



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Diseño óptimo para la estabilización del talud principal en
las áreas mineras Sicay y Santa Elena, Cuenca – Azuay”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERA EN MINAS

Autora:

PAULINA LIZBETH LÓPEZ ALVARADO

Director:

LEONARDO ANÍBAL NÚÑEZ RODAS

CUENCA – ECUADOR

2021

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis papás, por apoyarme siempre de la forma que han podido para cumplir mis objetivos a lo largo del camino, sin importar lo complicado que haya sido siempre aceptar los retos que me he puesto en la vida.

A mis hermanos, Cristina y Leonardo, por ser parte fundamental de mi camino como persona, por siempre estar para mí y enseñarme con su ejemplo a salir adelante.

A mi sobrino, por mostrarme siempre el lado alegre y divertido a mi vida.

A mi amiga Karen, por ser mi compañera de aventuras durante casi una década, por ser el lado opuesto, pero complementario en mi día a día.

A mi amiga Ángeles, por hacer que estos años de estudio en la Universidad sean más divertidos y llevaderos, por compartir conmigo su sabiduría como persona y por ser incondicional.

Gracias por todo, porque sin su ayuda no podría estar donde estoy ahora.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento es primero a Dios, por darme la fortaleza para seguir adelante a pesar de todas las caídas.

A mis padres por ayudarme a cumplir este objetivo.

A mis profesores, Ing. Patricio Feijoo y Eduardo Luna, por ser grandes personas dentro y fuera de las clases, y de manera especial al Ing. Leonardo Núñez, por ser un gran maestro, por ayudarme en la realización de este trabajo de titulación, pero sobre todo por ser una gran persona que me ha sabido guiar y apoyar en estos años.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
INDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	2
MARCO TEÓRICO.....	2
1.1 Datos Generales.....	2
1.1.1 Descripción de la zona de estudio	2
1.1.2 Ubicación geográfica	2
1.1.3 Geología regional	3
1.1.3.1 Depósitos Cuaternario.....	3
1.1.3.2 Formaciones del Terciario	4
1.1.4 Geología local.....	7
1.1.4.1 Volcánicos Llacao (Holoceno - Pleistoceno)	7
1.1.5 Estratigrafía	7
1.1.6 Clima.....	8
1.2 Marco teórico	8
1.2.1 Minería a cielo abierto	8
1.2.2 Definición de cantera	9
1.2.3 Parámetros geométricos del diseño de excavaciones	10
1.2.4 Definición de materiales de construcción	11
1.2.5 Estabilidad de taludes	11
1.2.6 Diseño de taludes.....	12
1.2.6.1 Pendiente del talud.....	12
1.2.6.2 Bermas intermedias	12
1.2.7 Mecánica de rocas	13

1.2.7.1	Ábacos utilizados en la estabilidad de taludes	13
1.2.8	Evaluación geotécnica	20
1.2.9	Levantamiento topográfico	21
CAPÍTULO 2	24
ANÁLISIS GEOMECÁNICO	24
2.1	Peso específico	24
2.2	Cohesión	26
2.3	Angulo de fricción.....	26
2.4	Granulometría	27
2.5	Humedad.....	34
2.6	Permeabilidad.....	35
CAPÍTULO 3	40
DISEÑO DE ESTABILIZACIÓN	40
3.1	Factor de seguridad	40
3.2	Diseño para la nueva conformación del terreno y estabilidad del talud	42
3.2.1	Altura de intervención para estabilización del talud	42
3.2.2	Altura del banco	42
3.2.3	Ángulo de talud del banco	43
3.2.4	Berma de seguridad	44
3.3	Alternativas de diseño previas al diseño óptimo.....	45
3.3.1	Diseño 1	45
3.3.2	Diseño 2	51
CAPÍTULO 4	57
ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
4.1	Análisis de los diseños ejecutados	57
4.1.1	Diseño 1	57
4.1.2	Diseño 2	59
4.2	Presentación del diseño óptimo.....	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
Conclusiones	63
Recomendaciones	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Vista en perspectiva de la estratigrafía.....	8
Figura 1.2 Parámetros geométricos del diseño de excavaciones	10
Figura 1.3. Condiciones de flujo de agua y presión intersticial para la selección del ábaco de cálculo.....	14
Figura 1.4. Ábaco de falla circular No. 1	15
Figura 1.5. Ábaco de falla circular No. 2	16
Figura 1.6. Ábaco de falla circular No. 3	17
Figura 1.7. Ábaco de falla circular No. 4.....	18
Figura 1.8. Ábaco de falla circular No. 5	19
Figura 1.9. Levantamiento topográfico	23
Figura 2.1. Picnómetro con agua	25
Figura 2.2. Picnómetro con material de la Muestra 2.	25
Figura 2.3. Cálculo del ángulo de fricción interna.	27
Figura 2.4. Clasificación de suelos basado en granulometría ASTM.....	28
Figura 2.5. Curva granulométrica-Muestra 1.	29
Figura 2.6. Curva granulométrica-Muestra 2.	30
Figura 2.7. Curva granulométrica-Muestra 3.	31
Figura 2.8. Curva granulométrica-Muestra 4.	32
Figura 2.9. Curva granulométrica-Muestra 4.	33
Figura 2.10. Estimación de la permeabilidad del suelo	35
Figura 2.11. Ensayo de permeabilidad-Muestra 1	36
Figura 2.12. Ensayo de permeabilidad-Muestra 2	37
Figura 2.13. Ensayo de permeabilidad-Muestra 3	37
Figura 2.14. Ensayo de permeabilidad-Muestra 4.....	38
Figura 2.15. Ensayo de permeabilidad-Muestra 5	39
Figura 3.1. Cálculo del factor de seguridad.....	41
Figura 3.2. Dimensiones Excavadora CAT 320.	43
Figura 3.3. Alturas y ángulos en taludes	44
Figura 3.4. Altura de los bancos - Diseño 1	45
Figura 3.5. Ángulo de talud de los bancos en trabajo - Diseño 1	46
Figura 3.6. Ángulo de talud del borde de liquidación - Diseño 1.....	47

Figura 3.7. Número de bancos- Diseño 1	48
Figura 3.8. Berma de seguridad- Diseño 1	49
Figura 3.9. Diseño geométrico de estabilización- Diseño 1	50
Figura 3.10. Altura del banco - Diseño 2	51
Figura 3.11. Ángulo de talud de los bancos en trabajo - Diseño 2	52
Figura 3.11. Ángulo de talud del borde de liquidación - Diseño 2.....	53
Figura 3.12. Número de bancos- Diseño 2.....	54
Figura 3.13. Berma de seguridad- Diseño 2.....	55
Figura 3.14. Diseño geométrico de estabilización- Diseño 2.....	56
Figura 4.1. Diseño 1 en 3D.....	57
Figura 4.2. Diseño 1- Vista superior.....	58
Figura 4.3. Diseño 2 en 3D.....	59
Figura 4.4. Diseño 2- Vista superior.....	59
Figura 4.5. Diseño óptimo en 3D.....	61
Figura 4.6. Diseño óptimo- Vista lateral.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Coordenadas de la concesión "Sicay".....	2
Tabla 2.2 Coordenadas de la concesión "Santa Elena"	3
Tabla 2.1 Resultados de densidad.....	26
Tabla 2.2 Resultados de granulometría- Muestra 1	29
Tabla 2.3 Resultados de granulometría- Muestra 2	30
Tabla 2.4 Resultados de granulometría- Muestra 3	31
Tabla 2.5 Resultados de granulometría- Muestra 4	32
Tabla 2.5 Resultados de granulometría- Muestra 4	33

ÍNDICE DE ANEXOS

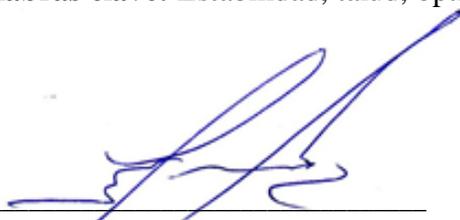
Anexo 1. Picnómetro vacío.	69
Anexo 2. Ensayo con picómetro- Muestra 1.	69
Anexo3. Muestra 1 con agua.	70
Anexo 4. Ensayo con picómetro- Muestra 2.	70
Anexo 5. Muestra 2 con agua.	71
Anexo 6. Ensayo con picómetro- Muestra 3.	71
Anexo 7. Muestra 3 con agua.	72
Anexo 8. Ensayo con picómetro- Muestra 4.	72
Anexo 9. Muestra 4 con agua.	73
Anexo 10. Ensayo con picómetro- Muestra 5.	73
Anexo 11. Muestra 5 con agua.	74
Anexo 12. Ensayo de permeabilidad-Muestra 1.....	74
Anexo 13. Ensayo de permeabilidad-Muestra 2.....	75
Anexo 14. Ensayo de permeabilidad-Muestra 3.....	75
Anexo 15. Ensayo de permeabilidad-Muestra 4.....	76
Anexo 16. Ensayo de permeabilidad-Muestra 5.....	76
Anexo 17. Ensayo de permeabilidad.....	77
Anexo 18. Ensayo con penetrómetro.	77
Anexo 19. Ensayo con veleta.	78

DISEÑO ÓPTIMO PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL TALUD PRINCIPAL EN LAS ÁREAS MINERAS SICAY Y SANTA ELENA, CUENCA – AZUAY

RESUMEN

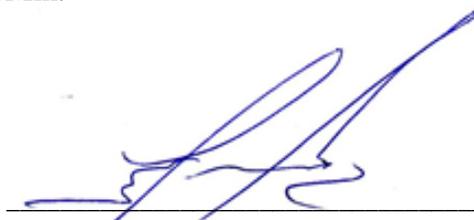
El presente proyecto tuvo como objetivo realizar el diseño óptimo para la estabilización del talud principal que está inmerso en las áreas mineras Sicay y Santa Elena, ubicadas en la parroquia Llaoco, cantón Cuenca. Para esto fue necesario realizar un análisis geotécnico de las zonas de estudio y determinar las variables requeridas al momento de optimizar su diseño. De esta manera, se proponen dos opciones diferentes de diseño con el fin de escoger el más óptimo. El diseño seleccionado fue el que presentó las mejores características técnicas, de seguridad y que se adapte a las necesidades del concesionario minero en el aspecto económico. Para realizar una correcta evaluación de las alternativas de diseño se aplicó el software minero RecMin.

Palabras clave: Estabilidad, talud, optimizar, RecMin.



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



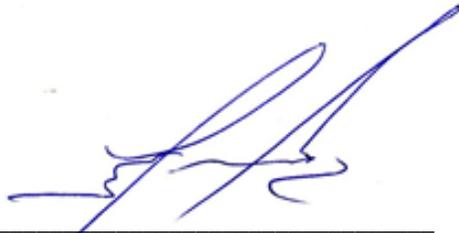
Paulina Lizbeth López Alvarado

Autora

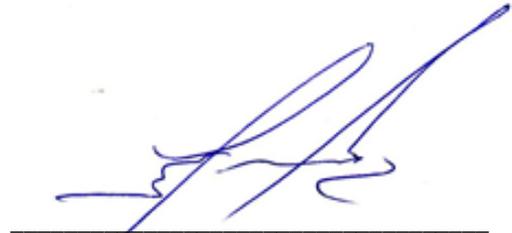
“OPTIMAL DESIGN FOR THE MAIN SLOPE STABILIZATION IN THE MINING AREAS OF SICAY AND SANTA ELENA, CUENCA – AZUAY”

ABSTRACT

The aim of this work was the optimal design for the main slope stabilization which is located in the mining areas of Sicay and Santa Elena in Llacao, Cuenca Canton. For this purpose, it was necessary to do a geotechnical analysis from the studied areas and to determine the required variables for optimizing its design. Thus, two different options of design are proposed in order to choose the most optimal. The selected design was the one that had the best technical and security characteristics and met the requirements of the mining concessionaire on the economic side. The RecMin software was applied for carrying out a proper evaluation of the design alternatives.



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Director of the Degree Project



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinator of the School

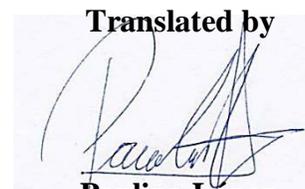


Paulina Lizbeth López Alvarado
Author



Language department

Translated by



Paulina López

Paulina Lizbeth López Alvarado

Trabajo de Titulación

Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Octubre, 2021

DISEÑO ÓPTIMO PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL TALUD PRINCIPAL EN LAS ÁREAS MINERAS SICAY Y SANTA ELENA, CUENCA – AZUAY

INTRODUCCIÓN

En la provincia del Azuay, la extracción minera está enfocada en los áridos y pétreos, de esta forma la parroquia Llacao, ubicada en la ciudad de Cuenca, cuenta con diversas concesiones que se dedican a la extracción de este material.

El siguiente proyecto establece un diseño óptimo para lograr la estabilidad del talud principal que se encuentra ubicado en dos áreas mineras conocidas como “Sicay” y “Santa Elena”.

Para poder realizar dicho objetivo, será necesario realizar la caracterización de los diferentes estratos que conforman el talud, de la misma manera se debe determinar los criterios necesarios para elaborar el diseño del talud y de esta manera, proponer alternativas para el diseño óptimo que permita cumplir con la estabilidad del talud principal, el mismo contará con características de seguridad, tanto para el personal como la adecuada maquinaria que deberá ser utilizada para el desarrollo del mismo.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Datos generales

1.1.1 Descripción de la zona de estudio

Las áreas mineras “Sicay” con código 101787 se encuentra formada por 9 hectáreas mineras contiguas y “Santa Elena” con código 101903 cuenta con una superficie de 14 hectáreas. Son concesiones que tienen por fin, la extracción de áridos para ser utilizados en la industria de la construcción en el ámbito cantonal y regional, ubicadas en el cantón Cuenca.

1.1.2 Ubicación geográfica

El área de interés, donde se encuentran las concesiones “Sicay” y “Santa Elena” están ubicadas relativamente cerca de la ciudad de Cuenca, en el sector conocido como Buena Esperanza, perteneciente a la parroquia Llaoco, cantón Cuenca, jurisdicción de la provincia del Azuay.

Sus coordenadas UTM del punto de partida y los demás vértices, referenciados al DATUM PSAD-56 y a la zona geográfica N° 17, así como las distancias de los lados del polígono que la delimitan son:

Tabla 1.1 Coordenadas de la concesión "Sicay"

SICAY			
PUNTOS	X	Y	DISTANCIA(m)
P. P	730.100,00	9.684.500,00	P.P.- 1 300,00
1	729.800,00	9.684.500,00	1-2 300,00
2	729.800,00	9.684.500,00	2-3 300,00
3	730.100,00	9.684.500,00	3- P.P. 300,00

Fuente: Título minero de la concesión “Sicay”

Tabla 2.2 Coordenadas de la concesión "Santa Elena"

SANTA ELENA			
PUNTOS	X	Y	DISTANCIA(m)
P. P	730.200,00	9.684.500,00	P.P.- 1 300,00
1	730.100,00	9.684.500,00	1-2 300,00
2	730.100,00	9.684.500,00	2-3 300,00
3	729.800,00	9.684.500,00	3- 4 300,00
4	729.800,00	9.684.500,00	4 -5 300,00
5	730.100,00	9.684.500,00	5-6 100,00
6	730.100,00	9.684.500,00	6-7 100,00
7	730.200,00	9.684.500,00	7- P.P. 500,00

Fuente: Título minero de la concesión "Santa Elena"

1.1.3 Geología regional

Según el PDOT de la parroquia Llacao, realizado por la Municipalidad de Cuenca (2017), se dice que el Austro junto con otras partes del país, no cuenta con volcanismo reciente. No obstante, algunas formaciones geológicas son frágiles o incompetentes favoreciendo riesgos como la inestabilidad de sus terrenos, de los cuales se pueden mencionar algunos ejemplos, tales como: El desastre de la Josefina, en el año 1993; la inestabilidad en el sector Nulti, las áreas inestables en algunas parroquias del cantón Cuenca, en las que está incluida Llacao.

1.1.3.1 Depósitos Cuaternario

- **Depósitos aluviales recientes (Qa)**

Está compuesto por bloques, gravas y arenas limosas en diferentes porcentajes y composiciones, sus formas van de redondeadas a sub-angulares según la dinámica y morfología del curso fluvial.

Un 2,48%, de la superficie total de 51,76 ha, de la Parroquia Llacao presenta este tipo de depósitos, hacia el este, en la comunidad Cruz Loma, en terrenos hacia la orilla del Río Cuenca. (Municipalidad de Cuenca, 2017)

- **Depósitos coluviales (Qc)**

Son depósitos de ladera y de pie de talud con materiales que han sufrido poco transporte, son muy heterogéneos dependiendo de la zona y el fenómeno inestable producto de: deslizamientos, derrumbes, flujos, etc. De manera general se componen de mezclas heterogéneas de bloques y fragmentos angulares y sub-angulares en matriz limo arcillosa con micro-fragmentos.

Un porcentaje del 23,38%, (446,66 ha) con respecto al área total de la Parroquia Llacao, se asienta sobre este tipo de capa geológica. (Municipalidad de Cuenca, 2017)

- **Terrazas aluviales (Qt1-5)**

Depósitos de origen mayormente aluvial. compuestas por capas conglomeráticas de matriz areno-arcillosa.

Las terrazas (t1-4) están formadas por bloques y boleos sub-angulares a redondeados y sub-esféricos (ocurrencia 40 % y 70%) en matriz de grava areno arcillosa (ocurrencia 60 % y 30%), la terraza (t5) está formada por estratos erráticos de arena, limo y depósito aluvial de potencia variada.

El 2,71% (51,76 ha), de la parroquia Llacao está asentada sobre esta capa geológica, comunidades como La Alborada, Huairaloma, sectores bajos de Chaullabamba de Llacao y de Cruz Loma. (Municipalidad de Cuenca, 2017)

1.1.3.2 Formaciones del Terciario

- **Formación Llacao (PLL)**

El principal afloramiento de la Formación Llacao es la planicie de Pachamama. Consiste principalmente de flujos piroclásticos, conglomerados y areniscas de origen volcánico y

localmente de avalanchas de escombros. Las capas de la Formación Llaeo son horizontales y sobreyacen en una fuerte discordancia angular y erosiva sobre los sedimentos de la cuenca y en especial a la formación Mangán.

Casi la mitad de la superficie de la Parroquia, el 40,25 % (768,83 ha), presenta esta capa, generalmente esta capa aflora en la parte alta de la Parroquia en la meseta de Pachamama y los sectores más altos de comunidades como: Santa María, Tres de Noviembre, Voluntad de Dios – La Merced, Zhiquir, Cruz Loma y la Parte oeste de Challuabamba de Llaeo. (Municipalidad de Cuenca, 2017)

- **Formación Mangán (Mm)**

La formación Mangán presenta una secuencia de limolitas, lutitas y areniscas finogranulares, en su parte inferior todos de color claro; en su parte media se encuentran lutitas asociadas con vetas de carbón; en la parte superior aflora una arenisca tobácea gruesa café, que se hace conglomerática hacia arriba. (Bristow, 1973).

Este tipo de capa aflora en el sector oeste de la Parroquia Llaeo, sobre todo en el área que pertenece a la sub-cuenca del Río Sidcay. Representa un porcentaje considerable del 24,94 % (476,51 ha) con respecto al área total de la Parroquia.

