b>						
Cripple Creek	EEUU		Oro	5.320	Prensa	FLSmidth
Eleanore	Canadá		Oro	6.720	Prensa	
<b>Proyectos</b>						
Rosemont	EEUU		Cobre	75.000	Prensa	Technical Report Updated feasibility Study, Augusta
El Morro	Chile		Oro y cobre	112.000	Prensa	
Metales	Mexico		Oro y cobre	120.000	Prensa	Technical Report Preliminary feasibility Study, ChesaPeake Gold Corp.

*Nota.* Esta tabla muestra las diferentes tecnologías que usan las mineras a nivel mundial para filtrar sus relaves según el resumen de Marcelo Capone.

Más de la mitad de las operaciones que cuentan con filtrado de relaves corresponden a proceso de minerales de oro y plata, esto se debe a que se trata de relaves muy tóxicos producto del proceso de cianuración al que son sometidos y resulta muy peligroso descargar los relaves con altos contenidos de agua al medio ambiente.



El mayor tonelaje de proceso observado en una operación existente corresponde Alcoa en Australia con 35 ktpd.

En general las operaciones de filtrado existentes en el mundo no superan los 10 ktpd de producción.

Se observa que ya existen proyectos que aspiran a tener operaciones de filtrado de relaves con tonelajes grandes sobre 75 ktpd, esto indica que la tecnología se está empezando a desarrollar a gran escala.

### **2.3.7 Tipos de Relave Filtrado**

#### **A. Filtrado de banda.**

Los filtros de banda de vacío cuentan con una banda filtrante continúa soportada por dos cilindros en sus extremos, que se desplaza a velocidad variable donde se deposita el material a filtrar, bajo la banda se dispone con un sistema de bomba de vacío que extrae el agua del material dejando un queque filtrado que se descarga al final de la banda hacia una correa recolectora. En los filtros de vacío la separación sólido-líquido tiene lugar gracias a la aspiración que imprime una bomba de vacío bajo la superficie donde reposa el producto.

Los principales beneficios de esta tecnología:

- Filtros totalmente continuos con la ausencia de tiempos muertos en su operación.
- Velocidad de movimiento de la banda ajustable según necesidades.  
Alimentación del filtro muy simple.
- Deposición uniforme del producto sobre una superficie plana.



- Tela filtrante debe estar siempre limpia y en perfectas condiciones, es seleccionada para cada proyecto y producto.
- Filtro ideal para la realización de lavados continuos y a contracorriente de la torta reduciendo el consumo de agua.
- Funcionamiento mecánico, simple y permitiendo un fácil mantenimiento y limpieza correspondiente.
- Buena disponibilidad (90%)
- Baja altura de equipo (reduce altura necesaria de edificio)

#### **B. Filtrado de prensa.**

Un filtro de prensa se compone de una serie de placas verticales, yuxtapuestas y acopladas. Las placas prensadas entre ellas cuentan con un sistema hidráulico neumático que permite su apertura o cierre. Entre las placas existen membranas filtrantes por ambos lados de la placa. El llenado de las cámaras se realiza mediante una bomba de relaves, a través de orificios se alimenta el sistema para ser prensado en cada cámara de filtración, los que están generalmente colocados en el centro de estas placas permitiendo una distribución adecuada del flujo, presión adecuada y mejor drenaje del relave dentro de la cámara. Lodos sólidos se acumulan gradualmente en la cámara de filtración hasta que se genera una pasta compacta final. El agua filtrada se colecta en la parte de atrás del soporte de filtración mediante ductos internos. El sistema generalmente cuenta con un sistema de inyección de aire a presión que permite soplar el material y obtener humedades menores. Finalmente, el queque filtrado en cada placa que se descarga



abriendo las placas mediante un sistema hidráulico, dejando caer el material filtrado sobre una correa recolectora.

El filtrado de prensa es un proceso discontinuo que opera en cíclicos los que se pueden resumir en

- Cerrado: cuando el filtro está limpio y vacío.
- Llenado: con las cámaras cerradas se llena de relaves para su filtración.
- Filtración: aumento de presión en las cámaras una vez que se encuentran llenas.
- Apertura: se separan las placas permitiendo que el relave filtrado se descargue.
- Limpieza: se limpian las cámaras con sistemas de agua presurizada.
- Los principales beneficios de esta tecnología:
- Grandes áreas de filtración (hasta 997 m<sup>2</sup>)
- Gran de experiencia en procesos de filtrado de concentrado, pero poca en relaves.
- Bajas humedades en queque filtrado.
- Sistemas eficientes de filtrado.
- Cortos ciclos de filtración
- Bajos costos operacionales.
- Bajo consumo de energía



- Descarga de torta segura.

En las siguientes figuras se muestran ejemplos de filtros de prensa de placas verticales

### 2.3.8 Aspectos Ambientales para Considerar.

- Potencial de infiltración:** un depósito de relaves espesados tiene un potencial de infiltración mayor que uno de relaves filtrados, debido a la cantidad de agua contenida en el relave en cada caso. Parea el relave espesado, considerando 100 ktpd de producción y un  $C_p$  de 64% el agua contenida en el relave depositado es del orden de 56.000 m<sup>3</sup> diarios y en el caso del relave filtrado a una humedad de 18% es del orden de 22.000 m<sup>3</sup>. Esto implica que la posible contaminación de aguas subterráneas por infiltraciones disminuye de forma considerable con los relaves filtrados.
- Recuperación de agua:** la mayor recuperación de agua del relave filtrado se traduce en un mejor make up para la planta, lo que implica un menor consumo de agua fresca, la que puede ser utilizada en otros propósitos, como el consumo humano o la agricultura.
- Consumo de energía:** Los relaves filtrados se espera que tengan un mayor consumo de energía para su proceso, esto va a depender de la configuración que tengan los depósitos que se estén comparando, ya que para el caso de los relaves espesados el mayor consumo de energía se presenta en el bombeo del relave desde la planta de espesamiento hasta el depósito, y ante una configuración con distancias o elevaciones muy altas se podría invertir el consumo de energía. Se considera que un consumo de energía es más perjudicial ambientalmente debido a que requiere de una



mayor potencia instalada y por ende mayores obras en líneas de transmisión y en subestaciones eléctricas.

- d) **Generación de polvo:** Uno de los cuestionamientos que tiene los depósitos de relaves filtrados es la contaminación por emisión de polvo desde el depósito, esto debido al bajo contenido de humedad con que se depositan los relaves. Para poder determinar el potencial de contaminación por emisión de polvo desde un depósito de relaves filtrados se realizaron pruebas de laboratorio con un túnel de viento simulando el comportamiento de relaves filtrados frente a la acción eólica, considerando diferentes condiciones de disposición y operación. Los resultados obtenidos indican que en condiciones de disposición con el relave a densidad mínima (densidad aparente suelta), en estado seco, la resistencia a la acción del viento (12 m/s) durante más de 5 horas, es prácticamente nula, con un arrastre de material cercano superior al 90%, y en condiciones de disposición con el relave a densidad mínima (densidad aparente suelta), con humedad promedio del 18%, la resistencia a la acción del viento (12 m/s) durante 6 horas, presenta un valor medido de arrastre de material cercano al 1%, es decir, se espera que durante la operación del depósito con la humedad que se deposita el relave es suficiente para no generar polvo, sin embargo cuando el depósito se comienza a secar producto de la evaporación se produce una generación de polvo importante, por lo que se deben aplicar aditivos que permitan el control del polvo para cuando se deja de operar por periodos largos en algún sector y lo mismo para el abandono.





- e) **Cierre del depósito:** Los depósitos de relaves filtrados presentan características favorables para desarrollar el cierre de forma gradual, ya que a diferencia de los relaves espesados que depositan de forma hidráulica en capas delgadas abarcando grandes superficies, estos se depositan de forma mecánica con correas distribuidoras que permiten apilarlos utilizando la geometría óptima y a medida que se va depositando en 40 otros sectores los que ya están con la geometría final pueden iniciar sus actividades de cierre con coberturas, supresores de polvo u otros agentes que permitan controlar las emisiones.
  
- f) **Área del depósito:** Los depósitos filtrados utilizan un área menor que los otros depósitos, ya que por los contenidos de humedad bajos y las características del relave se pueden lograr pendientes de depositación mayores requiriendo se superficies menores para un mismo tonelaje depositado. En el caso de los relaves espesados estos se depositan con pendientes entre 2 y 3% lo que hace que la superficie requerida sea muy extensa si es que se busca minimizar la construcción de muros de confinamiento perimetral.
  
- g) **Geotecnia:** Los depósitos de relaves filtrados no requieren de un muro de confinamiento ya que son estables por si solos. Se depositan con ángulos muchos mayores a los de un depósito de relaves espesados, los que dependen de las características geotécnicas de cada material. La depositación se realiza mediante correas transportadoras y posterior esparcido mediante bulldozers, lo que hace que el depósito de relaves filtrados tenga un grado de compactación mayor a los otros tipos de



depósitos y alcance densidades mayores. También se podría aplicar compactación adicional con rodillos, pero esto dependerá de cada caso.

### **2.3.9 Ventajas Y Desventajas Ambientales De Los Relaves Filtrados**

#### **Ventajas:**

- No requiere de muro para su almacenamiento.
- Menor potencial de infiltración que los otros depósitos de relaves
- Mayor recuperación de agua
- Menor área requerida para el depósito
- Posibilita el cierre anticipado del depósito

#### **Desventajas:**

- Potencial mayor consumo de energía
- Mayor generación de polvo
- Operación discontinua y disponibilidad menor de los equipos de filtrado, respecto a espesadores, lo que podría generar detenciones de la planta ante fallas en los equipos.
- Equipos altamente tecnológicos, con mayores requerimientos de mantenimiento y mayor potencial de falla.



### 2.3.10 Propuesta de evaluación ambiental.

Una propuesta de evaluación ambiental para un depósito de relaves filtrados debe considerar algunos los factores indicados anteriormente con ensayos para cada uno de los aspectos que lo requieren.

Primero se debe generar una línea base con las características ambientales del lugar donde se emplazará el depósito, siendo relevantes los datos de precipitaciones y vientos.

