

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“Propuesta de diseño de ampliación de la relavera de la  
planta de beneficio La López en el cantón Camilo Ponce  
Enríquez”**

**PROYECTO DE LA MATERIA INTEGRADORA**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO DE MINAS**

Presentada por:

**Darío Javier Granda Castro**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2016**

## **AGRADECIMIENTO**

A la ESPOL, y a los profesores que contribuyeron en mi formación profesional. A los profesores por la orientación, seguimiento y apoyo brindado en el desarrollo de este proyecto.

A mi familia por el apoyo incondicional brindado a lo largo de la carrera, y a mis amigos por ayudarme a recorrer este largo caminar.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por todo su apoyo, confianza,  
cariño y entrega durante toda mi vida.

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

PhD. Paúl Carrión  
Docente de la materia integradora

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

---

Darío Javier Granda Castro

## RESUMEN

La presente investigación se realizó en el laboratorio de mecánica de materiales, suelos y rocas de la Escuela Superior Politécnica del Litoral y en el laboratorio de suelos de la Universidad de Guayaquil, estableciendo como objetivo proponer el diseño de la ampliación de la relavera para la planta de beneficio “La López”, mediante el uso de las arenas de relave previo a su caracterización geomecánica y geotécnica.

Los relaves producidos por la planta de beneficio son arenas con contenido de sulfuro y sin contenido de sulfuro, las cuales han sido almacenadas en la relavera existente desde hace 30 años. En la actualidad, la piscina de relave ha alcanzado su máxima capacidad, creando la necesidad de colocar las colas en una nueva relavera. Las limitaciones del espacio físico de la concesión impiden la construcción de dicha relavera, por lo tanto, se optó por proponer el diseño de la ampliación de la relavera sobre la relavera existente.

Invertir en la compra de materiales para la construcción de la ampliación de la relavera no está planificado en los rubros de la empresa, ni representa ingresos. Por esta razón se plantea utilizar las arenas de relave con sulfuros y sin sulfuros como materiales constituyentes del muro de la ampliación de la relavera, cuyo costo para la empresa es nulo. Para esto, se realizaron

ensayos geomecánicos que permitieron conocer sus características y propiedades.

Posteriormente se realizó el análisis de estabilidad del talud del muro de la ampliación de la relavera utilizando el programa Slope W/ de GeoStudio, hasta obtener factores de seguridad que cumplan los requerimientos técnicos. Se calculó el volumen de material que almacenará la ampliación de la relavera, el material a utilizar en la construcción del muro y se presentó la propuesta de diseño.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS.....	XI
SIMBOLOGÍA.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	9
1.4. Metodología general.....	10
2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	14
2.1. Datos geográficos de la zona de estudio.....	14
2.2. Datos ecológicos de la zona de estudio.....	15
2.3. Datos socioeconómicos de la zona de estudio.....	17

2.4. Geología de la zona de estudio.....	18
2.5. Datos de la relavera actual.....	21
3. MARCO TEÓRICO .....	23
3.1. Generalidades .....	23
3.2. Métodos constructivos de depósitos de relaves .....	24
3.3. Características básicas de los suelos .....	27
3.4. Ensayos realizados a las arenas de relave .....	32
3.5. Slope W/.....	37
4. TRABAJO DE CAMPO Y LABORATORIO .....	38
4.1. Trabajo de campo .....	38
4.2. Trabajo de laboratorio .....	41
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	47
5.1. Análisis granulométrico .....	47
5.2. Ensayo de gravedad específica .....	49
5.3. Ensayo de permeabilidad.....	51
5.4. Ensayo de compactación proctor standard .....	53
5.5. Ensayo de corte directo.....	57

5.6. Análisis de resultados de ensayos realizados .....	63
6. PROPUESTA DE DISEÑO DE LA AMPLIACIÓN DE LA RELAVERA .....	65
6.1. Elaboración de perfiles de la relavera actual.....	65
6.2. Definición de regiones y materiales en Slope W/ .....	67
6.3. Análisis de estabilidad del talud en Slope W/ .....	70
6.4. Cálculo de la capacidad de vertido de la ampliación de la relavera ...	73
6.5. Cálculo del volumen de relave usado en el diseño de la relavera.....	73
6.6. Tiempo de llenado de la piscina de la ampliación de la relavera.....	74
6.7. Propuesta final del diseño de la ampliación de la relavera.....	75
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78

## ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CIMM	Centro de Investigación Minero Metalúrgico de Chile
EEUU	Estados Unidos de América
IGM	Instituto Geográfico Militar
INIGEMM	Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero y Metalúrgico de Ecuador
SME	Society for Mining, Metallurgy and Exploration

## SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
Au	Oro
Cu	Cobre
Lb	Libras
Mo	Molibdeno

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales fallas de las presas de relaves .....	6
Figura 2. Metodología empleada en el desarrollo del proyecto .....	13
Figura 3. Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	15
Figura 4. Mapa de ubicación de ríos de la zona de estudio.....	17
Figura 5. Población ocupada por rama de actividad del cantón Camilo Ponce Enríquez .....	18
Figura 6. Mapa de subdivisiones metal tectónica del distrito Azuay .....	20
Figura 7. Vista panorámica de un depósito de relaves .....	24
Figura 8. Curva densidad seca máxima vs humedad óptima del ensayo proctor.....	34
Figura 9. Topografía de la relavera perteneciente a la planta de procesamiento La López.....	39

Figura 10. Curva granulométrica de muestra de arena con sulfuro .....	48
Figura 11. Curva granulométrica de muestra de arena sin sulfuro .....	49
Figura 12. Curva de compactación proctor standard de muestra de arena con sulfuro .....	55
Figura 13. Curva de compactación proctor standard de muestra de arena sin sulfuro .....	56
Figura 14. Curva $\tau$ vs $\epsilon$ de 4 kg para muestra de arena con sulfuros.....	57
Figura 15. Curva $\tau$ vs $\epsilon$ de 8 kg para muestra de arena con sulfuros.....	58
Figura 16. Curva $\tau$ vs $\epsilon$ de 16 kg para muestra de arena con sulfuros.....	58
Figura 17. Curva general $\tau$ vs $\epsilon$ para muestra de arena con sulfuros .....	59
Figura 18. Curva $\tau$ vs $\epsilon$ de 4 kg para muestra de arena sin sulfuros.....	59
Figura 19. Curva $\tau$ vs $\epsilon$ de 8 kg para muestra de arena sin sulfuros.....	60
Figura 20. Curva $\tau$ vs $\epsilon$ de 16 kg para arena sin sulfuros.....	60

Figura 21. Curva general $\tau$ vs $\epsilon$ para muestra de arena sin sulfuros.....	61
Figura 22. Curva $\tau$ vs $\sigma$ para muestra de arena sin sulfuros.....	62
Figura 23. Curva $\tau$ vs $\sigma$ para muestra de arena con sulfuros.....	62
Figura 24. Alineación sobre la relavera actual .....	66
Figura 25. Perfil transversal de la relavera actual.....	67
Figura 26. Simulación del factor de seguridad para el muro de 3 metros .....	71
Figura 27. Simulación del factor de seguridad para el muro de 6 metros .....	71
Figura 28. Simulación del factor de seguridad para el muro de 9 metros .....	72
Figura 29. Diseño final de la ampliación de la relavera.....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Muestreo .....	40
Tabla 2. Especificaciones ensayo proctor standard.....	46
Tabla 3. Datos de ensayo de gravedad específica – Arena con sulfuros .....	49
Tabla 4. Datos de ensayo de gravedad específica – Arena sin sulfuros.....	50
Tabla 5. Parámetros iniciales del ensayo – Arena con sulfuro .....	51
Tabla 6. Lecturas del nivel de agua – Arena con sulfuro .....	52
Tabla 7. Resultados ensayo – Arena con sulfuro.....	52
Tabla 8. Parámetros iniciales del ensayo – Arena sin sulfuro.....	52
Tabla 9. Lecturas del nivel de agua – Arena sin sulfuro .....	53
Tabla 10. Resultados ensayo – Arena sin sulfuro.....	53
Tabla 11. Datos del ensayo proctor standard – Arena con sulfuros.....	54

Tabla 12. Datos del ensayo proctor standard – Arena sin sulfuros.....	56
Tabla 13. Regiones y materiales establecidos usados en Slope W/.....	68
Tabla 14. Resumen de factores de seguridad obtenidos.....	72
Tabla 15. Propuesta de diseño final de la ampliación de la relavera .....	76

# **CAPÍTULO 1**

## **1. ANTECEDENTES**

### **1.1. Generalidades**

Las relaveras o presas de relaves son sitios donde se depositan los residuos provenientes de las plantas de beneficio, y cuya infraestructura debe perdurar a través de los años. Las fallas de estas infraestructuras han generado desastres de gran magnitud a nivel mundial que dejaron como resultado consecuencias negativas para la población y la naturaleza, entre las cuales se pueden mencionar el desastre de Aznalcóllar, España producido en 1988, la rotura de la relavera de Mount Polley, Canadá en 2014 y la más reciente que ocurrió en Noviembre del 2015 en el distrito de Minas Gerais, Brasil.

Las presas de relave construidas en la mayoría de las minas del país no cumplen los requerimientos necesarios para acopiar el tipo ni cantidad de residuos que almacenan, ni existe una normativa nacional que regule procedimientos para la construcción de dichas relaveras, siendo estas infraestructuras empíricas.

La minería aurífera en el distrito minero Ponce Enríquez ha evolucionado a través de los años, diversos procesos de extracción de oro han sido puestos en marcha para conseguir el aumento de la producción. Sin embargo, el manejo deficiente de los relaves provenientes de las plantas de tratamiento ha ocasionado diversos problemas ambientales, que afecta el ecosistema circundante.

El alcance del presente proyecto es proponer un diseño de la ampliación de la relavera existente de la planta de beneficio La López, utilizando como materiales de construcción los relaves generados, a fin de reducir costos constructivos y evitar la sobresaturación de la presa de relaves que un futuro pueda causar problemas ambientales y que afecten el equilibrio natural de la zona.

## 1.2. Planteamiento del problema

El beneficio mineral comprende múltiples actividades y debe entenderse como un sistema complejo de procesos, que al operar utiliza determinadas materias primas y genera, en consecuencia, una gran variedad de residuos. (Herdoíza, 2010).

Cualquier proceso de transformación, separación o purificación, puede ser dividido en lo que la ingeniería denomina operaciones unitarias; las cuales se insertan en diferentes procesos industriales manteniendo sus principios básicos, aunque varíe en cada proceso, su dinámica y la corriente de materiales. La caracterización de las operaciones unitarias permite entender la lógica de generación de residuos de manera integrada a los procesos industriales. (Márquez, 1990).

Dintrans y Bastidas (1991) señalan que toda acción que se desarrolle en nuestro planeta, tendiente a la explotación de algún recurso natural, traerá consigo irremediablemente una alteración del ecosistema involucrado. Lo importante es tener una conciencia ecológica, de modo de lograr que estos efectos sean lo menos perjudiciales posibles, tomando las medidas preventivas y mitigadoras correspondientes. Siguiendo la misma línea, el Centro de Investigación Minero y Metalúrgico de Chile (CIMM, 2005) menciona que es necesario hacer referencia a la imagen negativa que posee

la comunidad con respecto a la minería, actividad que es considerada como un generador de impactos, la mayoría de las veces perjudiciales, hacia el medio ambiente y la salud de las personas.

La experiencia a nivel mundial permite visualizar que la producción de residuos es un fenómeno inherente al desarrollo, producto del aumento de los niveles de vida con el consiguiente aumento del consumo de una mayor variedad de bienes. Por otra parte, queda claro que el crecimiento incontrolado y la inadecuada disposición sin tratamiento de los residuos, son una característica propia e indeseable de la actividad minera, provocando la contaminación de aguas superficiales o subterráneas. Por esta razón la implementación de un sistema integrado de gestión de residuos (relaves), permitirá minimizar la percolación de residuos hacia el medio circundante. (Herdoíza, 2010).

Los relaves son los productos residuales de la industria minera. Su deposición en sitios estratégicos aumenta el costo de producción, y consecuentemente, es conveniente conseguir que dicha deposición sea lo más económica posible. Este requerimiento conduce a desarrollar el método de construcción de relaveras aguas arriba, el cual fue el método estándar alrededor del año 1950. Con el desarrollo de la ingeniería en los años 60, se reconoció la existencia de debilidades y riesgos del método de construcción de relaveras aguas arriba, y se añadió un diseño de bancos que fortalezca

las estructuras, así como zonas de transición y filtros. (Davies & Lighthall, 2002).

Durante los últimos treinta años, el cambio más importante en el diseño de relaveras ha sido el reconocimiento de riesgos geotécnicos a largo plazo, particularmente la afectación del drenaje ácido y la lixiviación de metales pesados. Hoy en día la caracterización geotécnica es uno de los aspectos más importantes de la planificación en la deposición de relaves. (Davies & Lighthall, 2002).

La deposición y administración de los residuos mineros es un campo en constante evolución. Un incremento de la conciencia social referente a los riesgos y las responsabilidades asociadas con la existencia permanente de las presas de relave han delineado una estructura conceptual dentro de la cual todos los accionistas pertenecientes a la empresa minera tienen que trabajar en conjunto para asegurar la seguridad de las relaveras, desde su inicio hasta el final. (Hamade, 2013).

Todas las empresas mineras que poseen plantas de beneficio aspiran tener presas de relave en las cuales puedan almacenar sus residuos de manera segura a lo largo de la vida del proyecto. Desafortunadamente, algunas fallan, y en grandes proporciones. La ICOLD (International Commission of Large Dams), en conjunto con la USCOLD (United States Commission of

Large Dams) y la UNEP (United States Environment Programme) realizaron un estudio a nivel mundial sobre la tasa de fallas que presentan las presas de relaves que dieron como resultado consecuencias catastróficas ambientales y socioeconómicas. (Hamade, 2013).

La figura 1 muestra el número de fallas de las presas de relave en función del motivo de la falla. De la figura, se evidencia que la inestabilidad de taludes es la principal causa de incidentes seguida de desbordamiento por sismos y filtraciones. (Hamade, 2013).

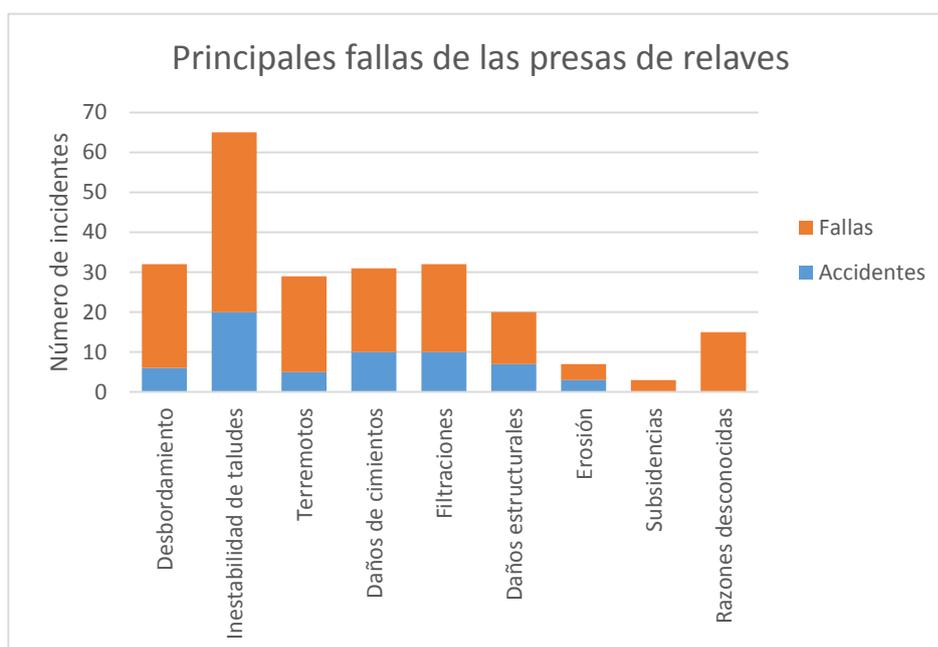


Figura 1. Principales fallas de las presas de relaves  
Fuente: Hamade, Geotechnical design of Tailings Dams, 2013

Países como Canadá han considerado de suma importancia exigir la correcta construcción de sus presas de relave para evitar catástrofes medioambientales, para esto han elaborado guías que contienen normas técnicas de construcción, con la finalidad de fijar estándares que certifiquen la seguridad de estas infraestructuras. (Hamade, 2013). Ecuador no posee ninguna normativa de construcción de relaveras, siendo un reto a futuro proponer un sistema que exija a los titulares mineros la correcta realización de sus embalses de relaves.

El cantón Camilo Ponce Enríquez es un distrito minero importante a nivel nacional, las concesiones mineras pertenecientes a esta zona se dedican netamente a la explotación de minerales polimetálicos, entre los más importantes se destacan el oro y la plata. El material bruto extraído de la mina es procesado física y químicamente, para obtener el metal de interés que será posteriormente vendido.