- **Formación Azogues (Maz)**

Según (Steinmann,1996) las trazas de fisión determinan edad del Mioceno Medio – Tardío. Además, indica un ambiente de agua dulce; estructuras sedimentarias como ripples de oscilación, laminación cruzada, marcas de herramienta y algunos canales rellenos de conglomerados indican deposición en un ambiente deltaico.

La formación Azogues, presenta una secuencia sedimentaria típicamente clástica. Areniscas tobáceas de grano medio a grueso, café amarillentas, con capas de lutitas, limolitas y pocas intercalaciones de conglomerados. Se encuentra fauna de moluscos y restos de plantas.

En la Parroquia Llaeo esta capa aflora en dos sectores: en la parte central de Challuabamba de Llaeo y en los cerros próximos al sector del Descanso, el área total de

afloramiento de esta capa representa el 4,95% (94,73 ha) de la superficie de la Parroquia. (Municipalidad de Cuenca, 2017)

- **Formación Loyola (Ml)**

Según últimas dataciones de trazas de fisión, esta formación corresponde a la edad Mioceno Medio (Steinmann et al., 1996). Este autor con estudios sedimentológicos indica fauna con abundantes peces, escamas, ostrácodos y camarones que determinan un ambiente marino salobre con sedimentos depositados a nivel del mar en la planicie costera.

La Formación sedimentaria clástica fino-granular, consiste en una alternancia de lutitas gris oscuro muy fisibles, limolitas que meteorizan a arcillas de color blanco y habano, localmente lentes de areniscas limosas habanas finamente estratificadas con cemento calcáreo, calizas, y mega brechas.

El afloramiento de esta capa en cuanto a superficie es de 4,88 ha, que representa apenas un 0,25% del total de la Parroquia. Esta capa aparece en el sector de la capilla de Cruz Loma. (Municipalidad de Cuenca, 2017)

- **Formación Biblián (Mb)**

La formación Biblián presenta una secuencia sedimentaria clástica. Alternancia de argilitas, limolitas rojizas inter-estratificadas con areniscas tobáceas de grano fino a grueso y conglomerados con cantos mal sorteados y sub-angulares de la Formación Yunguilla, se observa yeso secundario en grieta.

El afloramiento de esta capa geológica, en cuanto a área es de 19,18 ha., que representa el 1% de la superficie total de la Parroquia Llaico. Se presenta en sectores reducidos en la parte central de la comunidad de Challuabamba de Llaico. (Municipalidad de Cuenca, 2017).

1.1.4 Geología local

Las áreas mineras “Sicay” y “Santa Elena”, están representadas principalmente por la Formación Llacao y por un segundo nivel de terrazas a sus alrededores. Las características litológicas de las mismas se describen a continuación:

1.1.4.1 Volcánicos Llacao (Holoceno - Pleistoceno)

Consiste en aglomerados en una matriz de vidrio blanco desvitrificado, pero también se encontraron tobas blancas estratificadas. Los volcánicos son notoriamente inestables. Su comportamiento geotécnico es el siguiente: (Cuenca, 2017)

- **Condiciones geodinámicas**

En los volcánicos Llacao es común el volcamiento y la caída de bloques debido al agua superficial.

- **Condiciones estructurales**

La roca tobácea es en general masiva, con fracturas muy espaciadas (>1m) de hasta 3 mm no rellenas. Fracturas sub-verticales por descompresión y desecación al borde de farallones.

- **Condiciones hidrogeológicas**

Estratos con baja permeabilidad, o media por fracturación. Niveles estáticos profundos.

1.1.5 Estratigrafía

La estratigrafía del talud se detalla a continuación, donde se puede observar dos tipos diferentes de material, los mismos que concuerdan con el criterio geológico local. La primera capa, desde la superficie, es grava mal graduada; seguida por arcilla arenosa.

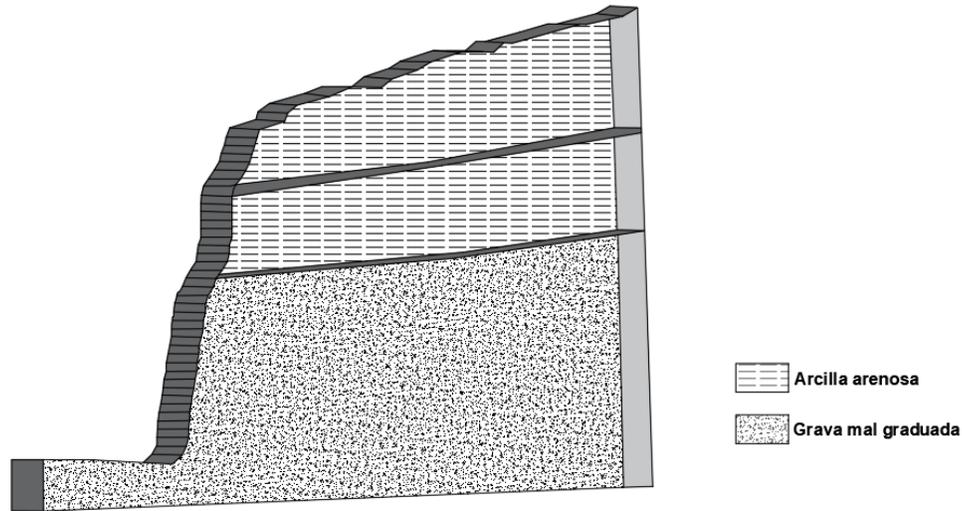


Figura 1.1 Vista en perspectiva de la estratigrafía

Fuente: Elaboración propia

1.1.6 Clima

La parroquia Llacao se encuentra dentro de la región bioclimática Sub-húmedo Templado. La temperatura media anual en el territorio oscila entre los 13,87°C y 15,70°C. La misma se ubica entre las altitudes 2320 a 2838 m.s.n.m. Recibe una precipitación media anual comprendida entre 717,65 mm y 838,17 mm, según el Mapa de Precipitación Promedio Interanual e Intermensual de la Cuenca del Río Paute. (Municipalidad de Cuenca, 2017)

1.2 Marco teórico

1.2.1 Minería a cielo abierto

Las innovaciones en las técnicas de explotación han modificado radicalmente la minería a partir de la segunda mitad del siglo XX, de modo que se ha pasado del aprovechamiento de vetas subterráneas de gran calidad, a la explotación en minas a cielo abierto, de yacimientos de menor calidad con minerales diseminados.

La minería a cielo abierto se caracteriza por los grandes volúmenes de materiales que se deben mover de la capa superficial. La disposición del yacimiento y el recubrimiento e intercalaciones de material estéril determinan la relación estéril/mineral con que se debe extraer este último. Este parámetro, comúnmente denominado "ratio", puede ser muy variable dependiendo de unos yacimientos y otros, pero en todos condiciona la viabilidad económica de las explotaciones y, consecuentemente, la profundidad que es posible alcanzar por minería de superficie. (Herbert, 2016)

Además de eso, la mina incluye escombreras, que llegan a tener grandes dimensiones. A ello se suman los vertederos para residuos del procesamiento, que en el caso de menas con bajo contenido metálico también requieren una gran superficie, y superficies de infraestructura como complejos de viviendas para los mineros, suministro de energía, vías de transporte, talleres, oficinas administrativas, plantas de tratamiento, etc.

La explotación minera a cielo abierto produce una alteración significativa de la corteza terrestre, tiene el doble efecto de eliminar las capas superiores del suelo (extracción), y de cubrirlas en otros lugares (establecimiento de escombreras). Deja depresiones, cuyo volumen depende de la cantidad de material extraído durante la explotación, las mismas constituyen una alteración morfológica permanente del suelo. Los tajos en rocas consolidadas producen alteraciones especialmente importantes, suelen tener una pendiente pronunciada y muchas veces se carece de material de relleno. (Bellotti, 2011)

1.2.2 Definición de cantera

Cantera es el término genérico que se utiliza para referirse a las explotaciones de rocas industriales, ornamentales y de materiales de construcción. Constituyen, por mucho, el sector más importante en cuanto a número, ya que desde tiempos pasados se han venido explotando para la extracción y abastecimiento de materias primas para ser usadas en la construcción y en obras de infraestructura. (Herbert, 2016)

El procedimiento para realizar la explotación queda definido por la aplicación de unos parámetros o diseños de la excavación, que permiten alcanzar las producciones

programadas, de la forma más económica posible y en las máximas condiciones de seguridad.

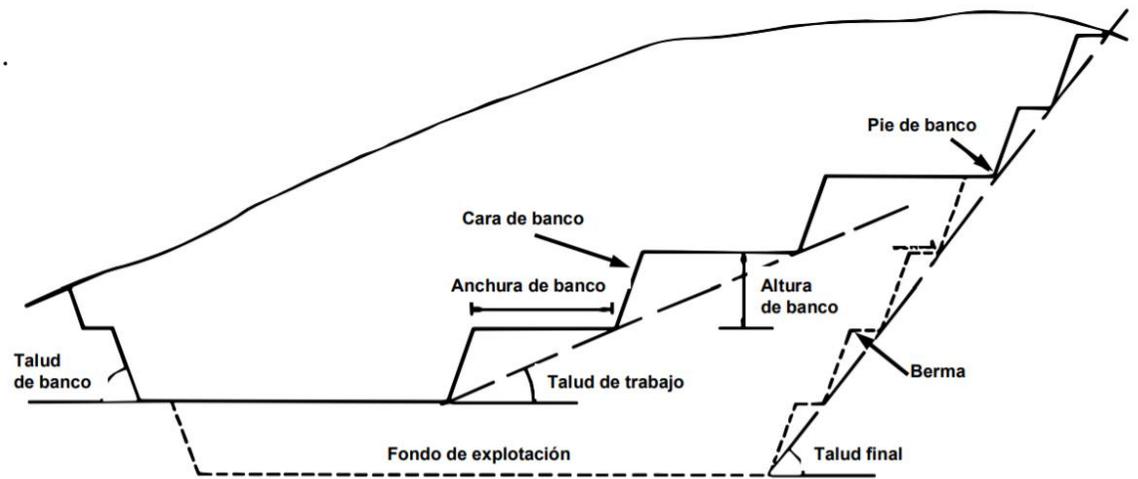


Figura 2.2 Parámetros geométricos del diseño de excavaciones

Fuente: (Herbet, 2007)

1.2.3 Parámetros geométricos del diseño de excavaciones

- **Banco:** Módulo comprendido entre dos niveles que constituyen el bloque que se explota de estéril/mineral.
- **Altura de banco:** Es la distancia vertical entre dos niveles.
- **Talud del banco:** Ángulo delimitado entre la horizontal y la línea de máxima pendiente de la cara del banco.
- **Talud de trabajo:** Ángulo determinado por los pies de los bancos entre los cuales se encuentra alguno de los tajos o plataformas de trabajo.
- **Límites finales de la explotación:** Son situaciones especiales, donde se indica el final de las excavaciones.
- **Talud final de explotación:** Es el ángulo de talud estable delimitado por la horizontal y la línea que une el pie del banco inferior y la cabeza del superior.
- **Bermas:** Plataformas horizontales existentes en los límites de la excavación sobre los taludes finales, estos contribuyen a mejorar la estabilidad de un talud y las condiciones de seguridad frente a deslizamientos o caídas de piedras.

- **Pistas:** Son las estructuras que se encuentran dentro de una explotación a través de las cuales se extraen los materiales, o se efectúan desplazamientos de equipos y servicios entre diferentes puntos de la misma.
- **Ángulo de reposo del material:** Es el talud máximo para el que es estable sin deslizar el material suelto que lo constituye y en condiciones de drenaje total, después de vertido. (Herbet, 2007)

1.2.4 Definición de materiales de construcción

Los materiales de construcción son cuerpos físicos, con una extensión limitada y propiedades específicas, que se colocan en un orden y debida proporción, para formar una obra de infraestructura. La explotación de las rocas sedimentarias clásticas se efectúa a cielo abierto, debido, por una parte, a su localización y, por la otra, a su formación fluvial reciente. Estos yacimientos, por sus propiedades y emplazamiento en llanuras o terrazas, presentan un nivel más o menos cercano a la superficie de afloramiento. Cuando están situados en los cauces de los ríos, una parte del yacimiento se encuentra bajo el agua y otra parte en la superficie. (Alconz, 2006)

1.2.5 Estabilidad de taludes

Se conoce con el nombre genérico de taludes a cualquier superficie inclinada con respecto a la horizontal, que adoptan permanentemente las masas de tierras. Cuando el talud se produce en forma natural, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación, en tanto que los taludes artificiales son los inclinados de los terraplenes. También se producen taludes en los bordes de una excavación que se realiza a nivel del terreno natural, a los cuales se los suele denominar taludes de excavación. En conclusión, el talud constituye la estructura más compleja de las vías terrestres; razón por la cual es preciso analizar la necesidad de definir criterios de aceptabilidad del diseño, uno de estos criterios está expresado en función del factor de seguridad; la determinación del mismo dependerá de la experiencia del ingeniero que se encuentra a cargo; y de un

criterio que no es muy conocido, como es la probabilidad de falla, este es un componente estadístico. Además, la estabilidad de taludes determinará en un instante dado, cuál será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén, provocando una mayor confianza y seguridad al momento de desarrollar una obra. A diferentes inclinaciones del talud corresponden diferentes masas de material por mover y, por lo tanto, diferentes cotas. (Navarro, 2008)

La estabilidad de un talud se determina por la relación existente entre las fuerzas que tienden a producir la inestabilidad y las fuerzas resistentes u opuestas a la estabilidad, producidas por las características del macizo rocoso. Los métodos frecuentemente utilizados en el análisis de estabilidad de taludes en roca, buscan determinar el equilibrio límite entre las rocas factibles a derrumbarse. (Velásquez, 2012)

1.2.6 Diseño de taludes

Para el diseño de un talud se debe incluir como mínimo los siguientes elementos: (Jara & Parra, 2016)

1.2.6.1 Pendiente del talud

Para el diseño de la pendiente del talud se debe analizar a profundidad las condiciones de litología, estructura y meteorización de los materiales que conforman el talud. Para decidir el valor de la pendiente y la forma del talud se puede realizar ensayos de laboratorio y análisis de estabilidad, utilizando modelamientos matemáticos y físicos. (Jara & Parra, 2016)

1.2.6.2 Bermas intermedias

Se debe construir bermas intermedias en los sitios de cambio de pendiente y en los sitios donde sean requeridas para garantizar un factor de seguridad adecuado contra deslizamientos. La localización y ancho de las bermas depende del propósito de las bermas. (Jara & Parra, 2016)

Entre los criterios generales según su propósito (diseño de bermas y pendientes) se encuentran:

- Formación geológica.
- Meteorización.
- Estructura geológica.
- Comportamiento hidrológico
- Sismicidad -Factores de riesgo

1.2.7 Mecánica de rocas

1.2.7.1 Ábacos utilizados en la estabilidad de taludes

En la historia de la práctica ingenieril, al no existir ordenadores, se inició con el uso de diversos ábacos de uso más sencillo e inmediato. Las variables que se usan son demasiadas, razón por la cual, existe un número extenso de ábacos y tablas, siendo el más adecuado para este proyecto el Ábaco de Hoek y Bray, que se describe a continuación:

Ábacos de Hoek y Bray

Los ábacos pueden ser empleados para el estudio de la estabilidad de taludes en terrenos homogéneos, ya sea en suelos o en roca muy fracturada.

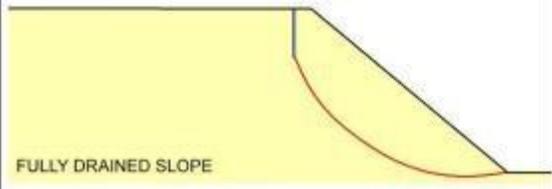
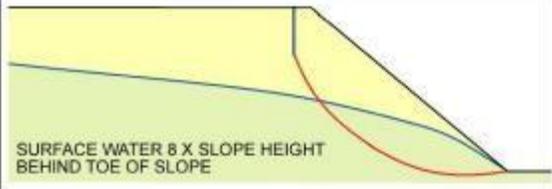
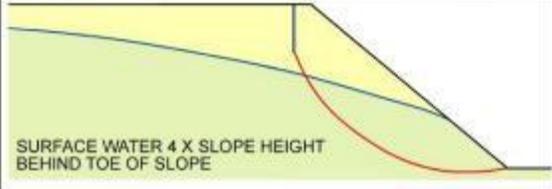
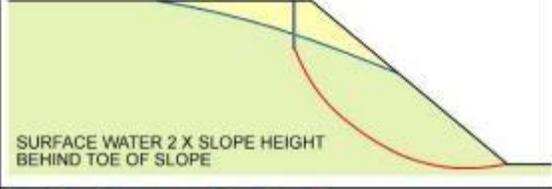
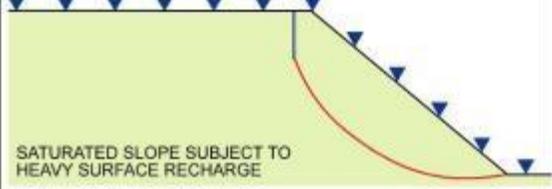
GROUNDWATER FLOW CONDITIONS	CHART NUMBERS
 <p>FULLY DRAINED SLOPE</p>	1
 <p>SURFACE WATER 8 X SLOPE HEIGHT BEHIND TOE OF SLOPE</p>	2
 <p>SURFACE WATER 4 X SLOPE HEIGHT BEHIND TOE OF SLOPE</p>	3
 <p>SURFACE WATER 2 X SLOPE HEIGHT BEHIND TOE OF SLOPE</p>	4
 <p>SATURATED SLOPE SUBJECT TO HEAVY SURFACE RECHARGE</p>	5

Figura 1.3. Condiciones de flujo de agua y presión intersticial para la selección del ábaco de cálculo.

Fuente: (Hoek & Bray, 1981)

El uso de la tabla para determinar el factor seguridad de una pendiente, contiene los pasos:

- Paso 1: Decidir sobre las condiciones del agua subterránea que se cree que existen en la pendiente y elegir el gráfico que más se acerca a estas condiciones. (Hoek & Bray, 1981) A continuación, se presentan los diferentes gráficos según las condiciones del agua subterránea.