- a) **Recuperación de agua:** Se requieren ensayos de filtrado de relaves de laboratorio en una primera etapa de prefactibilidad y a escala piloto o industrial para la etapa de factibilidad, que permitan definir cuál será el % de recuperación de agua en el proceso de filtrado y por ende el balance de agua del proyecto. Con estos valores se puede evaluar el impacto que el proyecto causara respecto del uso de fuentes de agua naturales. En el caso de un proyecto que utilice agua de mar este factor podría ser menos importante.
- b) **Potencial de infiltración:** Se requieren ensayos de filtrado de relaves al igual que en el caso anterior, con lo que se puede determinar cuál será el máximo contenido de agua que tendrán los relaves depositados. Con estos datos se pueden realizar ensayos de consolidación para determinar si el material con la humedad residual con la que se deposita puede soltar agua en función del grado de compactación al que será sometido ya sea por compactación mecánica o por peso propio a medida que el depósito toma altura. Este factor es claramente más favorable para un depósito de este tipo en comparación a relaves convencionales o espesados, ya que el



contenido de agua es muy inferior a los otros casos, lo que hace que se evalúe de forma favorable este aspecto.

- c) **Generación de polvo:** Se requieren hacer ensayos de laboratorio en túnel de viento en una primera etapa y posteriormente se recomienda ensayos de campo, que permitan definir cuál es el potencial de generación de material particulado. En caso de que la generación este por sobre los límites establecidos por la normativa se debe considerar la aplicación de algún supresor de polvo, para lo que se deben realizar ensayos también, de forma de evaluar los distintos tipos de supresor, las dosificaciones requeridas y las frecuencias de aplicación, de forma de mitigar este riesgo.
- d) **Geotecnia:** Se requieren ensayos geotécnicos tanto del material a depositar como del suelo de fundación. En este caso se aplica lo mismo que para cualquier depósito de material. Este aspecto es muy importante en la evaluación ya que de él depende la estabilidad sísmica del depósito. Con los resultados del análisis de estos aspectos se puede completar una matriz de riesgos, evaluar su criticidad y determinar si requieren de medidas de mitigación y control.

### 2.3.11 Depósito de Relaves.

Dentro de la disposición de relaves existen diferentes y variadas formas de depositación de relaves, que dependiendo de diversos factores como son las cercanías al concentrador, capacidad de almacenamiento de relaves, topografía del lugar, producción del yacimiento se deberá seleccionar la forma más apropiada para disponer estos relaves.



Atendiendo a lo indicado anteriormente, los distintos tipos de “Depósitos de Relaves” que se consideran en la actualidad en Chile indicados en el “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relaves”, son los siguientes:

- Tranques de Relaves
- Embalses de Relaves
- Depósito de Relaves Espesados
- Depósito de Relaves Filtrados
- Depósito de Relaves en Pasta

#### **2.3.12 Depósitos de Relaves Filtrados.**

Este tipo de depósitos de relaves es muy similar al de los relaves espesados, con la diferencia de que el material contiene menos agua debido al proceso de filtrado utilizando equipos similares a los que se emplean para filtrar concentrados, como son los filtros de prensa o de vacío. El relave una vez filtrado se transporta al lugar de depósito mediante cintas transportadoras o bien mediante equipos de movimiento de tierra y/o camiones. En el primer caso, se logra un domo de material similar al método de Robinsky; mientras que en el segundo caso se utiliza el equipo de movimiento de tierras para ir construyendo módulos de material compactado, los cuales permiten conformar un depósito aterrazado de gran volumen. Es importante señalar que, en este método, aunque el contenido de humedad que se logra (20% a 30%) permite su manejo con equipos de movimiento de tierra, es suficientemente alto como para tener un relleno prácticamente saturado, por lo que es posible que se produzcan infiltraciones importantes de las aguas contenidas en estos relaves si el suelo de fundación es relativamente



permeable. También es necesario señalar que la presencia de algunas arcillas, yeso, etc. en los materiales de relaves pueden reducir significativamente la eficiencia de filtrado.

### **2.3.13 Componentes Principales de un Depósito de Relaves y Algunos Otros Conceptos Importantes.**

- a) **Cubeta.** - Corresponde al volumen físico disponible donde se depositan las lamas (finos) y gran parte del agua de los relaves de tal modo que se forma en ella la laguna de aguas claras debido a la sedimentación de las partículas finas. La cubeta es la componente más importante en relación con la vida útil del depósito.
- b) **Muro o Prisma Perimetral o Prisma Resistente.** - Este muro delimita la cubeta y permite contener los residuos que en ella se descargan. Por lo tanto, el muro perimetral generalmente es la componente más importante en lo que dice relación con la estabilidad o grado de seguridad del depósito. En los tranques de relaves este muro se va construyendo con el material grueso (arenas) de los relaves a lo largo de la vida útil del depósito. Sistema de Descarga y/o
- c) **Clasificación y Selección de los Relaves.** - El sistema de descarga de residuos mineros permite depositar estos en la cubeta, por lo que una falla de este sistema se traduce en la detención de la operación eficiente del depósito. Además, muchas veces, este sistema se utiliza también para clasificar y seleccionar los residuos, de modo de utilizar parte de estos como material para la construcción del muro perimetral (uso de ciclones)



- d) **Zona de descarga de los Residuos o Zona de Playa.** - La zona donde se descargan los residuos a la cubeta se le llama zona de playa porque usualmente está seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas. Es la parte del depósito de relaves o lamas situada en las cercanías de la línea de vaciado, esta playa de forma junto al prisma resistente.
  
- e) **Poza de Aguas Claras o Laguna de Decantación.** - Corresponde a la laguna de aguas clarificadas que se forma en la cubeta debido a la sedimentación o decantación de las partículas sólidas. Esta poza permite la recuperación de aguas y al mismo tiempo la evacuación de estas desde la cubeta. Esta laguna debe mantenerse lo más alejada posible del muro de arenas o prisma resistente y su evacuación debe hacerse siempre para no disminuir el grado de estabilidad del muro.
  
- f) **Sistema de Recuperación de Aguas.** - El sistema de recuperación de aguas permite devolver a la planta, las aguas claras que se han recuperado desde la poza o laguna de aguas clara, mediante bombeo desde balsas y/o descargas de torres de evacuación o decantación que son obras destinadas a la descarga gravitacional de las aguas claras desde la poza de decantación de un tranque o embalse de relaves.
  
- g) **Sistema de Drenaje.** - Es el sistema (por ejemplo, dedos o lechos drenantes) utilizado para deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro, usualmente protegido por filtros para evitar que el flujo de aguas arrastre las partículas finas y produzca la colmatación del sistema.



- h) Sistema de Impermeabilización de la Cubeta.** - Si los relaves en la cubeta contienen sustancias tóxicas debe evitarse la infiltración de aguas al subsuelo, ya que estas podrían provocar la contaminación de los recursos de aguas subterráneas y/o de superficie de la zona de emplazamiento del depósito. En este caso, es preciso que se disponga de un sistema de impermeabilización del piso y paredes de la cubeta, usualmente construido en base a una serie de "estratos" impermeables y "permeables-drenantes"
- i) Canales de Desvío.** - Son las zanjas o túneles construidos en las laderas para captar y desviar las escorrentías superficiales, impidiendo su ingreso a la cubeta del tranque o embalse de relaves.
- j) Berma de Coronamiento.** - Es la faja horizontal de mayor cota del talud externo del prisma resistente o muro de contención.
- k) Revancha.** - Es la diferencia de cota entre la línea de coronamiento y la superficie inmediatamente vecina de la fracción aguas adentro del tranque, generalmente lamosa o de arena muy fina. Se denomina revancha mínima al desnivel entre el coronamiento del prisma resistente y el punto más alto de las lamas; y se denomina revancha máxima al desnivel entre el coronamiento y la superficie de la poza de decantación.
- l) Nivel Freático.** - Es la cota de los puntos en que el agua de poros tiene presión nula.
- m) Muro de Partida o Muro Inicial.**- Muro construido con material grueso de empréstito al inicio del depósito de relaves. En los sistemas constructivos del muro resistente de aguas abajo y eje central, las arenas





se vacían hacia aguas abajo del muro inicial y las lamas hacia aguas arriba.

La altura del muro de partida queda determinada por el avance en altura del prisma de arenas, en relación con el avance en altura del nivel de lamas.

El muro inicial debe permitir mantener una revancha mínima a lo largo del período de operación del tranque.

- n) **Muro de Pié.** - Es el que se construye, generalmente de enrocados en el extremo de aguas abajo del prisma resistente en los métodos constructivos de eje central y de aguas abajo. Este muro tiene por objeto dar un límite físico al muro de arenas y evitar el escape de material fuera de la traza del prisma.
- o) **Muro de Cola.** - Se suele construir para limitar el depósito por el extremo de aguas arriba. Puede construirse de tierra o por alguno de los sistemas de construcción empleados para el muro resistente.
- p) **Licuefacción.** - Pérdida total de la resistencia al corte de un suelo saturado por incremento de la presión de poros. El caso más frecuente de licuefacción ocurre por acción sísmica sobre materiales areno-limosos saturados. Los relaves saturados son altamente susceptibles a licuefacción sísmica, en especial, si la permeabilidad y densidad son bajas. Es el fenómeno más preocupante que ocurra en un tranque de relaves.
- q) **Piezometría.** - Es el sistema de control de las presiones hidrostáticas en el interior del prisma resistente para detectar la presencia de sectores saturados. Los instrumentos utilizados se llaman piezómetros y con ellos se detecta el nivel freático del subsuelo.



- r) **Vertederos de emergencia.** - Son vertederos de umbral variable destinados a evacuar el exceso de aguas acumuladas en la cubeta de un tranque al crecer la laguna de decantación por lluvias intensas.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y métodos que fueron empleados en la presente investigación se detallan a continuación:

#### **3.1 MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

El método aplicado para la correspondiente investigación está basado en el método descriptivo y analítico, debido a que la solución o respuesta del problema general depende de la descripción de las características geotécnicas para la interpretación y descripción del comportamiento de este del terreno en conjunto con el relave filtrado para diseñar el proceso constructivo del depósito.

Se desarrollo en tres etapas las cuales se describen a continuación.

##### **3.1.1 Etapa preliminar.**

En esta etapa de investigación se realizó la revisión de bibliografías de autores diferentes quienes realizaron estudios geotécnicos con la finalidad de diseñar depósitos de relave filtrado. Por ello se ejecutó lo siguiente:

- Recolección y procesamiento de toda la información bibliográfica existente de la zona de investigación.
- Elaboración de croquis.
- Revisión de planos referidos al área.
- Formatos para campo

Para lo cual se requirió de los siguientes equipos:

- Una laptop para buscar la bibliografía necesaria.