La planta de beneficio de La López, perteneciente a la empresa ORENAS S.A., recopila el material extraído de la mina "Jerusalén", de la misma empresa, y aplica el tratamiento físico que consiste en la trituración y molienda, para posteriormente aplicar el proceso de flotación, como parte de la preparación de la mena antes de realizar la cianuración, proceso del cual se obtiene el oro libre.

Los relaves de cianuración provienen del uso del cianuro como reactivo para la recuperación de metales de interés como el oro, son de naturaleza sólida – líquida y los principales problemas que presentan son el alto contenido de sulfatos de diversos metales pesados, y la presencia de cianuro; ambos son causantes de daños a la salud humana y ambiental.

Debido a la alta toxicidad de los relaves provenientes de la planta de procesamiento “La López” se construyó hace 30 años una relavera, destinada a almacenar este componente tóxico a fin de evitar la contaminación del medio circundante.

En la actualidad la relavera perteneciente a la planta de beneficio “La López” se encuentra saturada al alcanzar su máxima capacidad y no está en condiciones de seguir almacenando relaves. El espacio físico de la concesión minera no permite la construcción de una nueva relavera, y se ha optado por ampliar la capacidad de la relavera existente, al proponer la construcción ascendente de muro de contención.

Para efectuar esta propuesta se necesita material que actúe como constituyente del muro, y que reúna las características geomecánicas necesarias para que la infraestructura perdure a través del tiempo. Se pretende emplear las arenas provenientes del proceso de lixiviación y

cianuración como componentes del muro, a fin de economizar costos, para lo cual se realizarán ensayos que determinen su uso.

Se establece la siguiente pregunta clave: ¿Las arenas de relave de la planta de procesamiento de La López, cumplen las condiciones geomecánicas, geotécnicas y de estabilidad necesarias para la construcción del muro de la ampliación de la relavera?

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Proponer el diseño de la ampliación de la relavera para la planta de beneficio “La López”, mediante el uso de las arenas de relave previo a su caracterización geotécnica, para garantizar el correcto acopio de los relaves proporcionando seguridad técnica y ambiental.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar las arenas provenientes de la planta de beneficio mediante ensayos geotécnicos, para elegir el

material ideal en el diseño de la ampliación de la presa de relaves.

- Evaluar las condiciones de estabilidad del talud del dique mediante el cálculo del factor de seguridad utilizando el software Slope W/ de GeoStudio.
- Realizar la propuesta de diseño de la ampliación de la presa de relaves de acuerdo a las características técnicas requeridas.

#### **1.4. Metodología general**

La metodología general para el desarrollo del presente proyecto se ha dividido en tres componentes: Recopilación bibliográfica y trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de oficina. Se describe a continuación cada uno de los componentes.

##### **1. Recopilación bibliográfica y trabajo de campo**

Se efectuó la recopilación y análisis de información bibliográfica; bases de datos, topografía e información de interés facilitada por la empresa ORENAS S.A. Además, se consultaron mapas geomorfológicos,

geológicos, y otros documentos de interés de dominio público realizados por entidades gubernamentales (IGM, INIGEMM).

Posteriormente se realizó la visita a las instalaciones de la planta de tratamiento, en la cual se pudo identificar las condiciones actuales de la relavera.

Se tomaron muestras por duplicado de las arenas provenientes de los procesos de lixiviación de la planta de beneficio “La López”, mediante un muestreo aleatorio, para su posterior análisis en el laboratorio.

## 2. Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio consistió en la realización de ensayos de granulometría, gravedad específica, permeabilidad, proctor standard y corte directo, a fin de obtener las características geomecánicas de las arenas.

## 3. Trabajo de oficina

Dentro de este componente se analizaron los resultados de los ensayos efectuados en el laboratorio de suelos, como insumo para definir los

parámetros de diseño que permitan tomar decisiones referentes al diseño de la ampliación de la relavera.

A partir del levantamiento topográfico realizado, se definió la geometría actual de la relavera. Se definieron las regiones y materiales constituyentes de la relavera actual y de la ampliación. El diseño se realizó en el software AutoCAD Civil 3d y en el software Slope W/ de GeoStudio, donde se configuraron los parámetros geotécnicos del talud y se realizó el modelo final que constituye la propuesta.

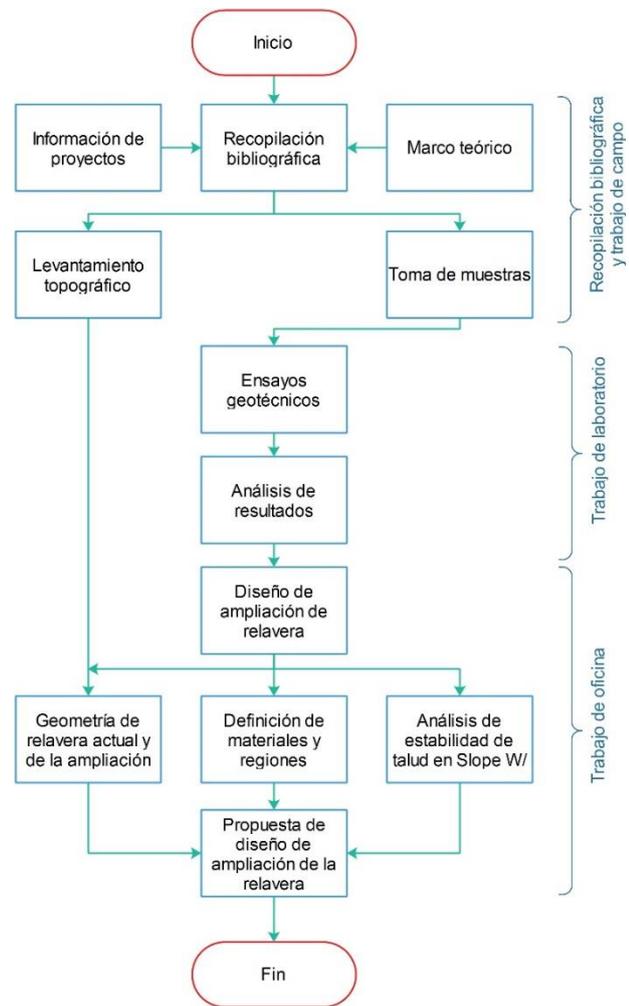


Figura 2. Metodología empleada en el desarrollo del proyecto

# **CAPÍTULO 2**

## **2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **2.1. Datos geográficos de la zona de estudio**

La zona de estudio se ubica a 1 Km de la comunidad “La López”, perteneciente a la parroquia del mismo nombre dentro del cantón Camilo Ponce Enríquez, al sur occidente de la provincia del Azuay.

Se puede acceder por vía terrestre, por la carretera panamericana Guayaquil – Machala. Se realiza el ingreso a la altura de la comunidad “La López”, a través de un camino asfaltado.

### MAPA DE UBICACIÓN DE LA RELAVERA DE LA PLANTA DE BENEFICIO LA LÓPEZ

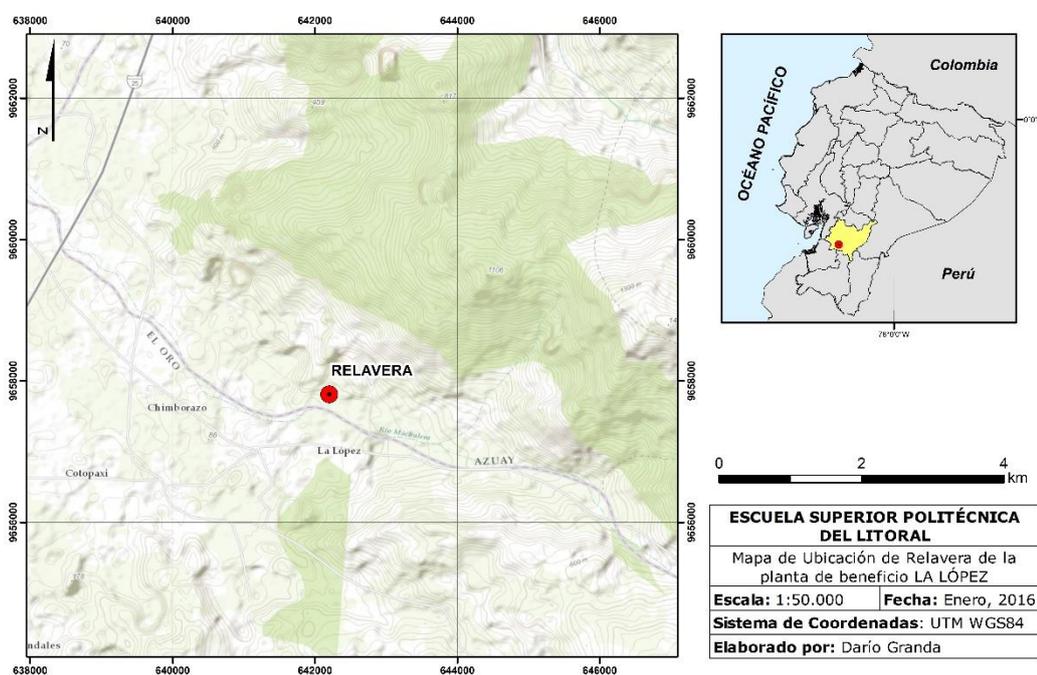


Figura 3. Mapa de ubicación de la zona de estudio  
Fuente y elaboración: Darío Granda, 2016

## 2.2. Datos ecológicos de la zona de estudio

### 2.2.1. Clima

Según lo establecido por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAHMI), el cantón Ponce Enríquez se encuentra en una región subtropical, que posee temperaturas entre 22 °C y 30 °C. Las temperaturas más bajas se manifiestan entre el período de agosto y noviembre y las temperaturas más altas entre diciembre y julio.

La precipitación anual promedio de la zona es de 1455.1 mm. La época lluviosa comprende los meses de Enero a Julio, mientras que la época seca abarca los meses de Agosto a Diciembre. (INAHMI, 2011).

### **2.2.2. Hidrología**

Los ríos Guanache, Siete y Villa circundan el cantón Camilo Ponce Enríquez. En la cordillera suroccidental nacen los ríos Fermín y Nueve de Octubre, cuya desembocadura se ubica en el Km 15 del río Siete, que posee una longitud 30 Km y desemboca en el estrecho de Jambelí, siendo el medio de transporte de aguas residuales más importante del cantón.

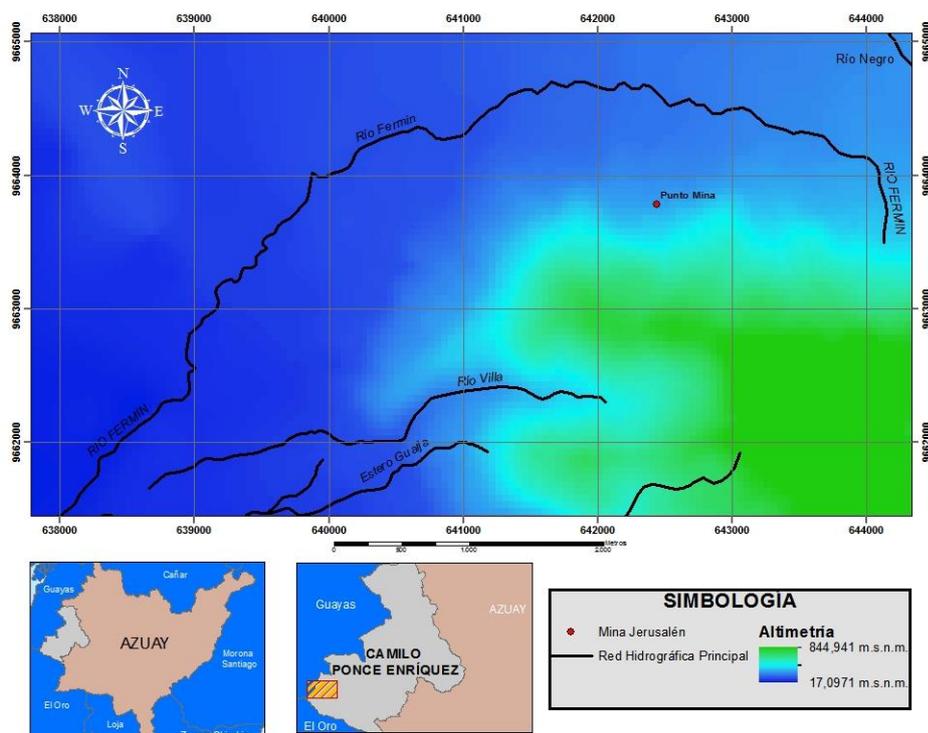


Figura 4. Mapa de ubicación de ríos de la zona de estudio  
Fuente y elaboración: Borja y Moreno, 2015.

### 2.3. Datos socioeconómicos de la zona de estudio

Según el INEC, el cantón Camilo Ponce Enríquez posee un total de 21998 pobladores, de los cuales 12211 (55.51%) son hombres y 9787 (44.49%) son mujeres. La tasa de analfabetismo del cantón alcanza el 7.3%. La incidencia de pobreza alcanza el 56.4% de la población, y el ingreso promedio se sitúa en 85 dólares mensuales.

El PEA (Población económicamente activa) según el INEC en el Censo de población y vivienda del año 2010, alcanza el 58.9% del total de la población del cantón. Las principales actividades a las que se dedican se encuentran detalladas en la figura 5, destacando la minería como actividad principal.

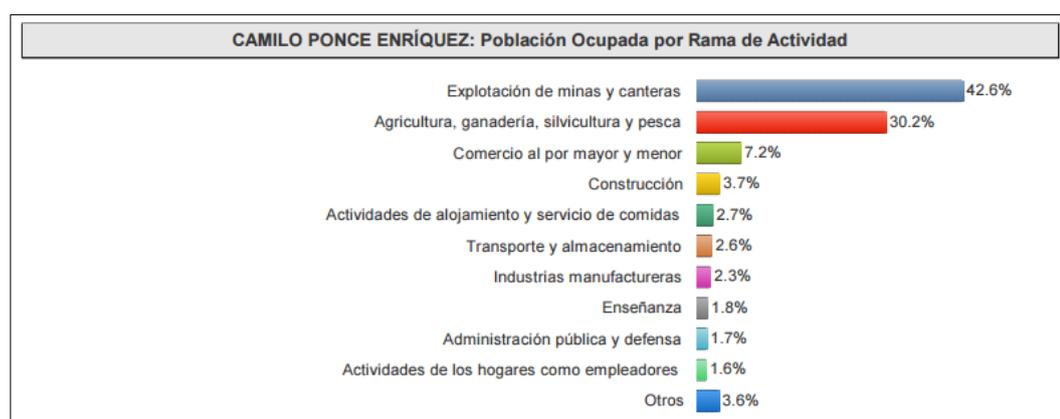


Figura 5. Población ocupada por rama de actividad del cantón Camilo Ponce Enríquez  
Fuente: INEC – Censo de Población y Vivienda 2010

## 2.4. Geología de la zona de estudio

La geología de la zona de interés para un mejor entendimiento se ha dividido en geología regional y geología local.

### 2.4.1. Geología regional

El cantón Camilo Ponce Enríquez se encuentra ubicado en la cordillera occidental dentro del terreno de Chaucha, que en conjunto con otras áreas

por sus similitudes se encuentran dentro del Distrito Azuay que abarca la anchura de la Cordillera Occidental desde el terreno Loja, al este de la falla de Baños hasta la llanura costera del Golfo de Guayaquil en el Oeste. (Vega, 2013)

Su declinación es en cierta medida arbitraria pero ocupa casi la totalidad del grupo Saraguro al sur, al oeste 79° y la ciudad de Cuenca. El límite sur del distrito fue delimitado por límites fallados del Complejo Metamórfico de El Oro, y los límites norte escogidos para abarcar todos los afloramientos de la cuenca sedimentaria, la masa principal del batolito de Chaucha y el grupo asociado del campo de depósitos del campo mineral de Molleturo. (Vega, 2013).

El origen geológico del Distrito Azuay data del Paleozoico – Triásico del Cratón de Guayana (Escudo Brasileño), que fueron acrecionados durante el Cretáceo y cuya evolución se rige geológicamente por su sistema de fallas inversas regionales y cabalgamientos, que a su vez delimitan a los diferentes terrenos, durante el Cenozoico estuvo dominado por magmatismo calco – alcalino y sedimentación ocupando un 80% de los afloramientos. (Vega, 2013).