Ábaco No. 1: Pendiente completamente drenada

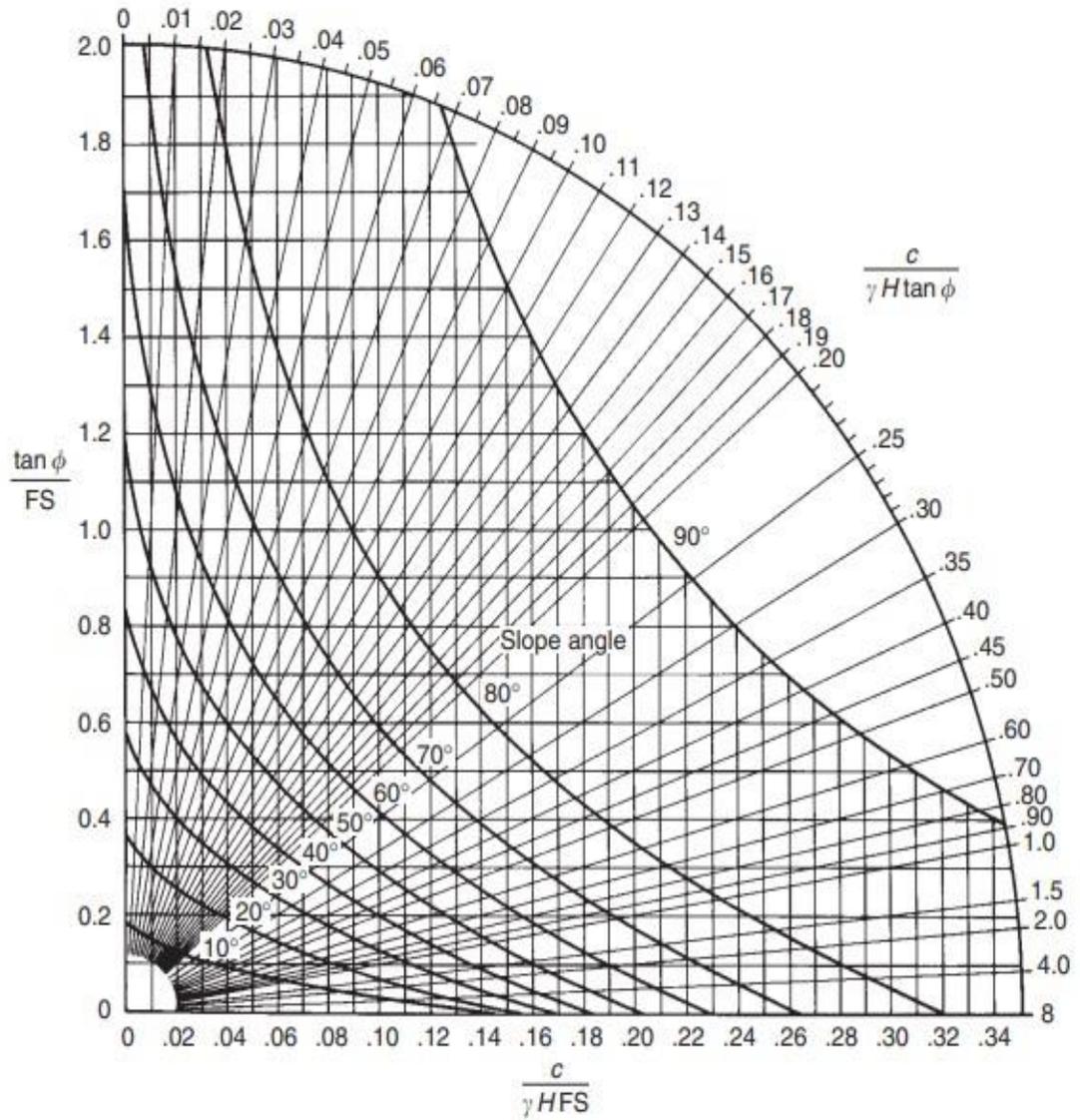


Figura 1.4. Ábaco de falla circular No. 1

Fuente. (Hoek & Bray. 1981)

Ábaco No. 2: Condición de agua subterránea 2

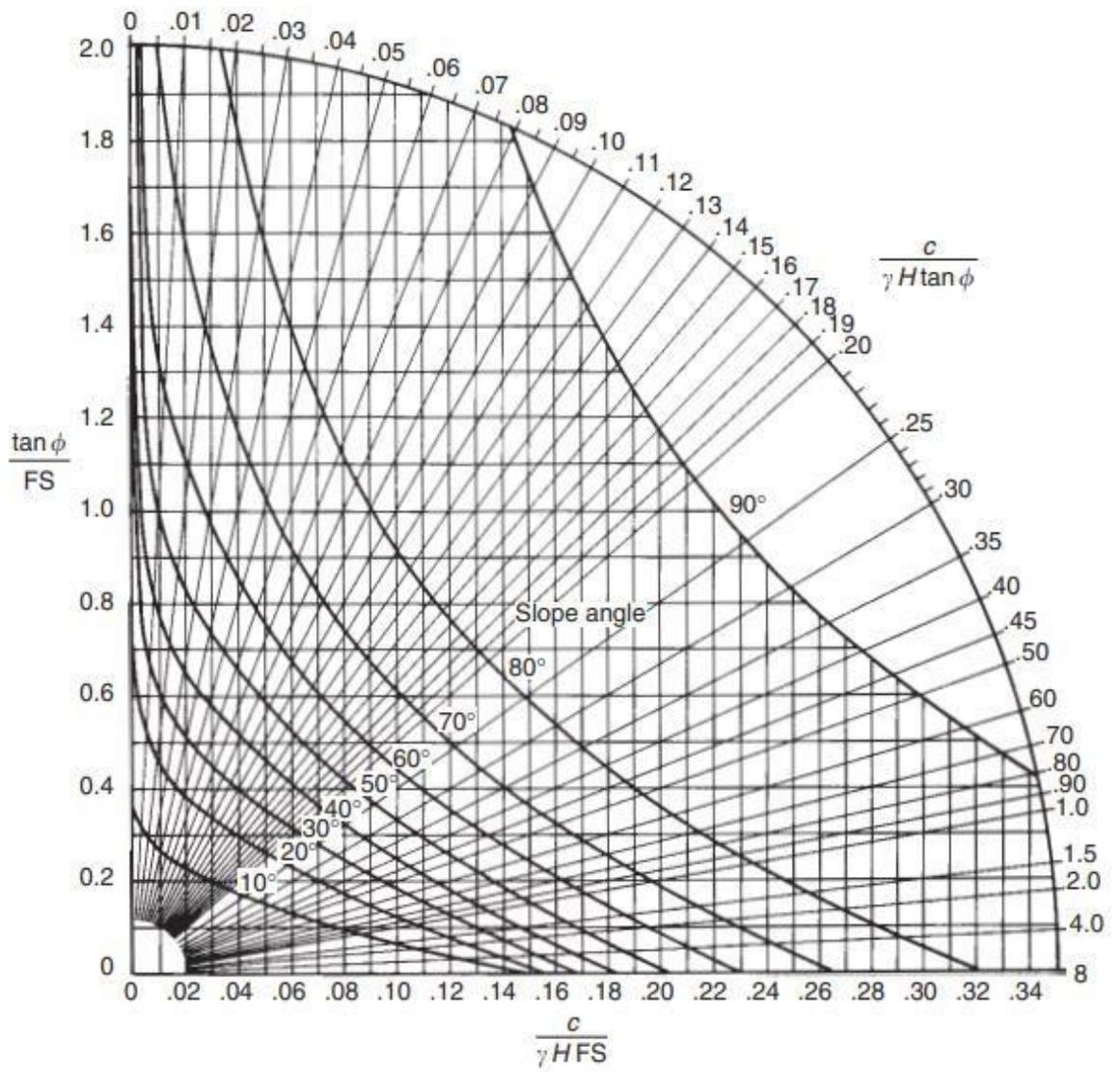


Figura 1.5. Ábaco de falla circular No. 2

Fuente: (Hoek & Bray. 1981)

Ábaco No. 3: Condición del agua subterránea 3

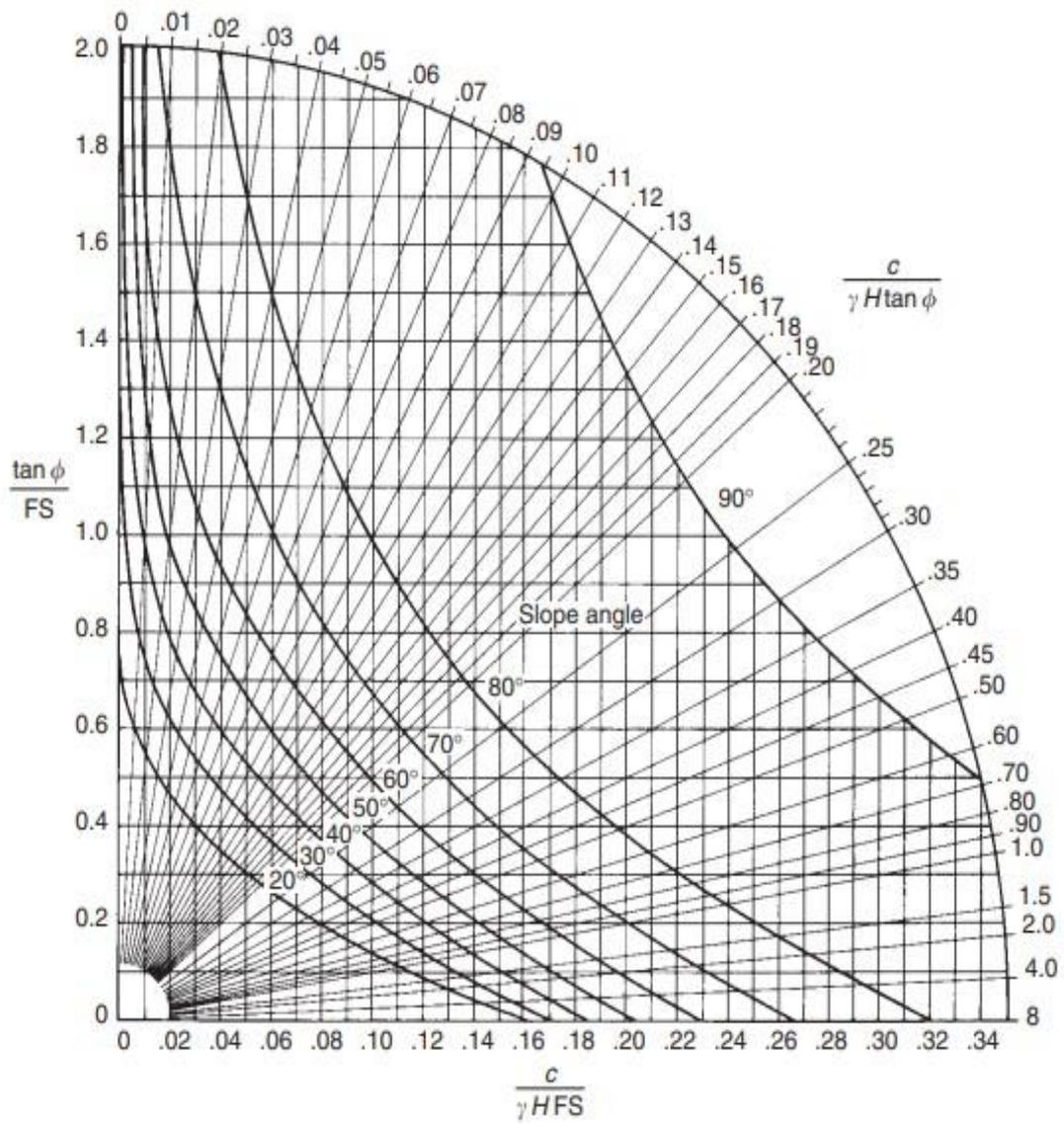


Figura 1.6. Ábaco de falla circular No. 3

Fuente: (Hoek & Bray. 1981)

Ábaco No. 4: Condiciones de agua subterránea 4

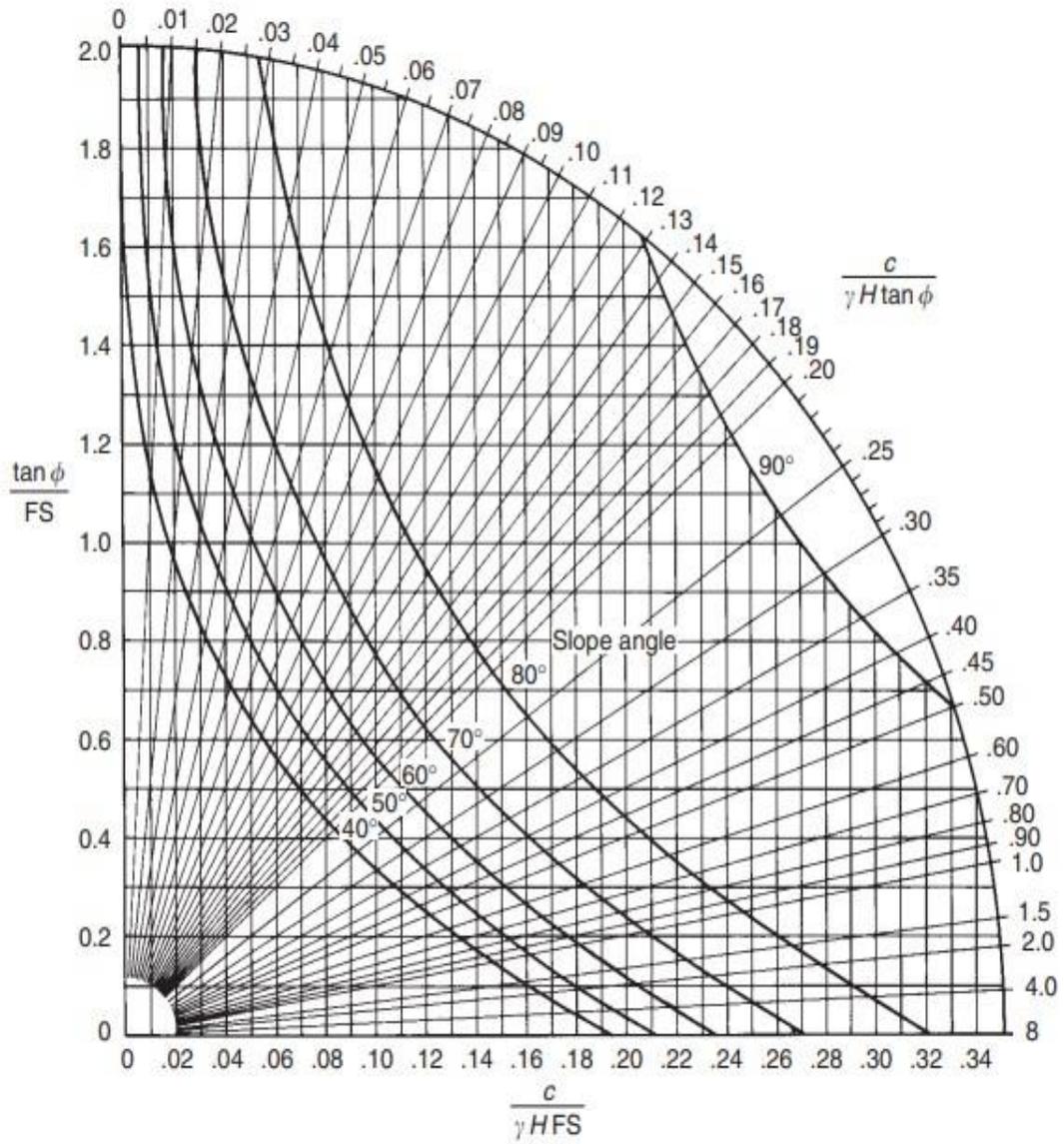


Figura 1.7. Ábaco de falla circular No. 4

Fuente (Hoek & Bray, 1981)

Ábaco No.5: Pendiente totalmente saturada

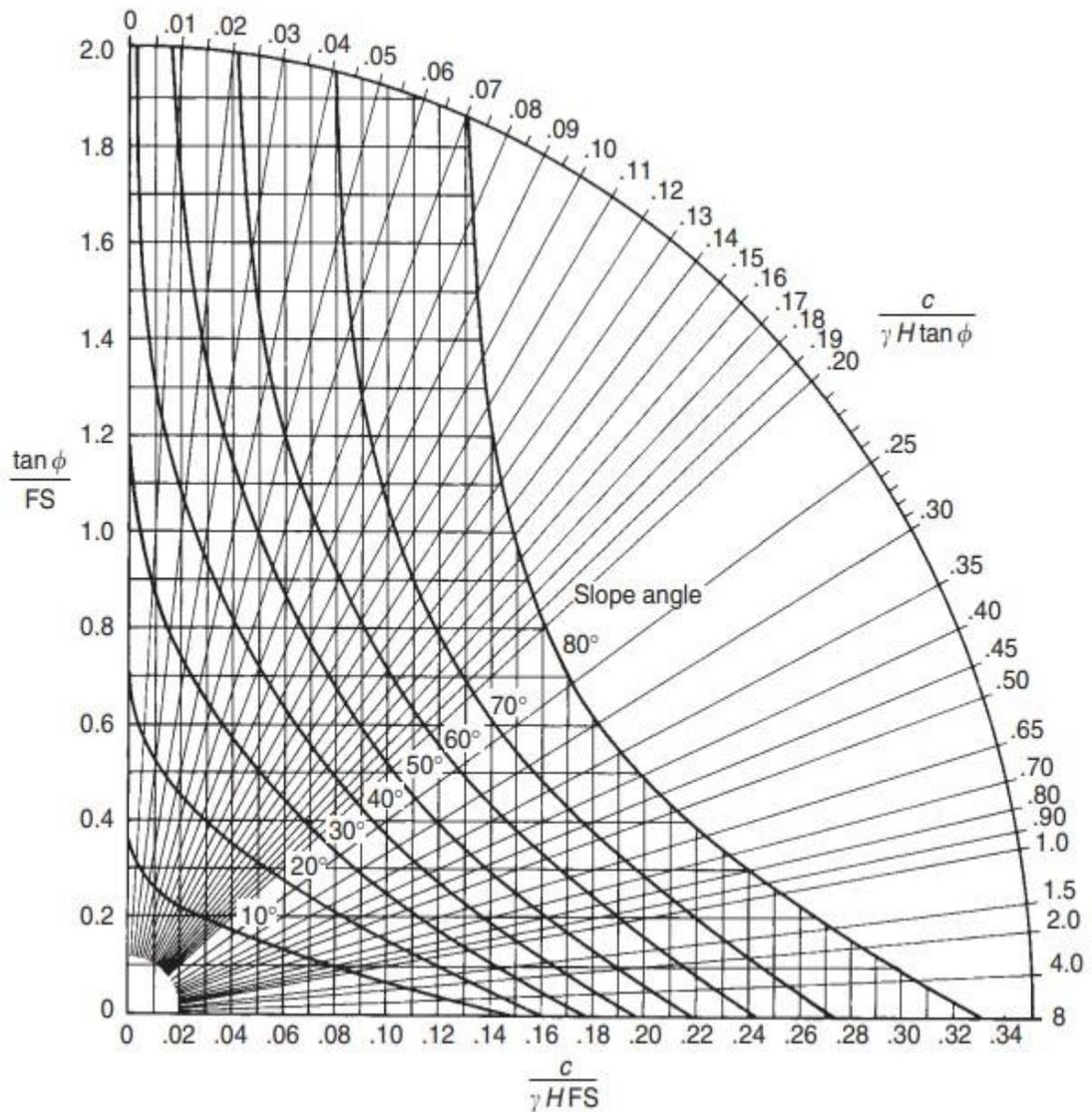


Figura 1.8. Ábaco de falla circular No. 5

Fuente: (Hoek & Bray. 1981)

- Paso 2: Seleccionar los parámetros de resistencia de la roca aplicables al material que está formando el talud.
- Paso 3: Calcular el valor del radio adimensional $c / (\gamma H \tan \phi)$ encontrar este valor en la escala circular externa de la tabla.

En donde:

- c : Cohesión.
 - γ : Peso específico del terreno, representativo del cuerpo del talud.
 - H : Altura del talud.
 - ϕ : Ángulo de rozamiento interno efectivo del terreno.
- Paso 4: Seguir la línea radial desde el valor encontrado en el paso 3 con su intersección de la curva a la cual corresponde el ángulo de la pendiente.
 - Paso 5: Encontrar el valor correspondiente de $\tan \phi/FS$ o $c/(\gamma H FS)$, dependiendo de cuál es más conveniente, y calcular el factor de seguridad (FS).