### 3.1.2 Etapa de campo.

Durante esta etapa se realizó la exploración de campo seleccionando los puntos de evaluación para realizar las calicatas, trincheras, y punto para cálculo de infiltración, luego se realizó el muestreo, posteriormente se extrajeron la cantidad de muestras necesarias y finalmente se realizaron los ensayos de laboratorio.

- Descripción de información plasmados en la libreta de campo.
- Levantamiento topográfico.
- Excavación de calicatas.
- Excavación de trincheras.
- Ensayo densidad in situ - Remplazo de agua.
- Etapa de laboratorio
- Etiquetado de muestras con fichas respectivas
- Entrega de muestras
- Ensayo de humedad natural
- Ensayo de análisis granulométrico
- Ensayo de límite líquido y limite plástico

Se uso los siguientes equipos:

- Una retroexcavadora

Se uso los siguientes materiales:

- Herramientas manuales
- Libreta de campo
- Flexo
- Pizarra
- Sacos



### 3.1.3 Etapa de gabinete.

En esta etapa de investigación se realizó el análisis y procesamiento de los datos obtenidos de los ensayos en laboratorio.

- Interpretación de los estudios geotécnicos a detalle.
- Digitalización de planos geotécnicos a detalle.
- Interpretación y desarrollo de las investigaciones geotécnicas.
- Estudio de peligro sísmico.
- Estudio hidrológico.
- Análisis Estructural.
- Proceso de diseño estructural
- Elaboración de especificaciones técnicas.
- Realización de planos para la construcción.
- Manual de aseguramiento de la calidad (QA/QC).
- Elaboración de tesis correspondiente.

## 3.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo con lo señalado por Vásquez (2017), el método se refiere a los procedimientos que pueden ser empleados con el propósito de demostrar la hipótesis, alcanzar los objetivos o proporcionar una respuesta precisa al problema identificado. En este proceso, se comienza por definir el punto de partida y lo que se observará inicialmente. Si se parte de situaciones específicas y se espera obtener información de estas para su análisis dentro de un marco teórico general, se está aplicando el método inductivo. En cambio, si se parte de situaciones generales que son explicadas por un marco teórico general y se aplican a una realidad concreta, que es el objeto de investigación, entonces se está utilizando el método deductivo. Es fundamental tener una



comprensión clara de cómo se adquiere el conocimiento y cuál es el objetivo final que se busca alcanzar con el método de investigación elegido, siempre en relación con el problema planteado.

### **3.2.1 Nivel de Investigación.**

Los estudios descriptivos tienen como objetivo principal especificar las propiedades, características y perfiles de individuos, grupos, comunidades, procesos, objetos u otros fenómenos que se sometan a un análisis detallado Hernández, Fernández, & Baptista, et (2014).

Este tipo de investigación se encuentra en el nivel descriptivo, ya que su enfoque radica en la descripción de las características y propiedades físico-mecánicas.

### **3.2.2 Tipo de Investigación.**

La investigación aplicada tiene como objetivo principal la creación de conocimiento que pueda aplicarse directamente para abordar los problemas que enfrenta la sociedad o el sector productivo. Este enfoque se sustenta principalmente en los descubrimientos tecnológicos derivados de la investigación básica, y se centra en la interconexión entre la teoría y la producción (Lozada, 2014).

En esta investigación, el tipo de investigación es aplicativo, debido a que se basó en los conocimientos previamente adquiridos en el área de la geotecnia y la mecánica de suelos.



### 3.2.3 Diseño de Investigación.

El diseño experimental se refiere a la capacidad de ejercer control en una situación en la que se manipulan de manera deliberada las variables independientes, con el propósito de analizar las consecuencias o efectos resultantes (Hernández-Sampieri, 2018).

Para Hernández (2014) el diseño experimental solo se emplea cuando el investigador procura demostrar un efecto de cierta causa, para esto se realizan pruebas y ensayos (experimentos) analizando las variables para corroborar si estas tienen una relación de causa y efecto.

El estudio posee un diseño experimental, ya que se realizó pruebas de laboratorio esto con el propósito de determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo para describir si cumplen con las características necesarias para la construcción del Depósito de Relave Filtrado.

El nivel descriptivo lo define como la meta que tiene el investigador para describir anomalías, escenarios y acontecimientos; con el fin de definir las características de los grupos de estudio.

El investigador solo mide o recoge información veraz de las variables, cabe destacar que su objetivo no define si las variables se relacionan, solo las describe. Hernández R., (2014)

La actual investigación corresponde al nivel descriptivo, ya que se describe las características físicas y mecánicas para conocer si el terreno de fundación, son materiales aptos para la construcción del Depósito de Relave Filtrado.



Los diseños transeccionales o transversales recogen la data en un momento de lapso único, donde el fin es la descripción de las variables para examinar su incidencia e interrelación en un periodo específico. Hernández R., (2014)

El actual proyecto tiene un diseño transversal ya que los ensayos realizados se efectuaron en un periodo determinado de tiempo, esto debido al costo y tiempo del proyecto.

En esta investigación, el diseño metodológico es experimental, puesto que se realizaron ensayos en laboratorio que tendrán un impacto directo en el proceso constructivo del depósito de relaves filtrados.

### **3.2.4 Variables de la Investigación.**

#### **3.2.4.1 Variable independiente:**

- **Características del área del terreno para el Depósito de Relave Filtrado.**

Se hace referencia a las acciones que engloban la evaluación en el terreno, el examen del subsuelo y los análisis de ingeniería requeridos en el proceso constructivo en este caso de un depósito de relave.

#### **3.2.4.2 Variable dependiente:**

- **Proceso constructivo del Depósito de Relave Filtrado.**

La concepción proceso constructivo efectivo representa un elemento crítico en garantizar que la construcción se realice de manera óptima a lo largo de su vida útil, lo que se traduce en una mayor seguridad para quienes la realizan.





### **3.2.5 Población.**

Según Tamayo (2018), la población se define como un grupo de elementos a estudiar, las cuales son parte del entorno espacial donde se desarrollará el trabajo de investigación.

Deposito de Relave Filtrado Quebrada Honda

### **3.2.6 Muestra.**

Según Hernández (2014) la muestra es una parte de una población que tiene una labor representativa, si la cantidad de la muestra es igual al de toda la población esta se denominaría censo, con esto ya se podría deducir el objetivo final de los datos estadísticos. Se realizaron 11 calicatas y 3 trincheras en zonas de referencia directa a la zona de construcción del Depósito de Relave Filtrado.



## CAPÍTULO IV

### CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

#### 4.1 UBICACIÓN

El depósito de Relaves Quebrada Honda se encuentra ubicada en la zona sur del Perú, a 30km en línea recta de la mina Toquepala, en el departamento de Tacna, en el km 24 de la carretera que une Camiara con Toquepala, a una cota promedio de 1200 m.s.n.m.

**Tabla 3**

*Ubicación Política.*

<b>Departamento</b>	<b>Tacna</b>
<b>Provincia</b>	Jorge Basadre
<b>Distrito</b>	Locumba
<b>Coordenadas UTM</b>	8092500 N 328600 E

*Nota.* En la tabla se muestra los datos de la ubicación política del área de estudio.

**Figura 2**  
*Ubicación Quebrada Honda*

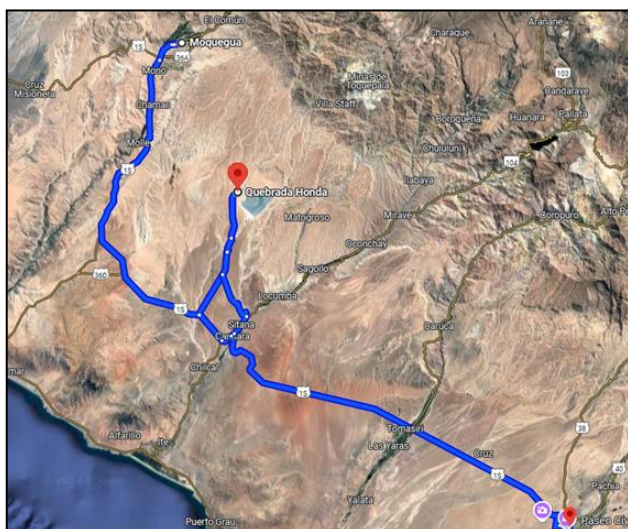


*Nota. En la imagen se muestra un recorte de Google Maps de la ubicación de área de estudio.*

#### 4.2 ACCESIBILIDAD

El depósito de Relaves Quebrada Honda se encuentra desde la ciudad de Tacna a una distancia de 111km (1h 30 min) y desde la ciudad de Moquegua se encuentra a una distancia de 109 km (1h 30 min), transportándose en auto, camioneta o bus.

**Figura 3**  
*Accesibilidad Quebrada Honda*



*Nota. En la imagen se muestra un recorte de Google Maps donde se observa las rutas de acceso al área de estudio.*



### **4.3 GEOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO**

El Sector Quebrada Honda se encuentra ubicado sobre el flanco andino, cerca de la cadena de conos volcánicos y la secuencia de los flujos volcánicos basales del Cretáceo tardío y del Terciario temprano. El prisma estratigráfico de la zona evaluada comprende rocas sedimentarias y volcánicas de origen sub aéreo o continental, que lateralmente pueden aumentar o disminuir de grosor y cuyas edades corresponden al Cretáceo, Terciario y Cuaternario. Se estima, que el grosor de la columna alcanza los 3 000 m, considerando sólo las unidades formacionales que afloran.

Las rocas más antiguas reconocidas en la zona corresponden a unidades de la formación Paralaque, sobre los cuales se asientan en forma discordante los materiales clásticos de la formación Moquegua. Los más recientes corresponden a los sedimentos poco o nada consolidados de naturaleza aluvial y coluvio-aluvial.

A continuación, se detalla los aspectos litológicos más característicos de las formaciones que afloran en la zona, siguiendo el orden del más antiguo al más reciente.

#### **4.3.1 Estratigrafía**

El prisma estratigráfico de la zona evaluada comprende rocas sedimentarias y volcánicas de origen subaéreo o continental, que lateralmente pueden aumentar o disminuir de grosor y cuyas edades corresponden al Cretáceo, Terciario y Cuaternario. Se estima, que el grosor de la columna alcanza los 3 000 m, considerando sólo las unidades formacionales que afloran.