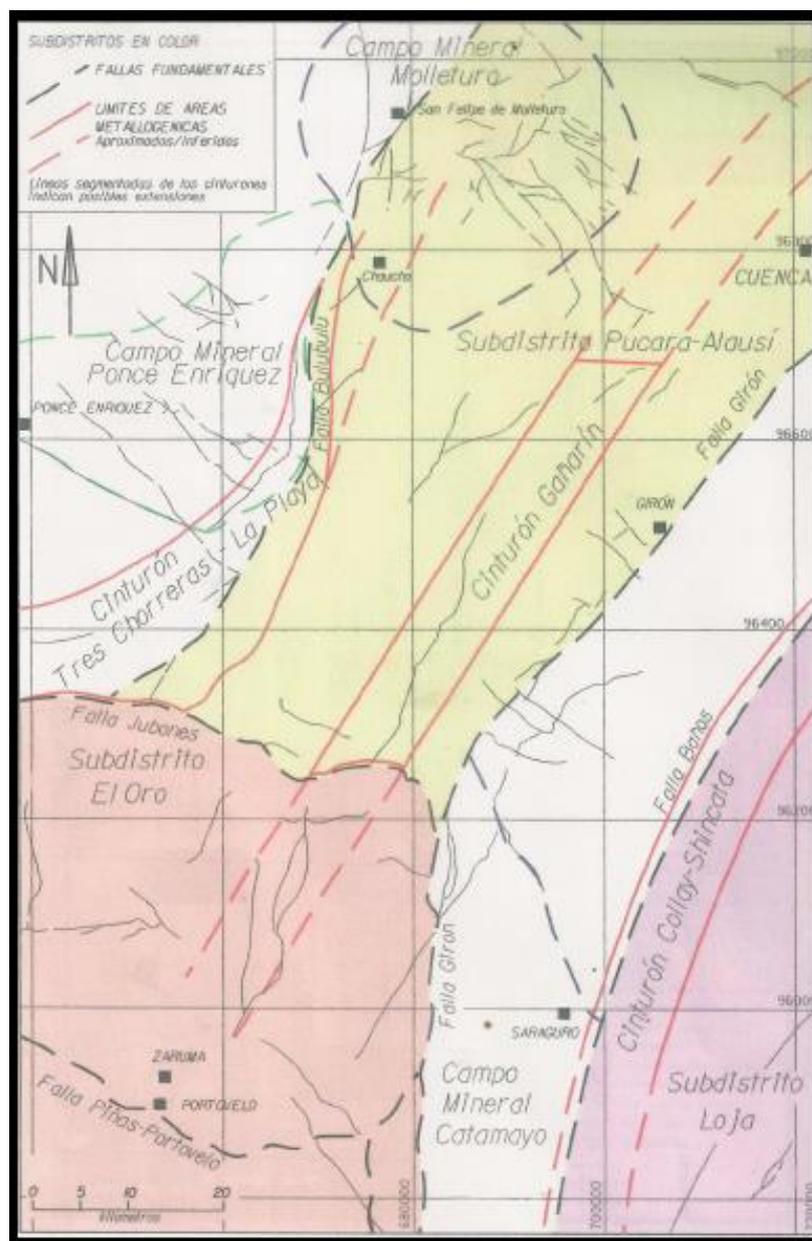


Figura 6. Mapa de subdivisiones metal tectónica del distrito Azuay  
Fuente y elaboración: Prodeminca. (2000). Evaluación de distritos mineros en el Ecuador. Vol. 4

### **2.4.2. Geología local**

El Campo Mineral de Ponce Enríquez, situado dentro del Subdistrito Máchala- Naranjal, es conocido por sus depósitos de Cu-Au-Mo en pórfidos y en vetas, brechas y stockworks epi-mesotermales desarrollados dentro de las rocas de caja volcánicas y que están espacialmente relacionados con pórfidos. (Borja & Moreno, 2015).

El material proviene del sector meridional del campo mineral denominado Bella Rica. Este sector está delimitado en el lado S por la Falla Margarita y hacia el S-E está recubierto por volcánicos del Grupo Saraguro (Formación La Trancas y tobas dacíticas no diferenciadas). Este sector está caracterizado por el centro subvolcánico mineralizado de Gaby-Papa Grande y tiene la mayor concentración de trabajos mineros. (Vega, 2013).

### **2.5. Datos de la relavera actual**

Se entrevistó al personal a cargo de la relavera, y según los datos proporcionados se conoce que relavera actual fue construida sobre el lecho del río, el cual fue rellenado con relaves antiguos y suelo de los alrededores, para dejar el nivel freático por debajo de la piscina de relaves y evitar problemas de infiltraciones.

La relavera construida posee un talud de inclinación 1:2 y profundidad de 12 metros; se colocaron capas de arena, grava, arcilla en la base de la piscina, y posteriormente se colocó una geomembrana para aislar el material de la piscina del suelo circundante.

El vertido de los relaves se lo realiza mediante un hidrociclón, utilizado para separar por granulometría la fracción gruesa de la fracción fina. La fracción fina posee alto contenido de agua, y se deposita de tal forma que se acumule en el centro de la piscina, mientras que la fracción gruesa en forma de pulpa forma parte del muro.

# **CAPÍTULO 3**

## **3. MARCO TEÓRICO**

### **3.1. Generalidades**

#### **3.1.1. Relaves**

Son residuos sólidos correspondientes 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. (Ramírez, 2007).

### 3.1.2. Depósito de relaves

Un depósito de relaves es una obra que se construye para contener en forma segura los relaves provenientes de una planta de beneficio de minerales, principalmente por flotación. Los relaves están compuestos por material molido y agua con reactivos. (Sernageomin, 2003).



Figura 7. Vista panorámica de un depósito de relaves  
Fuente: Calabrán (2009).

## 3.2. Métodos constructivos de depósitos de relaves

### 3.2.1. Método aguas arriba

En este método se construye una represa aguas abajo. Es importante que la represa inicial sea lo suficientemente permeable al paso del agua de

infiltración y que la porción aguas debajo de la represa sea diseñada para resistir los poros de agua y aire retenido. (Ordoñez, 1984).

Los relaves son descargados hacia la parte superior del dique de arranque usando hidrociclones, separando la parte fina de la gruesa. Conforme el dique va creciendo, la línea central va cambiando hacia aguas arriba, ya que el extremo aguas debajo de la nueva etapa es apoyado sobre el dique anterior y la porción aguas arriba es ubicada sobre los relaves finos. (Guamán, 2009).

Los relaves finos poseen baja resistencia al corte, conforme la altura del depósito aumenta, la superficie potencial de falla se hace más grande. Es decir, la estabilidad física de estos diques disminuye conforme aumenta la altura. (Ordoñez, 1984).

### **3.2.2. Método aguas abajo**

En el método de aguas abajo se requiere la construcción de un dique de arranque, pero contrastando con el método anterior, se requiere que la presa inicial sea impermeable a la menor infiltración, por lo que se la construye con material de préstamo debidamente compactado. Cada etapa nueva del dique es apoyada en la parte superior porción aguas abajo del dique anterior. (Ordoñez, 1984).

Antes de la extensión aguas abajo del dique, se deberá preparar una cama impermeable de drenaje de por lo menos de 0.90 m de espesor o drenaje alternativo con la finalidad de reducir la formación de poros de agua, los cuales reducen el esfuerzo cortante. Para depósitos superiores a 15 m se recomienda compactar la porción aguas abajo, extendida con el crecimiento del muro. (Ordoñez, 1984).

El talud aguas arriba del dique debe ser impermeabilizado con el fin de evitar infiltraciones que disminuyan el esfuerzo cortante del suelo; esto se lo puede realizar ya sea colocando una capa de suelo impermeable o bien recubriendo el talud con geomalla. (Ordoñez, 1984).

### **3.2.3. Método línea central**

Al igual que los métodos anteriores, se inicia con un dique de arranque, la presa se eleva extendiendo y compactando el relave grueso en la parte superior, sobre las caras aguas arriba y aguas abajo. Los relaves ubicados en el talud aguas abajo deben ir siempre compactados, ya que uno de los criterios para lograr la estabilidad de presas de tierra es desarrollar la máxima estabilidad en el extremo y áreas del talud aguas abajo. (Ordoñez, 1984).

### 3.3. Características básicas de los suelos

#### 3.3.1. Densidad

Se denomina densidad a la relación entre la masa de una muestra de suelo en su estado natural, y el volumen que ocupa.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del suelo

$m$ : Masa del suelo

$v$ : Volumen del suelo

#### 3.3.2. Humedad

Se define como densidad de una muestra a la relación expresada en porcentaje de la masa de agua contenida en la muestra, previamente evaporada a 110 °C y la masa de la muestra seca.

$$H = \frac{m_h}{m_s} * 100$$

Donde:

$H$ : Porcentaje de humedad

$m_h$ : Masa de agua de la muestra

$m_s$ : Masa de muestra seca

### 3.3.3. Porosidad

La porosidad de una muestra se define como el volumen de poros expresado en tanto por ciento respecto al volumen total de la muestra.

$$n = \frac{V_p}{V} * 100$$

Donde:

$n$ : Porosidad

$V_p$ : Volumen de poros

$V$ : Masa de muestra seca

### 3.3.4. Coeficiente de uniformidad

Definido por Hazen, es un valor que sirve para medir y calificar la distribución de tamaños de un suelo. Para materiales como grava y arena, se denominan bien distribuidos si poseen un coeficiente de uniformidad mayor a 6.

El coeficiente de uniformidad se define como:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

### 3.3.5. Coeficiente de curvatura

El coeficiente de curvatura permite diferenciar entre suelos seleccionados (o bien graduados) y pobremente seleccionados (o mal graduados), cuya consideración conduce a una definición más precisa del suelo, y que se utiliza en el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (USCS). Se consideran suelos bien graduados aquellos que poseen un coeficiente de curvatura entre 1 y 3.

El coeficiente de curvatura se define como:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

### 3.3.6. Cohesión

La cohesión se define como la propiedad que da tenacidad y dureza a un suelo proporcionando resistencia a su separación. Esta propiedad física de atracción, es de importancia en la dinámica del suelo por que origina la tenacidad como forma de resistencia a la separación de sus elementos o a la penetración de las herramientas de corte.

La cohesión entre las partículas del suelo se debe a dos fenómenos que predominan en distinto grado según el contenido de humedad. En el suelo seco se establece una atracción eléctrica entre las partículas, formando lo que se denomina cohesión molecular. A medida que las partículas se humedecen, el agua en forma de película, tiende a separar a las partículas vecinas.

En aumentos mayores de humedad se establecen nuevas atracciones, ahora debidas a la tensión superficial de las partículas mojadas por el agua. Esta nueva atracción entre los componentes del suelo crece con la humedad hasta un máximo, a partir del cual el suelo tiende a convertirse en líquido, desapareciendo las fuerzas de cohesión. Para diferenciarla de la cohesión

molecular, a esta forma de atracción de las partículas, se le da el nombre de cohesión superficial o adherencia entre las partículas. (Villa, 1998).

### **3.3.7. Ángulo de fricción interna**

El ángulo de fricción interna es la propiedad de los suelos que se relaciona con el ángulo máximo posible sobre el cual la pendiente de dicho material se encuentra en reposo sin existir subsidencias.

### **3.3.8. Resistencia al corte**

Al modificar el estado tensional del suelo se producen deformaciones que pueden originar su rotura. (González de Vallejo L., 2004).

La resistencia al corte de un suelo es la propiedad que posee de soportar cargas y conservar su estabilidad.

El criterio de rotura más conocido es el propuesto por Coulomb, que establece que:

$$\tau = c + \sigma_n * \tan \phi$$

Donde:

$\tau$ : Resistencia al corte

$c$ : Cohesión

$\phi$ : Ángulo de fricción interna

### **3.4. Ensayos realizados a las arenas de relave**

#### **3.4.1. Granulometría**

El propósito del análisis granulométrico es clasificar el material en función del tamaño de partícula y determinar el tipo de suelo al que corresponde la muestra. El análisis se lo puede realizar por vía húmeda o seca, mediante el uso de tamices de diferente tamaño; y también se puede realizar utilizando la muestra íntegra o una fracción de la misma.

#### **3.4.2. Gravedad específica**

La gravedad específica de la fase sólida de un suelo se define como la relación entre el peso unitario de sus partículas y el peso específico del agua.

La forma de calcular la gravedad específica varía según el tipo de suelo a analizar y el tamaño de las partículas. El valor de la gravedad específica es esencial para el cálculo de la relación de vacíos en un suelo, en análisis hidrométricos y para graficar la recta de saturación máxima en el ensayo proctor de compactación. (Juárez Badillo, 2005)

### **3.4.3. Ensayo proctor de compactación**

Es uno de los ensayos más utilizados en el estudio de suelos para la construcción de presas de relaves y terraplenes. Se conoce por compactación de suelos el aumento de su peso específico seco, a través de métodos mecánicos. Su importancia radica en el incremento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtiene. (Terreros de Varela C., 1995).

Este ensayo se utiliza comúnmente para conocer la densidad seca máxima de un material y la humedad óptima con la que se alcanza esta densidad. Se utiliza un recipiente de un litro, el cual se llena con tres capas de material a evaluar, y se golpea un número determinado de veces para compactarlo utilizando un martillo, aplicando siempre la misma energía. Existe el método

standard y el modificado, que difieren en el peso del martillo y la altura de caída.

Las muestras a utilizarse primero se desecan, para posteriormente humedecerlas con diferente contenido de agua. Con cinco o seis ensayos se puede elaborar una curva densidad seca – humedad, obteniendo el valor máximo que representa las condiciones óptimas de compactación, como se muestra en la figura 8.

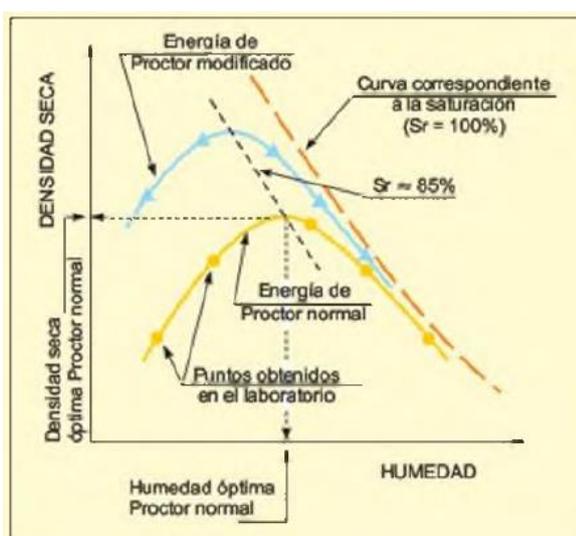


Figura 8. Curva densidad seca máxima vs humedad óptima del ensayo proctor  
Fuente y elaboración: González de Vallejo, L., Ingeniería Geológica, 2004.

Esta condición sería la ideal para el diseño de la relavera, al suponer la máxima concentración de sólidos posible y las mejores condiciones de estabilidad para el material compactado. (González de Vallejo L., 2004).

#### 3.4.4. Ensayo de permeabilidad

La permeabilidad es la propiedad que tiene un suelo de dejar pasar el agua a través de él. Mediante este ensayo se mide el coeficiente de permeabilidad en suelos relativamente impermeables, se recomienda que las muestras sean inalteradas.

El coeficiente de permeabilidad está dado por la fórmula:

$$K = \frac{L * a}{A * t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Donde:

t: tiempo de prueba

a: Área del tubo vertical de carga

A: Área de la muestra

L: Longitud

$h_1$ : Carga hidráulica al principio de la prueba

$h_2$ : Carga hidráulica al final de la prueba

El coeficiente de permeabilidad depende del tamaño y forma de los granos de un suelo, de su relación de vacíos, de su contenido de materia orgánica y de la temperatura. (Terrerros de Varela C., 1995).

En el laboratorio se realizan pruebas utilizando aparatos denominados permeámetros, que funcionan en carga constante o variable.

#### **3.4.5. Ensayo de corte directo**

El ensayo de corte directo tiene como propósito determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo, sometida a deformaciones que simulen las cargas y tensiones que existan en el terreno como resultado de la aplicación de una carga.

Este ensayo se realiza usando el aparato de corte directo, siendo el más común una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. El ensayo produce la falla a través de un determinado plano, sobre el cual actúan el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante.

Estos esfuerzos se determinan al dividir ambas fuerzas por el área de corte, y deben obedecer la ecuación de coulomb, que depende de la cohesión y la resistencia al corte del suelo.

### **3.5. Slope W/**

Es un software creado para analizar problemas de estabilidad de taludes utilizado en geotecnia, ingeniería civil y minería.

Inicialmente se debe definir la geometría y las regiones que componen un determinado sistema. Los datos pueden ingresarse al software Slope W/ manualmente o pueden exportarse como archivos .dwf.

# **CAPÍTULO 4**

## **4. TRABAJO DE CAMPO Y LABORATORIO**

### **4.1. Trabajo de campo**

Esta sección describe las actividades de campo realizado en este proyecto, que consistió en el levantamiento topográfico a detalle de la presa de relaves y la toma de muestras de arena que componen la relavera.

#### **4.1.1. Topografía**

La cartografía base de libre acceso perteneciente al área de estudio proporcionada por el Instituto Geográfico Militar se encuentra restringida

actualmente, por lo que no se pudo acceder a la información mencionada anteriormente.