1.2.8 Evaluación geotécnica

La Geotecnia pertenece a una rama de la Ingeniería, esta trata el estudio de la interacción de las construcciones con el terreno. Esta disciplina está relacionada a diferentes disciplinas como: Ingeniería Civil, Arquitectura y la Ingeniería Minera, que están relacionadas con el terreno. (Universidad de Cantabria, 2014)

Para realizar la evaluación geotécnica de la zona de estudio, se obtendrán ciertos parámetros que serán base para realizar el posterior diseño de estabilidad, entre estos están:

Cohesión: Es una medida de la adherencia entre las partículas de suelo. Al hablar de cohesión en mecánica de suelos se entiende como la resistencia a la corte producida por la cementación. En suelos eminentemente granulares, es decir, que no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión es igual a 0 estos suelos son denominados “Suelos no cohesivos”. (Suarez, 1998)

Ángulo de fricción: Es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, es decir $\tan \phi$.

El ángulo de fricción depende de varios factores. (Suarez, 1998)

Entre ellos algunos de los más importantes son:

- a. Tamaño de los granos.
- b. Forma de los granos.
- c. Distribución de los tamaños de granos.
- d. Densidad.

Peso específico: Se define como una propiedad física del suelo, la misma que es igual a la relación entre el peso del mismo y su volumen, partiendo de esta definición se deduce que el peso específico de una sustancia es igual al producto de su densidad por la gravedad. (Guerrero, 2015)

Porosidad: Se define como el porcentaje en volumen del suelo que no es ocupado por partículas sólidas. Los poros del suelo son espacios que alojan agua, gases y la actividad biológica del suelo. En general se habla de porosidad del suelo. Sin embargo, es más correcto hacer referencia a la porosidad del horizonte, porque al igual que la estructura, cambia de una capa a otra. (Baver, 1972)

Si bien existe una importante relación entre porosidad y textura, ésta es aún más estrecha con respecto a la estructura, ya que la disposición de las partículas del suelo determina la cantidad y naturaleza de los poros.

Permeabilidad: Se entiende como la facilidad con la que el agua pasa a través de los poros. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. Algunos suelos son tan permeables y la filtración tan intensa que para construir en ellos cualquier tipo de estanque es preciso aplicar técnicas de construcción especiales. (Angelone, 2006)

1.2.9 Levantamiento topográfico

A inicios del año 2021 se realizó el levantamiento topográfico, generando así, el mapa topográfico georreferenciado en el sistema PSAD 56 que se encuentra a continuación, este incluye: Coordenadas U.T.M., Escalas indicadas, Intervalo de curvas de nivel: 1 m., Vías de ingreso interna, Instalaciones y Perfiles Transversales.

Para obtener toda esta información se usó un Drone Phantom 4 Profesional, la superficie cubierta por el equipo fue de aproximadamente 15 hectáreas.

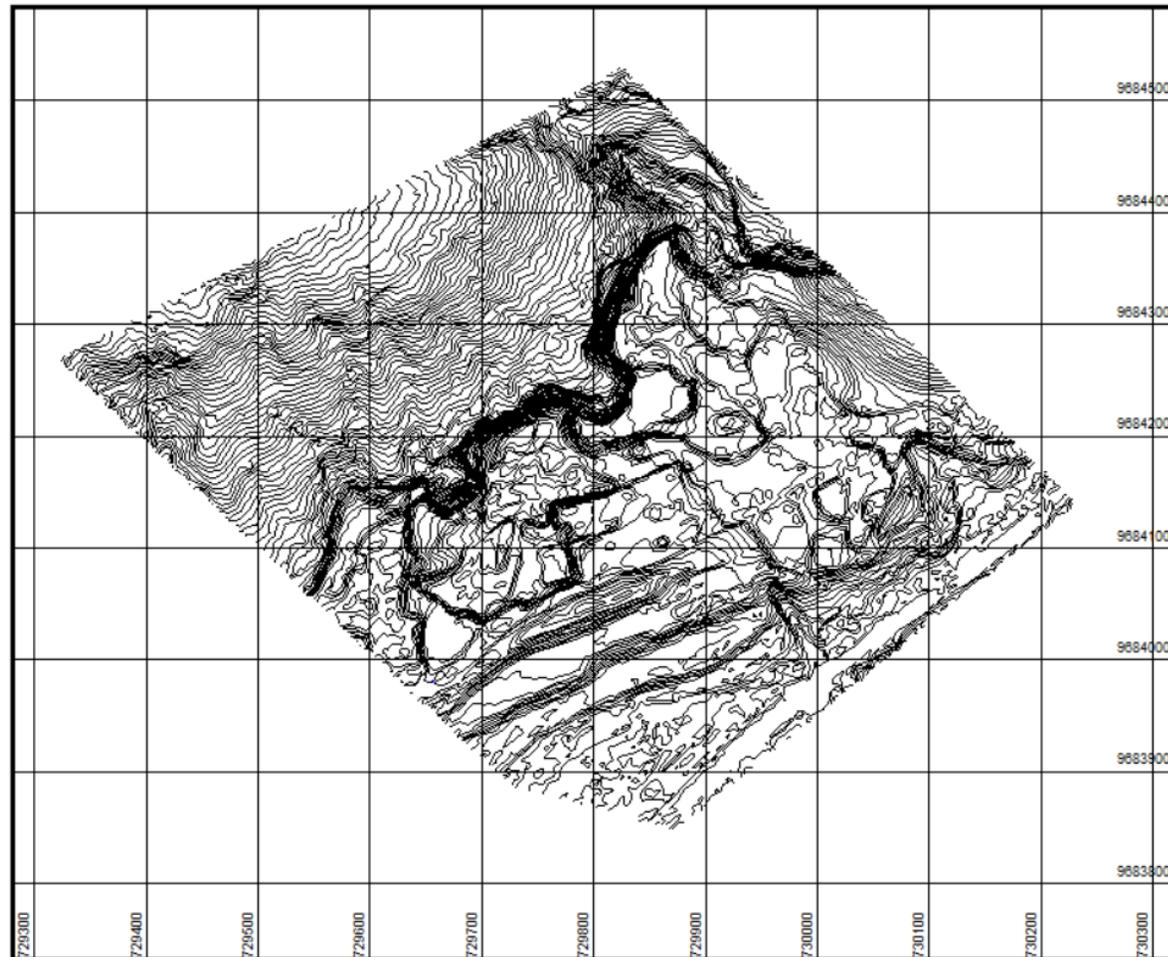


Figura 1.9. Levantamiento topográfico

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS GEOMECÁNICO

2.1 Peso específico

Para obtener el peso específico de la zona de estudio, se tomaron diversas muestras con las que se hicieron ensayos de laboratorio. Se utilizó el método del picnómetro, este consiste en usar un matraz con forma de pera y una tapa con capilar, la cual ayuda a desalojar el exceso de agua. Para obtener la densidad se debe obtener diversos datos para aplicar la siguiente fórmula: (Flores, 2010)

$$p = \frac{\rho_w(W_s - W_a)}{(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)} \quad (1)$$

Donde:

ρ_w = Densidad del agua (g/cm^3).

W_s = Peso del picnómetro con la muestra.

W_a = Peso del picnómetro con aire.

W_{sw} = Peso del picnómetro llenado con suelo y agua.

W_w = Peso del picnómetro llenado con agua.



Figura 2.1. Picnómetro con agua

Fuente: Elaboración propia.

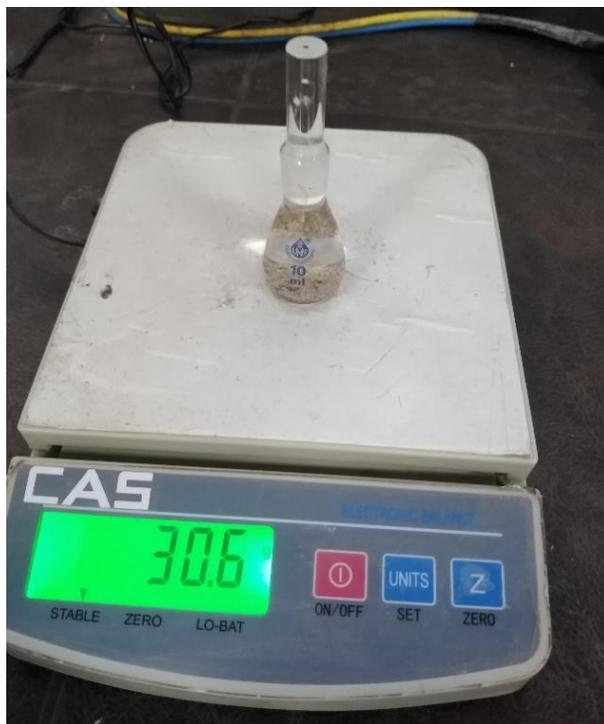


Figura 2.2. Picnómetro con material de la Muestra 2.

Fuente: Elaboración propia.

Después de obtener los datos correspondientes y aplicar la fórmula indicada, con cada una de las muestras de suelo, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2.1 Resultados de densidad.

MUESTRA	DENSIDAD
1	2,4 g/cm ³
2	2,5 g/cm ³
3	2 g/cm ³
4	2 g/cm ³
5	2 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se calcula la densidad promedio, con el fin de saber la densidad del suelo de la zona de estudio.

$$\rho_{prom} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5}{5} = 2,18 \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

2.2 Cohesión

Para obtener la cohesión de la zona de estudio, se procedió a la toma de datos con la ayuda de una veleta, instrumento que ayuda a la estimación de la resistencia a la penetración horizontal del suelo, determinando así el estado de las tensiones horizontales.

El resultado de la cohesión es igual al promedio de los datos tomados en campo, en este caso se obtuvo un resultado de 25,20 kPa.

2.3 Angulo de fricción

Para el ángulo de fricción fue necesario conocer la cohesión del suelo, esta fue calculada con anterioridad. El instrumento utilizado fue el penetrómetro, que sirve para caracterizar

la resistencia natural del suelo, de igual manera se tomaron datos de diferentes puntos, obteniendo un promedio igual al 30,4 kPa.

Con estos datos, se procede a graficar los datos del penetrómetro en el eje de las X, trazando un arco desde el punto 0. Luego se traza una recta desde la cohesión, que está en el eje de las Y, hasta el punto tangente del arco que se realizó previamente, de esta manera se puede obtener el ángulo de fricción.

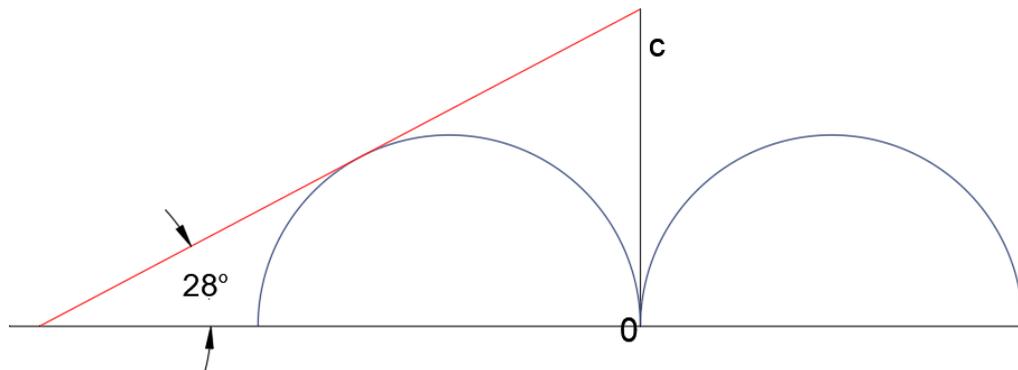


Figura 2.3. Cálculo del ángulo de fricción interna.

Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar la gráfica con los datos correspondientes, se obtuvo un ángulo de fricción interna de 28°.

2.4 Granulometría

La granulometría ayuda a saber la medida de los granos en los sedimentos. Con este ensayo se obtienen datos significativos del suelo, tales como: origen, propiedades mecánicas y la cantidad de granos según el tamaño en este caso de los suelos. (Gallardo, 2016)

El método que se usó fue mediante el tamizado, el mismo que consiste en elaborar la curva granulométrica de las distintas muestras de suelo. Para esto se pesó cada una de las muestras por tamices o mallas por vía seca con diferentes aberturas, desde 75 mm hasta aberturas de 0,075 mm. Se tomó como referencia la clasificación de ASTM.

GRAVA	ARENA			LIMO	ARCILLA	COLOIDES
	GRUESA	MEDIA	FINA			
76.2 mm 3"	4.75 mm N°4	2 mm N°10	0.42 mm N°40	0.074 mm N°200	0.005 mm	0.001 mm

Figura 2.4. Clasificación de suelos basado en granulometría ASTM

Fuente: (Gallardo, 2016)

Luego de realizar el proceso de tamizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Muestra 1

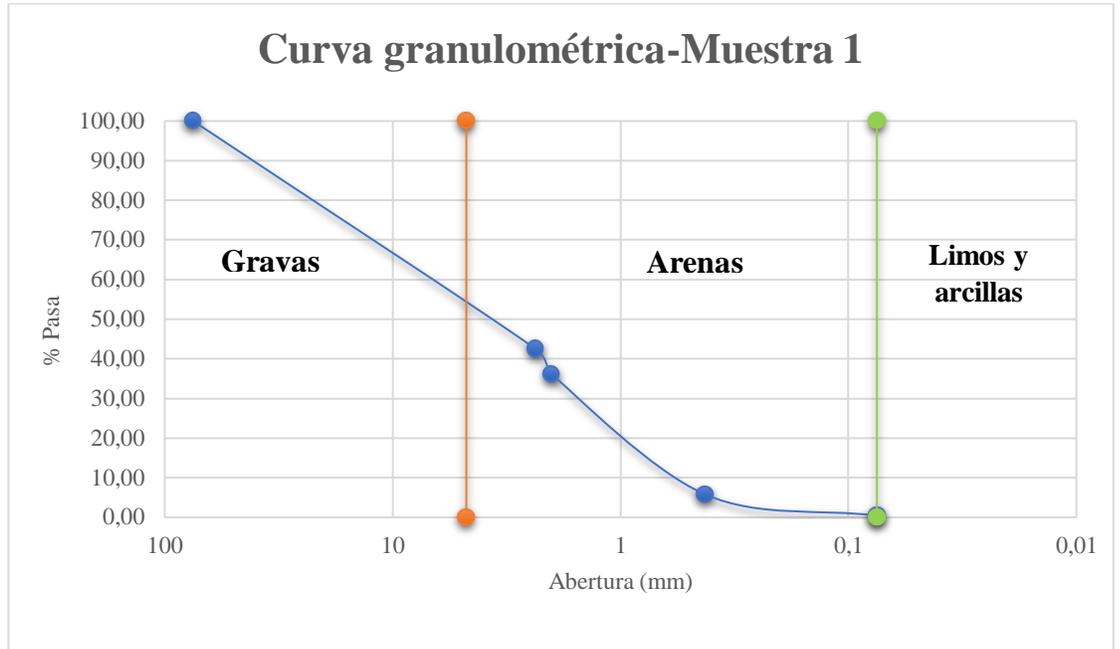


Figura 2.5. Curva granulométrica-Muestra 1.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2.2 Resultados de granulometría- Muestra 1

MUESTRA 1	
GRAVAS	57,48 %
ARENAS	42,06 %
LIMOS Y ARCILLAS	0,45 %

Fuente: Elaboración Propia

Muestra 2

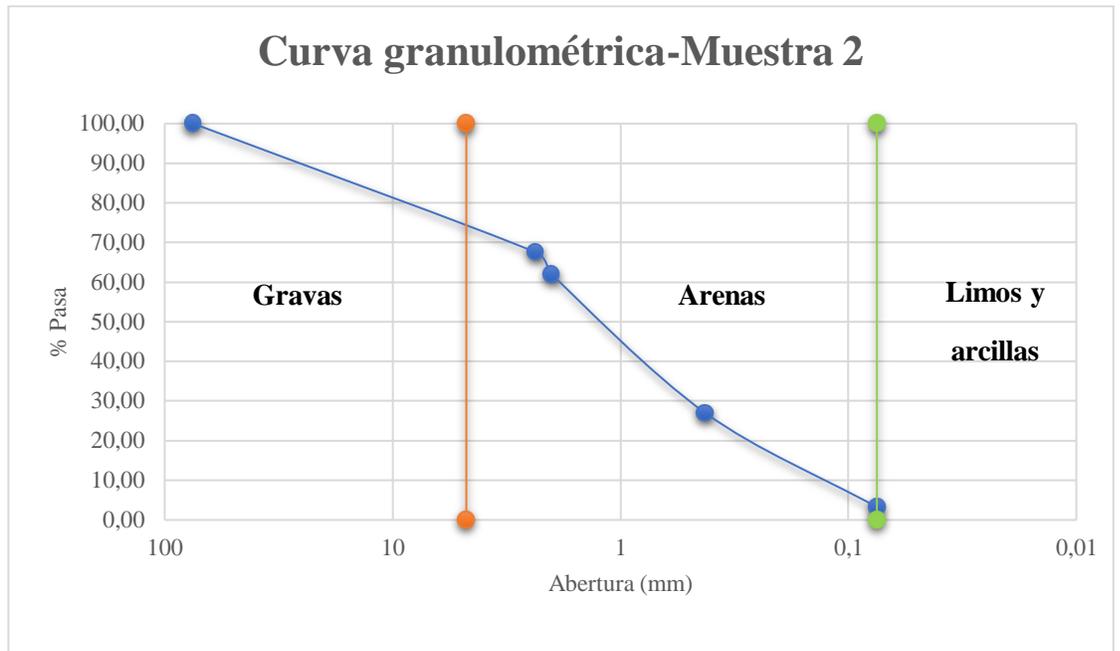


Figura 2.6. Curva granulométrica-Muestra 2.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.3 Resultados de granulometría- Muestra 2

MUESTRA 2	
GRAVAS	32,48 %
ARENAS	64,28 %
LIMOS Y ARCILLAS	3,24 %

Fuente: Elaboración Propia

Muestra 3

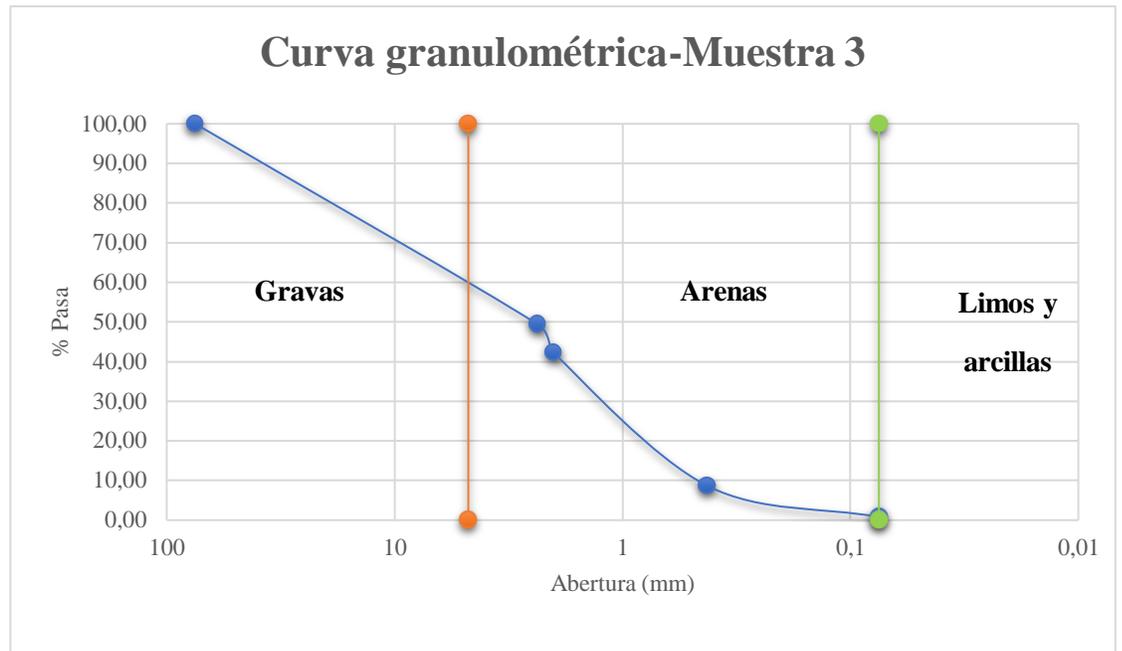


Figura 2.7. Curva granulométrica-Muestra 3.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2.4 Resultados de granulometría- Muestra 3