Las rocas más antiguas reconocidas en la zona corresponden a unidades de la formación Paralaque, sobre los cuales se asientan en forma discordante los

materiales clásticos de la formación Moquegua. Los más recientes corresponden a los sedimentos poco o nada consolidados de naturaleza aluvial y coluvio-aluvial.

A continuación, se detalla los aspectos litológicos más característicos de las formaciones que afloran en la zona, siguiendo el orden del más antiguo al más reciente. Asimismo, se presenta la columna estratigráfica.

**Tabla 4**

*Columna Estratigráfica*

ERA	SISTEMA	SERIE	FORMACIÓN GEOLÓGICA	MIEMBRO	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	ROCA INTRUSIVA
MESO - CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Depósitos Aluviales Recientes (Qr-al)		Acumulaciones de cantos y gravas englobados en una matriz areno-limosa, sueltos a ligeramente consolidados	
		PLEISTOCENO	Depósitos Aluviales Antiguos (Qp-al)		Conglomerado semiconsolidado de gravas redondeadas de tamaño y litología variada, con matriz areno-limosa, que se	
	CRETÁCEO - TERCIARIO	TERCIARIO SUPERIOR	Formación Moquegua	Superior (Ts-mos)	Acumulaciones arenoconglomerádica, intercaladas con tufos, areniscas, tufáceas, y	
				Inferior (Ts-moi)	Acumulaciones de areniscas arcósicas a tufáceas, de color gris a marrón claro, que alternan con areniscas arcillosas y arcillas grises a rojizas	Diorita/ Granodiorita (KTi-di/gd)
		TERCIARIO INFERIOR - CRETÁCEO SUPERIOR	Formación Paralaque (KTi-pa)		Derrames de dacitas, riolitas y andesitas, de textura porfirítica y colores marrones a rosados; intercalaciones piroclásticas y	

*Nota.* En la tabla se muestra las distintas formaciones geológicas encontradas en el área de estudio.

**4.3.1.1 Formación Paralaque (KTi-pa).**

Esta unidad integrante del grupo Toquepala, consiste en una secuencia de rocas volcánicas integrada mayormente por derrames lávicos de dacita, riolita y andesita, de textura porfirítica y de colores que oscilan entre marrón y rosado, los cuales presentan intercalaciones piroclásticas y paquetes lenticulares de conglomerados y brechas. Los derrames lávicos y



paquetes piroclásticos ocurren estratificados en bancos de hasta 10 m de espesor, por lo que frecuentemente conforman farallones escarpados en las laderas de las quebradas. Por acción del intemperismo que descompone y desintegra las rocas, desarrolla suelos limo-arcillosos con un cierto contenido de gravas.

Estos volcánicos sobre yacen con discordancia angular a las formaciones más antiguas e infra yacen con la misma relación a las unidades de la formación Moquegua. Su espesor alcanza los 2 000 m, presentando sus capas una dirección dominante hacia el Noroeste, con ángulos de buzamiento de 30 a 35° hacia el Norte y Noreste. Por su posición estratigráfica se le asigna una edad correspondiente al Cretáceo superior-Terciario inferior.

En el área evaluada, sus mejores exposiciones ocurren cerca del límite norte de la zona evaluada, constituyendo los cerros Incapuquio y Totoral, entre otros.

#### **4.3.1.2 Formación Moquegua.**

Consiste en una serie de capas continentales, compuesta por arcillas, areniscas, areniscas tufáceas, conglomerados y tufos de color rojizo a blanco amarillento, poco a medianamente coherentes. Estos sedimentos conforman una extensa planicie resultado del relleno de una cuenca longitudinal que se extendía entre la cadena costanera y el pie del macizo andino occidental; en la actualidad, esta planicie se halla disectada por numerosas quebradas profundas y secas que corren con dirección SO.



Esta formación sobreyace con fuerte discordancia angular a las rocas volcánicas del Grupo Toquepala e infrayace mediante discordancia erosional a los sedimentos cuaternarios. Por sus relaciones estratigráficas su edad de deposición se estima en el Terciario superior, considerándose que su espesor alcanza los 600 m.

Esta unidad sedimentaria es dividida en dos sub-unidades o “miembros” estratigráficos cuyos caracteres litológicos particulares se presentan a continuación:

#### **4.3.1.3 Moquegua inferior (Ts-moi).**

Este miembro consiste en una secuencia de areniscas arcósicas a tufáceas, de color gris a marrón claro, que alternan con areniscas arcillosas y arcillas, grises a rojizas. Las areniscas son de grano grueso a medio y se componen principalmente de feldespatos y cuarzo de formas subangulares, con regular cohesión y a veces bastante compacta por su matriz arcillosa. Las areniscas de las partes inferiores se presentan en bancos de 50 a 100 cm e intemperizan exfoliándose en láminas concéntricas; en las partes superiores las capas son más delgadas, de 20 a 50 cm y predominan los horizontes arcillosos con capitas y venillas de yeso. Es el miembro más potente de la formación.

Las mejores exposiciones de esta unidad se presentan en la parte central del área de estudio, rodeando por el norte y este la pampa Purgatorio y constituyendo las laderas bajas de las quebradas Honda y Santallana. En esta zona se han identificado, a mayor detalle, las sub-unidades Tmal1, Tmal2 y Tmc2. Las dos primeras consisten en



intercalaciones de arenisca, limolita y lodolita, con ocasionales estratos de conglomerado. La tercera unidad se encuentra entre las anteriores y consiste en conglomerado con algunos estratos de arenisca.

#### **4.3.1.4 Moquegua superior (Ts-mos).**

Este miembro se expone en las laderas altas del valle de Moquegua y en los cortes de las quebradas. Ocurren con buenas extensiones en las pampas que se desarrollan inmediatamente al pie del frente andino. Su litología es principalmente areno-conglomerádica, intercalándose secundariamente tufos, areniscas tufáceas, arcillas, etc. Su grosor, texturas y estructuras varían de un sitio a otro tal como se les observa en los diversos cortes naturales de las quebradas.

Esta unidad presenta buen desarrollo en la parte norte del área de estudio, constituyendo las planicies recortadas y colinas que separan las quebradas Huacanane Grande, Santallana, Totoral y Toquepala. En las partes central y sur aparece frecuentemente formando las laderas que flanquean las quebradas Santallana y Honda. En la zona de Quebrada Honda se han identificado a mayor detalle, las sub-unidades Tmt1, Tmt2 y Tmc1. Las dos primeras consisten en intercalaciones de tufos y areniscas tufáceas y la tercera, situada entre las anteriores, consiste en conglomerado.

#### **4.3.1.5 Depósitos aluviales antiguos (Qp-al).**

Consisten en conglomerados semiconsolidados constituidos por gravas redondeadas a subredondeadas de tamaño heterogéneo y litología variada, englobadas en una matriz areno-limosa, que se intercalan con





algunos horizontes lenticulares areno-limosos. El paquete sobreyace con discordancias erosional a ligeramente angular a las formaciones rocosas más antiguas, e infrayace concordantemente a acumulaciones aluviales más modernas. La unidad es típicamente continental y representa las primeras acumulaciones acontecidas durante el Cuaternario.

Geológicamente, consisten en depósitos de piedemonte que fueron depositados como una serie de abanicos coalescentes a lo largo del pie de las estribaciones andinas occidentales, en la depresión situada entre estas elevaciones montañosas y la Cordillera de la Costa, en un periodo climático más húmedo, notablemente diferente al

actual. Posteriormente, nuevos cursos fluviales cortaron estas acumulaciones constituyendo en algunos sitios gargantas, así como terrazas en sus flancos.

La edad de los depósitos es asignada al Pleistoceno y su espesor varía desde pocos metros hasta los 100 m aproximadamente. En el área de estudio estos depósitos se extienden altitudinalmente entre 1 600 y 2 400 msnm, conformando la Pampa del Chorro y la Pampa Purgatorio.

#### **4.3.1.6 Depósitos aluviales recientes (Qr-al).**

Son acumulaciones fluviales de materiales gravosos sueltos a ligeramente consolidados, de naturaleza heterogénea y heterométrica, que han sido transportados cierta distancia por las corrientes fluviales o aluvionales. Están conformados por cantos y gravas redondeadas englobados en una matriz areno-limosa. Se depositaron durante el Holoceno.



Es una unidad sedimentaria de carácter elongado y de poca amplitud en el área de estudio, aunque ampliamente distribuida. Ocurre principalmente en las quebradas Cimarrona, Los Burros, Toquepala, Huacanane Grande, Honda y Santallana.

En la zona de Quebrada Honda se han identificado, a mayor detalle, cuatro tipos de depósitos aluviales (entre antiguos y recientes):

- *Qal1*, que rellena los fondos de las quebradas mayores (Huacanane Grande, Lloquene y Honda), alcanzando una profundidad de 25 m. Estos depósitos consisten en gravas arenosas densas a muy densas, con cantidades variables de cantos y bolones. Se trata de rellenos torrenciales entrelazados.
- *Qal2*, constituido por los depósitos que rellenan la pampa Purgatorio, los cuales alcanzan hasta 30 m de espesor. Estos depósitos consisten en grava arenosa con cantidades variables de cantos y bolonería. Algunos horizontes superficiales están débilmente cementados con caliche.
- *Qal3*, constituido por un cono aluvial, cuya potencia máxima alcanza los 20 m.
- *Qal4*, que rellena los fondos de las pequeñas quebradas. De poca profundidad (5 m), consiste en arenas y gravas. En algunos casos presenta arena limosa, resultado del lavado de material eólico.

También ocurren depósitos eólicos y coluviales (no cartografiados por cuestiones de espesor o escala). Los primeros consisten principalmente



de limo arenoso, muy suelto y seco. El espesor de los depósitos eólicos varía entre unos pocos centímetros y alrededor de un metro. Los depósitos coluviales se desarrollan al pie de los taludes y laderas escarpadas, interdigitalizándose frecuentemente con material aluvial; consisten en arenas y bolones de forma sub-angular, meteorizados.

#### **4.3.1.7 Rocas intrusivas.**

Esta clase de rocas ocurren limitadamente dentro del sector en estudio, hallándose representadas por un stock diorítico-granodiorítico del Batolito de la Costa. Las dioritas son rocas de color gris verdoso, de grano medio a fino; en tanto, las granodioritas consisten en rocas de color gris claro y grano grueso.