La empresa no cuenta con mapas topográficos a detalle, por lo tanto se optó por realizar un levantamiento topográfico de la relavera, que es la zona de interés donde se realizará el diseño de la ampliación de la relavera.

Se utilizó como equipo de medición la estación total, por la disponibilidad del equipo y por la alta precisión que posee. Aplicando el método de radiación se efectuó el levantamiento en las zonas donde hubo la posibilidad de tomar datos. La figura 9 indica el relieve de la relavera.



Figura 9. Topografía de la relavera perteneciente a la planta de procesamiento La López

La relavera presenta un suave relieve, la piscina de relaves que fue construida con una profundidad inicial de 12 metros se ha llenado en su totalidad, quedando a la misma cota del suelo.

#### 4.1.2. Muestreo

El material muestreado corresponde a arenas provenientes de la planta de tratamiento, producto del proceso de flotación (con sulfuro) o del proceso de cianuración (sin sulfuro), las cuales constituyen la presa de relave actual.

Para que la muestra sea representativa, se recogió 10 kilos de material por muestra, las cuales fueron colocadas en saquillos. Las muestras fueron tomadas en tres puntos diferentes según el tipo de arena, las cuales se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Muestreo

<b>Muestra</b>	<b>Tipo de arena</b>	<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>	<b>Número de muestras</b>
<b>1</b>	Arena gruesa con sulfuro	6422091	9657460	2
<b>2</b>	Arena gruesa sin sulfuro	642038	9657375	2
<b>3</b>	Arena fina con sulfuro	642052	9657390	2

## 4.2. Trabajo de laboratorio

Esta sección abarca los procedimientos utilizados para realizar los ensayos en el laboratorio, las normas protocolarias y los resultados de los ensayos. Se utilizó el Laboratorio de mecánica de suelos, materiales y rocas de la Facultad de Ingenierías en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral y el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Guayaquil.

Los ensayos realizados de acuerdo a las normal ASTM fueron los siguientes:

- Granulometría ASTM D-422
- Gravedad específica ASTM D-854
- Permeabilidad ASTM D-8054
- Compactación Proctor Standard ASTM D-1557
- Corte directo ASTM 3080

### 4.2.1. Análisis granulométrico

Existen dos tipos de arenas provenientes de la presa de relaves de la planta de procesamiento de La López: arena con sulfuros y arena sin sulfuros. Se analizó la granulometría de los dos tipos de muestras por separado, realizando el mismo procedimiento.

Inicialmente la muestra se secó en un horno a una temperatura de 105 °C aproximadamente, y se procedió a realizar el cuarteo de la muestra hasta obtener 400 gramos de material aproximadamente.

Se colocan los tamices sucesivamente, situando en la parte superior el tamiz con mayor abertura de malla y en la parte inferior el tamiz de menor abertura de malla. Se utilizaron los tamices N° 16, 20, 40, 60, 100, 120, 140, 200.

La muestra de arena se coloca en la parte superior de los tamices, y se agitan en conjunto horizontalmente, con movimientos rotativos y dando pequeños golpes. Se agitó durante 15 minutos aproximadamente.

Se registra el peso de la fracción de muestra retenida en cada uno de los tamices con la ayuda de una balanza, y se proceden a realizar los cálculos de las variables que intervienen en el análisis granulométrico.

#### **4.2.2. Ensayo de gravedad específica**

Previo a la realización del ensayo se realizó la curva de calibración del matraz, que consistió en graficar el peso del matraz a diferentes temperaturas.

Para iniciar el ensayo se introdujo la muestra de suelo en el matraz, a la cual se añadió agua y se mezcló hasta obtener una solución homogénea. Se continuó añadiendo agua y se procedió a desairear la solución.

Se aforó el matraz hasta conseguir que el nivel de agua llegue a la marca graduada, y se procedió a obtener el peso del matraz con la mezcla de agua y suelo.

La mezcla fue trasladada a una bandeja de peso conocido, y se procedió a pesar la bandeja con la mezcla en su interior. Se llevó la bandeja a la estufa y se evaporó hasta eliminar la fase líquida. Se pesó la bandeja y se obtuvo el peso seco del suelo.

La gravedad específica se calculó mediante la fórmula siguiente:

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} - W_{mws}}$$

Donde:

$W_s$ : Peso del matraz antes de agregar los sólidos

$W_{mws}$ : Peso del matraz + agua + muestra a temperatura actual

Wmw: Peso del matraz + agua + temperatura de la curva de calibración

Ws: Peso del suelo seco

Gs: Gravedad específica

#### **4.2.3. Ensayo de permeabilidad**

Se realizó la prueba con permeámetro de carga variable para arenas con sulfuro y sin sulfuro, consistió en medir la cantidad de agua que atraviesa la muestra mediante un tubo alimentador, en el que se observó la diferencia de nivel del agua. Al ejecutarse la prueba, se llenó con agua el tubo vertical del permeámetro, observándose el descenso a medida que el agua atraviesa la muestra.

Es vital que la temperatura del agua sea lo más constante posible mientras se realiza las lecturas, el agua a utilizar debe ser desairada.

#### **4.2.4. Ensayo proctor standard de compactación**

El ensayo de proctor standard determina la relación entre el contenido de agua y el peso específico de un suelo, normada por la ASTM (D648) y la AASHTO (T-99), su razón de ser es representar experimentalmente en el laboratorio los resultados que se podrían obtener en el campo con ensayos de compactación de suelos.

Se realizó el método A del ensayo proctor standard de compactación debido a que es la que mejor se ajusta a los requerimientos de diseño. El material previamente secado se dividió en cinco partes iguales. Se tomó una parte del material y se humedeció aplicando un volumen de agua determinado, hasta obtener una masa uniforme y éste se dividió en cuatro partes iguales. Cada una de las partes se añadió individualmente en el molde sobre el cual se realizó el ensayo, y con el martillo se procedió a compactar aplicando una cierta cantidad de golpes especificados.

Posterior a la compactación de todas las capas se retiró el material compactado, se pesó en la balanza y se determinó la densidad húmeda. Se realizó el mismo procedimiento para las demás partes de la muestra.

Se realizó el ensayo proctor standard método A, cuyas especificaciones se mencionan en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones ensayo proctor standard

<b>PROCTOR STANDARD AASHTO T – 99</b>				
Martillo 5,5 libras			Altura de caída 12”	
<b>Método</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Material	Pasa tamiz N° 4		Pasa tamiz ¾ “	
Molde usado	4”	6”	4”	6”
N° de capas	3	3	3	3
N° de golpes por capa	25	56	25	56
Energía de compactación (lb.pie / pie <sup>3</sup> )	12.375	12.317	12.375	12.317

#### 4.2.5. Ensayo de corte directo

Se realizó el ensayo de corte directo en el Laboratorio “Ing. Dr. Arnaldo Ruffilli”, perteneciente a la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil. Se analizaron muestras de arena con sulfuros y sin sulfuros previamente compactadas, con el porcentaje de humedad óptima que ofrece la densidad máxima posible del material, para simular las condiciones en las que el material se encontrará dispuesto en la relavera.

Se aplicaron cargas verticales de 4, 8 y 16 kilogramos en cada medición, en las que se midió el respectivo desplazamiento horizontal y la carga tangencial.

# **CAPÍTULO 5**

## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Esta sección comprende la presentación y análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se comparó las características de las arenas con sulfuro y sin sulfuro, y se determinaron los parámetros geotécnicos necesarios para iniciar el diseño de la ampliación de la relavera.

### **5.1. Análisis granulométrico**

El análisis granulométrico tiene como finalidad proporcionar la curva de distribución granulométrica del material analizado, en función de la cantidad de material pasante acumulado y de la abertura del tamiz. La figura 10 muestra la curva granulométrica de la arena con sulfuro

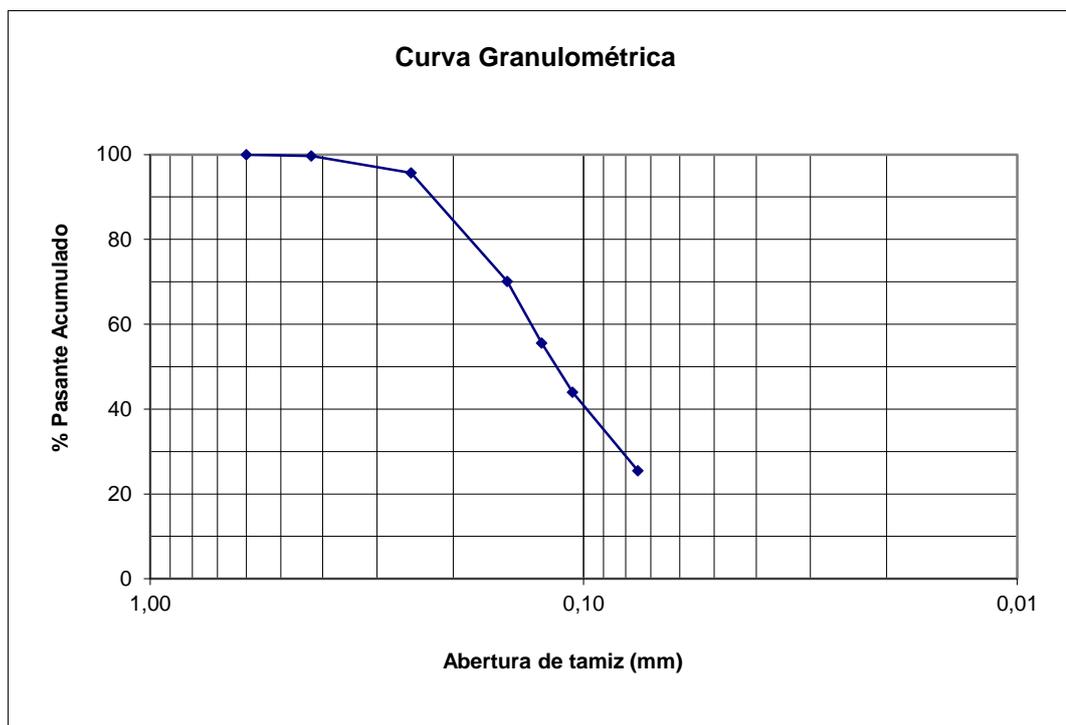


Figura 10. Curva granulométrica de muestra de arena con sulfuro

A partir de la curva granulométrica de la arena con sulfuro, se obtuvo el  $D_{60}$  cuyo valor es 0.13, el  $D_{30}$  con valor 0.08, y el  $D_{10}$  cuyo valor es 0.05. El coeficiente de uniformidad es de 2.6 y el coeficiente de curvatura es de 0.98.

Por otra parte, se obtuvo la curva granulométrica de la arena sin sulfuro, cuyo valor de  $D_{60}$  fue de 0.14, el  $D_{30}$  con valor 0.09, y el  $D_{10}$  cuyo valor es 0.05. El coeficiente de uniformidad es de 2.8 y el coeficiente de curvatura es de 1.16. La figura 11 muestra la curva granulométrica de la arena sin sulfuro

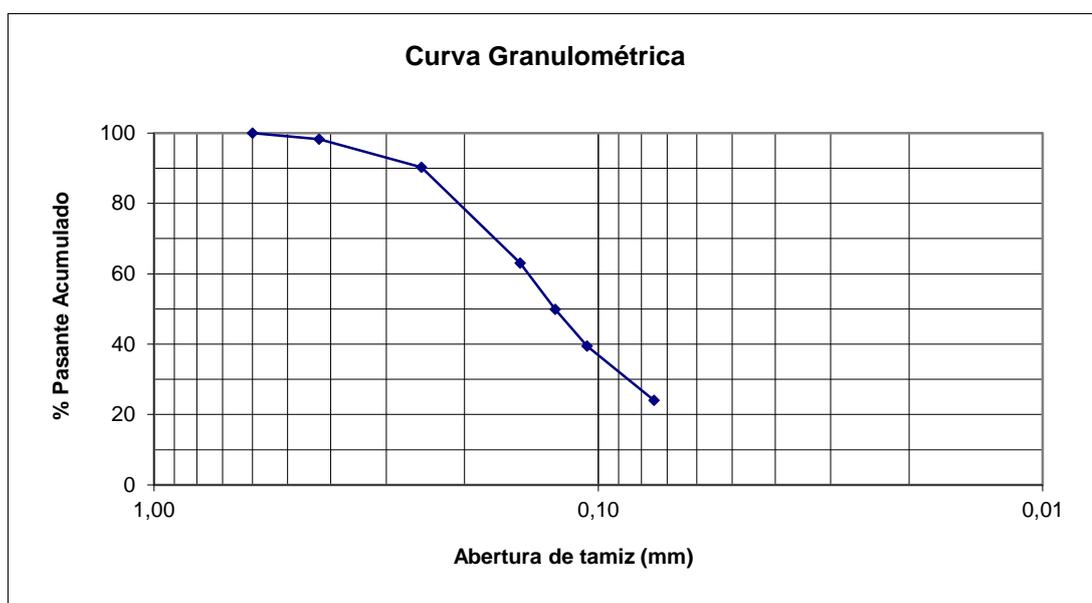


Figura 11. Curva granulométrica de muestra de arena sin sulfuro

## 5.2. Ensayo de gravedad específica

Se realizó el ensayo de gravedad específica para las arenas con sulfuros, utilizando tres matraces a una temperatura de 26°C, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 3. Datos de ensayo de gravedad específica – Arena con sulfuros

Matraz No.	4	7	5
$W_{mws}$	747.18	749.50	755.20
Temperatura	26.0 °C	26.0 °C	26.0 °C
$W_{mw}$	680.37	682.44	687.77
$W_{ms}$	284.42	285.50	291.03
$W_m$	183.32	185.35	190.83
$W_s = W_{ms} - W_m$	101.10	100.15	100.20
$W_s + W_{mw} + W_{mws}$	34.29	33.09	32.77
$G_s$	2.95	3.03	3.06

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} - W_{mws}}$$

$$G_s = 3.01$$

Se efectuó el mismo procedimiento para el cálculo de la gravedad específica para la muestra de arena sin sulfuro, utilizando los mismos matraces y las mismas condiciones de temperatura, obteniendo los resultados siguientes.

Tabla 4. Datos de ensayo de gravedad específica – Arena sin sulfuros

<b>Matraz No.</b>	4	7	5
<b>W<sub>mws</sub></b>	744.95	746.83	752.66
<b>Temperatura</b>	26.0 °C	26.0 °C	26.0 °C
<b>W<sub>mw</sub></b>	680.33	682.30	687.87
<b>W<sub>ms</sub></b>	283.45	285.42	290.92
<b>W<sub>m</sub></b>	183.37	185.43	190.96
<b>W<sub>s</sub> = W<sub>ms</sub> - W<sub>m</sub></b>	100.08	99.99	99.96
<b>W<sub>s</sub> + W<sub>mw</sub> + W<sub>mws</sub></b>	35.46	35.46	35.17
<b>G<sub>s</sub></b>	2.82	2.82	2.84

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} - W_{mws}}$$

$$G_s = 2.82$$

Los valores obtenidos de gravedad específica para ambos materiales permiten definir el tipo de material analizado, los resultados afirman que las

muestras se comportan como arena, independiente del contenido de sulfuro que presenten.

### 5.3. Ensayo de permeabilidad

El ensayo de permeabilidad permite definir la permeabilidad relativa de un determinado material, y se puede correlacionar dicho valor con el tipo de suelo típico.

Los resultados del ensayo se detallan en las tablas siguientes, en función del tipo de muestra, y tabla de los coeficientes de viscosidad puede ser revisada en el anexo 5 del presente documento.