MUESTRA 3	
GRAVAS	50,59 %
ARENAS	48,62 %
LIMOS Y ARCILLAS	0,79 %

Fuente: Elaboración Propia

Muestra 4

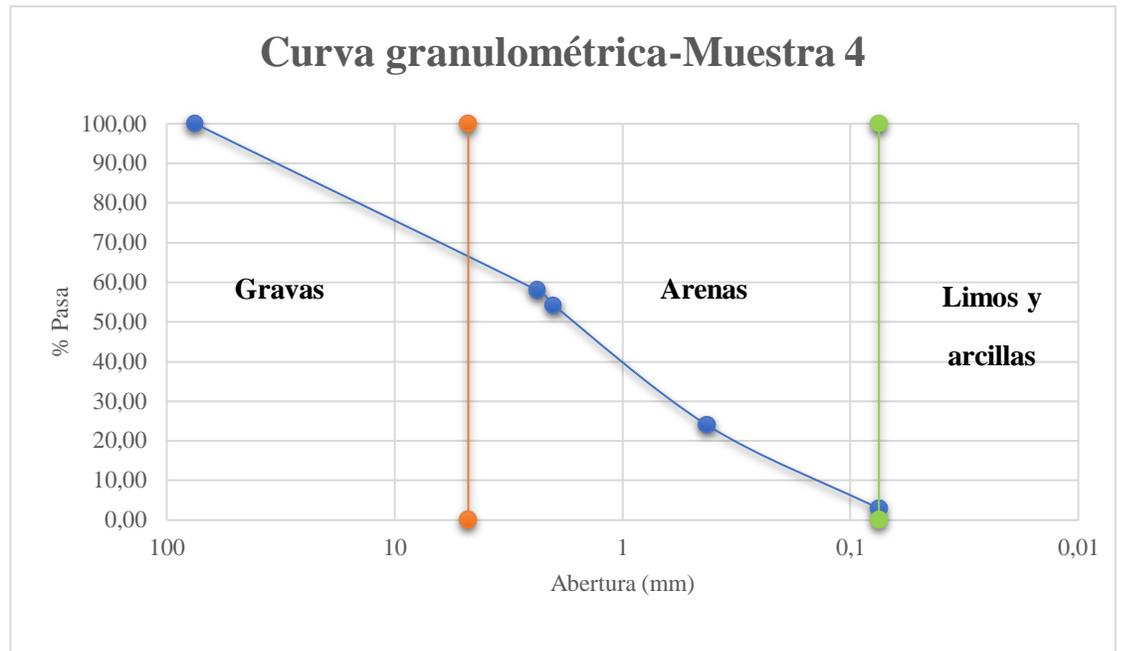


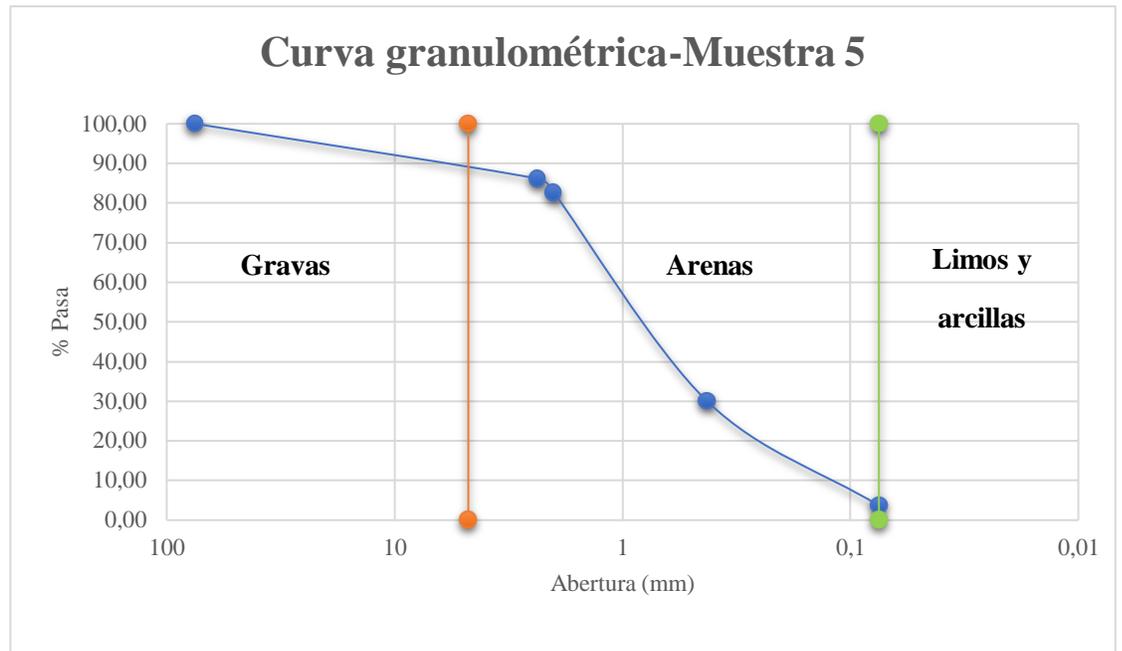
Figura 2.8. Curva granulométrica-Muestra 4.

Fuente: Autor

Tabla 2.5 Resultados de granulometría- Muestra 4

MUESTRA 4	
GRAVAS	42,09 %
ARENAS	54,99 %
LIMOS Y ARCILLAS	2,93 %

Fuente: Elaboración Propia

Muestra 5**Figura 2.9.** Curva granulométrica-Muestra 5.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2.5 Resultados de granulometría- Muestra 5

MUESTRA 5	
GRAVAS	13,84 %
ARENAS	82,49 %
LIMOS Y ARCILLAS	3,66 %

Fuente: Elaboración Propia

Se puede decir que el tipo de suelo en su gran mayoría es arena, seguido por grava, que en dos lugares representa más de la mitad del suelo, y con un porcentaje mínimo se encuentran los limos y arcillas.

2.5 Humedad

Para obtener el porcentaje de humedad del suelo, se realizó un ensayo de laboratorio, el mismo que consiste en obtener el peso en seco y el peso cuando la muestra se encuentra húmeda, para poder aplicar la siguiente fórmula:

$$\% H = \frac{P_1 - P_2}{P_2} * 100 \quad (3)$$

Donde:

% H= Porcentaje de humedad.

P₁ = Peso húmedo del suelo.

P₂ = Peso seco del suelo.

- Muestra 1

$$\% H = \frac{0,774\text{g} - 0,678\text{ g}}{0,678\text{ g}} * 100 = 14,16\%$$

- Muestra 2

$$\% H = \frac{0,8665\text{g} - 0,604\text{ g}}{0,604\text{g}} * 100 = 43,46\%$$

- Muestra 3

$$\% H = \frac{0,7136\text{g} - 0,491\text{ g}}{0,491\text{g}} * 100 = 45,34\%$$

- Muestra 4

$$\% H = \frac{0,8486\text{g} - 0,632\text{ g}}{0,632\text{g}} * 100 = 34,27\%$$

- Muestra 5

$$\% H = \frac{0,8134g - 0,562 g}{0,562g} * 100 = 44,73\%$$

Según los resultados obtenidos, el porcentaje de humedad de la muestra 1 es la que presento el porcentaje de humedad más bajo que en las otras zonas, ya que en ese lugar hay mayor presencia de material rocoso.

2.6 Permeabilidad

Para saber la permeabilidad del suelo, se tomó como punto de partida la granulometría del mismo, con esta clasificación se puede saber que tan permeable es el tipo de suelo que se encuentra en la zona de estudio.

Zona SBTn	SBTn	Rango de k (M/s)	SBTn Ic
1	Grano fino sensible	3×10^{-10} de 3×10^{-8}	NA
2	Los suelos orgánicos - arcilla	1×10^{-10} to 1×10^{-8}	$Ic > 3,60$
3	Arcilla	1×10^{-10} to 1×10^{-9}	$2,95 < Ic < 3,60$
4	Mezcla de limo	3×10^{-9} to 1×10^{-7}	$2,60 < Ic < 2,95$
5	Mezcla de arena	1×10^{-7} to 1×10^{-5}	$2,05 < Ic < 2,60$
6	Arena	1×10^{-5} to 1×10^{-3}	$1,31 < Ic < 2,05$
7	Arena densa de arena grava	1×10^{-3} to 1	$Ic < 1,31$
8	Muy denso / rigidez del suelo	1×10^{-8} to 1×10^{-3}	NA
9	Muy dura suelo de grano fino	1×10^{-9} to 1×10^{-7}	NA

Figura 2.10. Estimación de la permeabilidad del suelo

Fuente: (Loyola, C., Rivas, J., Gacitúa, M., 2014).

Además, se realizó un ensayo de laboratorio, donde se introdujo cada una de las muestras en recipientes que posteriormente fueron sobresaturados, cada uno con 400 ml de agua. Se tomó la medida inicial de la muestra de material con agua y luego de 24 horas, se tomó la medida de nuevo, con el fin de saber qué tanta agua se absorbió en el material a lo largo del día. Obteniendo los siguientes resultados:

- **Muestra 1**

Se colocó 5 cm de material, equivalente a 592,1 gramos, de igual manera 5 cm de agua, equivalente a 400 ml. Al cabo de 24 horas, el agua se redujo a 3,2 cm. Es decir $3,7 \times 10^{-7}$ m/s. Este resultado es igual al cociente entre la cantidad que se redujo en metros, para el tiempo transcurrido en segundos.



Figura 2.11. Ensayo de permeabilidad-Muestra 1

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra 2**

Se colocó 5 cm de material, equivalente a 476,3 gramos, de igual manera 5 cm de agua, equivalente a 400 ml. Al cabo de 24 horas, el agua se redujo a 1,2 cm. Es decir $1,39 \times 10^{-7}$ m/s.



Figura 2.12. Ensayo de permeabilidad-Muestra 2

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra 3**

Se colocó 5 cm de material, equivalente a 469,5 gramos, de igual manera 5 cm de agua, equivalente a 400 ml. Al cabo de 24 horas, el agua se redujo a 1,6 cm. Es decir $1,85 \times 10^{-7}$ m/s.



Figura 2.13. Ensayo de permeabilidad-Muestra 3

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra 4**

Se colocó 5 cm de material, equivalente a 554,6 gramos, de igual manera 5 cm de agua, equivalente a 400 ml. Al cabo de 24 horas, el agua se redujo a 2 cm. Es decir $2,3 \times 10^{-7}$ m/s.

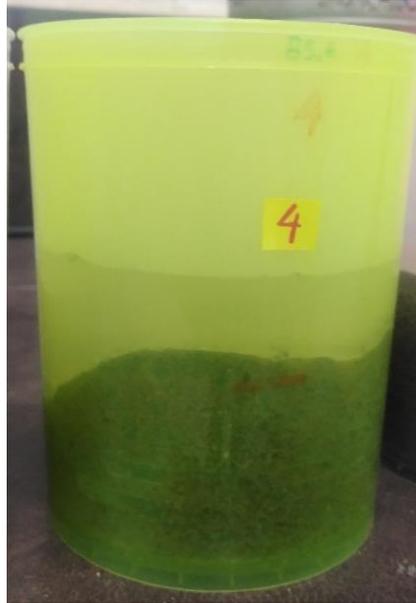


Figura 2.14. Ensayo de permeabilidad-Muestra 4

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra 5**

Se colocó 5 cm de material, equivalente a 503,6 gramos, de igual manera 5 cm de agua, equivalente a 400 ml. Al cabo de 24 horas, el agua se redujo a 3,2 cm. Es decir $1,27 \times 10^{-7}$ m/s.



Figura 2.15. Ensayo de permeabilidad-Muestra 5

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE ESTABILIZACIÓN

3.1 Factor de seguridad

Para el cálculo del factor de seguridad, fue necesario el uso de ábacos de Hoek y Bray, primero se decidió sobre las condiciones de agua subterránea que existe en la pendiente. En este caso se usó el grafico No. 5 “Pendiente totalmente saturada”.

Para realizar el cálculo del valor del radio adimensional $c/(\gamma H \tan \phi)$ se tienen los siguientes datos:

- c : 25,20 KPa= 25203 N/m².
- γ : 21378,49 N/m³.
- H : 50 m.
- ϕ : 28°.
- Ángulo de la pendiente: 70°.

$$\frac{25203 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{\left(21378,49 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}\right) * (50 \text{ m}) * \text{tag}(28)} = 0,044$$

A continuación, se sigue la línea radial desde el valor encontrado, en este caso 0,044; con su intersección de la curva a la cual corresponde el ángulo de la pendiente.

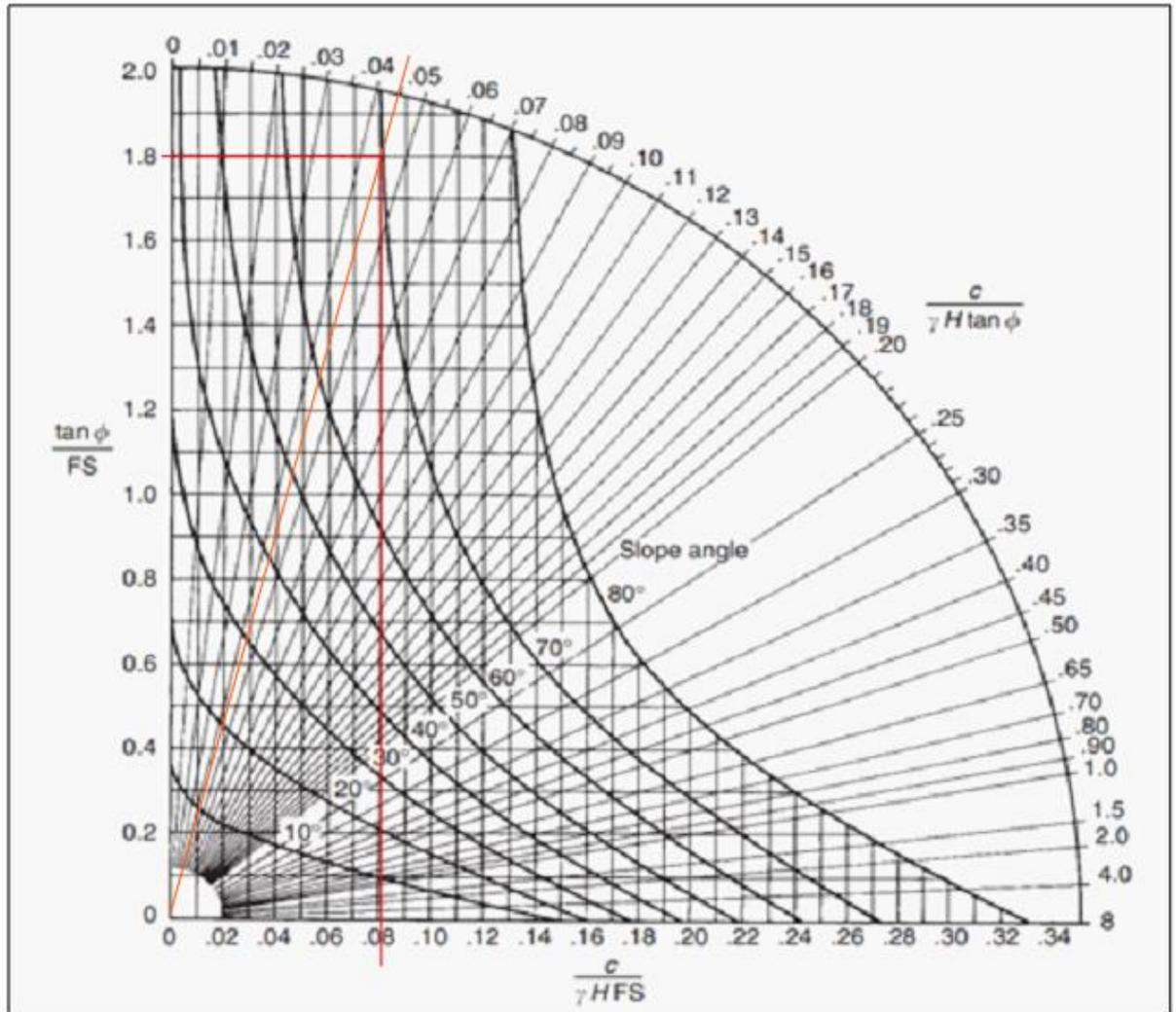


Figura 3.1. Cálculo del factor de seguridad.

Fuente: Elaboración Propia.

Por último, se calcula el valor de “FS” con las fórmulas de $\tan \phi / FS$ o $c / (\gamma H FS)$.

$$1,8 = \frac{\tan(28)}{FS} \rightarrow FS = \frac{\tan(28)}{1,8} = 0,3$$

Analizando el resultado, se observa que el factor de seguridad es muy bajo en las condiciones que se encuentra actualmente el terreno. Para esto es necesario, realizar un

diseño óptimo, en donde uno de los propósitos es que el factor de seguridad aumente al menos a 1,2.

3.2 Diseño para la nueva conformación del terreno y estabilidad del talud

3.2.1 Altura de intervención para estabilización del talud

Para establecer esta altura es necesario determinar la cota superior (H_s) y la cota base inferior (H_i). De esta forma poder calcular la altura límite (H), de la siguiente manera:

$$H = H_s - H_i$$

$$H = 2467 \text{ m} - 2417 \text{ m}$$

$$H = 50 \text{ m}$$

3.2.2 Altura del banco

La condición esencial para establecer la altura del banco es satisfacer las exigencias de seguridad en los trabajos mineros; para ello se debe considerar que, en la explotación de material pétreo, el rango permitido para establecer la altura del banco no debe sobrepasar la altura media del brazo del cucharón. Tomando en cuenta este requerimiento, se escogerá una máquina que reúna estas condiciones. En este caso se optó por la Excavadora sobre orugas CAT320.