Normalmente, estas intrusiones conforman cerros prominentes desprovistos de cobertura detrítica gruesa, salvo al pie de las laderas. En general, presentan un moderado a alto grado de diaclasamiento, así como una alteración intempérica moderada a intensa, que produce exfoliación y desintegración gradual de las rocas. Sin embargo, presentan gran dureza cuando se hallan “frescas”. En los taludes son estables, pero debido a su diaclasamiento son propensos a la formación de bloques, los cuales al caer desarrollan acumulaciones de coluvios con matriz arenosa, en las bases y laderas de los cerros.

Afloramientos característicos de estas rocas ocurren en la esquina noroccidental de la zona evaluada, entre las nacientes de la quebrada La Cimarrona y Huancanane Grande. Por las relaciones de campo, se considera que la edad de intrusión de este cuerpo magmático corresponde



al Cretáceo–Terciario inferior, lo cual es correlacionable con el gran levantamiento andino.

#### **4.4 TECTONICA**

El área de estudio se ubica mayoritariamente en la depresión longitudinal que se extiende entre las elevaciones de la cadena costanera y el pie de la cordillera occidental, la misma que es paralela a la línea litoral y se encuentra rellenada por los clásticos continentales de la formación Moquegua y los depósitos del Cuaternario antiguo, constituyendo la denominada llanura costanera. Cabe destacar, que las capas de la formación Moquegua se inclinan sensiblemente hacia el suroeste, como es evidente en las imágenes satelitales.

Desde el punto de vista estructural se considera que esta depresión tectónica se debería a la presencia de fallas longitudinales que corren a lo largo del flanco occidental andino, debido a lo cual el bloque occidental habría bajado con respecto al bloque oriental, habiendo ocurrido su conformación entre el Mioceno medio y el superior.

##### **4.4.1 Fallas**

Se reconocen dos grupos de fallas, uno de ellos asociado al sistema de fallas Incapuquio, que afecta solamente a las rocas volcánicas e intrusivas que aparecen en el extremo norte del área de estudio y el otro que afecta a los estratos de la formación Moquegua, principalmente en torno a la falla Purgatorio. En ambos casos se trata de fallas con rumbo general ONO – ESE. El sistema de fallas Incapuquio ha sido descrito en sus aspectos esenciales en el Sector Toquepala y solo habría que añadir que las fallas que aparecen en el área de estudio son de corta longitud y de rumbo E – O, preferentemente. A continuación, se caracteriza la falla Purgatorio y otras fallas asociadas.

#### **4.4.1.1 Sistema de fallas Purgatorio.**

Este conjunto de fallas que afectan los estratos de la formación Moquegua conforman una franja de 70 – 100 km. Se trata en su mayor parte de fallas verticales a sub-verticales. La falla más importante es la falla Purgatorio, la cual

presenta un rumbo ONO – ESE y tiene una longitud de 40 km. Esta falla se encuentra activa, existiendo evidencias geomorfológicas de que el último movimiento ocurrió en el siglo XX.

A nivel local, en el área del Embalse de Relaves Quebrada Honda existen fallas activas e inactivas (se han identificado hasta 14 fallas). Estas fallas tienen una dirección entre 300 y 310° y presentan espesores entre 2 y 25 m, con desplazamientos hasta de dos metros. En su mayor parte son fallas sub-verticales y normales y se presentan asociadas a pliegues (ver sección). Las zonas de falla presentan brechas y delgadas capas de arcilla de falla.

#### **4.4.1.2 Pliegues.**

A nivel regional, la formación Moquegua está también afectada por pliegues, de amplio radio de curvatura, los cuales tienen, por lo general, longitudes de 5 – 10 km. A escala local, en la zona de Quebrada Honda se presentan pliegues de baja amplitud (menores a 25 m), con direcciones NO-SE. En el área del embalse se han identificado dos monoclinales, mostrando las capas plegadas fuerte cizallamiento.



## 4.5 GEOLOGÍA HISTÓRICA

El desarrollo geohistórico de la zona evaluada refleja la serie de eventos geotectónicos por los cuales ha pasado. Se inicia en el Cretáceo superior con la deposición de la formación Paralaque, consistente en derrames volcánicos que presentan intercalaciones piroclásticas y conglomerádicas, que sugieren que el ciclo volcánico oscilaba entre periodos de intensa actividad eruptiva seguidas de etapas erosivas y sedimentarias continentales.

Posteriormente, la columna sedimentaria es afectada por la segunda fase de la tectónica andina, acontecida entre el Eoceno y el Oligoceno, lo que habría dado lugar al emplazamiento de los cuerpos intrusivos que afloran en la zona.

Consecutivamente a esta etapa, tiene lugar un largo periodo erosivo que rebaja el relieve cordillerano a una altura bastante modesta (1 800 a 2 000 msnm) labrándose durante el Mioceno una superficie madura conocida como “superficie de erosión Puna”.

Al finalizar el Terciario inferior, se produjo la gran depresión que se extiende longitudinalmente al pie de Andes y el sistema de fallas Incapuquio, cuya traza pasa muy cerca del área de estudio. Las fallas de este sistema generaron en algunas zonas franjas de debilidad estructural que facilitaron el emplazamiento de los cuerpos magmáticos intrusivos. Asimismo, sobre esta depresión se acumulan los clásticos de la formación Moquegua, en facies de tipo lacustre a fluvial, con aportes intermitentes de productos volcánicos.

La tercera etapa de la orogenia andina, acontecida durante tiempos mio-pliocenos, pliega y levanta a su nivel actual el prisma rocoso de los Andes occidentales, conformando el relieve montañoso de la zona altoandina y las planicies de las pampas costeras. Este levantamiento, esencialmente de carácter epirogénico, vino acompañado



de un proceso de acelerada disección del relieve, lo que dio lugar a que los ríos y quebradas interandinas establezcan definitivamente sus cauces.

Simultáneamente, en el Pleistoceno, ocurren las grandes fases glaciales de alcance mundial de las cuales las dos últimas han sido reconocidas en el país; estas glaciaciones han dado lugar a un característico modelado del relieve en regiones ubicadas por encima de los 3 800 msnm, pero también tuvieron notables consecuencias indirectas en las zonas bajas, habiendo condicionado períodos de lluvias más intensos, que los que actualmente existen. Dichas lluvias propiciaron la disección de los relieves del flanco andino occidental y de las planicies que conforman las pampas costaneras.

En la etapa actual (holoceno) y en condiciones climáticas áridas a semiáridas, se depositan una nueva serie de sedimentos clásticos, aluviales y coluvio-aluviales. En tanto, el tectonismo moderno se manifiesta por la serie de eventos sísmicos que se producen en la región, ocurriendo también una alta frecuencia de sismos de origen volcánico.

#### **4.6 SISMICIDAD**

El área de estudio está afectada por una sismicidad de elevada intensidad debido a su proximidad a la zona de colisión entre las placas de Nazca y Sudamericana, una de las más importantes fuentes sísmicas del mundo, y por la presencia de activas fallas regionales, donde se han originado numerosos sismos de magnitud intermedia. La sismicidad histórica, el marco sismo tectónico, las fuentes sísmicas y las máximas intensidades sísmicas del área son similares a las descritas en la geología del sector Toquepala. En esta sección, por tanto, solo se evaluará el peligro sísmico existente en el área.



#### 4.7 PELIGRO SÍSMICO

De acuerdo con el Mapa de Distribución de Isoaceleraciones de Castillo y Alva (1993), en el área de estudio se desarrollan aceleraciones sísmicas del orden de 0.47 – 0.51 g para un período de retorno de 950 años (10% de excedencia para 100 años de vida útil). Esta evaluación no toma en consideración los materiales superficiales y sus respectivas leyes de atenuación.

Woodward Clyde elaboró un estudio de riesgo sísmico en la zona donde se iba a construir la presa de relaves Quebrada Honda (1994). Ese estudio desarrolló análisis determinísticos y probabilísticos para la estimación del riesgo sísmico.

En síntesis, el análisis determinístico establece que, para un período de retorno de 350 años, la falla Purgatorio es el origen de la aceleración máxima horizontal, alcanzando 0.40 g. Este valor se eleva a 0.43 para un período de retorno de 500 años. Este análisis establece también que los sismos originados en placas regionales son más peligrosos que aquellos que se originan en la zona de subducción. El análisis probabilístico arriba también a resultados similares, aunque en este caso la fuente donde se originan los sismos más intensos sería la falla Toquepala (la más importante del sistema de fallas Incapuquio).

Dado que, en general, se ha modelado considerando que el material superficial es rocoso, hecho que no es completamente cierto en el caso del área de la presa (pampa Purgatorio), se considera en este estudio que el valor de la aceleración máxima superficial debe aproximarse más a los resultados que arroja el estudio de Castillo y Alva (1993).



**Tabla 5**

*Fallas regionales sísmicamente significativas.*

FALLA	BUZAMIENTO/RUMBO	LONGITUD TOTAL (KM)	LONGITUD DEL ESCARPE MAS RECIENTE KM	ALTURA DE ESCARPE (M)	SENTIDO DE DESPLAZAMIENTO	EDAD	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (MM/AÑO)
Machado Chico	60/ 210	16	6.1	2.0-3.0	Normal	Pleistoceno tardío	0.016–0.02
Pampa Huanocollo	40/ 200	10.5	1.6	0.5- 1.5	Normal	Pleistoceno temprano-medio	0.001–0.002
Cerro Cordilleras	50/ 250 50/ 280	20.5	20.5 3.7	? 2.0-2.5	Normal	Pleistoceno temprano-medio Pleistoceno tardío	? 0.015–0.02
Chololo	50/ 060	17.3	17.3 11.9	~200	Normal	Cuaternario Pleistoceno tardío– Holoceno	0.20 0.016–0.20
Cerro Loreto	60/ 020	9.1	9.1	2.0- 3.0	Normal	Pleistoceno mediotardío	0.003–0.02
Chaspaya	50/ 060	10.1	8	2.5- 3.0	Normal	Pleistoceno tardío– Holoceno	0.02–0.30
Cerro Chascoso	70/ 010	9	5.5	1.0- 1.5	Normal	Pleistoceno temprano-medio	0.0006–0.005
Altos Los Chilenos	60/ 041	9.5	9.5	2.0- 4.0	Normal	Pleistoceno mediotardío	0.003–0.03
Cerro Morrito	60/ 250	4.3	4.3	2.0- 3.0	Normal	Pleistoceno mediotardío	0.003–0.02
Micalaco	90/ 100	32.5	19.9	1.5- 2.0 20 -30*	Normal Dextral	Pleistoceno tardío Cuaternario	0.01–0.016 0.01–0.015
Toquepala	90/ 120	107	25.1 (este) 40.0 (oeste)	1.5- 2.5 1.5-2.5 -50*	Normal Dextral	Holoceno Holoceno Pleistoceno medio	0.15–0.25 0.15–0.25 0.07–0.40
Purgatorio	70/ 285 80/ 085	40	5.1 (este) 20 (oeste)	2.1 3.0 94.5*	Normal Normal Dextral	Holoceno Holoceno Pleistoceno temprano-medio	0.21 0.30 0.05–0.12
Villacollo	90/ 090	20.5	9.8	1.5–2.0	Normal	Pleistoceno tardío	0.01–0.016
Cerro Rocosco	70/300	10.4	10.4	1.0–2.0	Normal	Pleistoceno mediotardío	0.001–0.016
Cerro Caquilloco	90/110	17.6	17.6	?	?	Pleistoceno temprano-medio	?
San Francisco	70/315	21	7.6	1.0–1.5	Normal	Pleistoceno mediotardío	0.001–0.01