Tabla 5. Parámetros iniciales del ensayo – Arena con sulfuro

<b>PARÁMETROS INICIALES DEL ENSAYO</b>	
Longitud del cilindro L	11.82 cm
Área de la muestra A	80.75 cm <sup>2</sup>
Volumen de la muestra V	954.47 cm <sup>3</sup>
Área del tubo capilar a	0.16 cm <sup>2</sup>

Tabla 6. Lecturas del nivel de agua – Arena con sulfuro

<b>LECTURAS DEL NIVEL DE AGUA</b>		
<b>Hora</b>	<b>Lectura</b>	<b>Temperatura</b>
0:00:00	57	26 °C
0:01:29	47	26 °C
0:03:44	37	26 °C
0:06:48	27	26 °C

Tabla 7. Resultados ensayo – Arena con sulfuro

<b>RESULTADOS DEL ENSAYO</b>	
Tiempo de prueba	408 segundos
h1	27 cm
h2	57 cm
<b>K<sub>20°C</sub></b>	<b>4.02 x 10<sup>-5</sup> cm/seg</b>

Tabla 8. Parámetros iniciales del ensayo – Arena sin sulfuro

<b>PARÁMETROS INICIALES DEL ENSAYO</b>	
Longitud del cilindro L	11.82 cm
Área de la muestra A	80.75 cm <sup>2</sup>
Volumen de la muestra V	954.47 cm <sup>3</sup>
Área del tubo capilar a	0.16 cm <sup>2</sup>

Tabla 9. Lecturas del nivel de agua – Arena sin sulfuro

<b>LECTURAS DEL NIVEL DE AGUA</b>		
<b>Hora</b>	<b>Lectura</b>	<b>Temperatura</b>
0:00:00	62	26 °C
0:04:03	52	26 °C
0:09:22	42	26 °C
0:16:47	32	26 °C

Tabla 10. Resultados ensayo – Arena sin sulfuro

<b>RESULTADOS DEL ENSAYO</b>	
Tiempo de prueba	1007 segundos
h1	32 cm
h2	62 cm
<b>K<sub>20°C</sub></b>	<b>1.40 x 10<sup>-5</sup> cm/seg</b>

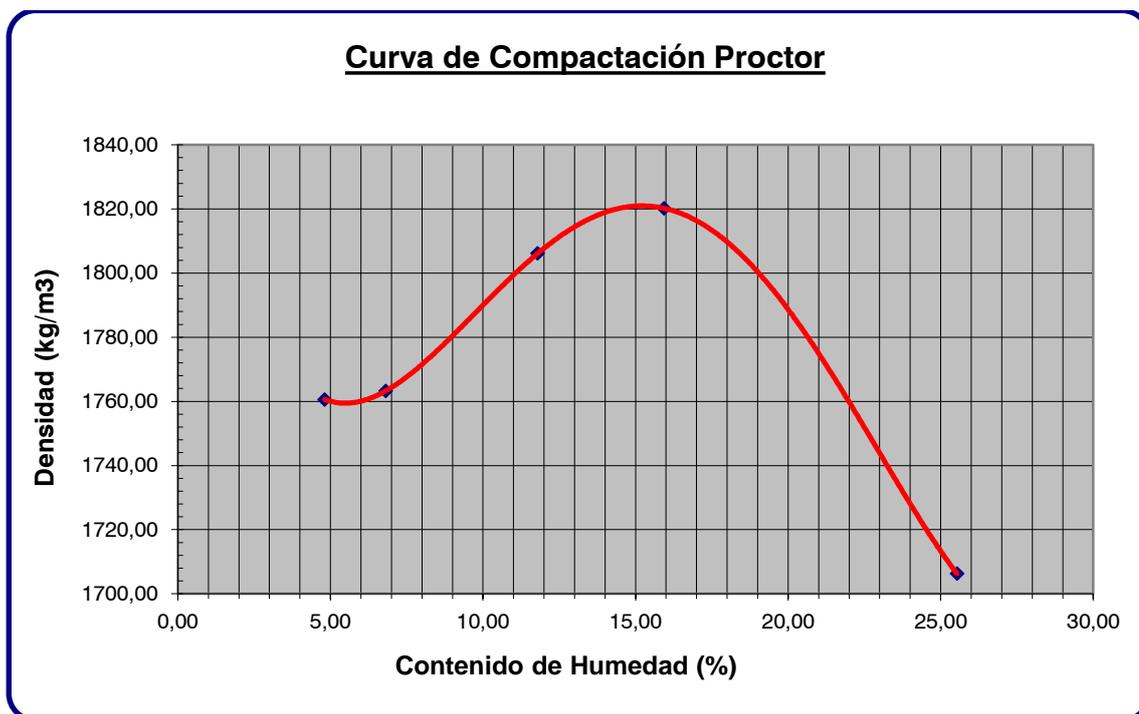
#### **5.4. Ensayo de compactación proctor standard**

A partir de los datos obtenidos del ensayo se elaboró la gráfica densidad seca vs contenido de humedad, de la cual se obtuvo el porcentaje de humedad con el que se alcanza la máxima densidad seca del material.

Los resultados del ensayo para arenas con sulfuro determinaron que con un porcentaje de humedad del 15.2% se obtuvo la densidad máxima de 1821.53 kg/m<sup>3</sup>, tal como indica la figura 12.

Tabla 11. Datos del ensayo proctor standard – Arena con sulfuros

<b>Muestra</b>	<b>Cantidad de Agua (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Contenido de Humedad (%)</b>	<b>Material Húmedo + Molde (kg)</b>	<b>Peso Seco de material (gr)</b>	<b>Densidad Seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>
1	150	4.81	3.74	1.742	1760.60
2	210	6.82	3.776	1.778	1763.30
3	360	11.79	3.904	1.906	1806.11
4	510	15.93	3.99	1.992	1820.22
5	810	25.53	4.02	2.022	1706.27



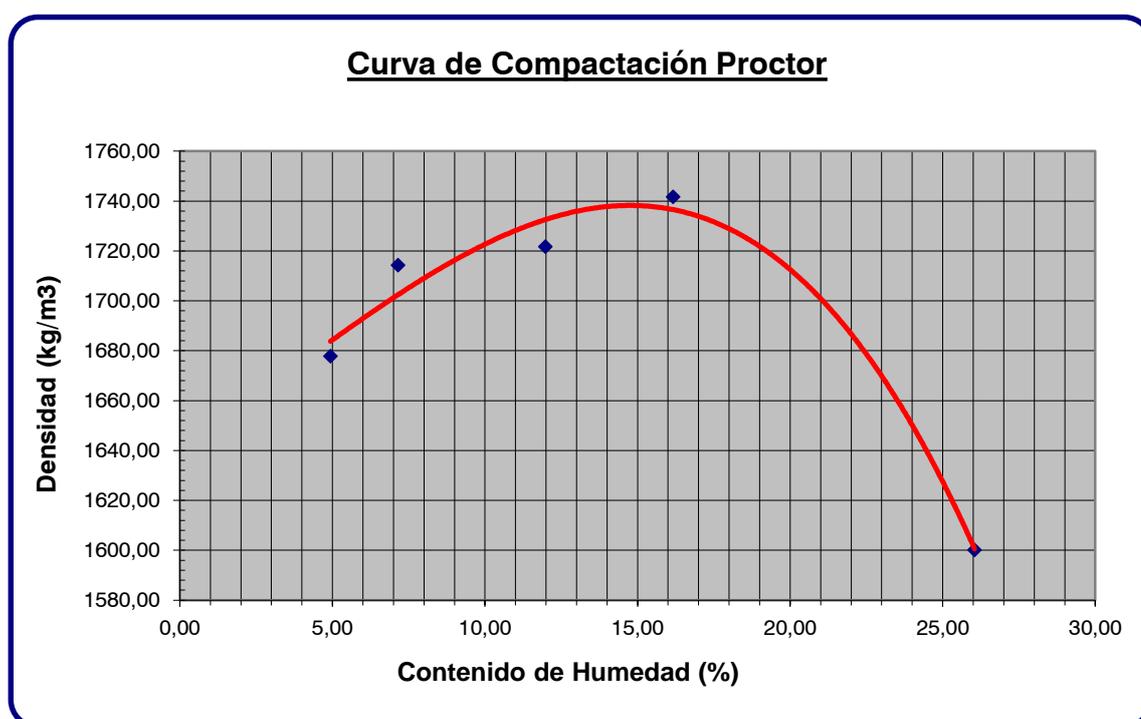
Humedad óptima	15.2 %
Densidad máxima	1821.53 kg/m <sup>3</sup>

Figura 12. Curva de compactación proctor standard de muestra de arena con sulfuro

De la misma manera se analizaron los datos del ensayo para arenas sin sulfuro, se elaboró la gráfica y se determinó que con un porcentaje de humedad del 15% se obtuvo la densidad máxima de 1738.29 kg/m<sup>3</sup>, tal como indica la figura 13.

Tabla 12. Datos del ensayo proctor standard – Arena sin sulfuros

Muestra	Cantidad de Agua (cm <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad (%)	Material Húmedo + Molde (kg)	Peso Seco de material (gr)	Densidad Seca (kg/m <sup>3</sup> )
1	150	4.93	3.66	1.662	1677.85
2	210	7.15	3.732	1.734	1714.35
3	360	11.98	3.818	1.82	1721.74
4	510	16.16	3.908	1.91	1741.76
5	810	26.05	3.902	1.904	1600.15



Humedad óptima	15.0 %
Densidad máxima	1738.29 kg/m <sup>3</sup>

Figura 13. Curva de compactación proctor standard de muestra de arena sin sulfuro

### 5.5. Ensayo de corte directo

A partir de los resultados obtenidos del ensayo se trazó la gráfica esfuerzo tangencial vs deformación, para conocer la deformación de la muestra cuando experimenta el máximo esfuerzo tangencial, tal como se muestra en las figuras siguientes, tanto para arenas con sulfuros como para arenas sin sulfuros.

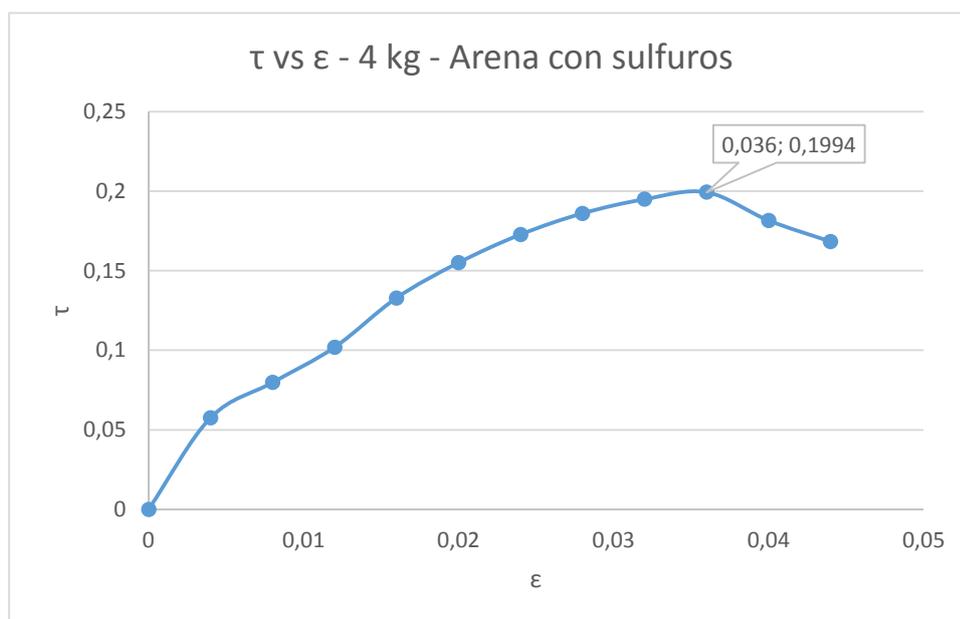
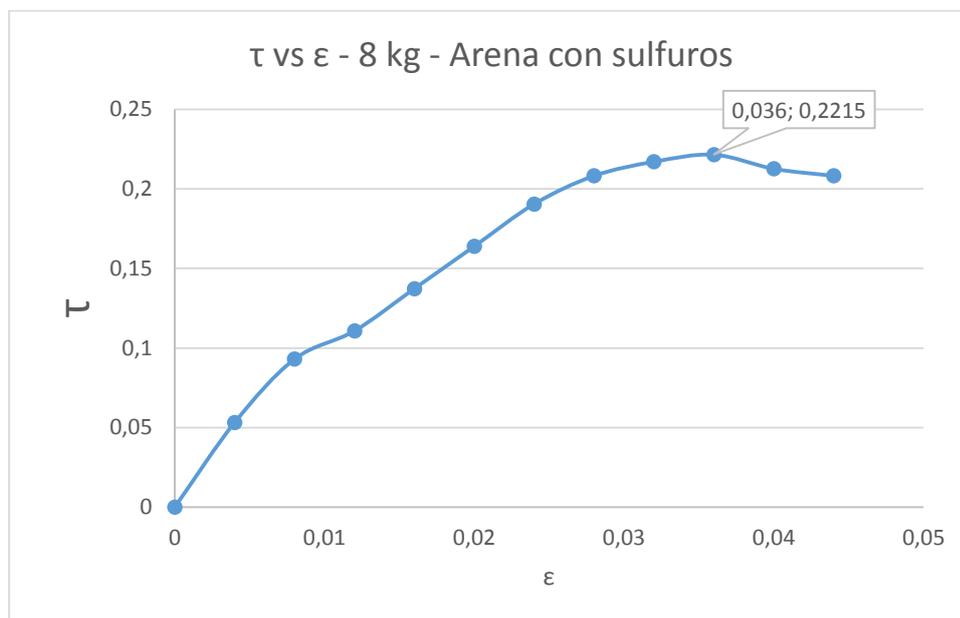
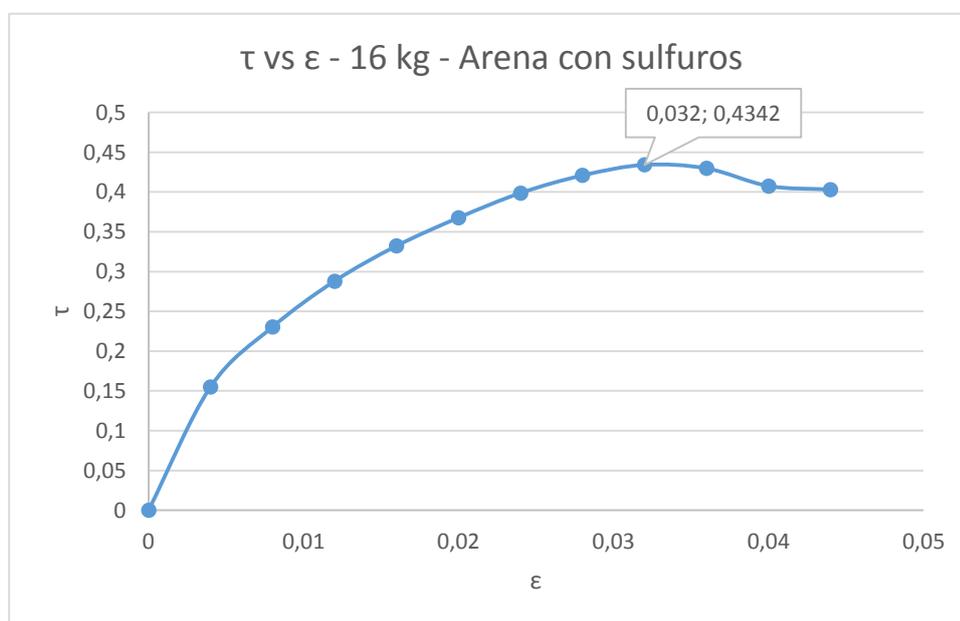


Figura 14. Curva  $\tau$  vs  $\epsilon$  de 4 kg para muestra de arena con sulfuros

Figura 15. Curva  $\tau$  vs  $\epsilon$  de 8 kg para muestra de arena con sulfurosFigura 16. Curva  $\tau$  vs  $\epsilon$  de 16 kg para muestra de arena con sulfuros

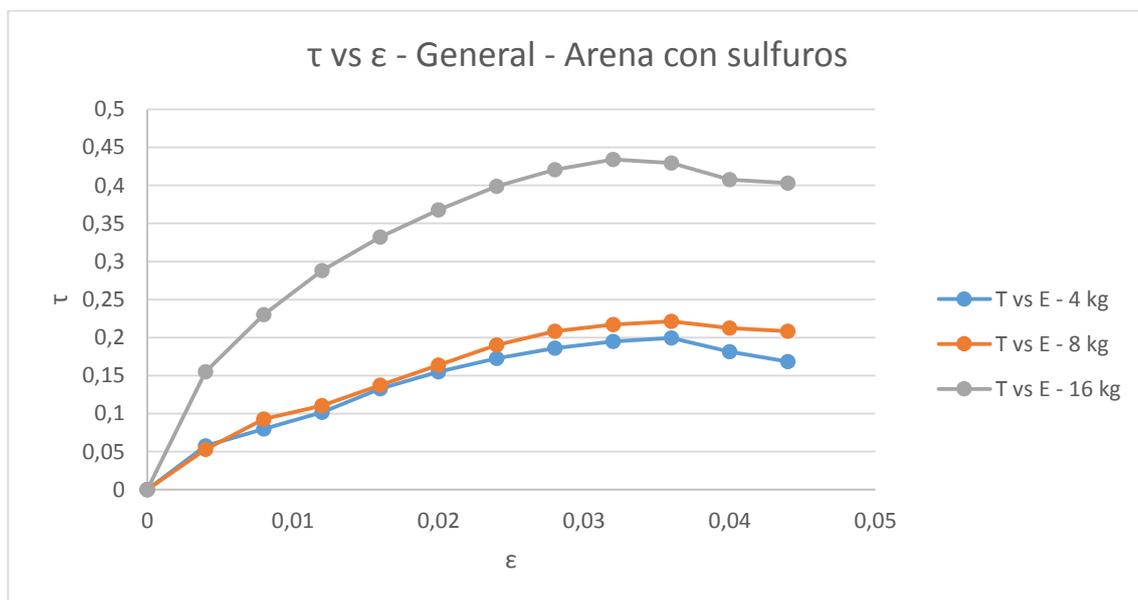


Figura 17. Curva general  $\tau$  vs  $\epsilon$  para muestra de arena con sulfuros