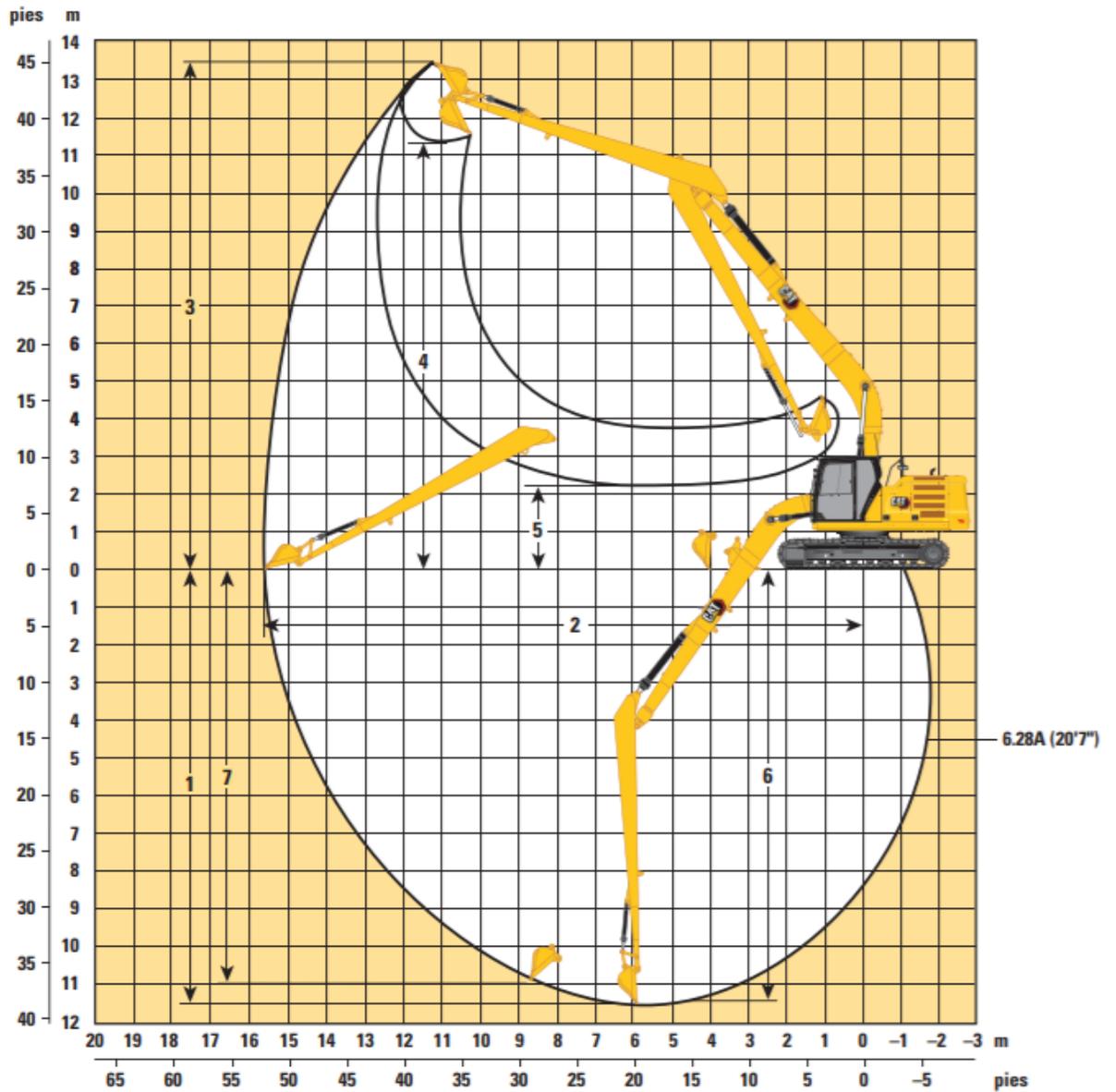


Figura 3.2. Dimensiones Excavadora CAT 320.

Fuente: CAT

3.2.3. Ángulo de talud del banco

Para determinar el ángulo de talud del banco, es importante conocer el tipo de material que este posee, para esto fue necesario el uso de tablas experimentales que recomiendan los valores más aconsejables para determinados casos. Los valores a escoger deberán garantizar la estabilidad y seguridad al momento de desarrollar las labores extractivas,

tanto para los trabajadores, personal técnico y la maquinaria empleada en el arranque, carga y transporte de material.

GRUPO DE ROCAS	CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO	ALTURA DE UN BANCO EN TRABAJO (m)	ÁNGULO DE TALUD DE LOS BANCOS (°)		
			EN TRABAJO	EN RECESO	
				PARA UN BANCO	PARA 2-3 UNIDADES
Rocas Peñascosas. $\sigma_{comp} = 8 \times 10^7 \text{ Pa}$ $f > 8$	Rocas altamente resistentes, sedimentarias, metamórficas y efusivas.	15 -20	HASTA 90°	70 -75°	65-70°
	Rocas resistentes poco fracturadas y débilmente meteorizadas, sedimentarias, metamórficas y efusivas.	15 -20	HASTA 80°	60 -75°	55-60°
	Rocas resistentes fracturadas y débilmente meteorizadas, sedimentarias, metamórficas y efusivas.	15 -20	HASTA 75°	55 -60°	50-55°
Rocas poco resistentes peñascosas y semipeñascosas	$f > 8$ Rocas sedimentarias, metamórficas y efusivas de la zona meteorizada, calizas relativamente estables en los taludes, areniscas, alebrolitas y otras rocas sedimentarias con cemento silíceo. Conglomerados, gneis, porfiritas, granitos y tobas.	10 - 15	70 -75°	50 -55°	45 -50°
	$1 > f > 8$ Rocas sedimentarias, metamórficas y efusivas altamente meteorizadas todas las rocas intensamente meteorizadas en los taludes (argilitas, alebrolitas y esquistos)	10 - 15	60 -70°	35 -45°	35 -40°
Rocas suaves y granuladas (pulverulentas) $f < 1$	Rocas arcillosas, así como también todas las rocas totalmente desintegradas (descompuestas)	10 - 15	50 -60°	40 -45°	35 -40°
	Rocas arcillo arenosas	10 - 15	40 -50°	35 -45°	30 -40°
	Rocas gravo - arenosas	10 - 15	hasta 40°	30 -40°	25 -35°

Figura 3.3. Alturas y ángulos en taludes

Fuente: (Yepes, 2020)

Para los bancos en receso se procurará una estabilidad de larga duración, la misma que se obtendrá dándole el ángulo de talud del banco el correspondiente ángulo de talud natural de las rocas. De esta manera los valores para los diferentes diseños estarán en los siguientes rangos:

Ángulo de talud de los bancos en trabajo: 70° - 80°.

Ángulo de talud del borde de liquidación final: 50° – 60°.

3.2.4 Berma de seguridad

En base a las propiedades físico-mecánicas de los estratos rocosos presentes en el terreno se estableció una magnitud de berma de seguridad de 5 m.

3.3 Alternativas de diseño previas al diseño óptimo

Para este trabajo se presentarán dos alternativas de diseño, tomando en cuenta las características del talud. De forma que cada una de ellas, presenten opciones de estabilidad y seguridad en el terreno.

3.3.1 Diseño 1

- **Altura de intervención para estabilización del talud**

$$H = 2467 \text{ m} - 2417 \text{ m}$$

$$H = 50 \text{ m}$$

- **Altura del banco**

Tomando en cuenta la maquinaria seleccionada, la altura del banco inferior será de 20 m y los tres bancos siguientes serán de 10 m cada uno.

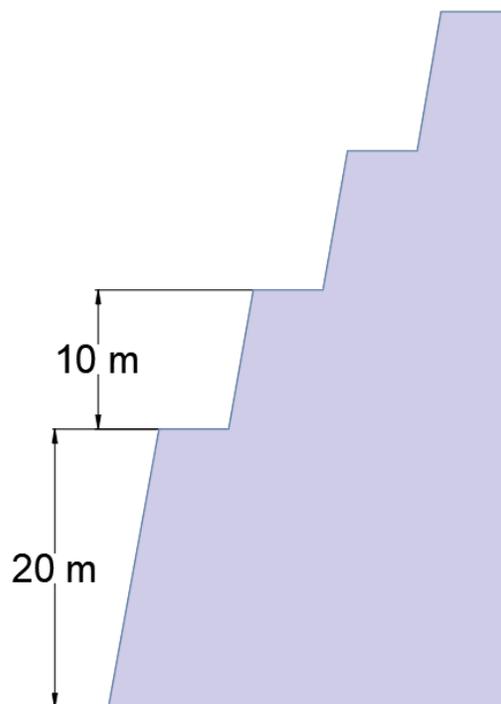


Figura 3.4. Altura de los bancos - Diseño 1

Fuente: Elaboración propia.

- **Ángulo de talud del banco**

-Ángulo de talud de los bancos en trabajo: 80° .

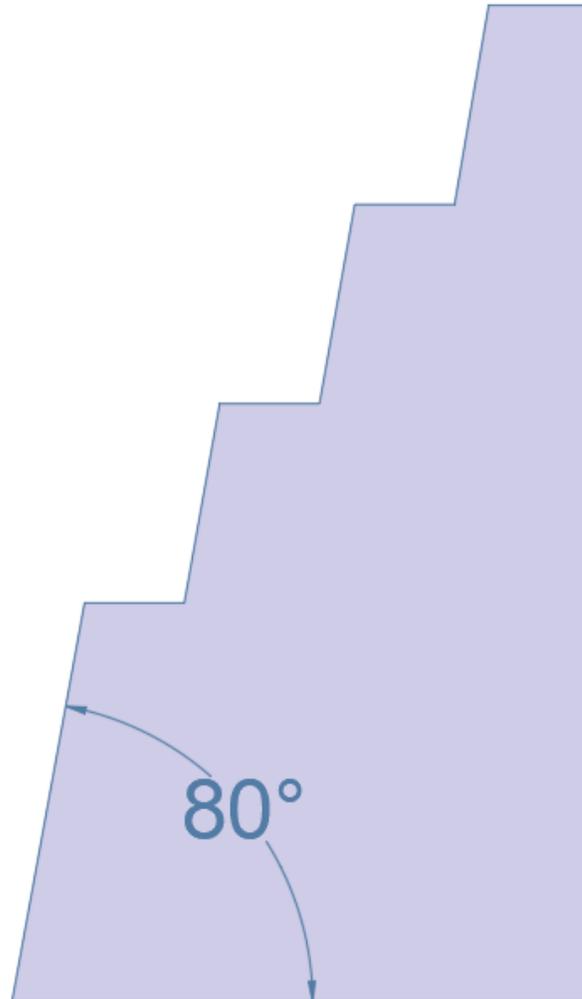


Figura 3.5. Ángulo de talud de los bancos en trabajo - Diseño 1

Fuente: Elaboración propia.

-Ángulo de talud del borde de liquidación final: 60° .

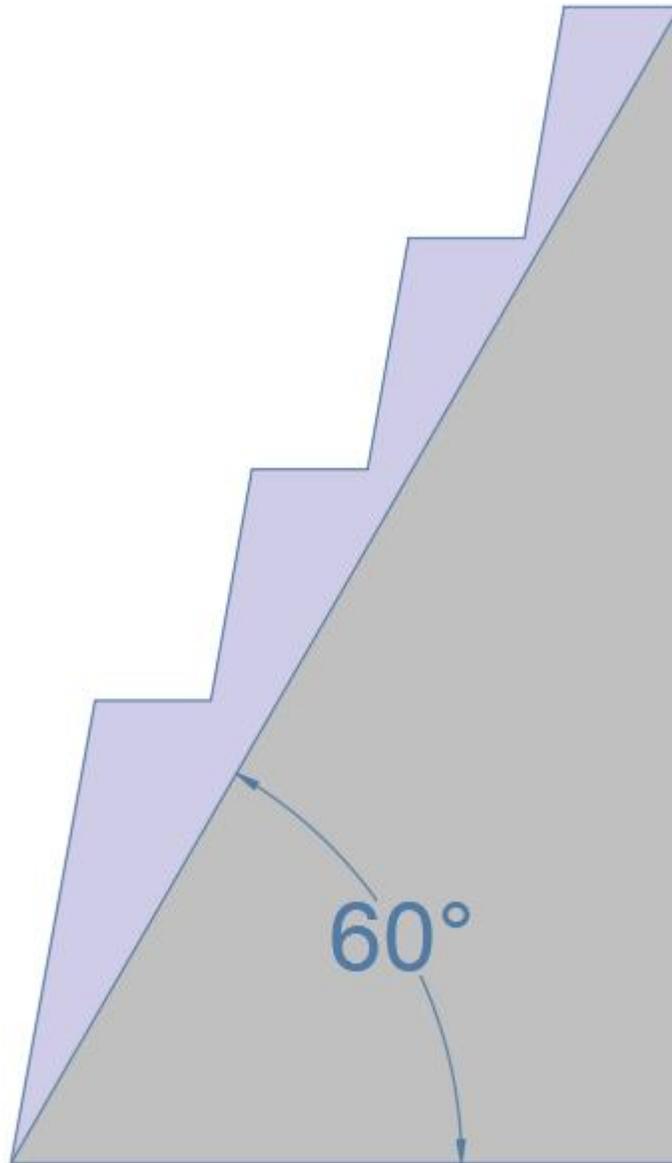


Figura 3.6. Ángulo de talud del borde de liquidación - Diseño 1

Fuente: Elaboración propia.

- **Número de bancos**

El número de bancos se ha determinado en base a la siguiente relación:

$$N_b = \frac{H}{hb}$$

$$N_b = \frac{50}{10} = 5$$

En este caso los 2 bancos inferiores formarán un solo banco de 20 m; es decir, serán 4 bancos en total.

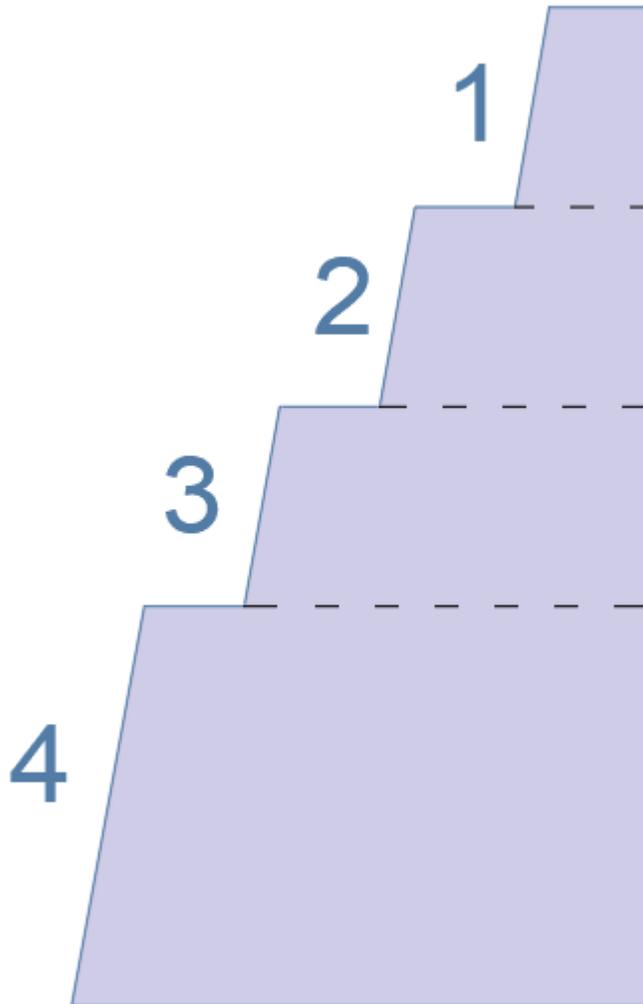


Figura 3.7. Número de bancos- Diseño 1

Fuente: Elaboración propia.

- **Berma de seguridad**

En base a las características específicas del terreno, se establece una magnitud de berma de seguridad de 5 m.

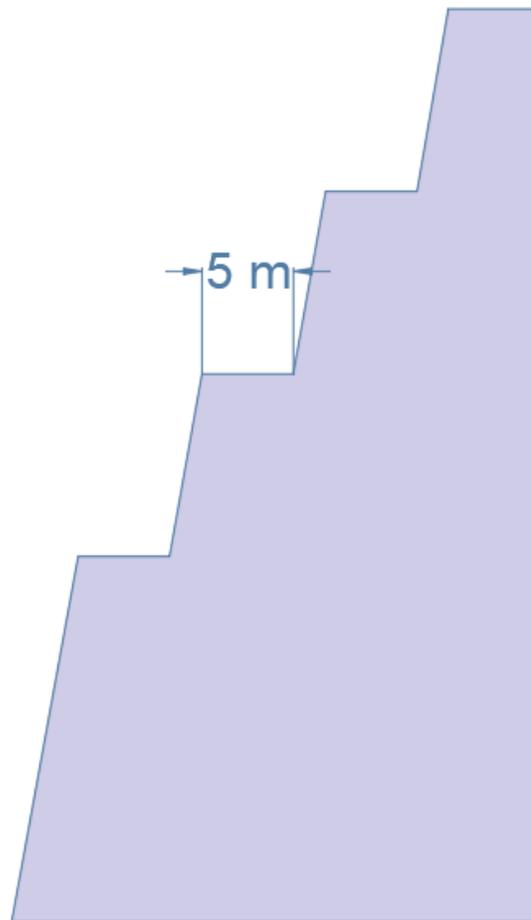


Figura 3.8. Berma de seguridad- Diseño 1

Fuente: Elaboración propia

- **Diseño geométrico de estabilización**

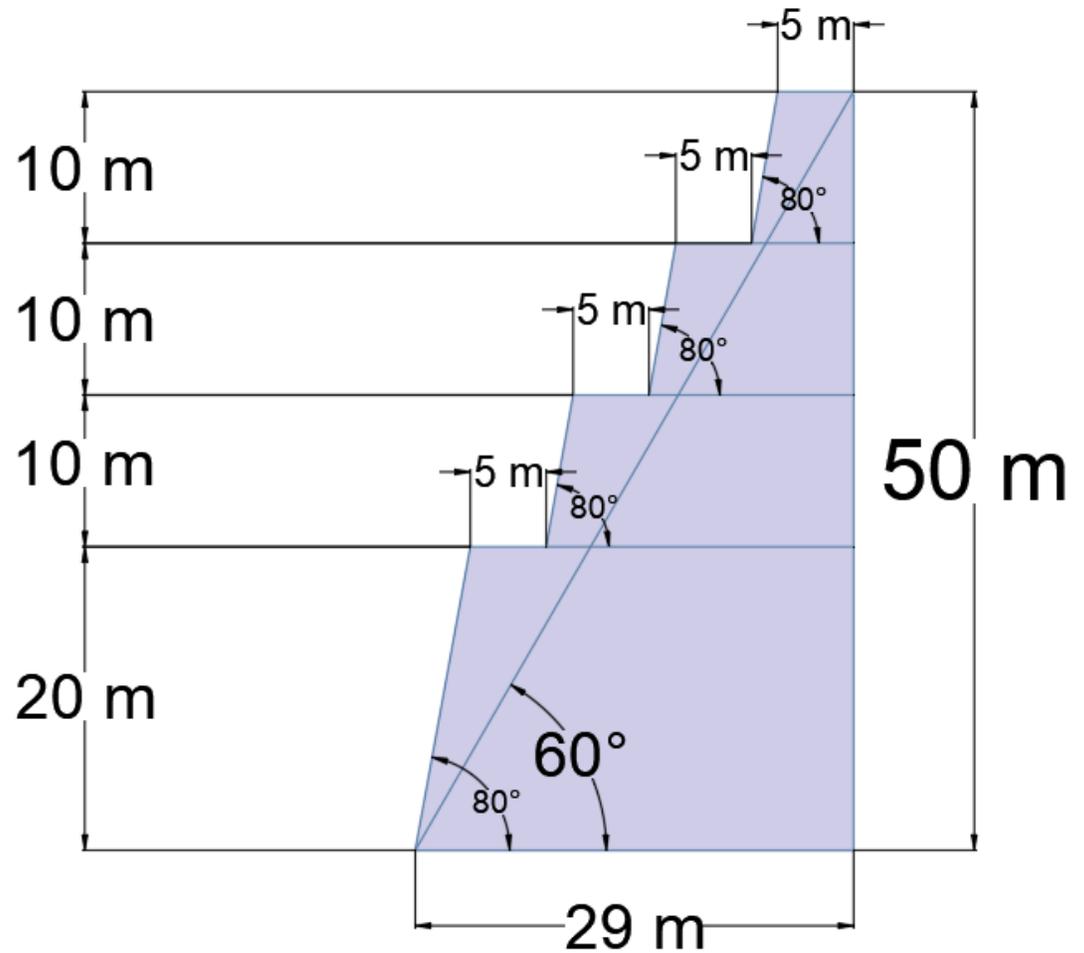


Figura 3.9. Diseño geométrico de estabilización- Diseño 1

Fuente: Elaboración propia.