*Nota.* La siguiente tabla muestra los datos de las fallas regionales sísmicamente según el estudio de Woodward Clyde.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL TERRENO DE FUNDACIÓN

Se realizaron 11 calicatas, 3 trincheras, determinando las propiedades físicas mecánicas del terreno de fundación que se detallan a continuación.

**Tabla 6**

*Ubicación de Calicatas - Deposito de Relave Filtrado Quebrada Honda*

UBICACIÓN	CALICATA	COORDENADAS LOCALES			PROFUNDIDAD TOTAL
		NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	
N		(m)	(m)	(m.s.n.m.)	(m)
Depósito de Relave Filtrado	TP22-01	8069103.5	305812.1	1208.7	3.1
	TP22-02	8069102.8	306069.8	1205.9	3.6
	TP22-03	8069177.2	306289.9	1204.8	3.5
	TP22-04	8069248.1	306540.2	1207.2	3.1
	TP22-05	8069300.9	305685.9	1217.7	3.3
	TP22-06	8069284.7	305940.3	1210.9	3.5
	TP22-07	8069457.9	305689.2	1222.6	3.5
	TP22-08	8069450.1	305966.0	1217.1	3.5
	TP22-09	8069488.9	306196.1	1213.8	4
	TP22-10	8069623.3	306287.9	1223.1	3.6
	TP22-11	8069437.3	306425.5	1216.7	3.5

*Nota.* La tabla muestra las coordenadas de ubicación y profundidad de cada calicata.

**Tabla 7**

*Ubicación de Trincheras - Deposito de Relave Filtrado Quebrada Honda*

UBICACIÓN	trinchera	COORDENADAS LOCALES			PROFUNDIDAD TOTAL
		NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	
N		(m)	(m)	(m.s.n.m.)	(m)
Depósito de Relave Filtrado	TR22-01	8069332.3	306208.7	1204.056	5.5
	TR22-02	8069617.1	306070.7	1218.253	8
	TR22-03	8069596.1	306486.0	1220.519	7

*Nota.* La tabla muestra las coordenadas de ubicación y profundidad de cada trinchera.

De las 11 calicatas, 3 trincheras, se determinaron las propiedades físicas y mecánicas del terreno de fundación que se detallan a continuación.

**Tabla 8**

*Resultados de Ensayos de Caracterización Físico Mecánicas de Calicatas - LMS*

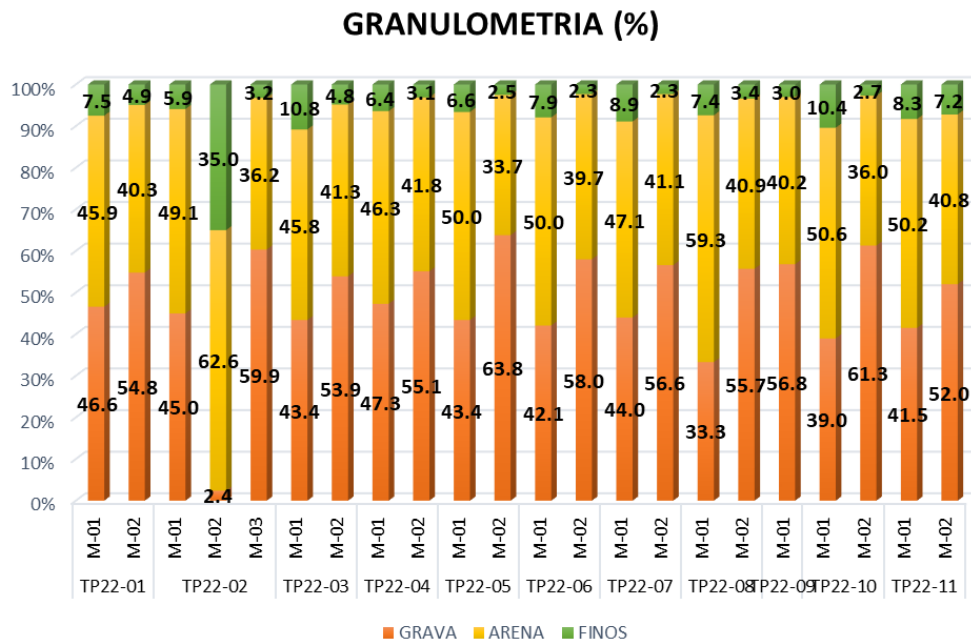
*Quebrada Honda*

UBICACIÓN	CALICATA	MUESTRA	PROF. (m)	SUCS	GRANULOMETRIA			LIMITE DE ATTERBERG		HUMEDAD (%)
					GRAVA (%)	ARENA (%)	FINOS (%)	LL	IP	
<b>Depósito de Relave Filtrado</b>	TP22-01	M-01	0.6	SP-SM	46.6	45.9	7.5	NP	NP	0.7
		M-02	3.1	GW	54.8	40.3	4.9	NP	NP	0.5
	TP22-02	M-01	2	GW	45.0	49.1	5.9	NP	NP	0.7
		M-02	2.8	SM	2.4	62.6	35.0	21	5	2
		M-03	3.6	GW	59.9	36.2	3.2	NP	NP	1
	TP22-03	M-01	2.5	SP-SM	43.4	45.8	10.8	NP	NP	0.9
		M-02	3.5	GW	53.9	41.3	4.8	NP	NP	0.7
	TP22-04	M-01	0.2	SP-SM	47.3	46.3	6.4	NP	NP	1.1
		M-02	3.1	GW	55.1	41.8	3.1	NP	NP	0.8
	TP22-05	M-01	0.6	SP-SM	43.4	50.0	6.6	NP	NP	0.9
		M-02	3.3	GW	63.8	33.7	2.5	NP	NP	1.2
	TP22-06	M-01	1	SP-SM	42.1	50.0	7.9	NP	NP	1.3
		M-02	3.5	GW	58.0	39.7	2.3	NP	NP	0.5
	TP22-07	M-01	0.7	SP-SM	44.0	47.1	8.9	NP	NP	0.7
		M-02	3.5	GW	56.6	41.1	2.3	NP	NP	0.8
	TP22-08	M-01	1.4	SP-SM	33.3	59.3	7.4	NP	NP	1.1
		M-02	3.5	GW	55.7	40.9	3.4	NP	NP	0.9
	TP22-09	M-01	4	GW	56.8	40.2	3.0	NP	NP	0.8
	TP22-10	M-01	1	SP-SM	39.0	50.6	10.4	NP	NP	1.1
		M-02	3.6	GW	61.3	36.0	2.7	NP	NP	0.7
	TP22-11	M-01	1	SP-SM	41.5	50.2	8.3	NP	NP	1.1
		M-02	3.5	GW	52.0	40.8	7.2	NP	NP	0.6

*Nota.* La tabla muestra las Caracterización Físico Mecánicas de cada estrato de las calicatas realizadas.

**Figura 4**

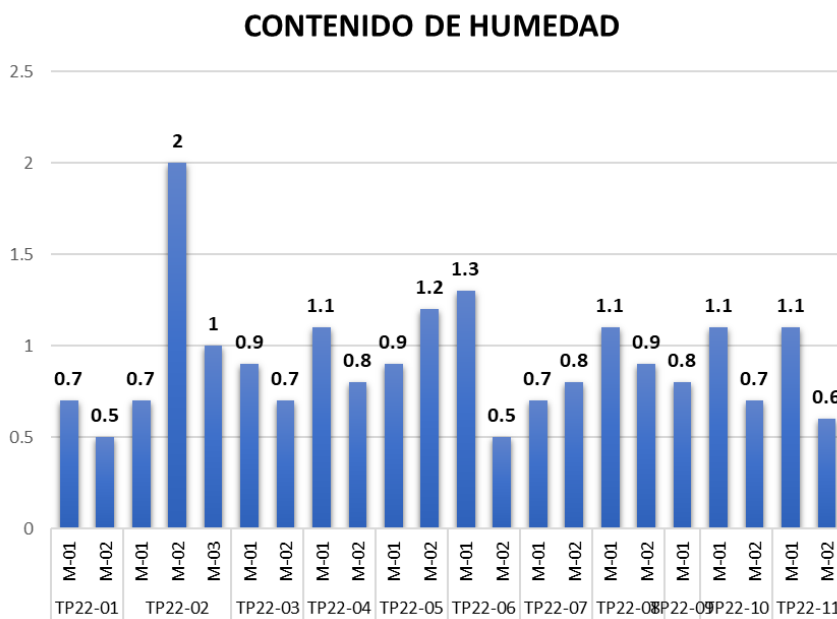
*Composición del suelo en función a sus partículas*



*Nota.* La tabla muestra los porcentajes de granulometría de cada estrato de las calicatas realizadas.

**Figura 5**

*Contenido de Humedad*



*Nota.* La tabla muestra el contenido de humedad de cada estrato de las calicatas realizadas.