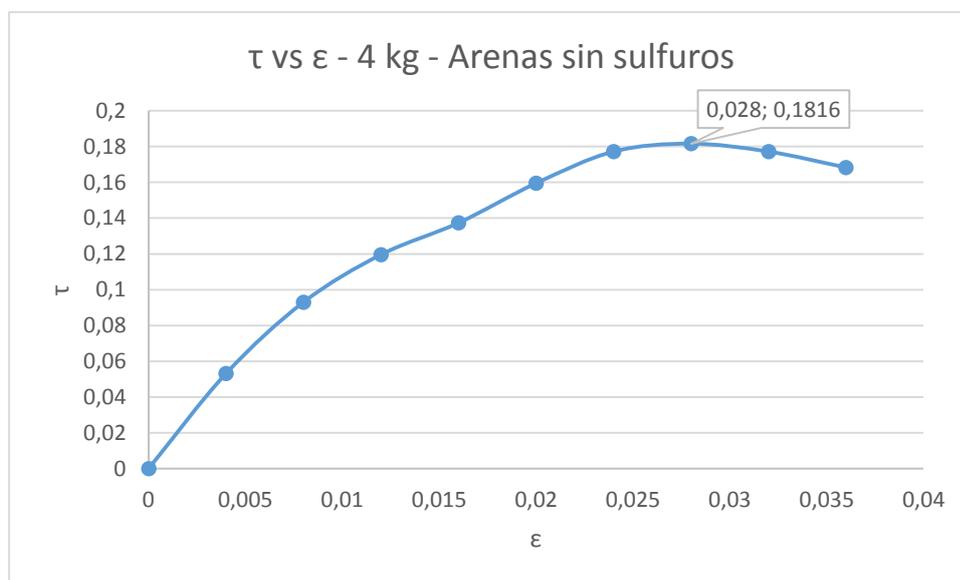
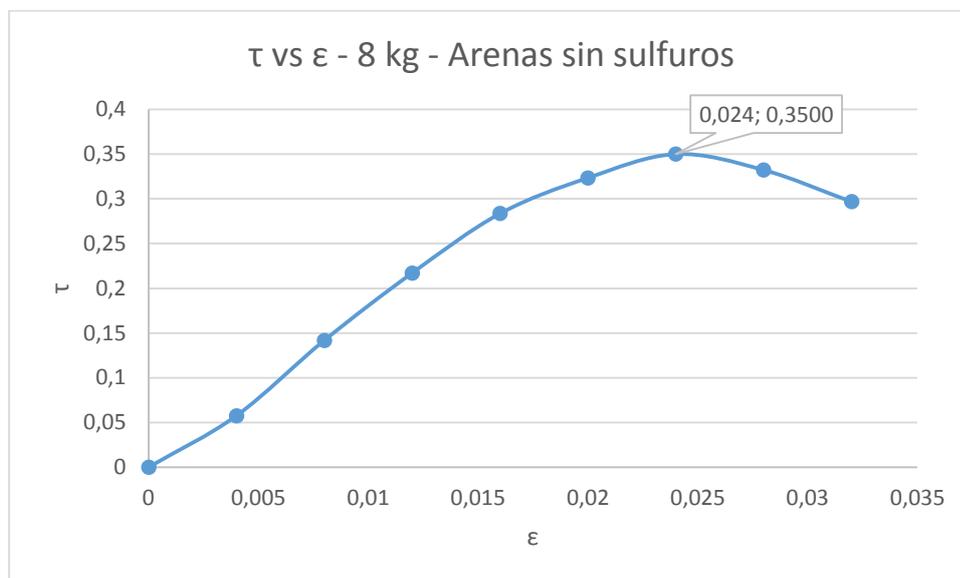
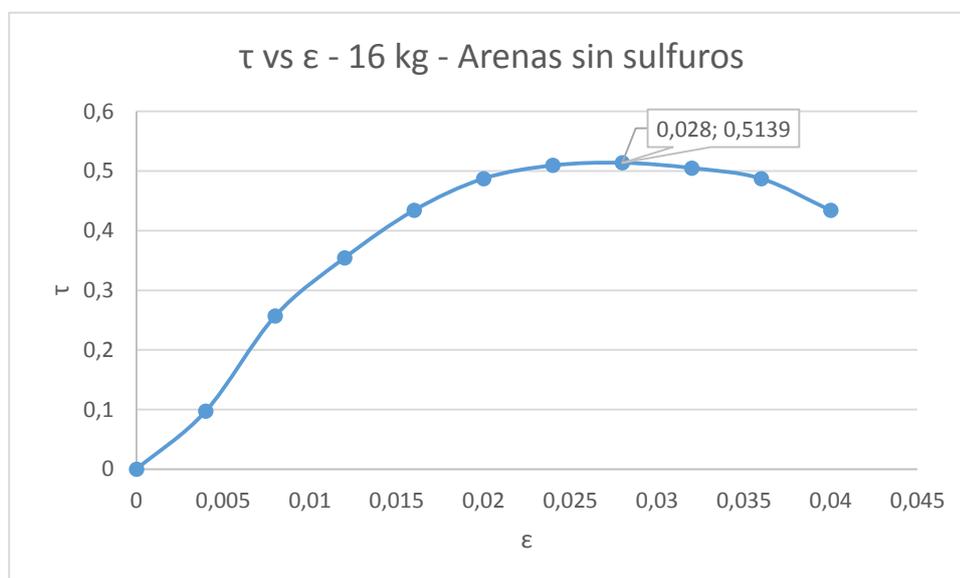


Figura 18. Curva  $\tau$  vs  $\epsilon$  de 4 kg para muestra de arena sin sulfuros

Figura 19. Curva  $\tau$  vs  $\epsilon$  de 8 kg para muestra de arena sin sulfurosFigura 20. Curva  $\tau$  vs  $\epsilon$  de 16 kg para arena sin sulfuros

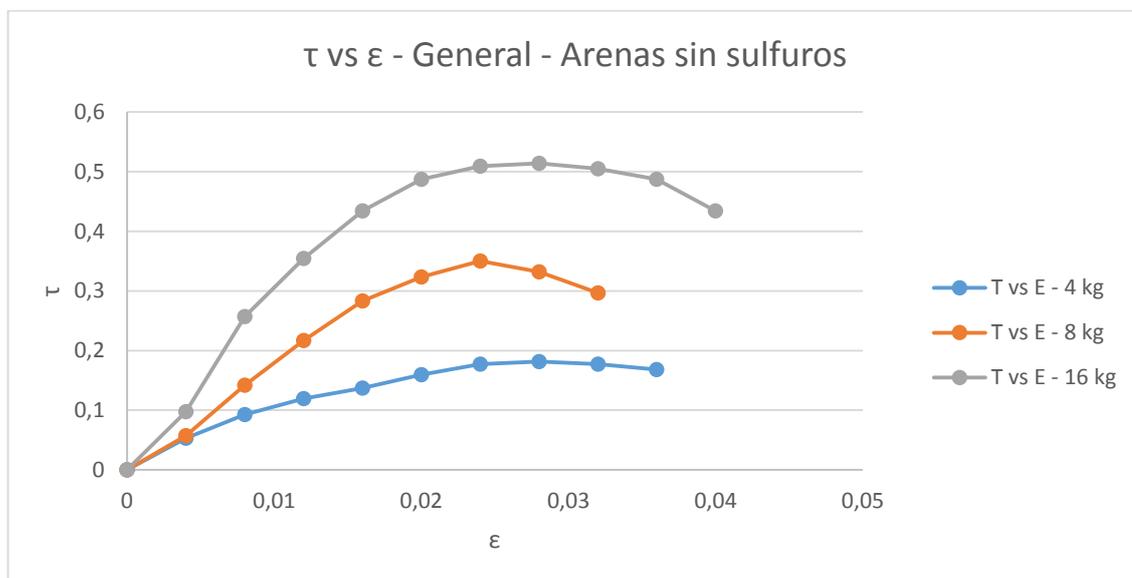
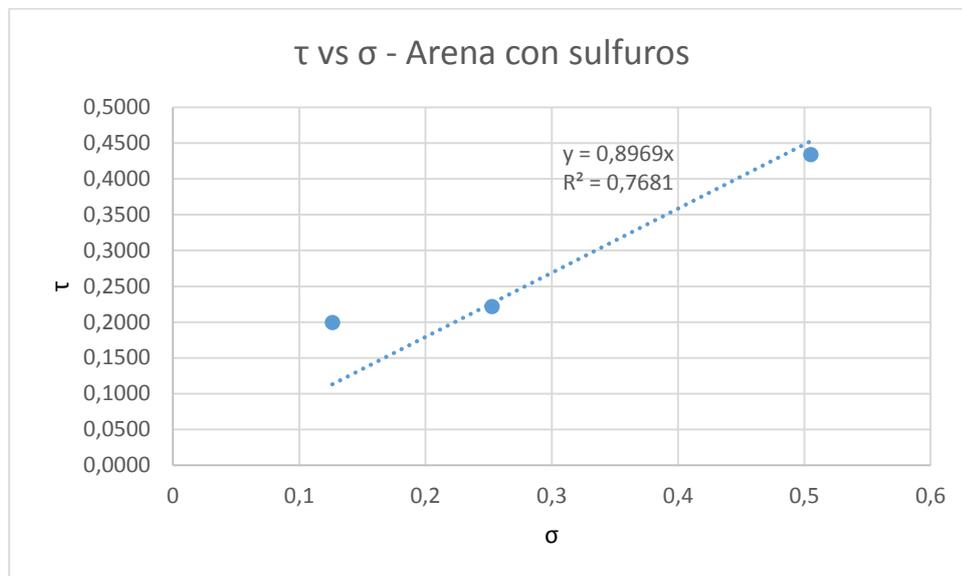
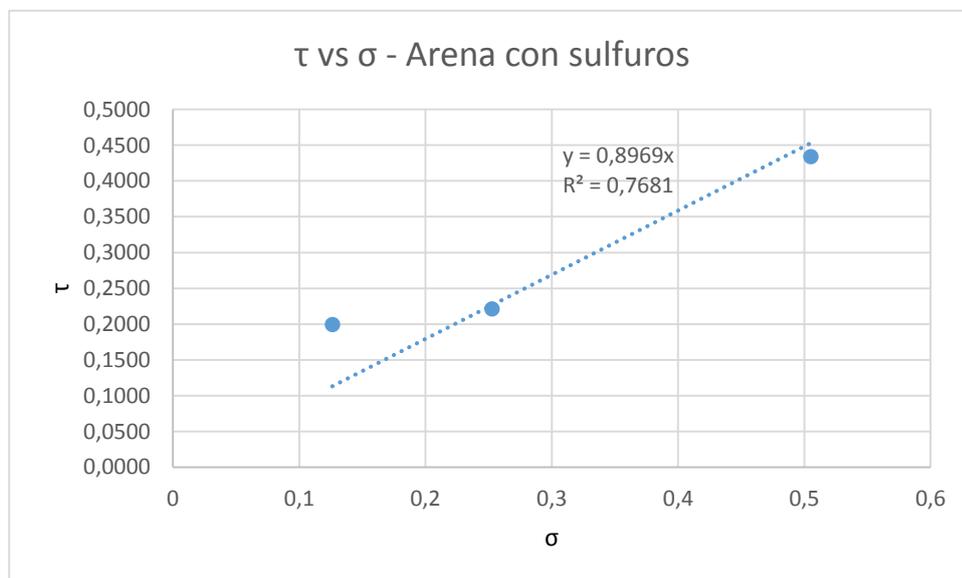


Figura 21. Curva general  $\tau$  vs  $\epsilon$  para muestra de arena sin sulfuros

Posteriormente se elaboró la gráfica esfuerzo tangencial vs esfuerzo normal, de la cual se calculó el ángulo de fricción interna, que es el parámetro determinante para el diseño de la ampliación de la relavera.

Se muestran a continuación las gráficas  $\tau$  vs  $\sigma$ , de las muestras de arenas sin sulfuros y con sulfuros. Los valores del ángulo de fricción interna obtenidos fueron de  $47.91^\circ$  y  $41.89^\circ$ .

Figura 22. Curva  $\tau$  vs  $\sigma$  para muestra de arena sin sulfurosFigura 23. Curva  $\tau$  vs  $\sigma$  para muestra de arena con sulfuros

## 5.6. Análisis de resultados de ensayos realizados

Los resultados obtenidos de los ensayos de granulometría, permeabilidad, gravedad específica y proctor standard reflejan una similitud entre las propiedades de ambos materiales, al obtener valores cercanos. Todos estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Espol.

En el caso del ensayo de corte directo, que fue realizado en la Universidad de Guayaquil, se obtuvieron resultados diferentes respecto a los demás ensayos. El valor obtenido para la arena sin sulfuro no está dentro del rango establecido para este tipo de material, por lo que el error obtenido se atribuye a errores en la realización del ensayo de corte directo, así como a los posibles errores en la toma de datos. Por otra parte, el valor del ángulo de fricción interna de la arena con sulfuro está dentro del límite teórico, que indica que las arenas compactadas poseen un ángulo entre  $35^\circ$  y  $45^\circ$ .

Al analizar los datos obtenidos en el anexo 6 y 7, se evidenció que existe una correlación entre los valores de cargas normales, excepto por la carga normal de 8 kg, se presume que estos valores son la fuente de error que no permiten obtener el valor del ángulo de fricción interna correcto. Excluyendo el error, se puede afirmar que las arenas con sulfuro y sin sulfuro poseen similares características geotécnicas, por lo que se consideran óptimas para su uso en el diseño de la ampliación de la relavera. No fue posible realizar

más ensayos de corte directo a las muestras de arenas debido al corto tiempo establecido para el desarrollo de este proyecto.

El diseño a realizarse se efectuó con arena con sulfuro, debido a que se conocen todas sus características, y sus resultados pueden ser aplicados al diseño con arena sin sulfuros.

# **CAPÍTULO 6**

## **6. PROPUESTA DE DISEÑO DE LA AMPLIACIÓN DE LA RELAVERA**

Para realizar la propuesta de diseño inicialmente se debe analizar la geometría y las condiciones geotécnicas relavera actual, y posteriormente añadir la configuración de la ampliación de la relavera y analizar el sistema en conjunto.

### **6.1. Elaboración de perfiles de la relavera actual**

A partir de los datos del levantamiento topográfico realizado inicialmente se elaboró el mapa topográfico. Se realizó una alineación, de la cual se obtuvo el perfil transversal de la relavera tal como se indica en las figuras 24 y 25.

Se conoce como información preliminar que la piscina de relave existente posee una profundidad de 12 metros, y un ángulo de talud de 1:2. Se debe preparar el perfil para poder exportarlo a Slope W/, para esto es necesario crear una superficie cerrada.

Se utilizó la herramienta Hatch en AutoCAD Civil 3d para generar un contorno, de esta manera se cerró la superficie.