- **Factor de seguridad**

Se realizó nuevamente el cálculo para el factor de seguridad con los datos del nuevo diseño, obteniendo un resultado de 1,18.

3.3.2 Diseño 2

- **Altura de intervención para estabilización del talud**

$$H = 2467 \text{ m} - 2417 \text{ m}$$

$$H = 50 \text{ m}$$

- **Altura del banco**

Tomando en cuenta la maquinaria seleccionada, la altura del banco inferior será de 25 m, los dos bancos siguientes serán de 10 m cada uno y el banco superior será de 5 m.

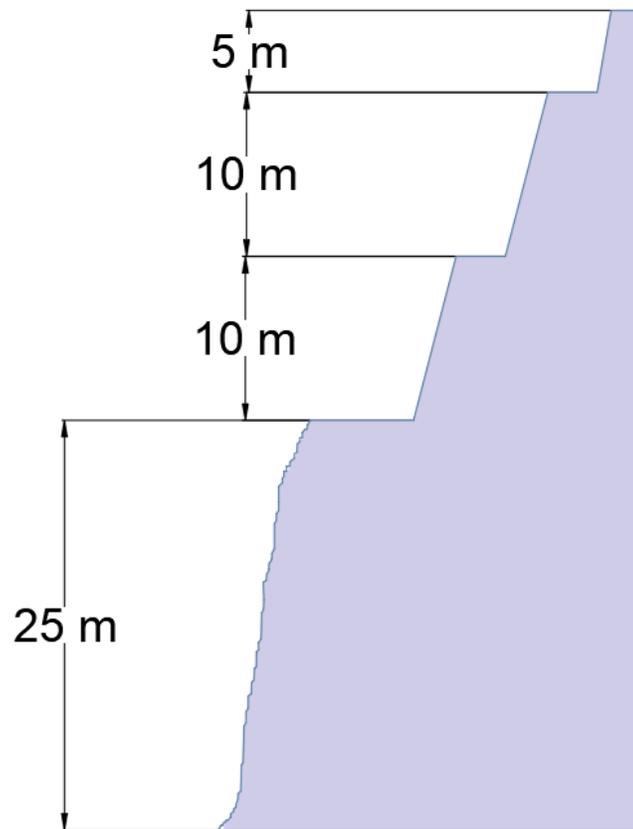


Figura 3.10. Altura del banco - Diseño 2

Fuente: Elaboración propia.

- **Ángulo de talud del banco**

En este diseño el ángulo de talud en trabajo del primer banco será como lo indica su topografía natural de 77° , los dos ángulos siguientes serán de 75° , y por último el ángulo del banco superior será de 80° .

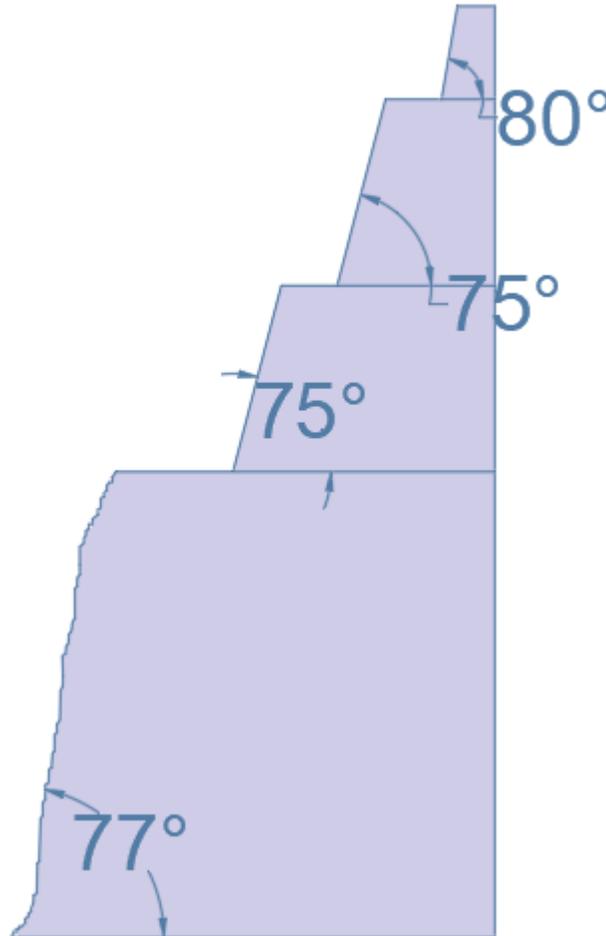


Figura 3.11. Ángulo de talud de los bancos en trabajo - Diseño 2

Fuente: Elaboración propia.

-Ángulo de talud del borde de liquidación final: 63°.

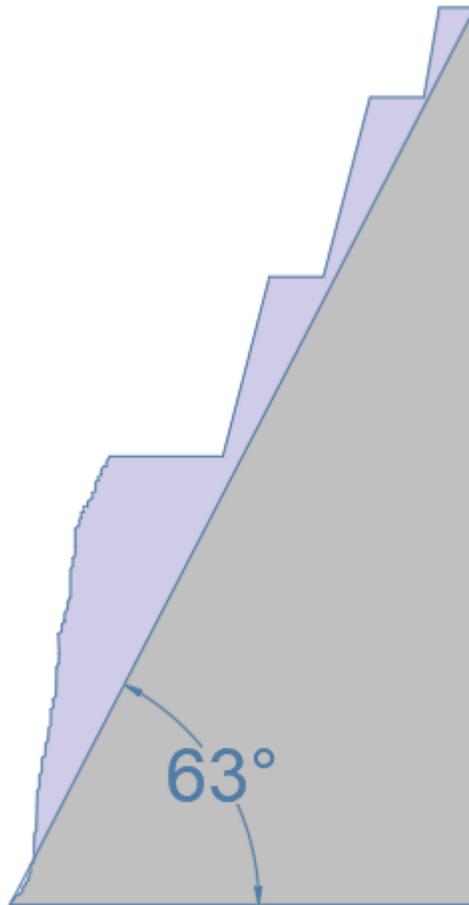


Figura 3.11. Ángulo de talud del borde de liquidación - Diseño 2

Fuente: Elaboración propia.

- **Número de bancos**

El número de bancos se ha determinado en base a la siguiente relación:

$$N_b = \frac{H}{hb}$$

$$N_b = \frac{50}{10} = 5$$

En este caso los bancos inferiores formarán un solo banco de 25 m, los dos siguientes de 10 m, y el superior de 5 m, es decir, serán 4 bancos en total.

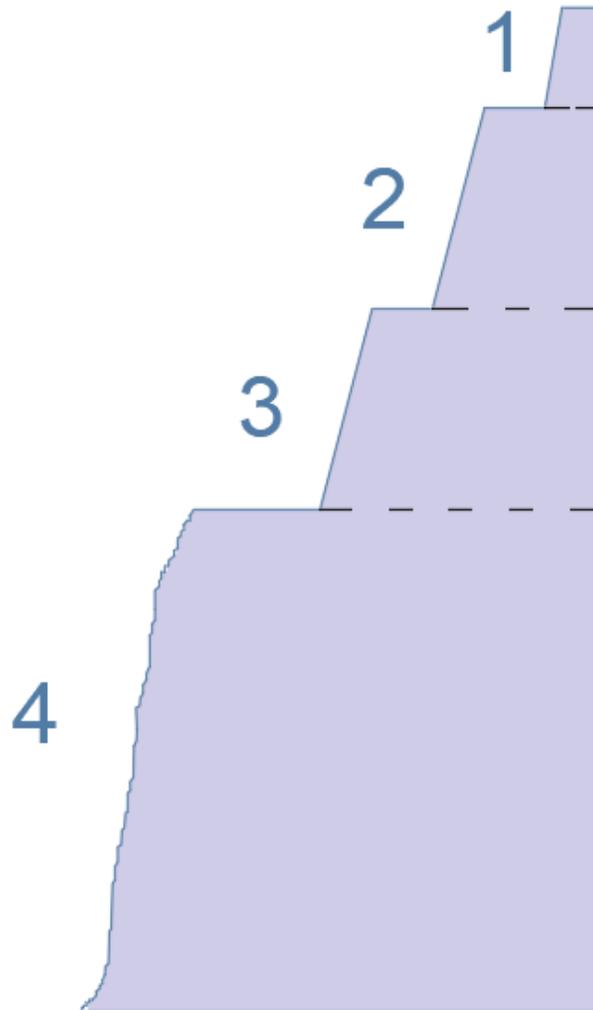


Figura 3.12. Número de bancos- Diseño 2

Fuente: Elaboración propia.

- **Berma de seguridad**

En base a las características específicas del terreno, se establece una magnitud de berma de seguridad de 2 m para el banco superior, los dos bancos siguientes, tendrán una berma de seguridad de 3 m, y el banco inferior tendrá una variación en la berma que va desde 6,5 m hasta 37,5 m dependiendo de la topografía del terreno.

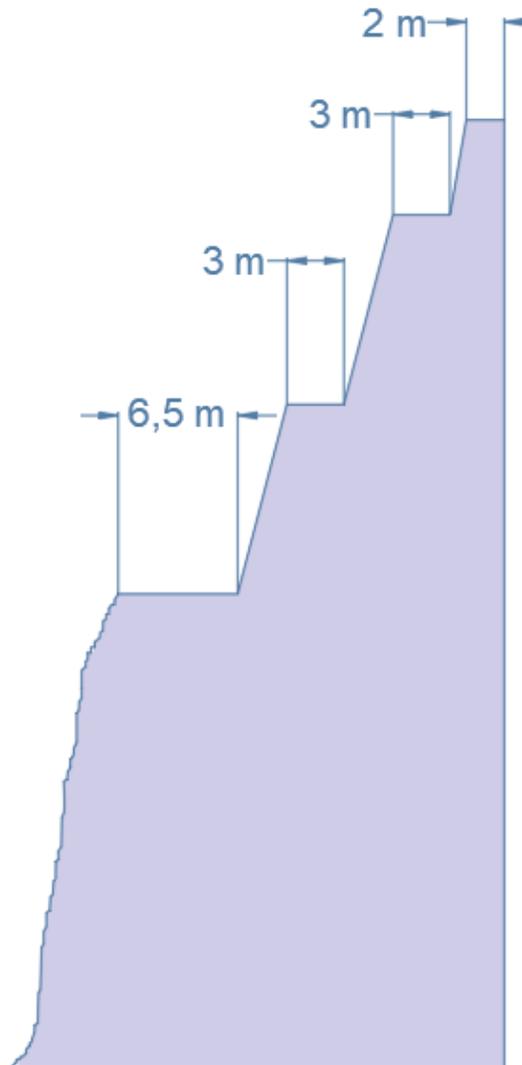


Figura 3.13. Berma de seguridad- Diseño 2

Fuente: Elaboración propia.

- **Diseño geométrico de estabilización**

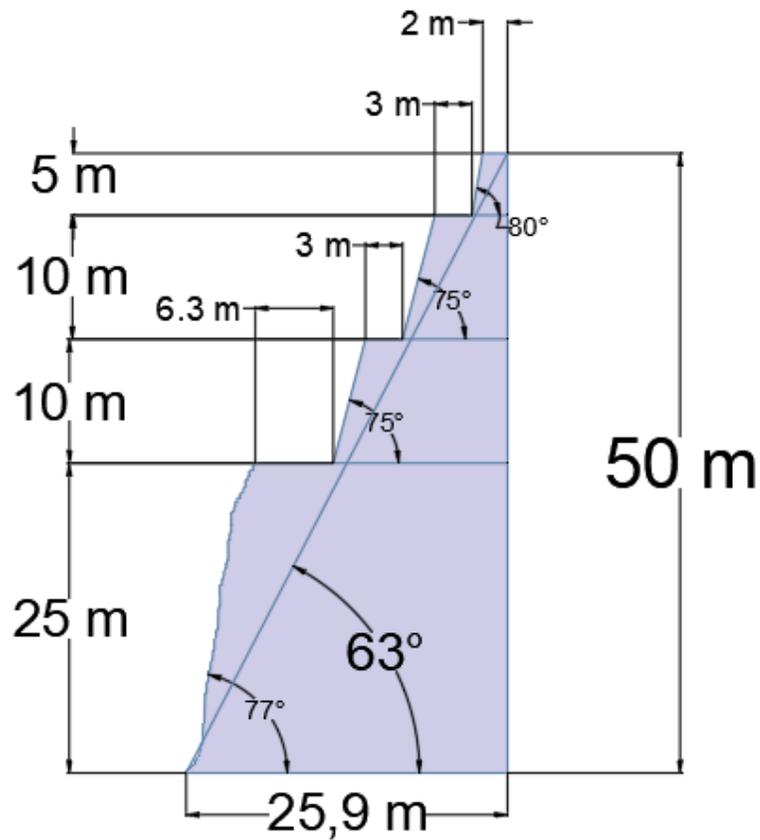


Figura 3.14. Diseño geométrico de estabilización- Diseño 2

Fuente: Elaboración propia.

- **Factor de seguridad**

Se realizó nuevamente el cálculo para el factor de seguridad con los datos del nuevo diseño, obteniendo un resultado de 1,26.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de los diseños ejecutados

4.1.1. Diseño 1

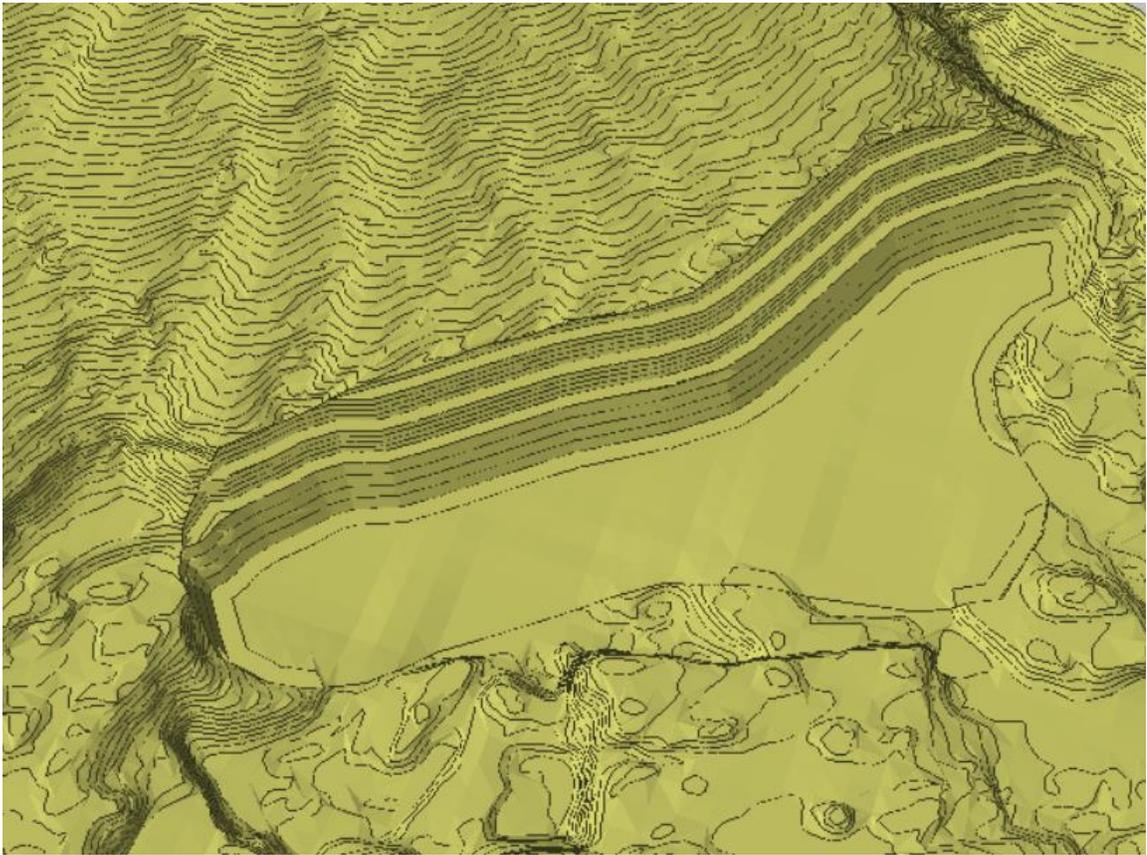


Figura 4.1. Diseño 1 en 3D.

Fuente: Elaboración propia.

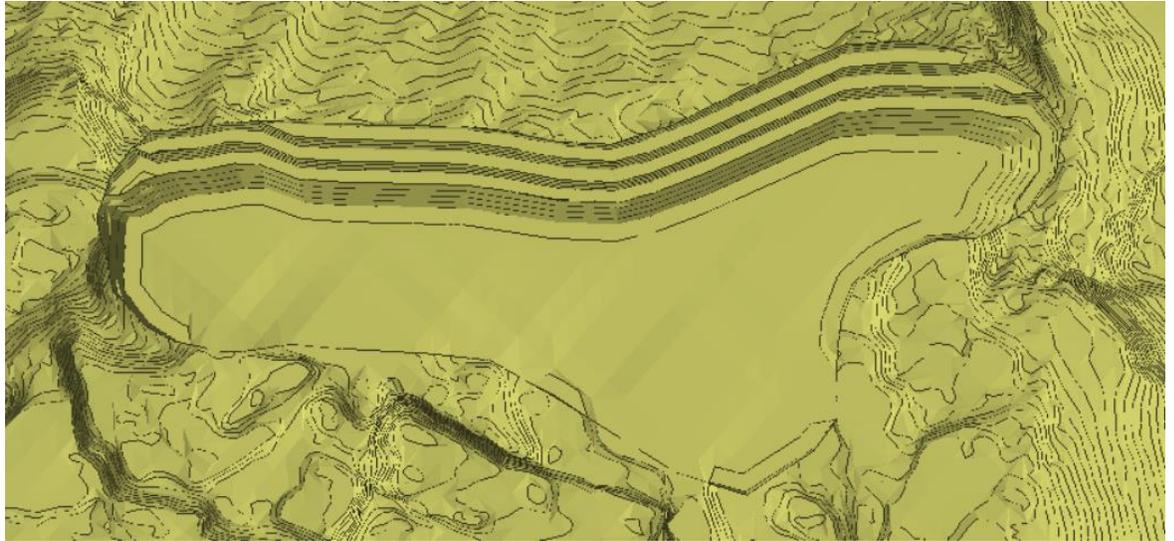


Figura 4.2. Diseño 1- Vista superior.