**Tabla 9**

*Resultados de Ensayos de Caracterización Físico Mecánicas de Trincheras - LMS*

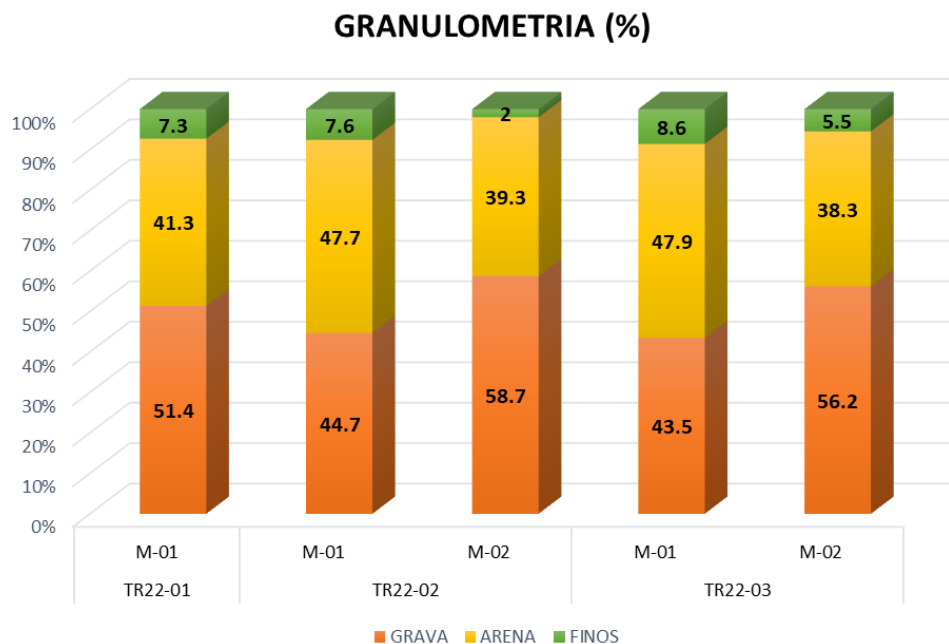
*Quebrada Honda*

UBICACIÓN	CALICATA	MUESTRA	PROF. (m)	SUCS	GRANULOMETRIA			LIMITE DE ATTERBERG		HUMEDAD (%)
					GRAVA (%)	ARENA (%)	FINOS (%)	LL	IP	
Depósito de Relave Filtrado	TR22-01	M-01	5.5	GW	51.4	41.3	7.3	NP	NP	0.6
	TR22-02	M-01	1.2	SP-SM	44.7	47.7	7.6	NP	NP	0.8
		M-02	8	GW	58.7	39.3	2	NP	NP	0.9
	TR22-03	M-01	0.4	SP-SM	43.5	47.9	8.6	NP	NP	0.5
		M-02	7	GW	56.2	38.3	5.5	NP	NP	0.6

*Nota.* La tabla muestra las Caracterización Físico Mecánicas de cada estrato de las trincheras realizadas.

**Figura 6**

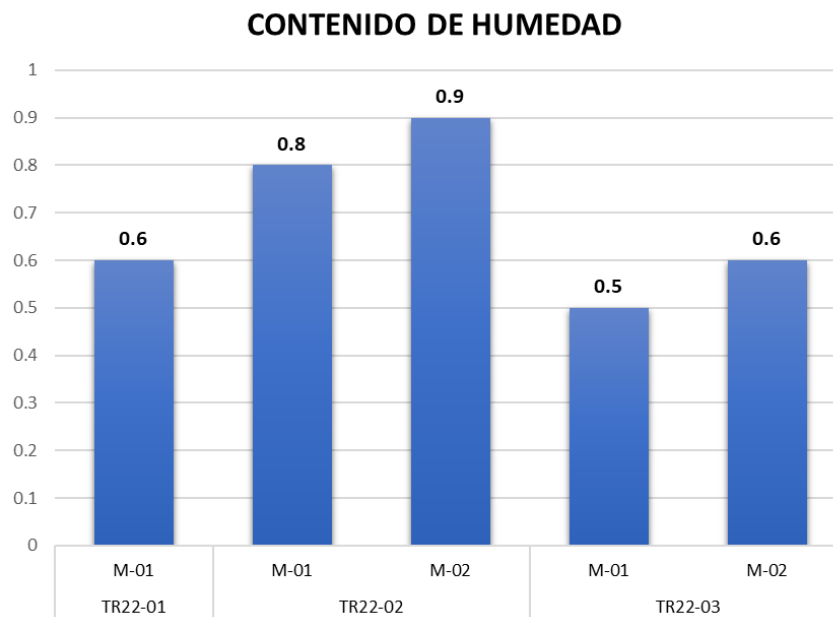
*Composición del suelo en función a sus partículas*



*Nota.* La tabla muestra los porcentajes de granulometría de cada estrato de las trincheras realizadas.

**Figura 7**

*Contenido de Humedad Trincheras*



*Nota.* La tabla muestra el contenido de humedad de cada estrato de las trincheras realizadas.

En la tabla 8 y 9 la figuras 4,5,6 y 7 se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos físicos realizados a las muestras extraídas de las 11 calicatas y 3 trincheras donde se realizó el análisis granulométrico obteniendo los siguientes promedios para las calicatas: donde las cantidades de gravas fueron: 50.7, 35.8%, 48.7%, 51.20%, 56.6%, 50.10%, 50.30%, 44.50%, 56.80%, 50.20, 46.80%, 48.05%, 51.7% y 49.85 las cantidades de arena fueron: 43.1%, 49.3%, 43.55%, 44.05%, 41.85%, 44.85%, 44.1%, 50.1%, 40.2%, 43.3%, 45.5, 44.5%, 43.5% y 43.1 y las cantidades de material fino fueron 6.2%, 14.7%, 7.8%, 4.75%, 4.55%, 5.1%, 5.6%, 5.4%, 3%, 6.55% 7.75, 7.45%, 4.8% y 7.05 no presenta índice líquido en 10 calicatas más en una en el estrato 2 un valor de 21 y en las 3 trincheras no presenta, con respecto a el índice de plasticidad obtenidos de 10 calicatas no presenta, más en una calicata presenta en un estrato 2 un valor de 5, y en las 3 trincheras no presenta el contenido de humedad es 0.6%, 1.23%, 0.8%, 0.95%, 1.05%, 0.9%, 0.75%, 1%, 0.8%, 0.9%, 0.85, las muestras analizadas se

clasifican con SP-SM en los primeros estratos y GW en los segundos estratos según SUCS.

## 5.2 RESULTADOS DE DENSIDAD DEL TERRENO DE FUNDACIÓN

Se realizaron 2 ensayos para determinar la densidad del terreno de fundación como se detalla a continuación.

**Tabla 10**

*Resultados de Densidad In Situ (Remplazo de Agua)*

UBICACIÓN	ENSAYO	PROFUNDIDAD TOTAL	SUCS	Densidad In Situ (Remplazo de Agua)		
				DENSIDAD HÚMEDAD	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA
				(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )
Depósito de Relave Filtrado	TP22-06-01	1	GW	2.784	1.3	2.636
	TP22-08-01	1.4	GW	2.8	0.9	2.609

*Nota.* La tabla muestra los valores obtenidos a partir del ensayo de Remplazo de Agua para obtener la densidad in situ.

**Figura 8**

*Ensayos de Densidad In Situ*



*Nota.* Las fotografías muestran los ensayos realizados en campo.

De acuerdo a los dos ensayos realizados densidad in situ por el método remplazo de agua, se infiere que el terreno de fundación tiene buena capacidad portante debido a que tiene una densidad seca mayor a 2.0 g/cm<sup>3</sup>. La densidad aparente del suelo es un buen indicador de propiedades importantes del suelo, como son: la compactación, porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración, lo que condiciona la circulación de agua y aire en el suelo, los procesos de establecimiento de las plantas (emergencia, enraizamiento) y el manejo del suelo.

### 5.3 RESULTADOS DE INFILTRACION DE AGUA DEL TERRENO DE FUNDACIÓN

Se realizaron 2 ensayos para determinar la velocidad de infiltración de agua en el terreno de fundación como se detalla a continuación.

**Tabla 11**

*Resultados de Ensayo de Infiltración*

UBICACIÓN	CALICAT A	PROFUNDIDA D PARCIAL (m)	SUCS	INFILTRACIÓ N (cm/s)	INFILTRACIÓ N (mm/h)
<b>Depósito de Relave Filtrado</b>	TP22-06-01	1	GW	1.9 E-03	11.1
	TP22-08-01	1.4	GW	1.4 E-03	7.8

*Nota.* La tabla muestra los valores obtenidos a partir del ensayo de Infiltración de Agua in situ.



## Figura 9

### *Ensayos de Infiltración de Agua*



*Nota.* Las fotografías muestran los ensayos realizados en campo.

El tiempo de infiltración de agua obtenidos en el terreno de fundación de los dos ensayos realizados es de 11.1 mm/h y 7.8 mm/h lo cual nos indica una velocidad baja de infiltración siendo considerable para su empleabilidad.

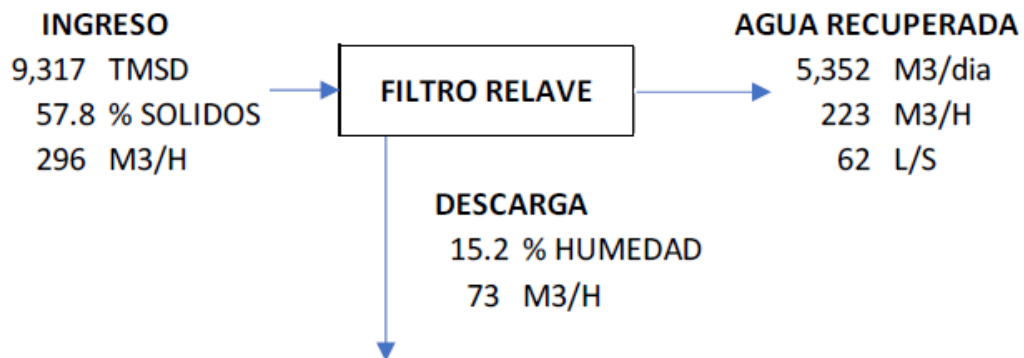
#### **5.4 PROPUESTA DE DISPOSICION DEL TERRENO DE FUNDACION**

El terreno de fundación en base a los resultados obtenidos se puede utilizar retirando el primer estrato hallado en promedio 1.30 m, el cual se encuentra en su mayoría suelto a comparación del segundo estrato, lo que garantiza la depositación en un terreno con densidad considerable y baja velocidad de infiltración.