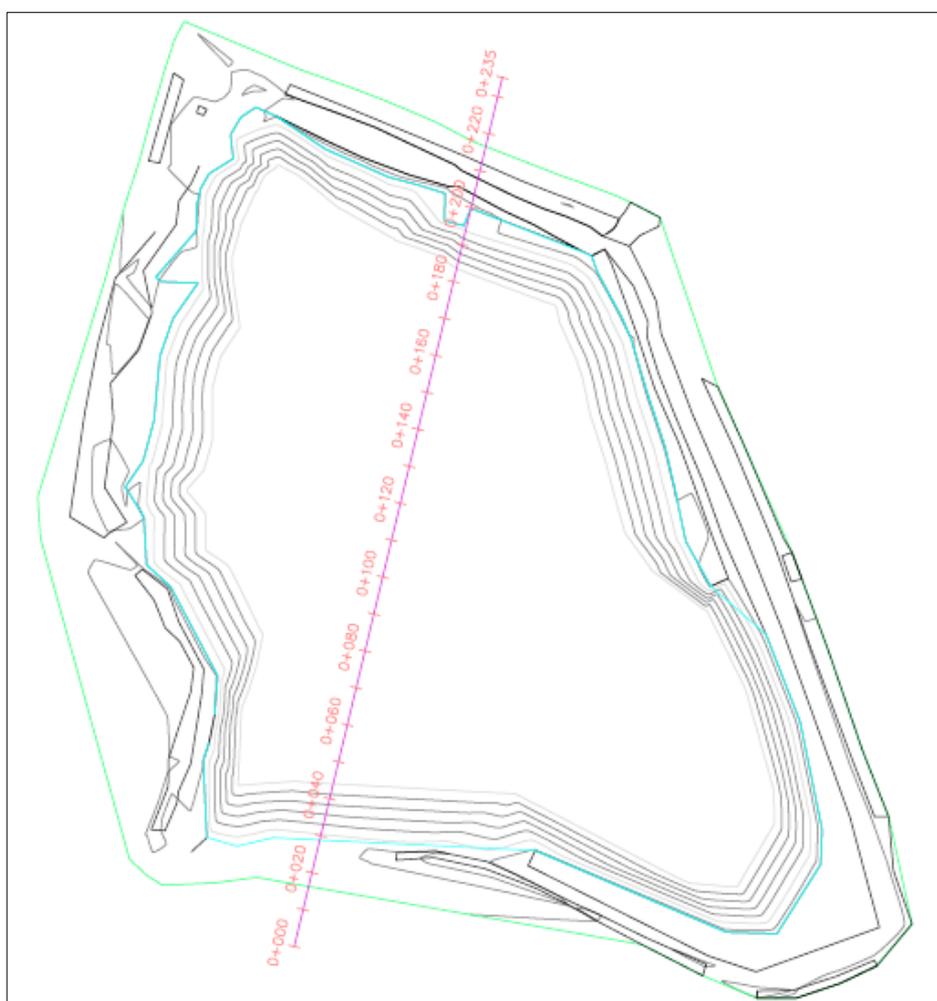


Figura 24. Alineación sobre la relavera actual

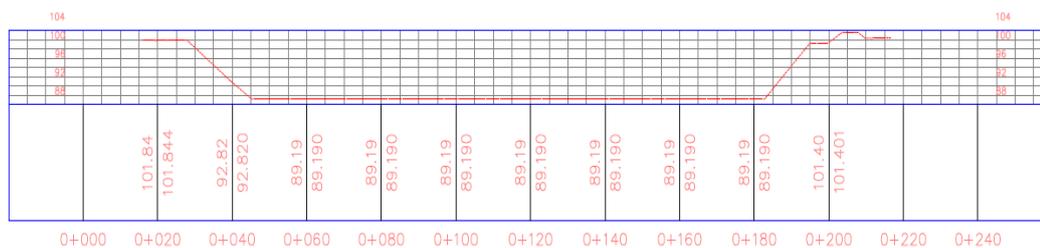


Figura 25. Perfil transversal de la relavera actual

## 6.2. Definición de regiones y materiales en Slope W/

Se importó el perfil creado en AutoCAD Civil 3d, y se definieron las regiones de análisis. Este caso de estudio posee tres regiones: el material que constituye el muro de la relavera existente, el relave que se encuentra en el interior de la piscina, y el muro de la ampliación de la relavera.

Posteriormente se definieron los materiales que componen las regiones. En la tabla 12 se detallan los materiales que fueron utilizados en la configuración.

Tabla 13. Regiones y materiales establecidos usados en Slope W/

<b>Región</b>	<b>Material</b>	<b>Peso específico</b>	<b>Cohesión</b>	<b>Ángulo de rozamiento interno</b>
Muro de relavera existente	Relaves antiguos con alto contenido de sulfuros	17.42 KN/m <sup>3</sup>	0	31.5°
Relaves contenidos en piscina	Relaves con y sin sulfuros	22 KN/m <sup>3</sup>	0	30°
Muro de ampliación de relavera	Relaves con sulfuros	17.87 KN/m <sup>3</sup>	0	42°

El muro de relavera existente fue construido hace más de 30 años con relaves antiguos provenientes de la planta de tratamiento, que tenía procesos diferentes a los actuales. Los valores de peso específico y de ángulo de rozamiento interno del muro son teóricos, tomados del proyecto denominado “Análisis de estabilidad de muro de relaves reforzado con geo sintéticos usando FLAC”, perteneciente a E. Maldonado de la empresa Golder Associates de Perú.

Los relaves contenidos en la piscina son una mezcla de relaves con sulfuros y sin sulfuros que se originan a partir de procesos de cianuración y flotación, Los valores de peso específico y de ángulo de rozamiento interno de estos

relaves también fueron teóricos tomados del mismo proyecto de E. Maldonado.

Los parámetros del muro de la ampliación de la relavera fueron los obtenidos en los ensayos descritos en el capítulo 5 del presente documento.

Se conoce por fuentes cercanas a la administración de la planta de tratamiento que el nivel freático se encuentra por debajo del fondo de la piscina de relaves, pero se desconoce el nivel exacto. No se encontraron datos bibliográficos, ni se lograron realizar perforaciones debido a que no se asignaron recursos a esta actividad. Este parámetro fue establecido en el programa Slope W/ con la finalidad de realizar la simulación de estabilidad lo más cercano a la realidad.

El muro de la ampliación de la relavera se diseñó con una altura final de 9 metros y una pendiente constante de  $30^\circ$ . El método constructivo se elaboró de tal manera que se construya en tres fases, elevando el muro cada tres metros hasta alcanzar los nueve metros finales.

### **6.3. Análisis de estabilidad del talud en Slope W/**

Se ingresaron los datos en el software y se simularon las condiciones de estabilidad para cada una de las tres fases constructivas, y para la ampliación del muro con la piscina de relaves a su máxima capacidad.

El análisis de estabilidad en Slope W/ se asoció con la obtención del factor de seguridad para la configuración del muro establecida en la sección 6.2. La ICOLD considera un valor de 1.5 como factor de seguridad aceptable en la construcción de presas de relave, tal como lo publicó en la Guía de diseño, construcción y operación de presas de relave.

Para una altura del muro de la ampliación de la relavera de 3 metros se obtuvo un factor de seguridad de 1.632, considerado dentro del rango de estabilidad al ser mayor que 1.5. La figura 27 muestra la simulación del cálculo del factor de seguridad en Slope W/.

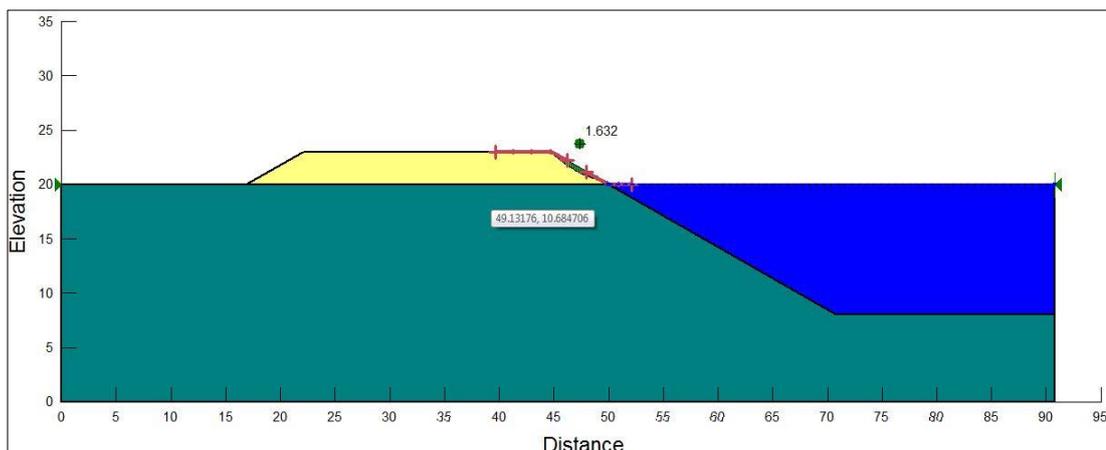


Figura 26. Simulación del factor de seguridad para el muro de 3 metros

Posteriormente para obtener el muro de 6 metros de altura se añadió material sobre el muro existente, y la simulación dio como resultado un factor de seguridad de 1.643 tal como se indica en la figura 28, considerado aceptable en términos de estabilidad.

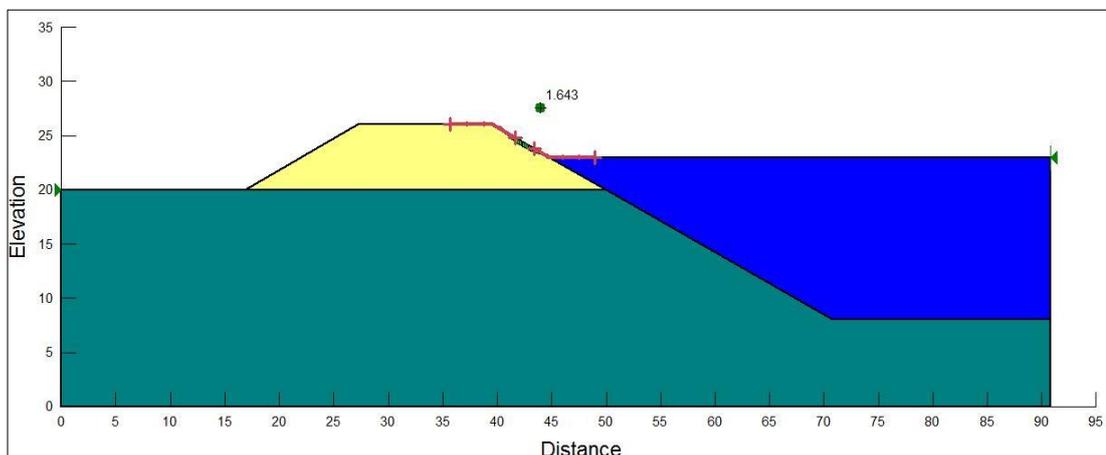


Figura 27. Simulación del factor de seguridad para el muro de 6 metros

Finalmente se añadió material hasta obtener el muro de la ampliación de relaves definitivo de 9 metros de altura. El factor de seguridad obtenido fue

de 1.643, que cumple con los requerimientos técnicos de seguridad. La figura 29 muestra la simulación del talud en esas condiciones.

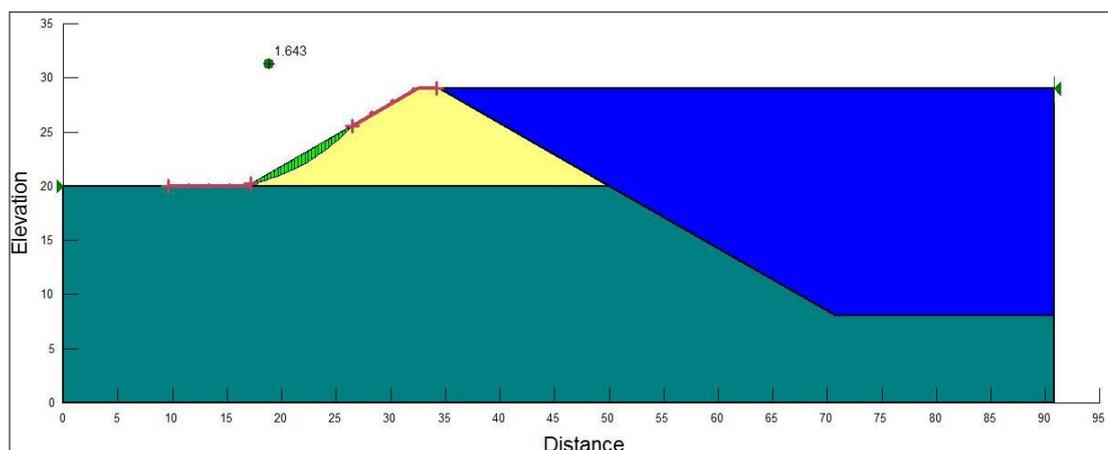


Figura 28. Simulación del factor de seguridad para el muro de 9 metros

Al concluir las simulaciones de estabilidad de las distintas configuraciones del talud del muro de la ampliación de la relavera, se elaboró la tabla 14 que resume los factores de seguridad obtenidos para cada caso.

Tabla 14. Resumen de factores de seguridad obtenidos

Altura del talud	Altura de piscina de relaves	Factor de seguridad obtenido	Zona de falla de talud
3 m	0	1.632	Talud interno
6 m	3 m	1.643	Talud interno
9 m	6 m	1.643	Talud externo
9 m	9 m	1.643	Talud externo

#### 6.4. Cálculo de la capacidad de vertido de la ampliación de la relavera

A partir de la topografía dibujada en AutoCAD Civil 3d, se logró obtener el perfil de la relavera actual con los puntos tomados en el levantamiento. Se utilizó el comando área, que permitió calcular el área de un objeto presente en el software, que para este caso en particular fue el contorno de la relavera actual. Se obtuvo el área, cuyo valor fue de 24799.202 m<sup>2</sup>.

Para efectos de cálculo de volumen, se multiplicó el área del contorno de la piscina por la altura total de la ampliación de la relavera, y se obtuvo el valor de 223192.82 m<sup>3</sup>.

#### 6.5. Cálculo del volumen de relave usado en el diseño de la relavera

Para el cálculo del volumen de relave utilizado en el diseño del dique principal de la ampliación de la relavera, se utilizó la siguiente expresión:

$$V_{relave} = A_{dique} * Perímetro_{piscina}$$

$$V_{relave} = \left( \frac{B + Lc}{2} * h \right) * Perímetro_{piscina}$$

Donde  $h$  es la altura máxima del dique,  $B$  es la base del dique y  $L_c$  es la longitud de corona. El perímetro de la piscina se lo determinó mediante el software AutoCAD Civil 3D, cuyo valor fue de 681.87 metros. Reemplazando los valores se tiene:

$$V_{relave} = \left( \frac{33.1769 + 2}{2} * 9 \right) * 681.87$$

$$V_{relave} = 107937.33 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, se necesitará un volumen de 107937.33 m<sup>3</sup> de relave, un valor menor al volumen que podrá almacenar la ampliación de la relavera actual. Este resultado favorece a la empresa, puesto que el relave es un material que necesita ser almacenado, pasando a ser parte de la relavera en forma del muro del dique.

#### **6.6. Tiempo de llenado de la piscina de la ampliación de la relavera**

Se conoció por recopilación bibliográfica que la producción de relave de la planta de beneficio La López es de alrededor de 5000 m<sup>3</sup> mensuales. El tiempo de llenado se calculó en base a la producción de relave y al volumen de relave utilizado para llenar la piscina y para la construcción del muro.

$$\textit{Tiempo de llenado} = \frac{\textit{Volumen de relave utilizado}}{\textit{Producción relave}}$$

$$\textit{Tiempo de llenado} = \frac{223192.82 \text{ m}^3 + 107937.33 \text{ m}^3}{5000 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}}$$

$$\textit{Tiempo de llenado} = 66.23 \text{ meses}$$

$$\textit{Tiempo de llenado} = 5.52 \text{ años}$$

Los cálculos efectuados señalan que el tiempo que tomará llenar la piscina de la ampliación de la relavera será de 5.52 años, considerándose una obra a corto plazo.

### **6.7. Propuesta final del diseño de la ampliación de la relavera**

La propuesta final del diseño de la ampliación de la relavera comprende las características geotécnicas, geométricas y de estabilidad, las cuales fueron calculadas en los apartados anteriores y se muestran en la tabla siguiente a manera de resumen.

Tabla 15. Propuesta de diseño final de la ampliación de la relavera

<b>PROPUESTA DE DISEÑO FINAL DE LA AMPLIACIÓN DE LA RELAVERA</b>	
Material de diseño	Arena con sulfuros
Humedad óptima	15.2%
Densidad máxima	1821.53 kg/m <sup>3</sup>
Longitud de base	33.1769 m
Longitud de corona	2 m
Ángulo de talud externo	30°
Ángulo de talud interno	30°
Altura máxima	9 m
Factor de seguridad	1.643
Volumen máximo de almacenamiento	223192.82 m <sup>3</sup>
Volumen de relave utilizado en el dique	107937.33 m <sup>3</sup>
Producción de relaves	5000 m <sup>3</sup> /mes
Tiempo de llenado	5.52 años

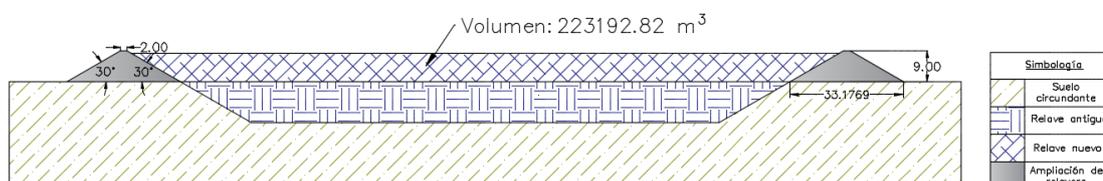


Figura 29. Diseño final de la ampliación de la relavera



# CAPÍTULO 7

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al término de esta investigación, se puede concluir lo siguiente:

- Se logró proponer el diseño de la ampliación de la relavera para la planta de beneficio “La López”, al obtener las características geotécnicas de las arenas de relave con sulfuro, proporcionando seguridad técnica mediante óptimos factores de seguridad del talud y seguridad ambiental garantizando el correcto acopio de los relaves.
- A partir de los ensayos realizados se considera la arena con sulfuro como material óptimo para realizar la construcción de la ampliación de la relavera, sus características aplicadas al diseño permitieron obtener

factores de seguridad que cumplen las condiciones técnicas de estabilidad.

- Se realizó la propuesta del diseño de la ampliación de la relavera, al obtener una altura del dique de 9 metros, longitud de corona de 2 metros, ángulos de inclinaciones de talud de  $30^\circ$ , longitud de base del dique de 33.18 metros y factor de seguridad de 1.643.
- La propuesta del diseño de la relavera permitirá almacenar un volumen de  $223192.82 \text{ m}^3$  de relave proveniente de los procesos de la planta de tratamiento, el cual se vertirá en 5.52 años.
- El muro del dique principal de la propuesta de la ampliación de la relavera utilizará un total de  $107937.33 \text{ m}^3$  de relave con sulfuro.
- Se recomienda realizar varios ensayos de corte directo para la arena sin sulfuro, para obtener su ángulo de fricción interna y poder realizar el diseño con este material en un futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BORJA T., MORENO J., (2015). “Estudio para la optimización de un circuito flotación-cianuración de concentrados sulfurosos en la planta de beneficio La López para el procesamiento del mineral de la mina Jerusalén en el cantón Camilo Ponce Enríquez”, Tesis de grado, Ingeniería en minas, Espol, Ecuador.
2. BUREAU OF RECLAMATION (1987). Design of small dams. Third edition. France.
3. CALABRAN R. (2009). Evaluación de riesgo ambiental del tranque de relave Las Tórtolas ubicado en la comuna de Colina, región metropolitana de Santiago. Trabajo de grado. Ingeniería en Geografía. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
4. CALIFORNIA MINING ASSOCIATION (1991). Mine waste management. Sacramento, California, EEUU.
5. CIMM (2005). Caracterización y determinación de los requerimientos de desarrollo tecnológico e innovación tecnológica para la mediana y

pequeña minería de la III, IV y V región. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica. Ministerio de Minería. Santiago, Chile.

6. DAS B. (1990). Principles of geotechnical engineering. Second edition. PWS – Kent Publishing Corp. Massachusetts, EEUU.
7. DAS B. (1999). Principios de ingeniería en cimentaciones. Cuarta edición. EEUU.
8. DINTRANS G. & BASTIDAS M. (1991). Estudio del impacto ambiental en tranques de relaves “El Chiche”. Comité Regional de Seguridad Minera IV Región Coquimbo (1991). Compendio de exposiciones del seminario minería y medio ambiente. Coquimbo, Chile.
9. DAVIES M. & LIGHTALL P. (2002). Design of tailings dams and impoundments. Tailings and mine waste practices. SME. Phoenix, EEUU.
10. DAVIDSON R., STAUFFER P., MORAN R. (1996). Tailings impoundment design – Striving for balance, Tailings and mine waste '96, Rotterdam, Holanda.

11. GONZALES DE VALLEJO L. (2004). Ingeniería Geológica. Editorial Pearson. España.
12. GUAMÁN J., (2009). Estudio y diseño de un depósito de relaves para el almacenamiento de relaves del plan de manejo de las plantas de beneficio en el sector minero Portovelo. Trabajo de grado. Ingeniería civil. Universidad Técnica Particular de Loja. Loja. Ecuador.
13. HAMADE T. (2013). Geotechnical design of tailings dams – A stochastic analysis approach. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería en minas y materiales. McGill University. Montreal. Canadá.
14. HERDOÍZA G. (2010). Sistema de gestión integral de residuos sólidos para la planta de beneficio Prohemach. Tesis. Maestría en gestión ambiental para industrias de producción y servicios. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
15. ICOLD (1999). Guidelines of tailings dam design, construction and operation. Australia.
16. JUÁREZ BADILLO E., (2005). Mecánica de suelos. Editorial Limusa. Tomo 1, Ciudad de México, México.

17. KEALY C., BUSCH R. (1988). Evaluation of mine tailings disposal.
18. KLUTE A. (1986). Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. American society of agronomy. Wisconsin, EEUU.
19. LIGHTHALL P. (1987). Innovative tailings disposal in Canada. International journal of surface mining 1.
20. MALDONADO E. (2010). Análisis de estabilidad de muro de relaves reforzado con geosintéticos usando FLAC. Golden Associates. Perú.
21. MÁRQUEZ F. (1990). Manejo seguro de residuos peligrosos. Departamento de ingeniería química. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
22. MITTAL H., MORGENSTERN N. (1977). Design and performance of tailings dams. ASCE Conference on Geotechnical practice for disposal of solid waste materials.

23. ORDÓÑEZ A. (1984). Canchas de relaves de concentradoras mineras. Análisis de estabilidad de presas. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.
24. RAMÍREZ, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves.
25. RIDLEN P., DAVIDSON R., MANKA D., DUNNE R. (1997). Geotechnical design of Kennecott Utah copper tailings impoundment expansion, Tailings and mine waste '97. Rotterdam, Holanda.
26. SERNAGEOMIN. (2003). Guía de Buenas Prácticas Ambientales para la Pequeña Minería.
27. TERREROS DE VARELA, C. (1995). Mecánica de suelos, Laboratorio. Universidad de Guayaquil. Ecuador.
28. Vega, A. (2013). "Cálculo de reservas de la veta Paraíso, Mina Paraíso, Cantón Ponce Enríquez", Tesis de grado, Ingeniería en geología, Espol, Ecuador.

29. VICK S. (1990). Planning, design and analysis of tailings dams. Bitech publishers ltd.

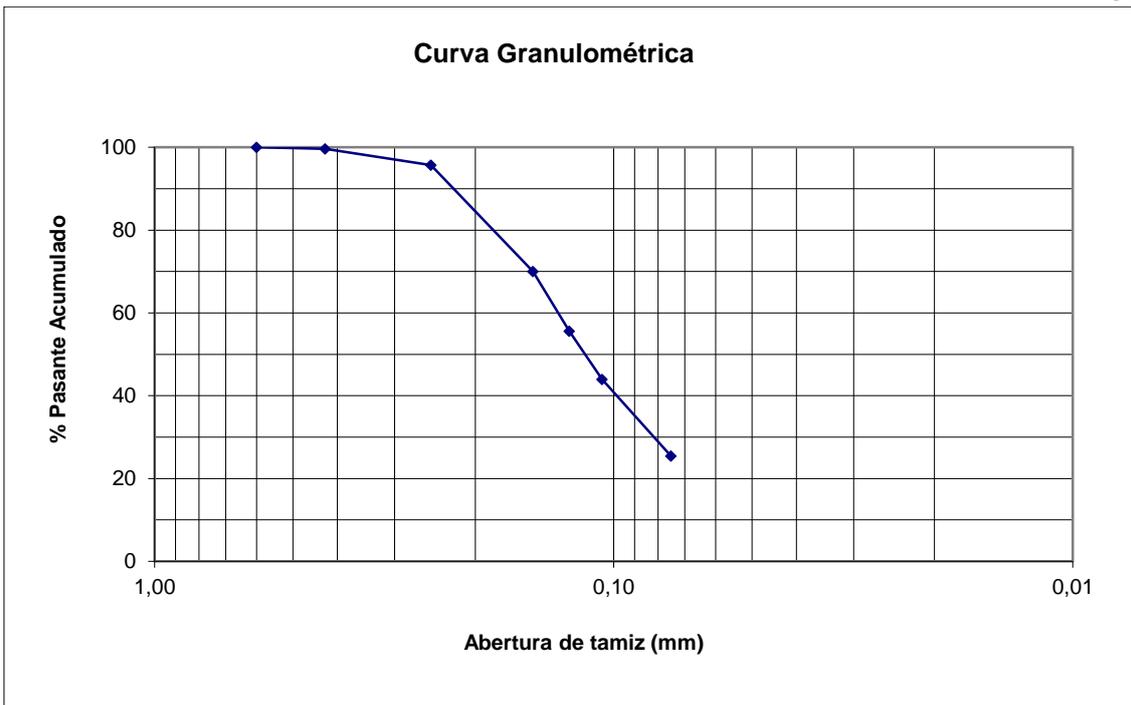
30. VILLA, R. (1998). Labranza del suelo. Universidad de Chile.

# **ANEXOS**

# Tamiz	Abertura (mm)	Peso parcial (gr.)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
3"	75,00				
2"	50,00				
1"	25,00				
3/4"	18,75				
1/2"	12,50				
3/8"	9,38				
1/4"	6,25				
No. 4	4,750				
No. 6	3,350				
No. 8	2,360				
No. 10	2,000				
No. 12	1,700				
No. 14	1,400				
No. 16	1,180	0,00			
No. 18	1,000				
No. 20	0,850	0,00			
No. 30	0,600				
No. 40	0,425	0,84	0,35	0,35	99,65
No. 50	0,300				
No. 60	0,250	9,39	3,95	4,30	95,70
No. 80	0,180				
No. 100	0,150	61,00	25,64	29,94	70,06
No. 120	0,125	34,39	14,46	44,40	55,60
No. 140	0,106	27,67	11,63	56,03	43,97
No. 170	0,090				
No. 200	0,075	43,98	18,49	74,52	25,48
Fondo		60,61	25,48	100,00	0,00
<b>Total</b>		237,88			

Anexo 1: Análisis granulométrico arena con sulfuros

Referencias: AASHTO T-87-70, T-88-70; ASTM D421-58, D422-63

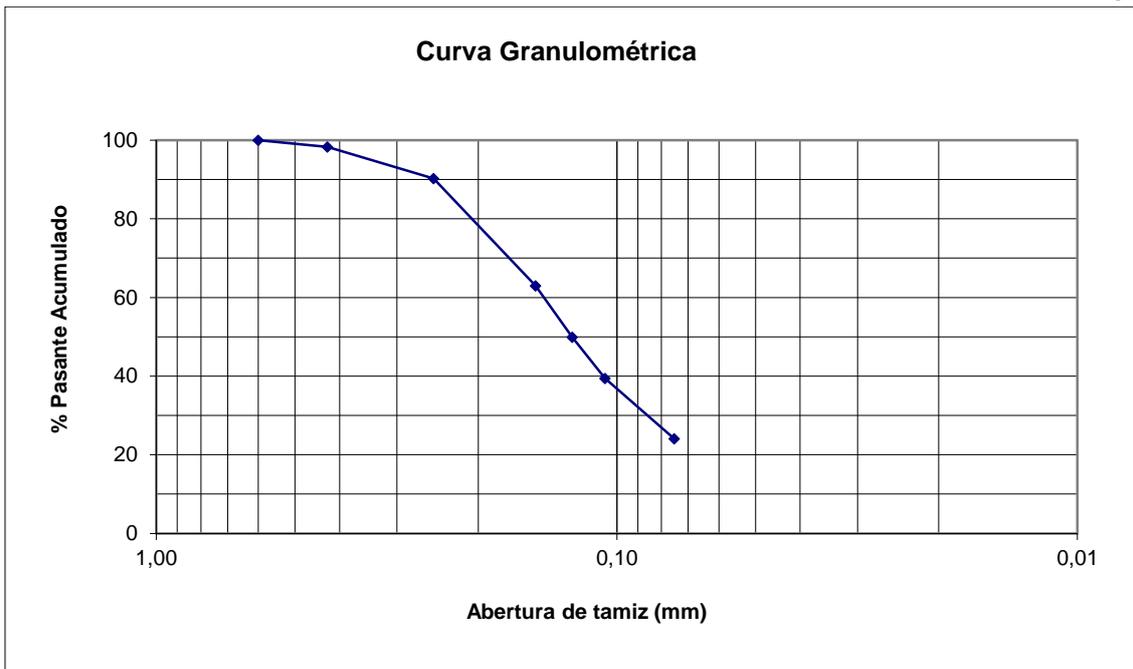


Anexo 2  
Curva granulométrica de arenas con sulfuro

# Tamiz	Abertura (mm)	Peso parcial (gr.)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
3"	75,00				
2"	50,00				
1"	25,00				
3/4"	18,75				
1/2"	12,50				
3/8"	9,38				
1/4"	6,25				
No. 4	4,750				
No. 6	3,350				
No. 8	2,360				
No. 10	2,000				
No. 12	1,700				
No. 14	1,400				
No. 16	1,180	0,00			
No. 18	1,000				
No. 20	0,850	0,00			
No. 30	0,600				
No. 40	0,425	3,35	1,72	1,72	98,28
No. 50	0,300				
No. 60	0,250	15,67	8,03	9,74	90,26
No. 80	0,180				
No. 100	0,150	53,20	27,25	36,99	63,01
No. 120	0,125	25,65	13,14	50,13	49,87
No. 140	0,106	20,34	10,42	60,54	39,46
No. 170	0,090				
No. 200	0,075	30,04	15,39	75,93	24,07
Fondo		47,00	24,07	100,00	0,00
<b>Total</b>		195,25			

Anexo 3: Análisis granulométrico arena sin sulfuros

Referencias: AASHTO T-87-70, T-88-70; ASTM D421-58, D422-63



Anexo 4  
Curva granulométrica de arenas sin sulfuro

<b>Coefficiente de viscosidad</b>	
<b>T (°C)</b>	<b>Cv</b>
20	1.0000
21	0.9761
22	0.9531
23	0.9311
24	0.9097
25	0.8893
26	0.8694
27	0.8702
28	0.8318
29	0.8139
30	0.7967
31	0.7801
32	0.7641
33	0.7486
34	0.7334
35	0.7189

Anexo 5  
Coeficiente de viscosidad en función de la temperatura

K= 0,1403      A= 31,6692174

Deformación mm	Desplazamiento horizontal 0,001"	Carga V= 4 kg			Carga V= 8 kg			Carga V= 16 kg					
		Carga T		$\sigma T$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma V$ Kg/cm <sup>2</sup>	Carga T		$\sigma T$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma V$ Kg/cm <sup>2</sup>	Carga T		$\sigma T$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma V$ Kg/cm <sup>2</sup>
		0,0001"	kg			0,0001"	kg			0,0001"	kg		
0,004	0,010	0,0013	1,8239	0,0576	0,1263	0,0012	1,6836	0,0532	0,2526	0,0035	4,9105	0,1551	0,5052
0,008	0,020	0,0018	2,5254	0,0797		0,0021	2,9463	0,0930		0,0052	7,2956	0,2304	
0,012	0,030	0,0023	3,2269	0,1019		0,0025	3,5075	0,1108		0,0065	9,1195	0,2880	
0,016	0,040	0,003	4,209	0,1329		0,0031	4,3493	0,1373		0,0075	10,5225	0,3323	
0,02	0,050	0,0035	4,9105	0,1551		0,0037	5,1911	0,1639		0,0083	11,6449	0,3677	
0,024	0,060	0,0039	5,4717	0,1728		0,0043	6,0329	0,1905		0,0090	12,627	0,3987	
0,028	0,070	0,0042	5,8926	0,1861		0,0047	6,5941	0,2082		0,0095	13,3285	0,4209	
0,032	0,080	0,0044	6,1732	0,1949		0,0049	6,8747	0,2171		0,0098	13,7494	0,4342	
0,036	0,090	0,0045	6,3135	0,1994		0,005	7,015	0,2215		0,0097	13,6091	0,4297	
0,04	0,100	0,0041	5,7523	0,1816		0,0048	6,7344	0,2126		0,0092	12,9076	0,4076	
0,044	0,110	0,0038	5,3314	0,1683		0,0047	6,5941	0,2082		0,0091	12,7673	0,4031	

Anexo 6  
 Ficha de ensayo corte directo arena con sulfuros

K= 0,1403

A= 31,6692

Deformación mm	Desplazamiento horizontal 0,001"	Carga V= 4 kg				Carga V= 8 kg				Carga V= 16 kg			
		Carga T		$\sigma_T$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_V$ Kg/cm <sup>2</sup>	Carga T		$\sigma_T$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_V$ Kg/cm <sup>2</sup>	Carga T		$\sigma_T$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_V$ Kg/cm <sup>2</sup>
		0,0001"	kg			0,0001"	kg			0,0001"	kg		
0,004	0,010	0,0012	1,6836	0,0532	0,1263	0,0013	1,8239	0,0576	0,2526	0,0022	3,0866	0,0975	0,5052
0,008	0,020	0,0021	2,9463	0,0930		0,0032	4,4896	0,1418		0,0058	8,1374	0,2569	
0,012	0,030	0,0027	3,7881	0,1196		0,0049	6,8747	0,2171		0,0080	11,224	0,3544	
0,016	0,040	0,0031	4,3493	0,1373		0,0064	8,9792	0,2835		0,0098	13,7494	0,4342	
0,02	0,050	0,0036	5,0508	0,1595		0,0073	10,2419	0,3234		0,0110	15,433	0,4873	
0,024	0,060	0,004	5,612	0,1772		0,0079	11,0837	0,3500		0,0115	16,1345	0,5095	
0,028	0,070	0,0041	5,7523	0,1816		0,0075	10,5225	0,3323		0,0116	16,2748	0,5139	
0,032	0,080	0,004	5,612	0,1772		0,0067	9,4001	0,2968		0,0114	15,9942	0,5050	
0,036	0,090	0,0038	5,3314	0,1683						0,0110	15,433	0,4873	
0,04	0,100									0,0098	13,7494	0,4342	

## Anexo 7

Ficha de ensayo corte directo arena con sulfuro