Fuente: Elaboración propia.

Para el modelamiento de los diseños, se usó el software minero RecMin, el cual permite tener una mejor visualización de cómo quedan los diseños finales.

En el Diseño 1, se puede observar 4 bancos más simétricos, todos con un ángulo de trabajo de 80° y bermas de 5 m cada una. La diferencia se encuentra en los bancos. Se puede observar que el banco inferior es de mayor altura que los demás, ya que en esta zona está compuesta por grava.

Al final de todo el diseño se extraerá un volumen total de $356\,275,80\text{ m}^3$

4.1.2. Diseño 2



Figura 4.3. Diseño 2 en 3D.

Fuente: Elaboración propia.

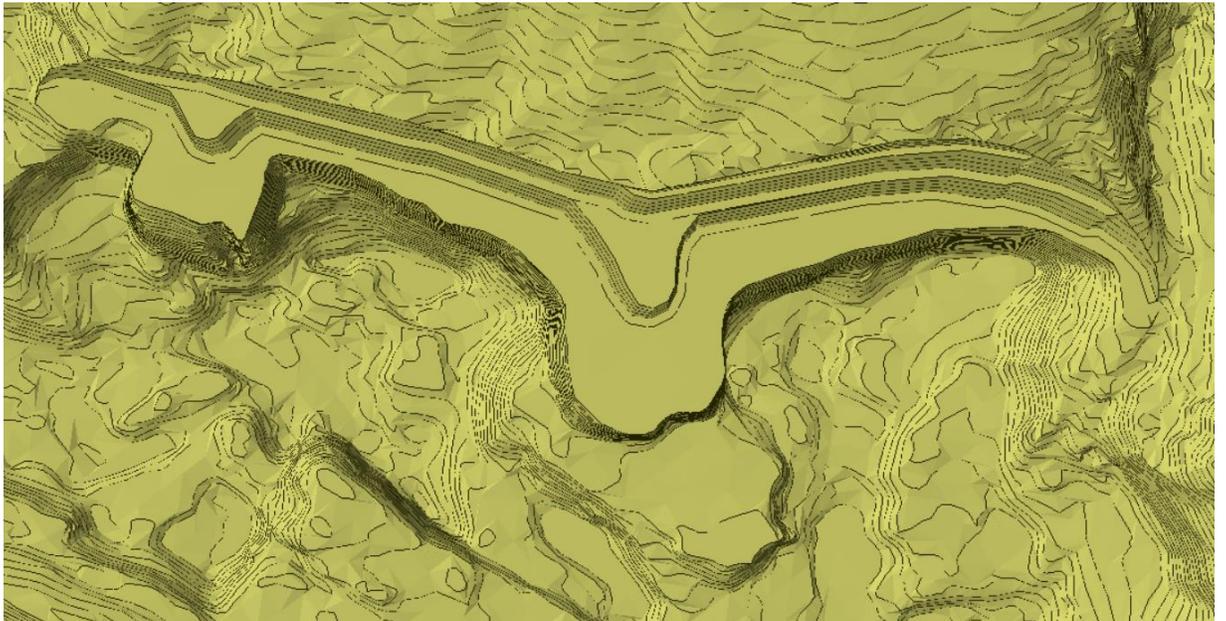


Figura 4.4. Diseño 2- Vista superior.

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño 2, de igual manera se usó el software minero RecMin. En este diseño se aprovecha mejor la topografía natural del terreno, diseñando los bancos de tal manera que el volumen a extraer sea menor.

El banco inferior cuenta con 25 m, de los cuales solo los 5 m superiores serán removidos, dejando ese banco en su mayoría con su topografía inicial.

En la parte superior, al estar compuesta por arcilla arenosa, se tiene un mayor cuidado para evitar el desprendimiento de material, por lo que su ángulo de trabajo es menor.

Al final de todo el diseño se extraerá un volumen total de 111 197,90 m³

4.2 Presentación del diseño óptimo

Después de analizar los dos diseños previamente presentados, se llega a la conclusión que el Diseño 2 es el más óptimo para este proyecto. A pesar, que los dos diseños cuentan con un factor de seguridad mayor a 1, son las otras características las que hacen una inclinación favorable para el Diseño 2.

Este Diseño, al aprovechar la topografía inicial del terreno, ahorra mucho tiempo en la extracción del material previa a la estabilización del talud. El volumen que será extraído totalmente, es mucho menor que el Diseño 1; esto nos da una idea que los costos serán menores igual que el tiempo de ejecución.

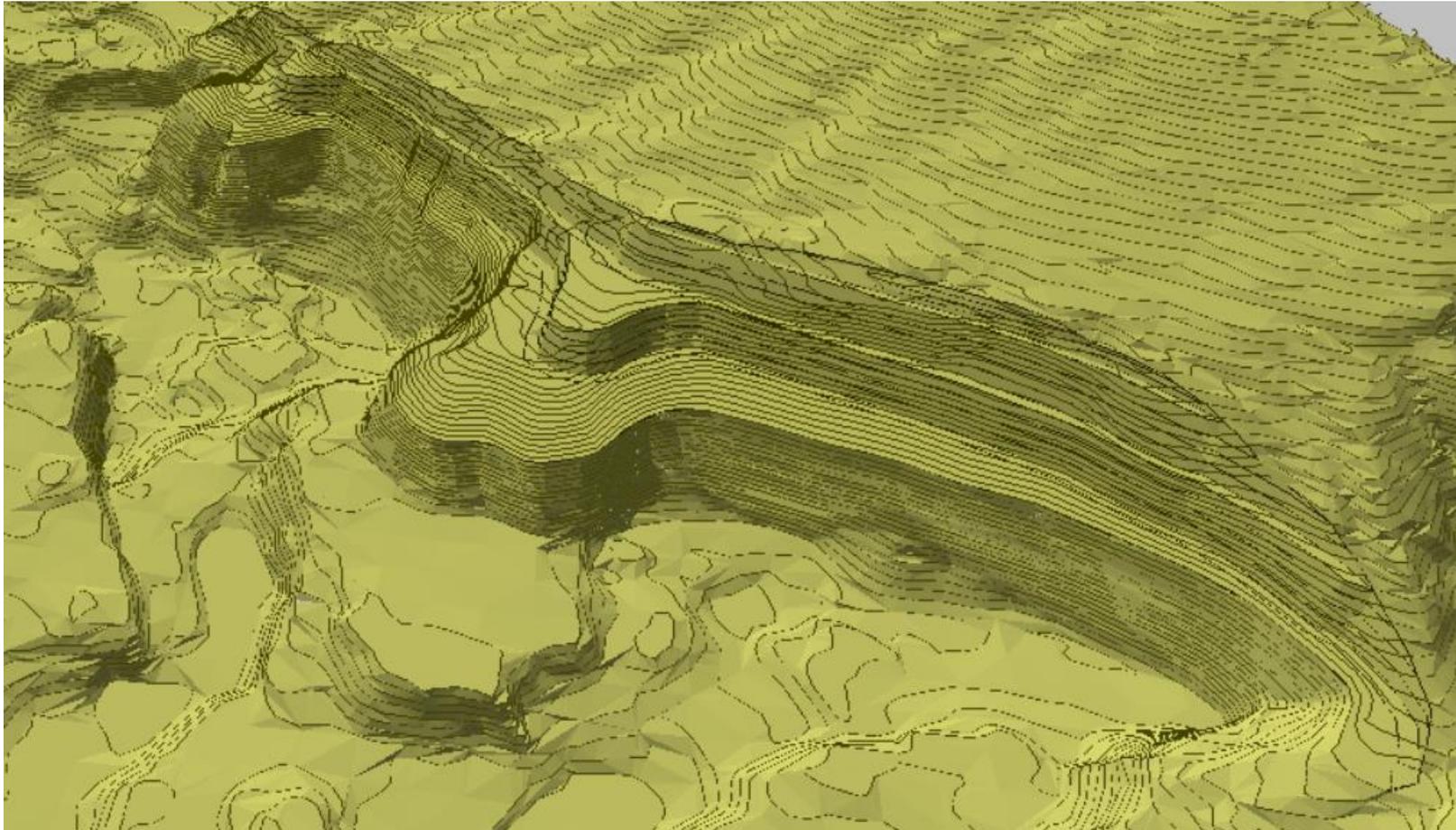


Figura 4.5. Diseño óptimo en 3D.

Fuente: Elaboración propia.

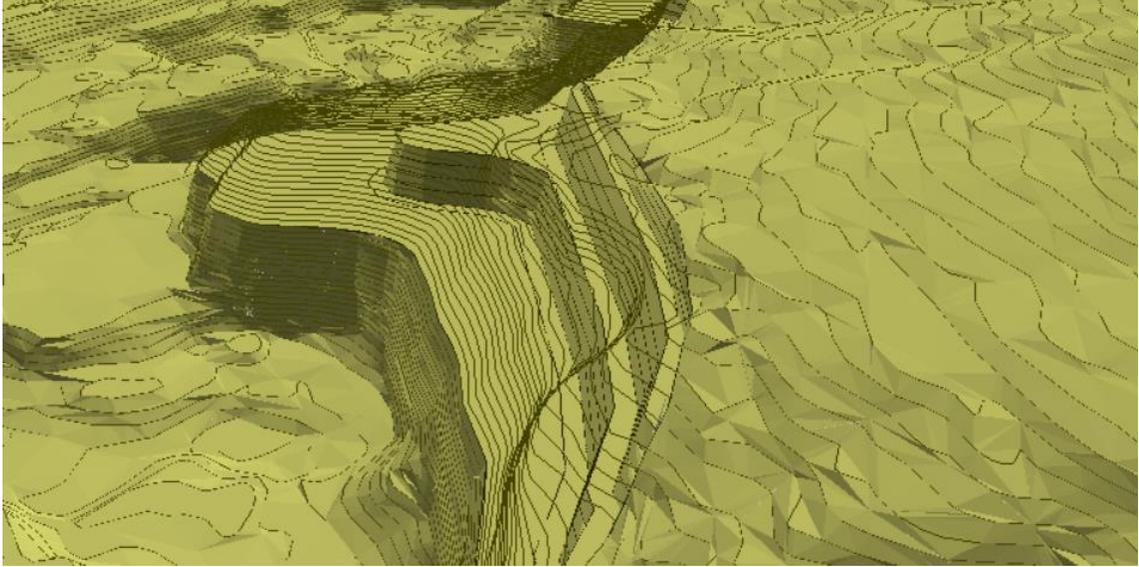


Figura 4.6. Diseño óptimo- Vista lateral.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.6, se puede observar que el diseño se realizó en base a las curvas de nivel iniciales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se realizó el diseño de estabilidad del talud principal, ubicado en las áreas mineras “Sicay” y “Santa Elena”, al observar las condiciones de la zona de estudio, se presenció desprendimiento de material rocoso en pequeñas cantidades; sin embargo, no deja de ser un indicador de falta de seguridad en la zona.
- Se ejecutaron diferentes ensayos, para así conocer sus características geomecánicas, los mismos que fueron la base de los diseños; se concluyó que el talud está formado por dos tipos de materiales, grava en la parte inferior y arena en la parte superior. Por otro lado, las pruebas realizadas indican un suelo permeable y la mayor parte del mismo, presenta un porcentaje intermedio de humedad.
- Una parte fundamental para la elección del diseño óptimo es el cálculo del factor de seguridad, el terreno en las condiciones actuales presenta un valor menor a 1, indicándonos que estas condiciones no son seguras, y por lo tanto, los diseños propuestos deben tener un resultado mayor a 1, para ofrecer mayor seguridad a la zona de estudio.
- Se analizaron dos diseños que podrían permitir una adecuada estabilidad del talud, en donde se tuvo en cuenta el volumen que será removido, el nuevo factor de seguridad y las características que presenten mayor seguridad.
- Se puede decir que los dos diseños cuentan con buenas características, las mismas que le dan la estabilidad necesaria para que la zona sea segura. Al hablar del factor de seguridad, los diseños tienen un resultado mayor a 1, siendo un valor óptimo para la estabilización del talud. Sin embargo, el diseño 2 fue seleccionado como óptimo, ya que presenta un volumen menor para ser removido, entendiéndose también que tomará menor tiempo en las labores de estabilización. A pesar que los dos diseños cumplían con un factor de seguridad óptimo, al diseño 2 se le atribuyen más características que hacen que sea el mejor para este proyecto.
- Las características que determinan que el diseño 2 sea el óptimo, además de las señaladas con anterioridad, son entre otros sus ángulos de trabajo que varían según

la estratigrafía que presenta el terreno. De esta manera se tiene en la parte inferior, compuesta por grava, ángulos más grandes que en la parte superior, compuesta por arena. Por otra parte, el propósito de este diseño es acoplarse de manera parcial a la topografía inicial del terreno, para ahorrar tiempo y dinero en la remoción de material, por esta razón el ángulo de trabajo de la parte inferior es igual al ángulo que presenta actualmente el terreno.

Recomendaciones

- Para obtener un resultado más cercano a la realidad, es necesario obtener muestras de diferentes puntos de la zona de estudio. Esto será esencial para realizar los ensayos geomecánicos del suelo.
- Al momento de realizar los ensayos con la veleta y el penetrómetro, es fundamental que la zona de estudio no esté húmeda, para esto, será necesario que no haya llovido por al menos tres días seguidos, de esta manera los datos obtenidos serán veraces.
- Para el diseño es importante tener en cuenta el análisis granulométrico, además las características geomecánicas del suelo, que son la base para establecer las alternativas para la nueva conformación del terreno.
- Un punto importante para la toma de decisiones es el factor de seguridad, lo recomendable es que este sea mayor a 1; también el volumen que será removido ya que es un indicativo del tiempo y el dinero que se empleará para ejecutar el trabajo.
- Para una mayor seguridad, se recomienda colocar una geomembrana en el área estabilizada, de esta manera se podrá evitar la erosión, además se puede tener vegetaciones herbáceas, esta ayudará a la retención de agua y tienen un mínimo peso que afecte a su estabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alconz, W. (2006). “*Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura Materiales de Construcción (Guía de las prácticas de campo y normas de calidad)*” [Tesis de grado]. Universidad Mayor de San Simón, Bolivia.
- Angelone, S. (2006). “Permeabilidad de los suelos”. [Archivo PDF]. https://www.academia.edu/4215320/Permeabilidad_en_Suelos?from=cover_page
- Baver, L. (1972). Soil Physics. New York: John Wiley & Sons, Inc. 498 p.
- Bellotti, M. (2011). *Minería a cielo abierto versus glaciares en alerta roja en Argentina*. [Archivo PDF]. <https://core.ac.uk/download/33553708.pdf>
- Bristow C. (1973). Guide to the geology of Cuenca Basin, southern Ecuador. Ecuadorian geol. and geophys. Soc., Quito. 54 p
- CAT. “*Especificaciones técnicas de Excavadora CAT 320*”. [Archivo PDF]. <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20180604-55406-39118>
- Flores, L. (2010). Manual de procedimientos analíticos. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Gallardo, R. (2016). *Identificación y clasificación de suelos*. [Diapositivas PowerPoint]. <https://es.slideshare.net/romelgam/capitulo-4-clasificacion-granulometra>
- Guerrero, P. (2015). *Mecánica de Fluidos*. [Diapositivas PowerPoint]. <https://es.slideshare.net/Ebene159/mcanica-de-fludos>
- Herbert, J. (2007). *Diseños de explotaciones de cantera*. [Archivo PDF]. https://oa.upm.es/21839/1/071120_L3_CANTERAS-ARIDOS.pdf

Herbert, J. (2016). *Métodos de minería a cielo abierto*. [Archivo PDF]. http://oa.upm.es/10675/1/20111122_METODOS_MINERIA_A_CIELO_ABIERTO.pdf

Hoek, E. & Bray, J. (1981), "Rock Slope Engineering". Revised 3rd edition. Institution of Mining and Metallurgy. Londres.

Jara, W., & Parra, J. (2016). *Elaborar estudios y diseños para el control de talud y movimientos de tierra en el kilómetro 22 vía Usme y vía al parque natural del Sumapaz, vereda los arrayanes*. [Archivo PDF]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13718/4/1.%20TRABAJO%20DE%20GRADO%2031%20MAYO%202016.pdf>

Loyola, C., Rivas, J., Gacitúa, M. (2014). Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(1),73.

Ministerio de Recursos Naturales No Renovables. (2010). *Sustitución del Título Minero Concesión para materiales de construcción "Santa Elena"*.

Ministerio de Recursos Naturales No Renovables. (2010). *Sustitución del Título Minero Concesión para materiales de construcción "Sicay"*.

Municipalidad de Cuenca. (2017). *PDOT, Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Llacao*. [Archivo PDF]. <https://docplayer.es/49755752-Pdot-plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial-de-la-parroquia-llacao.html>

Navarro, S. (2008). *Estabilidad de taludes*. [Archivo PDF]. <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/estabilidad-de-taludes.pdf>

Steinmann, M. & Hungerbuehler, D. (1996). Geología de cuencas sedimentarias (Mioceno, Sur del Ecuador), curso internacional, Cuenca-Ecuador, ETHZürich, 28 p.

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Ingeniería de Suelos Ltda.
<http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>

Universidad de Cantabria. (2014). *Introducción a la Geotecnia*. [Archivo PDF].
<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1555/course/section/2012/capitulo1.pdf>

Velásquez, A. (2012). *Estabilidad de taludes*. [Archivo PDF].

<http://www.sigweb.cl/wp-content/uploads/2012/10/Estabilidad-de-taludes.pdf>

Yepes, V. (2020). Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención. Colección Manual de Referencia, 2ª edición. Editorial Universidad Politécnica de València, 480 pp.

ANEXOS
(Análisis Geomecánico)



Anexo 1. Picnómetro vacío.



Anexo 2. Ensayo con picómetro- Muestra 1.



Anexo3. Muestra 1 con agua.



Anexo 4. Ensayo con picómetro- Muestra 2.



Anexo 5. Muestra 2 con agua.



Anexo 6. Ensayo con picómetro- Muestra 3.



Anexo 7. Muestra 3 con agua.



Anexo 8. Ensayo con picómetro- Muestra 4.



Anexo 9. Muestra 4 con agua.



Anexo 10. Ensayo con picómetro- Muestra 5.



Anexo 11. Muestra 5 con agua.



Anexo 12. Ensayo de permeabilidad-Muestra 1.



Anexo 13. Ensayo de permeabilidad-Muestra 2.



Anexo 14. Ensayo de permeabilidad-Muestra 3.



Anexo 15. Ensayo de permeabilidad-Muestra 4.



Anexo 16. Ensayo de permeabilidad-Muestra 5.



Anexo 17. Ensayo de permeabilidad.



Anexo 18. Ensayo con penetrómetro.



Anexo 19. Ensayo con veleta.