Adicional a ello se considera los siguientes valores proyectados.

**Figura 10**

*Diagrama de disposición de Relave Filtrado*



*Nota.* El diagrama detalla los valores considerados para la disposición de relave filtrado.

**Tabla 12**

*Equipos para disposición propuesto*

<b>EQUIPOS PRINCIPALES</b>	<b>CANT.</b>	<b>TONELAJE SECO X DIA</b>	<b>COMENTARIO</b>
CARGADOR FRONTAL	1	24,347 t	Dentro de la capacidad máxima de la planta
VOLQUETES 830	2	11,674 t	Distancia Max 1.5km Max Tiempo recorrido ida y vuelta 19.5 min Rendimiento 600 m3/h/tractor
TRACTOR D8T	2	9,333 t	Rendimiento 230 m3/h/tractor
RODILLO LISO 10-12 TN	1	12,174 t	Rendimiento 600 m3/h/tractor
<b>EQUIPOS SECUNDARIOS</b>	<b>CANT.</b>		<b>FACTOR DE USO</b>
MOTONIVELADORA 14H	1		0.5
CISTERNA 5,000 GLN - CONTROL DE POLVO	1		0.5

*Nota.* La tabla detalla las características de los equipos requeridos para la disposición de relave filtrado.



## VI. CONCLUSIONES

- El estudio geotécnico para el desarrollo constructivo del depósito de relaves Quebrada Honda se desarrolló con éxito, permitiéndonos evaluar todas las condiciones geotécnicas, brindando una base sólida para la planificación para el proceso constructivo del depósito de relave filtrado cuyos resultados fueron favorables.
- Se determinaron las características físicas y mecánicas del terreno de fundación a lo largo de su extensión donde se clasificó el primer estrato como gravas bien graduadas (GW) con los siguientes porcentajes promedio: Grava 56%, Arena 40% y Finos 3% y el segundo estrato como arenas mal graduadas y arenas limosas (SP-SM) con los siguientes porcentajes promedio: Grava 42%, Arena 49% y Finos 8% según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Además, no se observó una variación significativa en el contenido de humedad, que osciló entre 0.5% como el valor más seco y 1.3% como el más saturado, sin considerar un único valor que se tuvo de 2%. Es importante destacar que, en todos los puntos de muestreo, los suelos no presentaron plasticidad según los límites de Atterberg. Adicionalmente a partir del ensayo de Remplazo de Agua y Infiltración de Agua, se determinó que el terreno de fundación tiene una densidad seca de 2.60 g/cm<sup>3</sup> y una velocidad de infiltración de agua de 15mm/h promedio.
- Las características físicas y mecánicas del terreno de fundación obtenidas a partir del estudio geotécnico son óptimas para el proceso constructivo del depósito de relaves.



## VII. RECOMENDACIONES

- Profundizar los estudios geotécnicos del suelo incluyendo el ensayo de diamantina in situ y el ensayo de rocas.
- Realizar un monitoreo sísmico en el lugar del proyecto, considerando otros estudios de forma que se pueda tener una información más amplia de los eventos sísmicos de forma que se prevea eventualidad sísmica durante el proceso constructivo.
- Se recomienda ampliar la zona de monitoreo de agua presente en el borde terreno de fundación con piezómetros.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aulestia, D. (2014). Geotecnia y cimentaciones. Ecuador. Desdeelmurete. (2015). *Desdeelmurete*. Obtenido de Blog de geotecnia, cimentaciones especiales y tratamientos del terreno.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, L. (2014). *Metodología de la investigación: Prentice-Hall Hispanoamericana*. Interamericana Editores.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). "Metodología de la investigación" (Sexta ed.). México: MCGRAW-HILL, INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Berry, P., & Reid, D. (1996). Mecánica de suelos (Primera ed.). México: McGraw-Hill Compnies.
- Braja M., D. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México: Thomson Editores, S.A. de C.V.
- E. Bowles, J. (1981). Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. México: MCGRAW-HILL DE MEXICO, S.A DE C.V.
- Gonzalez De Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). Mecánica de suelos (Vol. Tomo 1). (G. N. Editores, Ed.) México: Editorial Limusa S.A. de C.V.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2004). Mecánica de Suelos. (G. N. EDITORES, Ed.) México: Editorial Limusa S.A cc C.V.
- Behar, D. S. (2008). Metodologia de la Investigacion (Vol. Segunda). Editorial Shalom 2008. doi:ISBN 978-959-212-783-7
- Berdugo, I. (1999). Elementos básicos para el estudio geotécnico de excavaciones superficiales en suelos blandos (3 ed.). Colombia: Santa Fe de Bogotá.



- Hernandez-Sampieri, H., & Mendoza, C. P. (2018). Metodología de Investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (Primera Edición ed.). (S. d. Interamericana Editores, Ed.) Mexico: Mc Graw Hill Education. doi:ISBN: 978-1-4562-6096-5
- Bligh, W. (1910). Dams Barrages and Weirs on Porous Foundations. Engineering News, p. 708.
- Bowles, J. (1982). Manual de laboratorio de mecánica de suelos. Editorial mc Graw – Hill Latinoamericana: Bogotá – Colombia.
- Heredia, M. (2002). Manual práctico del ingeniero civil. Lima: Primera Edición . Huanca, B. (1991). Mecánica de suelos. Ica, Perú: UNICA
- Heredia, M. (2002). Manual práctico del ingeniero civil. Lima: Primera Edición . Huanca, B. (1991). Mecánica de suelos. Ica, Perú: UNICA



## ANEXOS



---

## **ANEXO 1 Plano de Ubicación del Depósito de Relaves Filtrados**





## **ANEXO 2 Plano de Investigaciones Geotécnicas del Depósito de Relaves Filtrados**



### **ANEXO 3 Registro Estratigráfico de Calicatas y Trincheras**

---



## **ANEXO 4 Ensayos de Densidad In Situ e Infiltración**

---



## **ANEXO 5 Ensayos de Laboratorio**

---



## ANEXO 6 Panel Fotográfico

---



*Nota:* Fotografía de la toma de fotografía aéreas del área realizadas con dron.



*Nota:* Fotografía de la primera trinchera realizada.



*Nota:* Fotografía de la segunda trinchera realizada.





*Nota:* Fotografía de la tercera trinchera realizada.



*Nota:* Fotografía de la calicata realizada.



*Nota:* Fotografía de la calicata realizada.



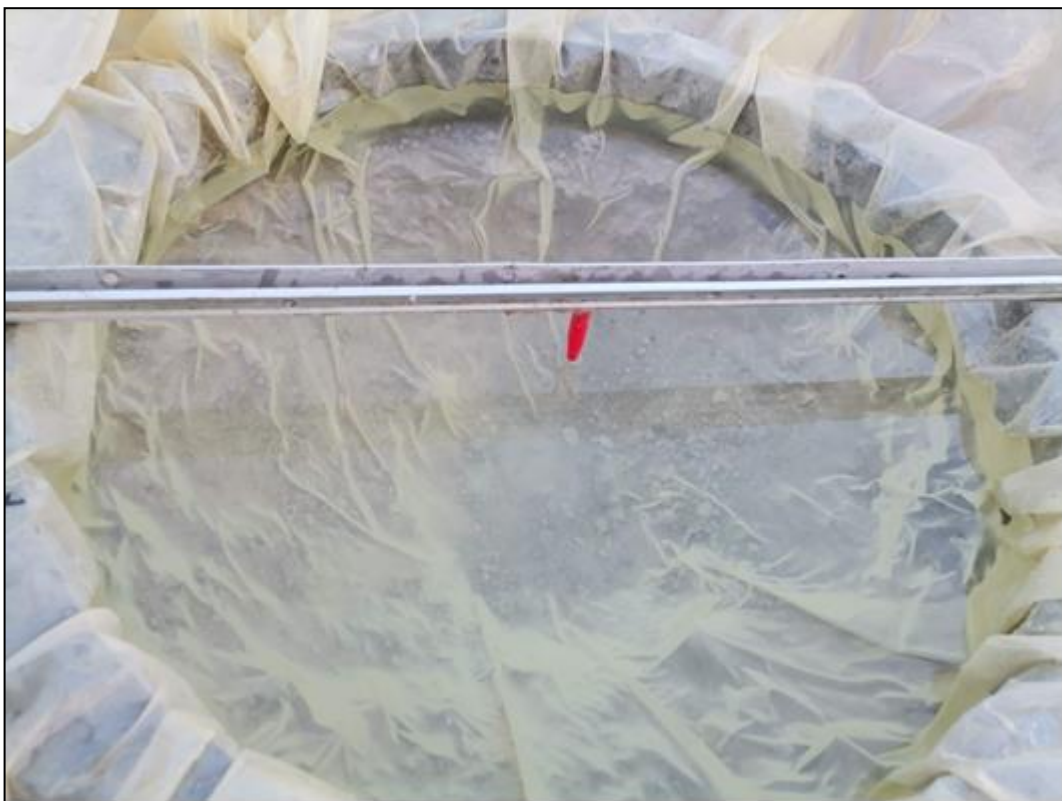
*Nota:* Fotografía de la identificación y medición de estratos de la calicata realizada.



*Nota:* Fotografía de la identificación y medición de estratos de la calicata realizada.



*Nota:* Fotografía de la preparación para realizar el ensayo de Reemplazo de Agua.



*Nota:* Fotografía del ensayo de Reemplazo de Agua.



*Nota:* Fotografía de la preparación para realizar el ensayo de Reemplazo de Agua.



*Nota:* Fotografía del ensayo de Reemplazo de Agua.





*Nota:* Fotografía del ensayo de Infiltración de Agua.



*Nota: Nota:* Fotografía de visita realizada a la planta espesadora QH.



## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Hanneke Pilar Ponce Quispe

, identificado con DNI 70308408 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniero Geológico

, informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado

Título Profesional denominado:

" ESTUDIO GEOTECNICO PARA EL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL DEPÓSITO DE RELAVE FILTRADO - QUEBRADA HONDA - TACNA

" Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 04 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Hannero Pilar Ponce Quispe  
, identificado con DNI 70308406 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Geológica

, informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado  
 Título Profesional denominado:

" ESTUDIO GEOTECNICO PARA EL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL DEPOSITO DE  
RELAVE FILTRADO - QUEBRADA HONDA - TACNA

" Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 04 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella