

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE
APURÍMAC**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE
MINAS**



**"GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS EN
LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L –
PACHACONAS, ANTABAMBA"**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. JOSE ARANIBAR AGUILAR

**Abancay, diciembre del 2017.
PERÚ.**



**"GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE
ESCOMBRERAS EN LABORES MINERAS DEL GRUPO
AMAPA S.R.L – PACHACONAS, ANTABAMBA"**



**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE
MINAS.
FACULTAD DE INGENIERÍA.**



**"GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS EN
LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L –
PACHACONAS, ANTABAMBA"**

**TESIS PRESENTADA A LA ESCUELA
ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA DE MINAS PARA OPTAR EL
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
DE MINAS.**

PRESENTADO POR: Bach. JOSE ARANIBAR AGUILAR

ASESOR: Ing. EDGAR HUACAC FARFÁN

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

Dr. LEONARDO ADOLFO PRADO CÁRDENAS
Rector

Dr. ROLANDO RAMOS OBREGÓN
Vicerrector Académico

Dra. IRIS EUFEMIA PAREDES GONZALES
Vicerrector De Investigación



"GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS EN LABORES
MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L – PACHACONAS, ANTABAMBA"

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
APURIMAC

Dr. Leoncio Teófilo Carnero Carnero.
DOCENTE

Dr. Leoncio Teófilo Carnero Carnero.
Presidente.

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
Escuela Académica de Postgrado de Ingeniería de Minas
Giovanni Frisancho Triveño
DOCENTE

Ing. Giovanni Frisancho Triveño.
Primer miembro.

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
DE APURIMAC
Ing. José A. Cárdenas Catalán
DOCENTE

Ing. Jose Adolfo Cárdenas Catalán.
Segundo miembro.

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURIMAC
Escuela Académica de Postgrado de Ingeniería de Minas
Ing. Edgar Huacac Farfán
DOCENTE

Ing. Edgar Huacac Farfán.
Asesor.



ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE LA TESIS: GEOTÉCNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRENAS EN LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L. - PACHACONAS, ANTABAMBA.

POR EL TITULANDO:

BACHILLER JOSÉ ARANIBAR AGUILAR.

En la Biblioteca Especializada de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas, sito en el distrito de Tambuco, provincia de Abancay y Región Apurímac el día Trece de Diciembre del año Dos mil Diecisiete a horas dieciséis con diez minutos y en cumplimiento a la Resolución Decanal n° 283-2017-DFI-UNAMBA de fecha nueve de junio del año Dos mil Diecisiete dando reaproba el Proyecto de Tesis e Inscripción en el Registro de Proyecto de Tesis en la Decanatura de la Facultad de Ingenierías; y la Resolución Decanal n° 076-2017-DFI-UNAMBA de fecha quince de febrero del año corriente en donde se aprueba la designación de los jurados y la nominación del Profesor asesor de la tesis.

En concordancia al Reglamento general de grados y Títulos vigente para obtener el Título Profesional de Ingeniero de Minas y en presencia física del jurado evaluador recepcionante del presente Trabajo, integrada por los siguientes docentes:

1. Dr. Leoncio Teófilo Carrero Carrero. (Presidente y Replicante)
2. Ing. Giovanni Frisancho Triverio (1° Dictaminante)
3. Ing. José Adolfo Cárdenas Catalán (2° Dictaminante)
4. Ing. Edgar Crispín Huacac Farfán (Asesor del Trabajo)
5. Ing. Oscar Eugenio Álvarez Gamorra (Secretario)

A invitación del presidente del jurado, se dió inicio al acto académico programado, previamente el Secretario dió la lectura de los artículos 54° y 55° del Reglamento general de grados y Títulos.

Acto seguido, a invitación del presidente del jurado se dió inicio a la sustentación por parte del Bachiller en Ingeniería de Minas: JOSÉ ARANIBAR AGUILAR del Trabajo de Tesis intitulado: GEOTÉCNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRENAS EN LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L. - PACHACONAS, ANTABAMBA.

ES COPIA FIEL DEL ORIGINAL





Concluido el acto académico de EXPOSICIÓN, a invitación del Presidente se procedió a la etapa de RÉPLICAS O PREGUNTAS por parte de los integrantes del jurado evaluador, los mismos que fueron absueltos de manera suficiente por parte del sustentante.

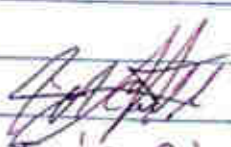
Seguidamente y en cumplimiento del Reglamento General de Grados y Títulos, se procedió a la Etapa de EVALUACIÓN por parte del jurado, la que resulta APROBADO POR UNANIMIDAD, con el calificativo de **MOY BUENO** con la nota vigerencial de Diecisiete (17).

Finalmente los miembros del jurado evaluador de la Sustentación y Defensa del Trabajo de Investigación, harán llegar las observaciones que vieran por conveniente para su levantamiento y posterior impartido del Trabajo presentado.

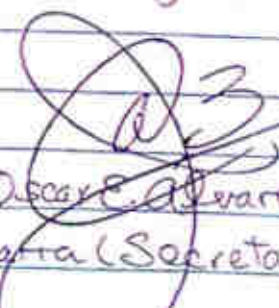
Dado por concluido el acto académico programado a horas dieciocho con treinta minutos del mismo día, en fe del cual firmamos



Dr. Leoncio T. Carrero
Carrero (Presidente)


Ing. Giovanni Frisancho
Triveño (1º Jurado)


Ing. José A. Cárdenas
Catalán (2º Jurado)


Ing. Edgar C. Huacac
Forfan (Asesor)


Ing. Oscar E. Alvarez
Gonzales (Secretario)


Bach. Jose Arambur
Arambur (Sustentante)

EL SECRETARIO GENERAL DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA
BASTIDAS DE APURIMAC

CERTIFICA:
Que el presente documento
Es copia fiel del original que obra en
Los archivos de esta institución a los
Que me remito en caso necesario.

Abasco: 21 DIC. 2017



DEDICATORIA:

Con mucho amor al ser que más amo en este mundo y que Dios me ha dado la dicha de tenerlo, a ti mi madre Isabel Aguilar Valenzuela, quien siempre batallaste y no descansaste en darnos una vida digna a todos tus hijos, no hubo circunstancia en la vida que te quito el sueño para nosotros tus hijos.

A mi padre Inocencio Aranibar Aguilar (en el cielo), a quien Dios no me dio la oportunidad de conocerlo, eres mi fuerza y consuelo en los momentos difíciles que paso.

A mis hermanos: Camilo, Margarita, Freddy, Inocencio, Elias y Paul (en el cielo), con quienes siempre nos dimos las fuerzas para revertir la situación en las cuales vivíamos en nuestra infancia. Quiero que sepan que les quiero mucho.

A mi abuelo German Aguilar Serrano, un hombre ejemplar de trabajo, ética y moral.

Finalmente, a la compañera de mi vida, a ti Elizabeth Ramos Zavala, desde aquel 13 de diciembre del 2013 mi vida encontró el amor verdadero, gracias por estar en todo momento junto a mí. Te amo Elizabeth.



AGRADECIMIENTO:

Agradecer a Dios por darme la vida, salud, felicidad y sabiduría. Por darnos y mantener este mundo tan bello en el cual habitamos y que lamentablemente por nuestra ambición humana lo estamos matando día a día.

A mi madre por su esfuerzo abnegado para hacer de sus hijos profesionales en servicio de nuestro pueblo y a mi querida familia, por practicar los valores ancestrales que son los pilares para el desarrollo de una sociedad justa e igual para todos.

A camilo Valenzuela Aguilar quien como hermano mayor dedico su juventud a la formación de sus hermanos menores con el fin de que seamos profesionales en la vida.

A Elizabeth Ramos Zavala, acompañarme en todo momento, darme el aliento para batallar en la vida y compartir sus sueños y metas junto a mi.

A mi alma mater, la UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC, por haberme dado la oportunidad de formarme profesionalmente en sus aulas universitarias.

A todos los docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Minas quienes, me ayudaron a cumplir con mis aspiraciones de ser "minero", profesional que dé a mi pueblo desarrollo con ingeniería y ética moral.

Al Ingeniero Edgar Huaca Farfán, quien me oriento en el desarrollo de este proyecto de investigación, por brindarme su tiempo en todo momento para despejar mis dudas. Siempre tuve admiración a su persona por ser un minero a carta cabal.

Al Doctor Leoncio T. Carnero Carnero, por su orientación en campo de la investigación científica.



A todos los trabajadores de la unidad minera Minaspata del grupo AMAPA S.R.L., quienes laboraron el 2015 y 2016, por brindarme su apoyo, enseñanza y colaboración en todo momento cuando realizaba mis practicas pre-profesionales.

A mi amigo Alfredo Arando Huamanñahui, quien siempre me compartió sus experiencias profesionales y sus aspiraciones en la vida.

A los integrantes de APUMINING, quienes apuestan por una minería moderna y sustentable.

A al Proyecto Minero Huaytullo, que día a día se consolida y del cual tengo la dicha de encaminar y conseguir el éxito del proyecto.

A mi amigo Enrique Loayza Baca, quien me compartió sus experiencias en la minería artesanal y pequeña minería y por su actitud de disposición para cualquier trabajo.

A mi padrino Gualberto Capiona Avini, por orientar mi vida en mi etapa de adolescente y por tener un gran aprecio por mi familia.

Finalmente, a mi querida tierra Utupalla, lugar de mi infancia con una vivencia única y por ser inspiración de mis proyectos y objetivos en la vida.

ÍNDICE

| | |
|--|-----|
| DEDICATORIA..... | i |
| AGRADECIMIENTO..... | ii |
| ÍNDICE TABLAS..... | iii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | iv |
| RESUMEN..... | v |
| ABSTRAC..... | vi |
| | |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPITULO I..... | 2 |
| 1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO..... | 2 |
| 1.1. Justificación..... | 2 |
| 1.2. Importancia..... | 3 |
| 1.3. Objetivos..... | 3 |
| 1.3.1. Objetivo general..... | 3 |
| 1.3.2. Objetivo específico..... | 3 |
| 1.4. Hipótesis..... | 4 |
| 1.4.1. Hipótesis general..... | 4 |
| 1.4.2. Hipótesis específicas..... | 4 |
| CAPITULO II..... | 5 |
| 2. ASPECTOS GENERALES..... | 5 |
| 2.1. Ubicación..... | 5 |
| 2.2. Accesibilidad..... | 6 |
| 2.3. Recursos..... | 7 |
| 2.3.1. Recursos Humanos..... | 7 |
| 2.3.2. Fauna y Flora..... | 8 |
| 2.3.3. Agricultura..... | 8 |
| 2.3.4. Ganadería..... | 8 |

| | |
|--|----|
| 2.3.5. Costumbres:..... | 9 |
| 2.4. Geología..... | 9 |
| 2.4.1. Geología regional..... | 9 |
| 2.4.2. Geología local..... | 9 |
| 2.4.3. Geología estructural..... | 10 |
| 2.5. Recursos mineros..... | 10 |
| 2.5.1. Geología económica..... | 10 |
| 2.5.1.1. Tipo de yacimiento..... | 10 |
| 2.5.1.2. Mineralogía..... | 11 |
| 2.5.1.3. Control de mineralización..... | 11 |
| 2.5.1.4. Estimación de reservas..... | 11 |
| CAPITULO III..... | 13 |
| 3. MARCO TEÓRICO..... | 13 |
| 3.1. Antecedentes de la investigación..... | 13 |
| 3.1.1. A nivel internacional..... | 13 |
| 3.1.2. A nivel nacional..... | 14 |
| 3.2. Generalidades de las escombreras..... | 15 |
| 3.2.1. Escombrera..... | 15 |
| 3.2.2. Estudio y descripción de las escombreras..... | 16 |
| 3.3. Descripción de los estériles mineros y sus propiedades..... | 18 |
| 3.3.1. Clases de estériles mineros..... | 18 |
| 3.3.2. Propiedades de los estériles mineros..... | 20 |
| 3.3.2.1. Granulometría..... | 20 |
| 3.3.2.2. Plasticidad de los finos..... | 21 |
| 3.3.2.3. Resistencia intacta..... | 22 |
| 3.3.2.4. Resistencia al corte..... | 22 |
| 3.3.2.5. Mineralogía y petrografía..... | 27 |



| | | |
|----------|--|----|
| 3.3.2.6. | Durabilidad..... | 27 |
| 3.3.2.7. | Conductividad hidráulica..... | 28 |
| 3.3.2.8. | Consolidación y asentamiento..... | 29 |
| 3.3.2.9. | Características geoquímicas | 30 |
| 3.4. | Elección y preparación del emplazamiento | 31 |
| 3.4.1. | Lugar del emplazamiento..... | 31 |
| 3.4.2. | Clasificación de las escombreras según su ubicación con respecto a la explotación..... | 33 |
| 3.4.3. | Geología y capacidad portante..... | 34 |
| 3.4.4. | Metodología para la elección del emplazamiento | 35 |
| 3.4.4.1. | Método del índice de calidad..... | 36 |
| 3.4.5. | Estudio del emplazamiento | 39 |
| 3.4.5.1. | Suelos del cimient..... | 40 |
| 3.4.5.2. | Propiedades de los suelos del cimient | 41 |
| 3.4.5.3. | Sustrato rocoso del cimient | 44 |
| 3.4.5.4. | Propiedades del Sustrato rocoso del cimient | 46 |
| 3.4.5.5. | Capa vegetal | 48 |
| 3.4.5.6. | Propiedades de la capa vegetal..... | 49 |
| 3.5. | Construcción de escombreras | 51 |
| 3.5.1. | Preparación del cimient y sistemas de drenaje..... | 51 |
| 3.5.1.1. | Preparación del cimient..... | 51 |
| 3.5.1.2. | Drenaje | 52 |
| 3.5.2. | Control de la calidad de los materiales | 56 |
| 3.5.3. | Operaciones de vertido..... | 59 |
| 3.5.3.1. | Procedimientos de vertido..... | 59 |
| 3.5.3.2. | Ritmos de descarga..... | 61 |
| 3.5.4. | Métodos y sistemas constructivos..... | 63 |



| | | |
|-------------------|---|----|
| 3.6. | Análisis de estabilidad de escombreras | 68 |
| 3.6.1. | Generalidades..... | 68 |
| 3.6.2. | Factores que afectan la estabilidad..... | 69 |
| 3.6.2.1. | Configuración de la escombrera..... | 70 |
| 3.6.2.2. | Pendiente del cimiento y grado de confinamiento | 70 |
| 3.6.2.3. | Tipo del cimiento..... | 70 |
| 3.6.2.4. | Calidad del material vertido | 71 |
| 3.6.2.5. | Método de construcción | 71 |
| 3.6.2.6. | Condiciones piezométricas y climatológicas..... | 71 |
| 3.6.2.7. | Ritmo de vertido | 72 |
| 3.6.3. | Clasificación del grado de estabilidad de las escombreras - Índice INESTEC. 72 | |
| 3.6.4. | Evaluación de riesgos..... | 76 |
| 3.6.4.1. | Seguridad de personas y equipos..... | 76 |
| 3.6.4.2. | Riesgo en instalaciones..... | 77 |
| 3.6.4.3. | Riesgo medioambiental | 77 |
| 3.6.5. | Tipos de roturas de escombreras | 77 |
| 3.6.5.1. | Rotura de borde | 79 |
| 3.6.5.2. | Rotura planar. | 80 |
| 3.6.5.3. | Rotura rotacional | 81 |
| 3.6.5.4. | Rotura en flujo | 81 |
| 3.6.6. | Métodos de análisis de estabilidad..... | 81 |
| 3.6.6.1. | Método del equilibrio límite (M.E.L.)..... | 86 |
| CAPITULO IV | | 89 |
| 4. | APLICACIÓN DE LA GEOTECNIA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS | 89 |
| 4.1. | Conceptos básicos..... | 89 |
| 4.2. | Criterios específicos..... | 90 |

| | | |
|------------------|---|-----|
| 4.2.1. | Estudio geológico y geotécnico. | 90 |
| 4.2.2. | Prospecciones de campo. | 91 |
| 4.3. | Técnicas e instrumentos de recolección de datos para la investigación. | 92 |
| 4.3.1. | Delimitación y elección del terreno para el diseño de escombrera. | 93 |
| 4.3.2. | Recojo de muestras para la caracterización geotécnica. | 94 |
| 4.3.3.1. | Ensayos estándar. | 97 |
| 4.4. | Diseño de escombreras mediante el programa GeoStudio – Slope/W. | 99 |
| 4.4.1. | Características del programa. | 101 |
| 4.4.1.1. | Métodos de cálculo. | 101 |
| 4.4.1.2. | Geometría y estratigrafía. | 101 |
| 4.4.1.3. | Superficie de deslizamiento. | 101 |
| 4.4.1.4. | Presión hidrostática. | 102 |
| 4.4.1.5. | Propiedades de los suelos. | 102 |
| 4.4.1.6. | Tipos de cargas. | 102 |
| CAPITULO V. | | 103 |
| 5. | ANÁLISIS DE RESULTADOS. | 103 |
| 5.1. | Análisis y discusión de resultados. | 103 |
| 5.1.1. | Caracterización geotécnica del terreno. | 103 |
| 5.1.1.1. | Caracterización geotécnica de la capa vegetal. | 103 |
| 5.1.1.2. | Caracterización geotécnica del terreno. | 104 |
| 5.1.1.3. | Caracterización geotécnica del estéril. | 105 |
| 5.1.2. | Análisis de estabilidad de la escombrera. | 106 |
| 5.1.2.1. | Estabilidad del terreno. | 108 |
| 5.1.2.2. | Estabilidad de la escombrera. | 112 |
| 5.1.2.3. | Estabilidad de la escombrera reforzada. | 118 |
| 5.1.3. | Seguridad de la escombrera: Especificaciones técnicas para la construcción de las escombreras. | 123 |



| | | |
|----------------------|--|-----|
| 5.1.3.1. | Sistema de seguridad para de la escombrera | 123 |
| 5.1.3.2. | Sistema de drenaje de la escombrera..... | 124 |
| 5.1.4. | Control ambiental de la escombrera..... | 125 |
| 5.1.4.1. | Barreras aislantes..... | 125 |
| 5.1.4.2. | Restauración de la capa vegetal y forestación..... | 126 |
| 5.2. | Prueba de hipótesis..... | 126 |
| CONCLUSIONES..... | | 127 |
| RECOMENDACIONES..... | | 130 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 131 |
| ANEXOS | | 134 |



ÍNDICE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla II.1: Coordenadas geografías y UTM de la Unidad Minera Minaspata – AMAPA S.R.L. | 5 |
| Tabla II.2: Accesibilidad a la Unidad Minera Minaspata - Grupo AMAPA S.R.L..... | 6 |
| Los minerales en Minaspata están bien definidos y se muestran en la tabla II.3: | 11 |
| Tabla II.3: Mineralogía de las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L..... | 11 |
| Tabla III.1: Propiedades de los estériles mineros y ensayos a realizar. | 19 |
| Tabla III.2: Factor de resistencia de la cimentación, β | 37 |
| Tabla III.3: Factor topográfico o de pendiente, θ | 37 |
| Tabla III.4: Factor relativo al entorno humano y material a ser afectados, η | 38 |
| Tabla III.5: Factor de alteración de la red de drenaje, δ | 38 |
| Tabla III.6: Clasificación de los emplazamientos según valor de Q_e | 39 |
| Tabla III.7: Propiedades y Pruebas Importantes para Suelos de Cimentación. | 40 |
| Tabla III.8: Propiedades del sustrato rocoso del cemento y ensayos a realizar. | 45 |
| Tabla III.9: Propiedades del recubrimiento del cemento y ensayos a realizar. | 48 |
| Tabla III.10: Clasificación de estabilidad de escombreras – Índice INESTEC..... | 73 |
| Tabla III.11: Clases de estabilidad de escombreras y actuaciones recomendadas. | 75 |
| Tabla III.12: Coeficientes de seguridad mínimos requeridos en el proyecto de escombreras. | 84 |
| Tabla IV.1: Coordenadas de delimitación del terreno para el diseño de la escombrera..... | 93 |
| Tabla IV.2: Detalles del muestreo en campo. | 94 |
| Tabla IV.3: Detalles de las muestras recogidas en campo..... | 95 |
| Tabla IV.4: Granulometría de las muestras enviadas a laboratorio. | 97 |
| Tabla IV.5: Densidad y humedad de las muestras enviadas a laboratorio. | 97 |
| Tabla IV.6: Cohesión y ángulo de fricción de las muestras enviadas a laboratorio. | 98 |

| | |
|---|-----|
| Tabla V.1: Ponderación y clasificación de la escombrera según el INESTEC | 107 |
| Tabla V.2: Características y detalles de la escombrera clasificada según el INESTEC | 108 |
| Tabla V.3: Resumen del modelamiento estabilidad estático y pseudo-estático del terreno..... | 112 |
| Tabla V.4: Características del diseño de la escombrera. | 113 |
| Tabla V.5: Resumen del modelamiento de estabilidad estático y pseudo-estático de la escombrera..... | 117 |
| Tabla V.6: Resumen del modelamiento de estabilidad estático y pseudo-estático de la escombrera reforzada..... | 122 |



ÍNDICE DE FIGURAS.

| | |
|---|-----|
| Figura II.1: Imagen satelital de la ubicación de la Unidad Minera Minaspatha – AMAPA S.R.L. | 6 |
| Figura II.2: Imagen satelital del recorrido desde la ciudad de Lima, Abancay, Pachaconas y la unidad minera Minaspatha. | 7 |
| Figura III.1: Análisis empírico para la estimación de la resistencia al corte de juntas de roca, estériles y contacto entre ambas. | 25 |
| Figura III.2: Método para estimar la rugosidad equivalente (R) de un estéril de mina. . | 26 |
| Figura III.3: Método para estimar la resistencia equivalente (S) de un estéril de mina. . | 26 |
| Figura III.4: Tipos de escombreras según el lugar de emplazamiento. | 32 |
| Figura III.5: Colocación de geotextil en una zanja de drenaje (Dren Francés). | 53 |
| Figura III.6: Drenaje del talud de la escombrera. | 54 |
| Figura III.7: Colocación del drenaje rocoso | 54 |
| Figura III.8: Detalle de dren perimetral | 56 |
| Figura III.9: Detalle de gradería. | 56 |
| Figura III.10: Calidad de los estériles. | 57 |
| Figura III.11: Configuración de la plataforma de vertido. | 60 |
| Figura III.12: Tipos de escombrera según la secuencia de construcción. | 64 |
| Figura III.13: Métodos de vertido en escombreras. | 66 |
| Figura III.14: Métodos de construcción de escombreras. | 66 |
| Figura III.15: Causas de inestabilidad de escombreras. | 78 |
| Figura IV.1: Columna estratigráfica de las calicatas en el terreno. | 96 |
| Figura IV.2: Columna estratigráfica de la calicatas del estéril. | 96 |
| Figura IV.3: Pantalla principal del programa GeoStudio 2012. | 100 |
| Figura IV.4: Ventana para hacer el modelamiento con GeoStudio – SLOPE/W. | 100 |
| Figura V.1: Modelamiento estático del terreno mediante el método Bishop. | 109 |
| Figura V.2: Modelamiento estático del terreno mediante el método Spencer. | 110 |
| Figura V.3: Modelamiento pseudo-estático del terreno mediante el método Bishop. . | 111 |
| Figura V.4: Modelamiento pseudo-estático del terreno mediante el método Bishop. . | 112 |
| Figura V.5: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera mediante el método Bishop | 114 |



| | |
|---|-----|
| Figura V.6: Modelamiento estático de la escombrera mediante el método Spencer. | 115 |
| Figura V.7: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera mediante el método Bishop. | 116 |
| Figura V.8: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera mediante el método Spencer. | 117 |
| Figura V.9: Modelamiento estático de la escombrera reforzada mediante el método Bishop..... | 119 |
| Figura V.10: Modelamiento estático de la escombrera reforzada mediante el Spencer. | 120 |
| Figura V.11: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera reforzada mediante el Bishop..... | 121 |
| Figura V.12: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera reforzada mediante el Spencer..... | 122 |
| Figura V.13: Muros de contención para el reforzamiento del terreno y superficie del terreno donde se dispondrá el material estéril. | 124 |
| Figura V. 14: Sistema de drenaje – diseño de cunetas..... | 125 |
| Figura VI.1: Plano de ubicación de la unidad minera Minaspata (AMAPA S.R.L)..... | 135 |
| Figura VI.2: Plano de ubicación y área para el diseño de la escombrera. | 136 |
| Figura VI.3:(Parte superior) Calicata de muestreo en el punto central y panorama de evacuación indiscriminada de material estéril. : (Parte inferior) : Identificación de muestras y calicata de muestreo del material estéril..... | 137 |
| Figura VI.4: Reporte de laboratorio GEOFAL SAC..... | 138 |
| Figura VI.5: (Arriba) Modelamiento de la escombrera y columna estratigráfica de la calicata. (Medio) Cuneta en la parte superior de la escombrera. (Abajo) Modelamiento de la escombrera en Google Earth Pro. | 150 |
| Figura VI.6: Copia de seguridad y certificado de modelación en GeoStudio – SLOP/W. | 151 |

RESUMEN

En los últimos 6 años el alza del precio de los metales en el mercado de los metales ha intensificado su producción en el Perú y esencialmente en regiones potencialmente mineras como: Apurímac, Arequipa, Cajamarca, Madre de Dios, Puno e Ica.

En Apurímac existen yacimientos de gran importancia para la gran minería, mediana minería, pequeña minería y minería artesanal, como lo es en el distrito de Pachaconas, provincia de Antabamba, donde se encuentra un yacimiento aurífero de alta ley, lo que ha incentivado la producción minera a pequeña escala generando ingresos económicos importantes y mejorara la calidad de vida de las familias del distrito, el desarrollo de la minería artesanal ha traído consigo el mal uso de los procedimientos mineros cuidados ambientales de acuerdo a ley.

En este sentido, el objetivo general del trabajo de investigación es el diseño de una escombrera mediante la aplicación de conocimientos y criterios geotécnicos modernos, para que servirá de modelo para las demás labores minera del grupo AMAPA S.R.L. – Pachaconas.

Para el efecto se procedió la identificación del terreno y su posterior elección del diseño. Luego se realizó la toma de muestras del terreno y del estéril de mina mediante calicatas, estas muestras fueron enviados a laboratorio donde se hicieron ensayos geotécnicos.

Con los datos del reporte de laboratorio procedió a la caracterización geotécnica del terreno y del estéril para determinar el tipo y calidad de escombrera según el INSTEC. Para consolidar el diseño de la escombrera se hizo modelamientos de estabilidad tanto del terreno y de la escombrera, obteniendo los factores de seguridad. A partir de los resultados se presentó el diseño de la escombrera para las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L. Según el análisis de estabilidad, el resultado resulto ser favorable.

“ABSTRACT”

In the last 6 years, the rise in the price of metals in the metals market has intensified its production in Peru and in potentially mining regions such as: Apurímac, Arequipa, Cajamarca, Madre de Dios, Puno and Ica.

In Apurímac there are deposits of great importance for mining, medium mining, small mining and artisanal mining, as it is in the district of Pachaconas, province of Antabamba, where a high-grade gold deposit is located, which has encouraged mining production. On a small scale generating income and improving the quality of life of families in the district, the development of artisanal mining has brought with it the misuse of environmental care mining procedures according to law.

In this sense, the general objective of the research work is the design of an application through the application of knowledge and modern geotechnical criteria, for the model service for the other workers of the AMAPA S.R.L. - Pachaconas.

For this purpose, the identification of the land and its subsequent design choice were proceeded. After the sampling of the terrain and the state of the tree were carried out using test pits, these samples were sent to a laboratory where geotechnical tests were carried out.

With the data from the processing laboratory of the geographical characteristic of the land and the state to determine the type and quality of the waste according to the INSTEC. To consolidate the design of the landfill, modeling of the speed of the land and the situation was made, obtaining the safety factors. Based on the results, the design of the tailings for the mining works of the AMAPA S.R.L group was presented. According to the analysis of the speed, the result turned out to be favorable.

INTRODUCCIÓN

Las actividades mineras en la unidad minera de Minasmeta del grupo AMAPA S.R.L., localizada en el distrito de Pachaconas, provincia de Antabamba, producen una gran cantidad de material estéril, esto plantea un problema de su almacenamiento en condiciones adecuadas de estabilidad, seguridad y control ambiental. El material estéril debe ser manipulado y tratado en forma adecuada desde la generación hasta su destino final. Debido a que la relación de producción de mineral y habilitación de más labores mineras aumenta significativamente, es necesario que se realice un estudio detallado sobre el manejo del material estéril, motivo por el cual se realizara la siguiente investigación. Para concretar el diseño y posterior implementación de una escombrera el primer trabajo es la elección del terreno donde se pueda depositar todo el material estéril generado por la mina, para esto se consideran criterios topográficos, geológicos, económicos, hídricos y otros.

La metodología empleada para la realización de este trabajo se basó en una investigación de campo, en la obtención de muestras para ensayos de laboratorio, en la aplicación de herramientas computarizadas, en fuentes bibliográficas, hemerográficas y orales que permitieron realizar los cálculos correspondientes para el diseño de la escombrera.

Para la mejor comprensión de esta investigación se presentó en cinco capítulos. En el capítulo I se muestra la justificación y objetivos del proyecto. En el capítulo II se presentan los aspectos generales del lugar del proyecto. En el capítulo III se presenta los fundamentos teóricos utilizados del desarrollo de esta investigación. En el capítulo IV se describe los resultados y análisis de datos, este capítulo es la esencia de la investigación. Finalmente se exponen las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y los anexos de la investigación.



CAPITULO I.

1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.

1.1. Justificación.

En los últimos 6 años el alza de precios de los metales ha intensificado su producción a lo largo del Perú y esencialmente en regiones potencialmente mineras como: Apurímac, Arequipa, Cajamarca, Madre de Dios, Puno e Ica.

En Apurímac existen yacimientos de gran importancia para la pequeña minería y minería artesanal, como lo es Pachaconas, donde se encuentra un yacimiento aurífero de alta ley (Sulfuros y Óxidos) con vetas de potencia considerable, lo que ha incentivado la producción minera a pequeña escala generando ingresos económicos importantes para las familias de Pachaconas.

AMAPA S.R.L. es una empresa de pequeña minería y minería artesanal en Pachaconas, son 10 grupos que apertura labores mineras sin planificación y evacuan desmonte de interior mina (8 toneladas por día aproximadamente).

A lo largo de 5 años de producción intensa, el desmonte evacuado ha venido y viene ocasionado daños ambientales, paisajísticos y riesgo de ocurrencia de accidentes; por lo tanto amerita dar una solución por lo que es justificable realizar una investigación con conocimiento científico y tecnológico, haciendo

uso de los conocimientos adquiridos en la escuela académico profesional de ingeniería de minas para dar solución a esta problemática en Pachaconas y que sirva de modelo a otros grupos donde se realiza operaciones mineras a pequeñas escala.

1.2. Importancia.

La investigación se torna importante porque se aplicará para determinar un correcto diseño de un botadero de escombreras tomando en consideración los criterios geotécnicos, el cual nos permitirá remediar los impactos ambientales en la zona de estudios; así mismo mejorará el ambiente paisajístico y evitar probables conflictos sociales entre el grupo AMAPA S.R.L y la comunidad.

Personalmente tiene gran importancia porque permitirá la titulación del que suscrito y será de gran aporte valioso a la formación de futuros profesionales en Ingeniería de Minas en nuestra universidad.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

Determinar un adecuado diseño para la escombrera de las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L.- Pachaconas, los conocimientos de la geotecnia.

1.3.2. Objetivo específico.

- ✓ Determinar la ubicación apropiada que garantice el diseño de la escombrera para las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L.
- ✓ Especificar el cumplimiento de los estándares de seguridad en el diseño de la escombrera para las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L.

- ✓ Considerar un correcto control ambiental para evitar impactos de la escombrera del grupo minero AMAPA S.R.L.

1.4. Hipótesis.

1.4.1. Hipótesis general.

Al aplicar la geotecnia se determinó un diseño adecuado de la escombrera para las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L.

1.4.2. Hipótesis específicas.

- La ubicación apropiada garantiza el diseño de la escombrera para las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L.
- El diseño de la escombrera para las labores generales de AMAPA S.R.L. cumple con los estándares de seguridad.
- El diseño de la escombrera para las labores mineras del grupo minero AMAPA S.R.L. cuentan con controles ambientales.

CAPITULO II.

2. ASPECTOS GENERALES.

2.1. Ubicación

La unidad minera Minaspatha se ubica en el distrito de Pachaconas, provincia de Antabamba. Está situada en la zona Sur-Oriental del Perú, enmarcada en las coordenadas, presentadas en la tabla II-1 y su ubicación en la figura II-1.

Tabla II.1: Coordenadas geografías y UTM de la Unidad Minera Minaspatha – AMAPA S.R.L.

| COORDENADAS GEOGRÁFICAS | |
|-------------------------|-----------------|
| LATITUD | 73° 0' 8.91"W |
| LONGITUD | 14° 13' 13.08"S |
| COORDENADAS UTM - WGS84 | |
| ESTE | 715546 |
| NORTE | 8426986 |
| ALTURA (m.s.n.m) | 3700 |
| Zona | 18 L |
| Hoja | 29 P-CHALHUANCA |

Fuente: Elaboración Propia

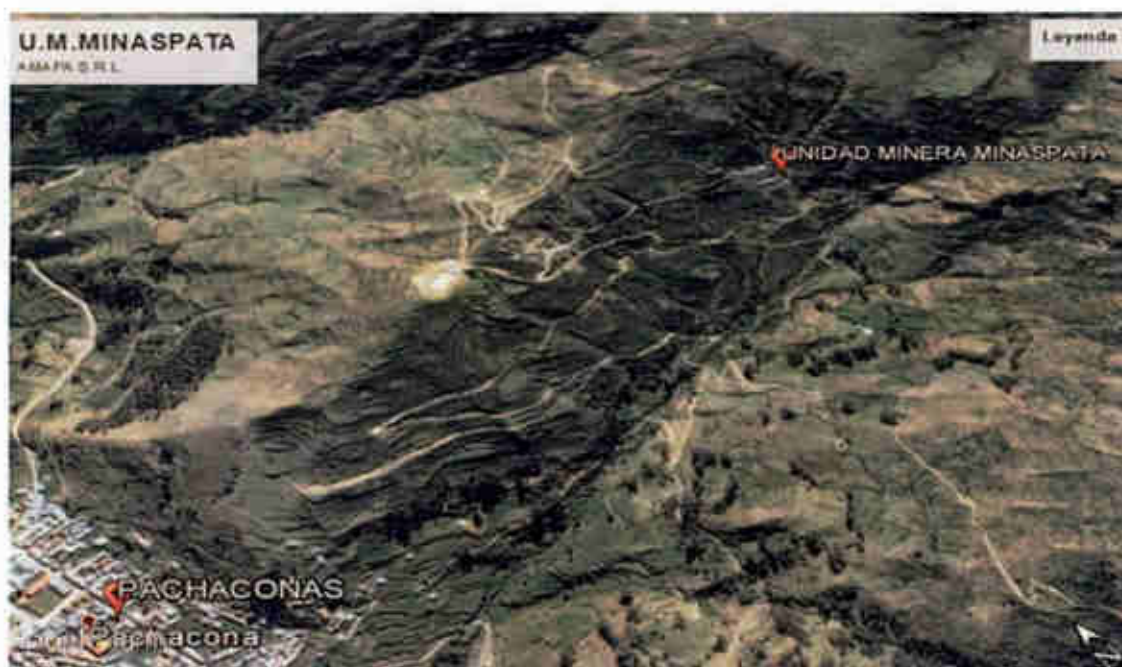


Figura II.1: Imagen satelital de la ubicación de la Unidad Minera Minaspatá – AMAPA S.R.L.

Fuente: Google Earth Pro – Elaboración Propia.

2.2. Accesibilidad.

La Unidad minera Minaspatá se encuentra a 117 km de la ciudad de Abancay, distancia que se recorre con camioneta 4 X 4, en un tiempo promedio de 3.5 horas. La accesibilidad se muestra en la tabla II-2 y la figura II-2.

Tabla II.2: Accesibilidad a la Unidad Minera Minaspatá - Grupo AMAPA S.R.L.

| | Tramo | Distancia (km) | Tipo de vía | Medio de Transporte | TIEMPO |
|---|----------------------------|----------------|---|----------------------|-------------|
| 1 | Abancay - Santa Rosa | 45 | Carretera Asfaltada (Panamericana Sur Km 411+800) | Combi o camioneta | 1.5 – 2 Hr. |
| 2 | Santa Rosa - Pachaconas | 70 | Carretera de tierra firme | Combi o camioneta | 1.5 – 3 Hr. |
| 3 | Pachaconas - U.M Minaspatá | 2 | Trocha Carrosable | Camioneta o caminata | 8 – 20 min. |

Fuente: Elaboración Propia



Figura II.2: Imagen satelital del recorrido desde la ciudad de Lima, Abancay, Pachaconas y la unidad minera Minaspa.

Fuente: Google Earth Pro – Elaboración Propia.

2.3. Recursos.

2.3.1. Recursos Humanos.

El distrito Pachaconas cuenta con una población aproximada de 1240 Habitantes, según los datos del INEI al 2015. Esta cantidad de pobladores lo conforman familias propias del lugar y otras familias que llegaron a Pachaconas por la actividad minera. Pachaconas cuenta con servicios de Educación Básica Regular (EBR), con Puesto Policial y un Centro de Salud. Pachaconas tiene 3 comunidades campesinas siendo: Palcayño, Huancaray, Chircahuay, estas comunidades priorizan la ganadería y agricultura para su subsistencia, siendo en los últimos 5 años la minería artesanal (informal) una alternativa de trabajo para estas 3 comunidades. Por último, cabe resaltar que el distrito de Pachaconas no cuenta con un sistema de saneamiento básico, puesto que el agua de consumo es no

clorada y la evacuación de excretas no es tecnificado (pozos de tratamiento de aguas servidas).

2.3.2. Fauna y Flora.

- ❖ **Fauna:** Pachaconas presenta unas especies faunísticas conocida y no son muchas, se encuentran; Zorro (*Vulpes vulpes*), Águila (*Aquila chrysaetos*), Zorrinos (*Mephitidae*), Puma (*Puma concolor*), Venado (*Odocoileus virginianus*), y especies de aves pequeñas. La presencia de Cóndor es ocasional por lo que no se considera como especie común.
- ❖ **Flora:** Como en todos los pueblos del sur, Pachaconas presenta una variedad de especies vegetales de las cuales las más representativas son: Molle (*Schinus molle*), Aliso (*Alnus glutinosa*), Chachacoma (*Senecio oreophyton*), Maque, Tuna (*Opuntia ficus-indica*), Tayanco, Ichu, eucalipto (*Eucalyptus*) y entre otros.

2.3.3. Agricultura.

La actividad agrícola del lugar es de manera convencional, cubre la demanda familiar y local, debida a que los productos cosechados no se venden a otro mercado. Los productos de mayor cultivo son: Maíz, Haba, Arveja. Quinua, Kiwicha y Papa. Estos excepto el ultimo, son sembrados en los andenes ya que Pachaconas presenta una topografía con valles tipo V.

2.3.4. Ganaderia.

Pachaconas desarrolla la actividad ganadera en forma prioritaria, ya que de ello depende su sustento alimenticio. El ganado vacuno es el más criado por los pobladores del lugar, mientras el Ovino es criado en las alturas junto a los

Camélidos, estos 3 animales brindan su carne para la alimentación y los ovinos y camélidos brindan su Lana para la confección de prendas.

2.3.5. Costumbres:

Pachaconas es un pueblo lleno de costumbres y desarrollan fiestas costumbristas en su mayoría patronales ya que el pueblo entero es de religión católica. Las fiestas resaltantes son: Virgen candelaria (2 de febrero), San Juan (24 de junio) y Navidad (25 de diciembre). Pachaconas es un pueblo de afición a la Tauromaquia.

2.4. Geología.

2.4.1. Geología regional.

La Unidad Minera Minaspatha se localiza en la parte central de la franja metalogenética Andahuaylas – Yauri, donde ocurren yacimientos de pórfidos de Cu, Mo-Au (Antapacay, Cotabambas, Trapiche, Chancas, etc.), yacimientos de skarns de Cu (Tintaya, las Bambas, Corocohuayco, quechuas, etc.) y yacimientos de oro (Cochasayhuas, Virundo, Utupara, etc).

2.4.2. Geología local

En el área circundante a la unidad minera Minaspatha, se exponen rocas sedimentarias clásticas y calcáreas de edad jurásica y cretácica, un tanto alejados se exponen rocas intrusivas de edad neógeno. La estratigrafía de las rocas sedimentarias comenzando por el más antiguo, ocurre en la siguiente secuencia:

- Formación Chuquibambilla: Estratos de areniscas grises oscuras con gruesos niveles de lutitas negras y lentes de caliza gris a negra, secuencia plegada y fuertemente fracturada.



- Formación Soraya: Estratos prominentes y compactos de cuarcitas blancas y grises plegadas y fracturadas, también correlacionadas al grupo yura de edad cretáceo inferior.
- Rocas Intrusivas: Rocas que ocurren alejados al área del proyecto, son intrusiones ígneas de variada composición y textura.

2.4.3. Geología estructural

La corteza terrestre, del yacimiento Minaspatá muestra extensos afloramientos de rocas sedimentarias clásticas calcáreas del jurásico y cretáceo que, en contacto con las rocas intrusivas del oligoceno temprano, albergan yacimientos mayormente con minerales de oro y plata

2.5. Recursos mineros

Lógicamente Pachaconas posee bastos recursos Mineros. Existen recursos metálicos a lo largo del territorio, los yacimientos destacables son: Minaspatá (Au, Ag), Yanama (Au, Cu, Ag), Nina Cassa (Polimetálico). Mientras los recursos No-Metálicos destacan los yacimientos de: Huancaray (Caliza y Yeso), Palcaño (piedras ornamentales).

2.5.1. Geología económica

2.5.1.1. Tipo de yacimiento.

El yacimiento es de tipo Rosario en vetas, puesto que se presentan cuerpos regulares con anchos variables. El oro ocurre en partículas de 2 micras a más, y principalmente en inclusiones de la veta principal que son sulfuros como mineral principal la piritá, arsenopiritá y otros sulfuros menores.



2.5.1.2. Mineralogía.

Los minerales en Minaspata están bien definidos y se muestran en la tabla II.3:

Tabla II.4: Mineralogía de las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L.

| Menas | |
|------------|--------------------------------|
| Mineral | Símbolo |
| Pirita | FeS |
| Calaverita | |
| Limonita | FeO.OH.nH ₂ O |
| Gangas | |
| Cuarzo | SiO ₂ |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ |

Fuente: Elaboración Propia

De estas menas se obtiene el oro como producto principal. La plata por encontrarse en cantidades pequeñas no es considerada como producto principal puesto no se llega a comercializar.

2.5.1.3. Control de mineralización.

La mayor mineralización se da en las alteraciones intensas y en el contacto de las rocas también aprovecha las fracturas de las fallas debido a que es propicio para el mineral rellenarse en dichas estructuras. Se realizará explotación selectiva de Sulfuros y Óxidos, para lograr un óptimo proceso metalúrgico.

2.5.1.4. Estimación de reservas.

La cubicación del yacimiento Minaspata se desarrolló con métodos tradicionales y simples (Mapeo Geológico, Geometría Descriptiva, Topografía), con lo que se considera que dentro de las 4 cuadrículas de Concesión se encuentran 3 Vetas Principales y 20 ramales con potencias de 2 m y 0,8 m, profundidad de 200 m y 180 m respectivamente y en ambos casos 0,2 m de potencia con lo cual se tiene aproximadamente 4 000 TM de

mineral con lo cual se proyecta una vida de 8 Años con extracción de 40 TM por mes.

El cálculo matemático de la cubicación sería el siguiente:

$$V=3*2m*200m*0.2m + 20*180m*0.8m*0.2m$$

$$V= 816 m^3$$

La densidad promedio del mineral es de $4.8 \text{ TM}/m^3$, por lo tanto.

$$\text{RESERVA} = 816 m^3 * 4.8 \text{ TM}/m^3$$

$$\text{RESERVA} = 3916.8 \text{ TM de mineral} = 4000 \text{ TM de mineral Aprox.}$$

CAPITULO III

3. MARCO TEÓRICO.

3.1. Antecedentes de la investigación.

3.1.1. A nivel internacional.

- Ing. Raúl Alberto ACTIS (2008). Escombreras “Ubicación, estabilidad y contaminación ambiental”.

Las escombreras o botaderos son lugares donde se depositan materiales de desecho provenientes de las industrias mineras, manufactureras, de la construcción o de actividades diversas. Si bien todas estas industrias generan importantes beneficios a la sociedad también generan importantes inconvenientes, siendo uno de los más nocivos la contaminación del medio ambiente. La ubicación en lugares apropiados y la técnica para que estos depósitos sean estables y que no contaminen el medio ambiente deben ser estudiadas para reducir sus efectos perjudiciales. Muchos de los temas relativos a estos problemas han sido desarrollados en los capítulos que componen este libro.

La prevención de la contaminación debe destacarse como premisa principal cuando se realicen estudios sobre problemas de residuos o desechos. Otras

premisas importantes son las que incluyen la reutilización de los residuos y la de optar por técnicas, métodos y maquinarias que tiendan hacia una producción mínima de residuos en las plantas nuevas y mediante cambios en los procesos de las plantas mineras o industriales existentes.

➤ **Pedroza Rojas Álvaro O. (2014). Algunos aportes de la geotecnia a la práctica minera.**

Comprender el comportamiento global de un medio tan complejo como un macizo rocoso es un reto tremendo, pero apasionante, cuya complejidad resulta comprensible si tomamos en cuenta que aún no podemos predecir los sismos.

3.1.2. A nivel nacional.

➤ **Pedro Mamani – Compañía Minera Antamina (2011). Construcción de botaderos de gran altura.**

Para el desarrollo de un proyecto minero básicamente tiene los siguientes componentes:

- Tajo
- Botaderos
- Planta Concentradora o SX - EW
- Presa de Relaves o Pads de Lixiviación

Antamina está ubicado en el corazón de la cordillera de los Andes, rodeado de picos y quebradas con una topografía muy difícil y suelos no competentes.

Esto representa una dificultad para la instalación de cualquier infraestructura, principalmente los botaderos.



Esta dificultad se ha convertido en retos para construir botaderos de Gran Altura, con descargas al vacío de 400m a 300m de altura, esta actividad está relacionada a la optimización de las distancias de acarreo.

Se cuenta con un equipo profesional conformado por el área de Ingeniería Mina, Geotecnia, Operaciones Mina y Consultores Externos.

➤ **Minera Santa Rosa – Mina Aruntani S.A.C (2006). “Plan de Cierre de la Mina Aruntani S.A.C. – Minera Santa Rosa”.**

El estudio Geotécnico de los botaderos de desmonte emplazadas en la Mina Aruntani Minera Santa Rosa, tiene como finalidad evaluar las características geomorfológicas, lito-estratigráficas, estructurales y geodinámicas del área de las principales labores de la Mina (botadero Sur y Norte) y de las áreas ubicadas en las cercanías de estas. La visita técnica fue realizada del 16 al 19 de mayo del 2006. El presente Informe contempla los resultados de la recopilación de información y de los ensayos realizados en la exploración geotécnica, resultados de los ensayos de laboratorio realizados con las muestras obtenidas en las exploraciones, así como, los resultados de evaluación de la estabilidad de los taludes existentes y proyectados de las desmonteras, Pad de lixiviación; contiene además las conclusiones y recomendaciones en base a dichos resultados.

3.2. Generalidades de las escombreras

3.2.1. Escombrera

Se denomina escombrera a toda aquella acumulación de materiales sólidos de granulometría variable procedentes de las actividades humanas, bien como

residuos de los procesos mineros (estériles rocosos) o de otros procesos industriales o urbanos (escombros de demolición, tierras de vaciado, etc.

Tradicionalmente, la forma de implantar las escombreras se ha realizado buscando la facilidad de transporte y ocupación de terrenos sin un plan previo de desarrollo. Aunque, en líneas generales, este proceder ha dado resultados aceptables, en algunos casos se han producido accidentes importantes y en otros un impacto ambiental excesivo, lo que hace aconsejable disponer de unas normas de buena práctica y unos criterios de ejecución y control para futuras implantaciones (Junta Andalucía 2013).

3.2.2. Estudio y descripción de las escombreras

Los depósitos de estériles se pueden describir atendiendo, normalmente, a los siguientes criterios:

A. Por sus dimensiones

Se considera escombrera cualquier acumulación de materiales que sobrepase los 25000 m³ de volumen, los 15 m de diferencia de altura entre su pie y la parte superior del depósito, o bien cuyo espesor de estéril sea superior a 10 m. En condiciones normales de homogeneidad y humedad del material, se dividen en:

- **Grandes.** Aquellas cuya altura sea superior a 30 m.
- **Medianas.** Aquellas cuya altura sea superior a 20 m e inferior a 30 m.
- **Pequeñas.** Aquellas cuya altura sea superior a 15 m e inferior a 20 m.

B. Por su emplazamiento

- De valle o cauce.

- De ladera. Situadas sobre pendientes con inclinaciones de hasta el 8 %.
- De divisoria.
- En llanura o exenta.
- De relleno de corta o hueco minero.

C. Por el tipo o sistema de vertido

- De vertido libre o por gravedad. En general, no reglamentario, excepto en el caso de escombreras de pequeñas dimensiones o en el interior de minas activas siempre y cuando no exista riesgo de deslizamiento o inestabilidad.
- De vertido libre por fases adosadas. Método más recomendable debido a su mayor estabilidad.
- Escombreras con dique de retención en pié o tacón de escollera. Recomendable cuando los estériles a verter presentan diferentes litologías
- De vertido por fases ascendentes compactadas y superpuestas. Implican capas horizontales compactadas.
- Estructuras mixtas. Aquellas que combinan algunos de los métodos anteriores.

D. Por el método constructivo

- Por basculamiento final. Da lugar a franjas de material inclinadas de acuerdo con el ángulo de rozamiento interno del mismo.
- Por capas horizontales compactadas. Método más general y recomendable debido a su mayor estabilidad.

E. Por su grado de riesgo potencial, estabilidad y coeficiente de seguridad

Debido a su posible deslizamiento, se dividen en:

➤ Clasificación por riesgo (Tipo A):

- Escombreras Tipo AI. Sin riesgos para personas, bienes, etc.
- Escombreras Tipo AII. Presentan riesgo moderado para personas, bienes, etc.
- Escombreras Tipo AIII. Presentan un riesgo elevado para personas, bienes, etc.

➤ Clasificación por seguridad ligada a la presencia de agua y problemas del cimiento (Tipo B):

- Escombreras normales (Tipo BI). Sin efecto de aguas freáticas y en cuya estabilidad no interviene el cimiento.
- Escombreras sometidas a filtración (Tipo BII). Agua en grietas o fisuras y riesgo de deslizamiento por la cimentación.
- Escombreras en situación de inundación, inestabilidad por riesgo sísmico, etc. (Tipo BIII).

3.3. Descripción de los estériles mineros y sus propiedades

3.3.1. Clases de estériles mineros

Una descripción básica de los estériles mineros debe incluir una descripción de cada tipo de roca y el porcentaje contenido de cada uno de ellos; estas se presentan en la tabla III.1.



Tabla III.1: propiedades de los estériles mineros y ensayos a realizar.

| PROPIEDAD DEL MATERIAL | APLICACIÓN | ENSAYO EN CAMPO | ENSAYO EN LABORATORIO |
|---|--|---|---|
| DESCRIPCIÓN: Litología Composición Microestructura Forma de las partículas | Clasificación Durabilidad Correlación entre resistencia intacta y al corte | Descripción en campo Clasificación preliminar Sondeos con recuperación de testigos | Análisis microscópico Clasificación detallada |
| GRANULOMETRÍA | Correlación entre resistencia y conductividad hidráulica Evaluación del potencial de separación | Estimación visual Examen en campo Ensayo de separación en campo | Cribado Medida de la humedad (hidrómetro) |
| PLASTICIDAD DE LOS FINOS | Clasificación Correlación con la resistencia al corte Índice del contenido de arcilla | Resistencia seca, dilatación y dureza | Límite de Atterberg en finos |
| RESISTENCIA INTACTA | Durabilidad Correlación con la resistencia al corte | Ensayo de carga puntual Dureza en campo | Ensayo triaxial Ensayo de compresión simple |
| RESISTENCIA AL CORTE | Criterio de rotura Estabilidad de escombreras | Ensayo de corte en campo Ángulo de reposo | Ensayos de corte directo o triaxial |
| MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA | Índice de hinchamiento Durabilidad Microestructura Clasificación | Ensayo de acidez para carbonatos | Difracción de R-X Límite de Atterberg en finos |
| DURABILIDAD | Reducción de la conductividad hidráulica Duración en firmes y base de cimentación Reducción de la resistencia al corte | Meteorización de la superficie | Durabilidad al desmenuzarse Ensayos de abrasión |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA | Estimación de la infiltración Predicción de las condiciones piezométricas Cálculo del drenaje | Correlación basada en la granulometría | Compactación y permeabilidad |
| CONSOLIDACIÓN Y ASENTAMIENTO | Resistencia al corte Consolidación y asentamiento | Peso unitario a partir del esponjamiento | |
| GEOQUÍMICA | Impacto medioambiental Riesgo por lixiviación de metales pesados. Adsorción Drenajes ácidos. Neutralización | Determinación de surgencias de agua Medida del pH en flujos de agua, conductividad, etc. | Lixiviación en columna Celdas de humedad Medida de la acidez Ensayos para determinar contaminantes |

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007.

3.3.2. Propiedades de los estériles mineros

3.3.2.1. Granulometría

La granulometría de los estériles tiene una influencia directa sobre la permeabilidad y la resistencia al corte. Por lo general, los materiales gruesos con pocos finos (menos del 10% de Malla 200) tienen buena resistencia y alta conductividad hidráulica.

El tamaño de los estériles de las escombreras depende de una serie de factores como: litología, dureza, discontinuidades del macizo rocoso, técnica de arranque y/o voladura, manipulación y transporte, método de vertido, etc.

Cuando el porcentaje de finos es superior al 10%, éstos controlan o tienen gran influencia sobre las propiedades de los materiales vertidos en la escombrera (resistencia al corte, conductividad hidráulica, grado de oxidación, formación de aguas ácidas, etc.).

La granulometría está muy relacionada con el fenómeno de la segregación, producido cuando los estériles transportados con camión o pala se vierten en la cresta del talud. Es muy habitual utilizar la fracción gruesa generada en la segregación natural, y que se acumula en el pie del talud, como método de drenaje del agua de las escombreras.

En general, en la segregación que se produce en un talud se pueden distinguir tres zonas:

- ❖ La concentración de finos en la cresta del talud.
- ❖ Una distribución uniforme de material de tamaño intermedio en el resto del talud hasta el pie.

- ❖ Una amplia dispersión de material grueso que se extiende más allá del pie del talud.

Internamente, la escombrera está compuesta de una serie de capas paralelas a la cara de vertido donde, alternativamente, se suceden las compuestas por granos finos y las de granos gruesos.

La altura del talud prácticamente no influye en la distribución granulométrica de la segregación. Por otro lado, la construcción en capas relativamente finas produce un depósito más homogéneo. En ciertos casos, pueden ser necesarias unas capas especiales de drenaje para evitar la saturación de los materiales.

También se puede distinguir entre los efectos que se producen en la segregación al realizarse un vertido por empuje (tractor) de un vertido desde una cierta altura (volquete, pala cargadora). En el primer caso disminuye la segregación de finos en la zona alta del talud, pero las partículas gruesas se siguen acumulando en el pie, disminuyendo, en general, la cantidad de material segregado

En cuanto a la hidrogeología de una escombrera donde se haya producido segregación, destaca el fenómeno de que los finos acumulados en la zona alta del talud impiden el paso de agua, produciéndose infiltraciones a lo largo del propio talud de la escombrera, por lo que un correcto drenaje del pie de la misma favorece la estabilidad (Carreño J. – Caracas 2013).

3.3.2.2. Plasticidad de los finos

Si aparece una cantidad considerable de componentes de tamaño limo o menor en los estériles, se deberán determinar los Límites de Atterberg (Límite líquido y Límite plástico) en laboratorio. La plasticidad de los finos puede tener un

impacto sobre las características de resistencia al corte del material, y debe ser indicativa del tipo de minerales arcillosos contenidos en él. Los Límites de Atterberg también se determinarán en rocas sedimentarias de tamaño fino mediante desagregación mecánica.

3.3.2.3. Resistencia intacta

La resistencia de los fragmentos de roca intactos influye en la durabilidad y resistencia al corte de los materiales de la escombrera

En investigaciones preliminares de escombreras pequeñas, donde los estériles están sometidos a esfuerzos relativamente bajos (menores de un 25-50 % de la resistencia a compresión de la roca intacta), o donde los estériles sean muy resistentes, la resistencia intacta se conocerá a partir de relaciones empíricas dependiendo del tipo de roca, por ensayos de dureza en campo y con el índice de carga puntual en los testigos de perforación.

En escombreras grandes, donde los materiales de la escombrera están sometidos a esfuerzos relativamente altos o son frágiles, los esfuerzos entre partículas alcanzan o superan la resistencia intacta de la roca, produciéndose el aplastamiento y rotura de las partículas. En este caso, deben realizarse estudios más detallados de la resistencia intacta que consistirán en ensayos de compresión simple.

3.3.2.4. Resistencia al corte

Para conseguir un análisis y un diseño correctos, es fundamental tener un conocimiento de las características de resistencia al corte de los materiales de las escombreras. La resistencia efectiva al esfuerzo cortante de estos estériles depende de una amplia gama de parámetros interrelacionados, entre los que

se incluyen la resistencia de la partícula intacta y resistencia anisotrópica, angulosidad de las partículas, granulometría, rugosidad de las superficies y propiedades de fricción, composición litológica, mineralogía y grado de saturación. En este sentido, la resistencia al corte puede variar con el tiempo debido a factores como la consolidación; oxidación; filtración y cambios químicos; además de deformaciones inducidas por los cimientos o reagrupamientos internos y migración de finos.

También está comprobado que la resistencia al corte es función de la tensión de confinamiento, proponiéndose varios modelos para materiales de relleno (Marshall, 1973; Barton, 1981; Hoek, 1983). Excepto en caso de producirse colapso que incluya la saturación de los estériles finos, es habitual suponer resistencias a fricción iguales o mayores que el ángulo de rozamiento interno. En el análisis y diseño de las escombreras, se suele determinar la resistencia al corte de los materiales de éstas suponiendo el criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb, sin cohesión y con un ángulo de rozamiento igual al ángulo de reposo natural de los materiales de la escombrera. Dicho ángulo de reposo es fácil de averiguar en campo y su valor suele oscilar entre 35° y 40°. Esta teoría relativamente simple para la evaluación de la resistencia al corte se puede considerar válida para escombreras de pequeño a medio tamaño, donde las tensiones internas son bajas en comparación con la resistencia de la roca intacta. Además, se ajusta a los materiales de escombrera que contienen una cantidad limitada de finos (menor del 10%) y no estén sometidos a degradación.

Para escombreras más grandes y complejas, donde las tensiones internas son mayores, las deformaciones que aparecen debido a la consolidación y a

los esfuerzos y ajustes internos son considerables y, además, aparece una proporción significativa de finos, por lo que se recomienda un mayor conocimiento de la resistencia al corte. En estos casos, se puede optar por varias teorías. Una de ellas sería adoptar suposiciones muy conservadoras de resistencia al corte, sin embargo, esto puede dar como resultado un diseño de la escombrera excesivamente conservador y poco económico.

Pueden realizarse ensayos de corte directo a gran escala o ensayos triaxiales de muestras representativas de los materiales de la escombrera. Las deformaciones halladas durante los ensayos deben ser suficientes para determinar la resistencia al corte tanto residual como de pico. Los resultados de los ensayos deben ser evaluados y se deberán elegir los parámetros de resistencia suficientemente conservadores para el estudio de la estabilidad a corto y largo plazo.

En los estudios anteriormente señalados de Barton y Kjaernsli (1981) se muestra que el valor de Φ' en estériles de mina puede ser cuantificado por la rugosidad equivalente, R, y por la resistencia equivalente, S, según la figura III.1

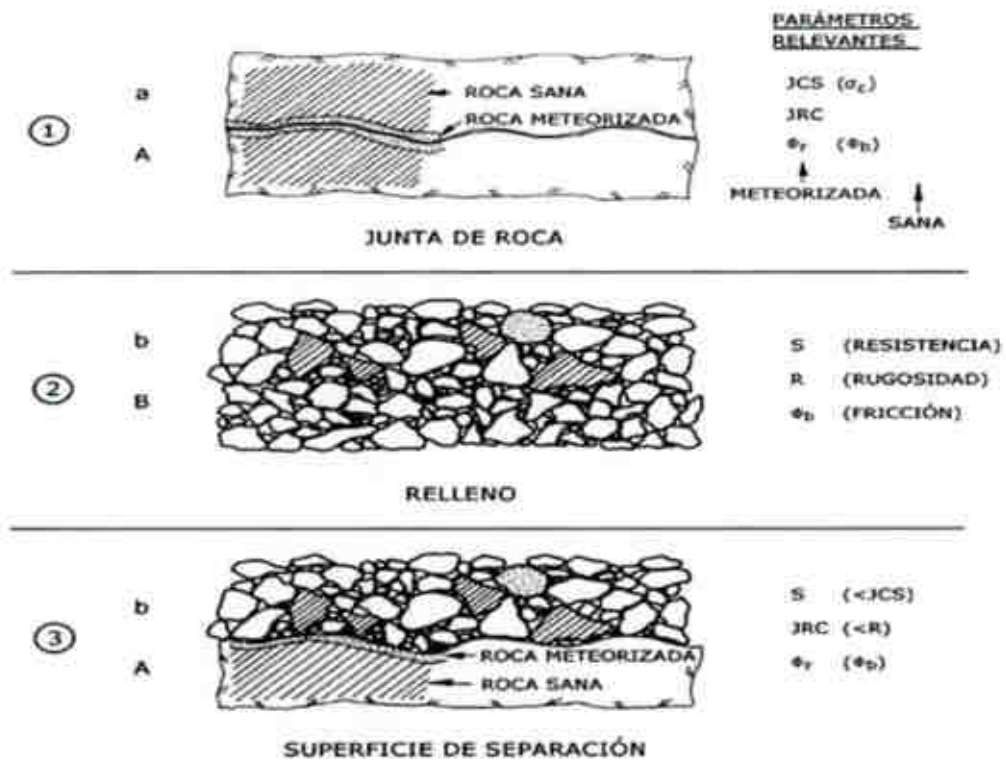


Figura III.1: Análisis empírico para la estimación de la resistencia al corte de juntas de roca, estériles y contacto entre ambas.

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

El valor de R depende de la porosidad del material y de la rugosidad y geometría de las partículas. La rugosidad equivalente, que es análoga al valor JRC de las juntas de roca, puede ser estimado utilizando la figura figura III.2:



| EJEMPLOS DEL GRADO DE REDONDEZ | | | | |
|--------------------------------|----------------|---------|-----------------------|------------------|
| ROCA DE CANTERA | CANTOS RODADOS | MORRENA | MATERIAL GLACIFLUVIAL | MATERIAL FLUVIAL |
| | | | | |

Figura III.2: Método para estimar la rugosidad equivalente (R) de un estéril de mina.
Fuente: Junta de Andalucía, 2003

Un método empírico para la estimación de la resistencia equivalente de partículas de roca (S) aparece en la figura III.3. Este parámetro es análogo al valor de compresión de juntas JCS y también depende de la escala.

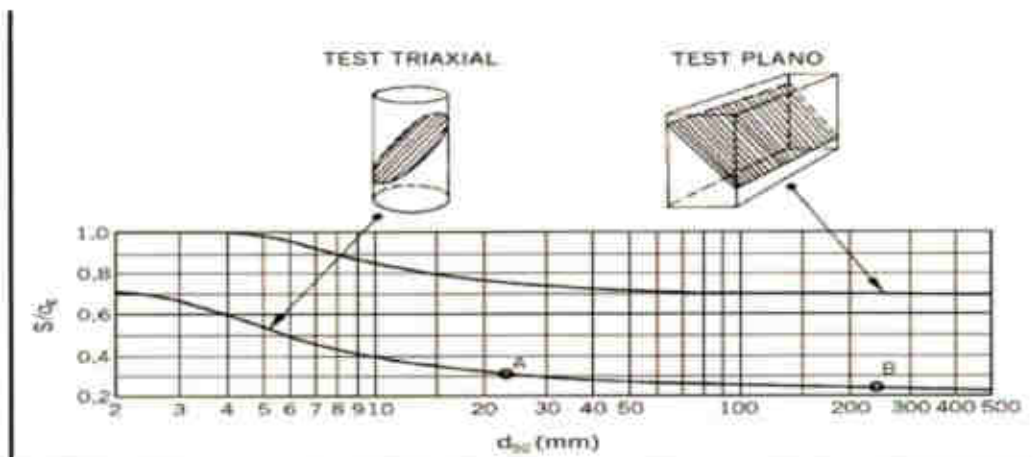


Figura III.3: Método para estimar la resistencia equivalente (S) de un estéril de mina.
Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

Un método empírico para la estimación de la resistencia equivalente de partículas de roca (S) aparece en la figura 3.4. Este parámetro es análogo al valor de compresión de juntas JCS y también depende de la escala.

El ángulo de rozamiento interno efectivo en estériles se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$\Phi' = R \cdot \log(S/\sigma'n) + \Phi_b$$

Se estudian los valores de Φ' al multiplicar los valores de las tensiones por 10, comenzando con un valor de 0,1 MPa. Este grado de dependencia de las tensiones se puede ampliar hasta cinco órdenes de magnitud.

3.3.2.5. Mineralogía y petrografía

La presencia de minerales arcillosos de baja resistencia o la aparición de hinchamientos, microgrietas y otras texturas, pueden influir en la durabilidad y resistencia de los materiales de la escombrera. Un conocimiento de la mineralogía y petrografía de las rocas puede ayudar también en la clasificación y descripción de las mismas.

Se deben determinar los Límites de Atterberg para muestras desagregadas de rocas sedimentarias de grano fino u otras rocas que contengan minerales arcillosos, para ayudar a la identificación de los tipos de minerales que pueden estar presentes.

3.3.2.6. Durabilidad

La durabilidad y el potencial de degradación física y química de la roca influyen en la resistencia al corte a largo plazo y la conductividad hidráulica de la escombrera, así como en la circulación y filtración de los fluidos en la

misma. Las características del desmoronamiento de las rocas son muy importantes en la exposición a sulfuros y en la generación de ácidos, así como en la estabilidad de la superficie de la escombrera, en relación al desplome y erosión. Además, la meteorización y el derrumbamiento mecánico de los materiales de la escombrera pueden ser acelerados por las condiciones de esfuerzo que aparecen en las grandes escombreras, por lo que se deben tener en cuenta.

El conocimiento cualitativo de la durabilidad debe estar basado en la meteorización observada, en la estanqueidad de las escombreras existentes, en los afloramientos de roca y en los testigos de sondeos. Si los conocimientos cualitativos indican que la roca puede ser susceptible de meteorización y degradación, deben realizarse ensayos de durabilidad y fisico-químicos en laboratorio, así como para los materiales de drenaje.

Los criterios de durabilidad dependen de las necesidades particulares del diseño. Los materiales más duros son apropiados para el drenaje y donde se necesite mantener sus características a largo plazo. La construcción de la escombrera en capas relativamente finas es recomendable para materiales blandos y suele estar controlada por la proporción de finos presente (Carreño J. – Caracas 2013).

3.3.2.7. Conductividad hidráulica

Será necesario estimar la conductividad hidráulica de los materiales de la escombrera para los análisis de filtración y el conocimiento del drenaje interno. Asimismo, la conductividad hidráulica sirve para conocer las



condiciones piezométricas en el interior de la escombrera que pueden conducir a la inestabilidad.

Las estimaciones preliminares de la conductividad hidráulica están, generalmente, basadas en correlaciones empíricas con la granulometría. Donde las escombreras contienen componentes con gran cantidad de finos o materiales propensos a la degradación, las estimaciones de conductividad hidráulica realizadas deben estar basadas en ensayos con permeámetros de compactación realizados en la fracción fina del material.

Las propiedades hidráulicas de los estériles son muy variables, apareciendo valores entre 10^{-2} m/s, para estériles ígneos y metamórficos y 10^{-9} m/s para materiales arcillosos. La distinción entre estériles que se comportan como un suelo y como una roca señala una separación entre materiales de baja y alta permeabilidad, respectivamente.

3.3.2.8. Consolidación y asentamiento

Los procesos de consolidación y asentamiento que las escombreras sufren durante y después de su construcción, influyen en la densidad y en las características de resistencia al corte de los materiales de dichas estructuras. Dependiendo de las técnicas de construcción, las distintas zonas del interior de las escombreras pueden sufrir diferentes esfuerzos de compactación.

Las características de los asentamientos pueden variar, produciéndose asentamientos diferenciales en el tiempo y su consecuente rotura, la cual puede conducir a la rotura de la superficie de drenaje, terrenos de recubrimiento, etc., además de grandes infiltraciones en la escombrera.

Debido a la granulometría, frecuentemente gruesa de la mayoría de los estériles de mina, los ensayos de compactación en laboratorio son difíciles, y los resultados,

generalmente, no son representativos. Por eso, no se suelen realizar ensayos de compactación ni ensayos de densidad. Las estimaciones preliminares de la densidad de los materiales de la escombrera están, normalmente, basadas en factores de esponjamiento conocidos, tolerantes con la consolidación y los asentamientos. Los factores de esponjamiento se encuentran en un rango entre 1,2 y 1,5, dependiendo de los tipos de material, métodos de construcción de la escombrera, etc.

3.3.2.9. Características geoquímicas

Las propiedades geoquímicas de los estériles pueden tener un impacto medioambiental significativo. Las aguas subterráneas y superficiales que circulan a través y sobre los materiales pueden arrastrar elementos contaminantes, tales como metales pesados. Además, los problemas de acidez son muy frecuentes en algunas escombreras, principalmente de pirita.

La composición química de los estériles es muy variable según la explotación minera de que se trate, ya que no sólo depende de la naturaleza litológica de los propios materiales extraídos, sino también del método de tratamiento y vertido, de las condiciones climatológicas y de las reacciones de meteorización que se desarrollan dentro de los depósitos.

Muchos residuos mineros tienen en su composición metales que, aun estando presentes en pequeñas cantidades, son tóxicos para las plantas, el hombre y

los animales, y el grado de contaminación producido por las aguas superficiales de escorrentía y lixiviados puede llegar a ser muy alto.

Los análisis químicos en laboratorio del material utilizado son necesarios para cumplir con los permisos pertinentes. Los ensayos normalmente utilizados son la columna de filtración y la determinación de ácido-base.

3.4. Elección y preparación del emplazamiento

3.4.1. Lugar del emplazamiento

En la elección del emplazamiento de una escombrera deben considerarse criterios de diversa naturaleza: técnicos, económicos, ambientales, socioeconómicos, etc.

Entre los criterios específicos más importantes se encuentran la distancia de transporte desde la explotación hasta la escombrera, que afecta al coste total de la operación; la capacidad de almacenamiento necesaria, que viene impuesta por el volumen de estériles a mover, las alternativas potenciales que pueden producirse sobre el medio natural y las restricciones ecológicas existentes en el área de implantación.

Debido al riesgo de deslizamientos y desprendimientos, no es aconsejable la ubicación de escombreras sobre cauces o zonas de ribera, salvo que vayan acompañadas de medidas especiales de protección.

En función del lugar de emplazamiento y de su configuración, las escombreras pueden clasificarse en los siguientes tipos: de vaguada, de ladera, de divisoria, exenta y de relleno de huecos, figura III.4

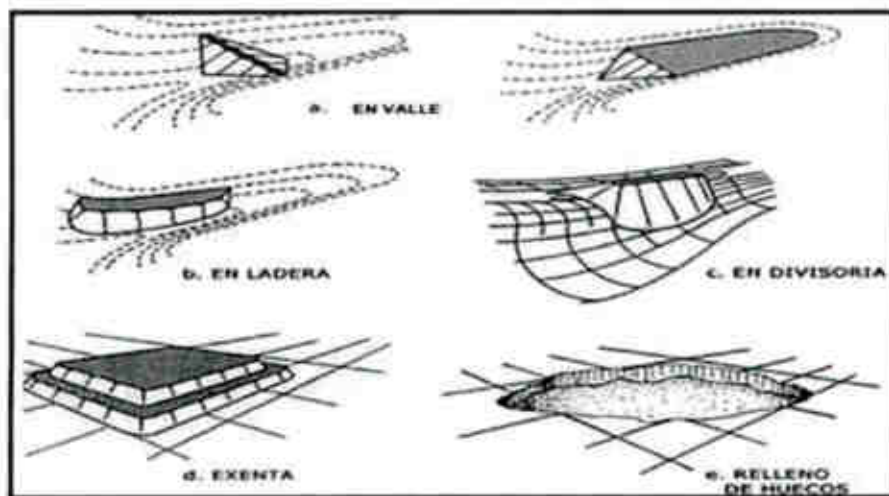


Figura III.4: Tipos de escombreras según el lugar de emplazamiento.
Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007.

a. Escombrera en valle

Pueden rellenar parcial o totalmente un valle o una vaguada, disponiéndose la superficie de la escombrera con una cierta inclinación para evitar la acumulación de agua en la parte superior. En función de las surgencias aguas arriba y dependiendo de la altura de la escombrera, en algunos casos se requiere la colocación de sistemas de drenaje en el interior de las mismas.

b. Escombrera en ladera

Cuando la construcción de la escombrera se realiza sobre un terreno con pendiente, sin llegar a bloquear totalmente el drenaje principal. Por lo general, el talud de la escombrera está en función de la inclinación de la superficie del terreno sobre la que se apoya.

c. Escombrera en divisoria.

Es un caso especial de escombrera en ladera, en el que ésta está emplazada en la cima y queda apoyada sobre ambos lados de la línea divisoria del terreno.

d. Escombrera exenta.

La escombrera se construye por apilamiento o amontonamiento de material sobre un terreno llano o con ligera inclinación. Cuando la escombrera alcanza una altura considerable, la construcción se realiza mediante terrazas y bermas.

e. Escombrera de relleno de huecos.

Debido a la fuerte presión ambiental para la conservación de los terrenos, se está generalizando el relleno con estériles de mina y escombros en antiguos huecos mineros abandonados.

Cuando existe la posibilidad de inestabilidad física o química de los materiales que se vayan a depositar en esos huecos, deberán acondicionarse e impermeabilizarse previamente para impedir el movimiento de los lixiviados o efluentes contaminantes.

3.4.2. Clasificación de las escombreras según su ubicación con respecto a la explotación

El tamaño de las escombreras está marcado por el volumen de estéril que es preciso mover para la extracción del mineral. En minas a cielo abierto, la cantidad de estériles no depende sólo de la estructura geológica del yacimiento y de la topografía del área, sino también del valor económico del mineral y de los costes de extracción del estéril. Los ratios o relaciones entre la roca estéril y el mineral, expresados en m³/t o t/t, son, en la mayoría de las explotaciones de sustancias metálicas y energéticas, muy superiores a la unidad.

Según sea la implantación de la escombrera con respecto a la explotación, éstas se clasifican en interiores, si los estériles se depositan dentro de los propios huecos excavados tras la apertura de un hueco inicial, y exteriores,



cuando la morfología del yacimiento y su consiguiente explotación no permiten el relleno del hueco creado en las primeras fases de la mina.

3.4.3. Geología y capacidad portante

Al elegir el lugar de asentamiento de una escombrera es preciso realizar una investigación de campo para determinar, mediante muestreo, las características geomecánicas de los materiales que constituirán la base del depósito, así como descartar la existencia de mineral potencialmente explotable en el subsuelo.

En una primera etapa se realizará un reconocimiento visual del terreno para identificar los afloramientos rocosos, la cubierta vegetal, los tipos de suelos, surgencias de agua, áreas de baja permeabilidad, vestigios de hundimientos mineros, discontinuidades estructurales, etc.

En la segunda etapa se efectuarán sondeos y calicatas que servirán para conseguir información geológica del subsuelo, así como para obtener muestras para la realización de ensayos in-situ o en laboratorio. Los sondeos para reconocimientos se deben realizar a profundidades superiores a los 5 ó 7 m.

Entre los ensayos in-situ de los suelos cabe destacar los ensayos de corte directo, ensayos de deformabilidad y ensayos de permeabilidad, mientras que, en laboratorio, se realizan los ensayos de propiedades índice, de compactación, de permeabilidad, de consolidación y de corte directo.

Dependiendo de las dimensiones de la escombrera y de las limitaciones impuestas por el entorno, el número de ensayos a realizar variará, siendo la investigación más completa conforme el riesgo de daños a bienes materiales o personas aumente.



Como mínimo se necesitan conocer tres parámetros básicos, como son: la cohesión, el ángulo de rozamiento interno y el peso específico aparente (seco y saturado), para estimar si la base de una escombrera puede soportar la sobrecarga que supone el peso de los estériles vertidos o si, por el contrario, es probable que se produzcan inestabilidades estructurales y movimientos de los materiales de la base que afecten a la estructura que gravita sobre los mismos (Junta de Andalucía – 2013).

3.4.4. Metodología para la elección del emplazamiento

La elección del área de implantación de una escombrera persigue diversos objetivos, entre los que cabe destacar los siguientes:

- ✚ Minimizar los costes de transporte y vertido.
- ✚ Alcanzar la integración y restauración de la estructura en el entorno.
- ✚ Garantizar el drenaje.
- ✚ Minimizar el área afectada.
- ✚ Evitar la alteración sobre hábitats y especies protegidas.

Como resultado de las restricciones medioambientales y económicas que influyen en el proceso de tratamiento de los residuos mineros, es evidente que se hace necesario llevar a cabo una evaluación exhaustiva de las distintas alternativas de emplazamiento de la escombrera. Los datos necesarios no siempre son sencillos de obtener, pueden ser incompletos o incluso las alternativas pueden ser económicamente irrealizables. Por tanto, existe siempre un grado de incertidumbre que juega un papel importantísimo en el proceso de elección del emplazamiento.

A continuación, se presentan los métodos más utilizados para la elección del emplazamiento:

3.4.4.1. Método del índice de calidad

El sistema propuesto por Ayala y Rodríguez (1986) sirve como instrumento de elección preliminar cuando las diversas alternativas existentes para el emplazamiento de la escombrera no resultan lo suficientemente definitivas. El método propuesto pasa por determinar el llamado índice de calidad del emplazamiento, Q_e , mediante la siguiente expresión:

$$Q_e = \alpha \cdot (\beta \cdot \theta)^{(\delta-\eta)}$$

Cada uno de los parámetros que definen el índice de calidad son:

A. Factor α de alteración de la capacidad portante del terreno debido al

nivel freático. Los valores que puede tomar son los siguientes:

$\alpha = 1$ Sin nivel freático o con nivel a profundidad superior a 5 m.

$\alpha = 0,7$ Con nivel freático entre 1,5 y 5 m.

$\alpha = 0,5$ Con nivel freático a menor profundidad de 0,5 m.

$\alpha = 0,3$ Con agua socavando menos del 50 % del perímetro de la estructura.

$\alpha = 0,1$ Con agua socavando más del 50 % del perímetro de la estructura.

B. Factor de resistencia de la cimentación, β . Depende de la naturaleza del cimiento y de la potencia de la capa superior del terreno de apoyo (tabla III.2).

Tabla III.2: Factor de resistencia de la cimentación, β .

| TIPO DE SUELO | POTENCIA | | | | |
|-------------------------|----------|-------------|-------------|---------------|-------|
| | < 0,5 m | 0,5 a 1,5 m | 1,5 a 3,0 m | 3,0 m a 8,0 m | > 8 m |
| Coluvial granular | 1 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.80 |
| Coluvial de transición | 0.95 | 0.9 | 0.85 | 0.8 | 0.75 |
| Coluvial limo-arcilloso | 0.80 | 0.80 | 0.70 | 0.6 | 0.50 |
| Aluvial compacto | 0.90 | 0.85 | 0.8 | 0.7 | 0.70 |
| Aluvial flojo | 0.75 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.40 |

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

- C. **Factor topográfico o de pendiente, θ .** Varía en función de si la implantación se efectúa en terraplén o en ladera y en función de la inclinación de la zona (tabla III.3).

Tabla III.3: Factor topográfico o de pendiente, θ .

| TOPOGRAFÍA DE IMPLEMENTACIÓN | | VALOR DE θ |
|------------------------------|--|-------------------|
| TERRAPLÉN | Inclinación < 1° | 1 |
| | Inclinación entre 1° y 5° (< 8 %) | 0.95 |
| | Inclinación entre 5° y 14° (de 8 % a 25 %) | 0.90 |
| LADERA | Inclinación entre 14° y 26° (de 25 % a 50 %) | 0.70 |
| | Inclinación > 26° (> 50 %) | 0.40 |
| | Perfil en V cerrada (inclinación de laderas > 20°) | 0.80 |
| | Perfil en V abierta (inclinación de laderas < 20°) | 0.6 – 0.7 |

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

- D. **El factor relativo al entorno humano y material a ser afectados, η .** considera el riesgo de ruina de distintos elementos si se produjera la destrucción de la escombrera (tabla III.4).

Tabla III.4: Factor relativo al entorno humano y material a ser afectados, η .

| ENTORNO AFECTADO | VALOR DE η |
|---|-----------------|
| Deshabitado | 1 |
| Edificios aislados | 1,1 |
| Explotaciones mineras poco importantes | 1,1 |
| Servicios | 1,2 |
| Explotaciones mineras importantes | 1,3 |
| Instalaciones industriales | 1,3 |
| Cauces intermitentes | 1,2 - |
| Carreteras de 1 ^o y 2 ^o orden, vías de comunicación | 1,6 |
| Cauces fluviales permanentes | 1,7 |
| Poblaciones | 2 |

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

E. Factor de alteración de la red de drenaje, δ . que viene dado (tabla III.5).

Tabla III.5: Factor de alteración de la red de drenaje, δ .

| ALTERACIÓN DE LA RED DE DRENAJE | VALOR DE δ |
|---|-------------------|
| Nula | 0.0 |
| Ligera | 0.20 |
| Modificación parcial de la escorrentía de una zona | 0.30 |
| Ocupación de un cauce intermitente | 0.40 |
| Ocupación de una vaguada con drenaje | 0.50 |
| Ocupación de una vaguada sin drenaje | 0.60 |
| Ocupación de un cauce permanente con erosión activa menor del 50 % del perímetro de la estructura | 0.80 |
| Ocupación de un cauce permanente con erosión activa mayor del 50 % del perímetro de la estructura | 0.90 |

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

Tras la obtención de los distintos parámetros se puede llegar a calcular cuál es el valor del índice de calidad Q_e . Según el valor obtenido, los emplazamientos se clasifican de acuerdo con (tabla III.6).

Tabla III.6: Clasificación de los emplazamientos según valor de Q_e .

| VALOR DE Q_e | EMPLAZAMIENTO |
|---------------------|--|
| $1 < Q_e < 0,90$ | Óptimo para cualquier tipo de estructura. Tolerable para estructuras de gran volumen. |
| $0,90 < Q_e < 0,50$ | Adecuado para estructuras de volumen moderado |
| $0,50 < Q_e < 0,30$ | Tolerable |
| $0,30 < Q_e < 0,15$ | Mediocre |
| $0,15 < Q_e < 0,08$ | Malo |
| $Q_e < 0,08$ | Inaceptable |

Fuente: Junta de Andalucía, 2003.

3.4.5. Estudio del emplazamiento

El conocimiento de las propiedades del cimientó y de los materiales de la escombrera será necesario para realizar un diseño correcto de la misma. En este sentido, también será importante establecer tanto la localización como la calidad del agua subterránea para poder predecir los impactos ambientales y establecer los programas de vigilancia adecuados.

Para seleccionar y obtener muestras representativas de los materiales, interpretar correctamente los resultados y aplicarlos al diseño, se requiere un conocimiento adecuado de ciertas propiedades físicas del medio. El tipo y cantidad de ensayos necesarios variará dependiendo de los siguientes factores: complejidad de las condiciones del emplazamiento, localización, tipo, tamaño y configuración de la escombrera, y características medioambientales. Para escombreras grandes, o situadas en ubicaciones ambientalmente sensibles, será necesario realizar una mayor cantidad de ensayos específicos.

La mayoría de los parámetros necesarios para el análisis y el diseño provienen de criterios empíricos basados en clasificaciones y descripciones cualitativas. En cualquier caso, cuando los programas de ensayos estén limitados o cuando los parámetros no se puedan hallar utilizando las técnicas habituales, se realizará un diseño más conservador (Carreño J. – Caracas 2013).

3.4.5.1. Suelos del cemento

A continuación, se describirán las propiedades más importantes de los suelos del cemento, así como su aplicación en el diseño y sus métodos de medida en campo y en laboratorio (tabla III.7).

Tabla III.7: Propiedades y Pruebas Importantes para Suelos de Cementación.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007.

| PROPIEDAD DEL MATERIAL | APLICACIÓN | ENSAYO EN CAMPO | ENSAYO EN LABORATORIO |
|------------------------------|--|---|--|
| DESCRIPCIÓN | Clasificación Durabilidad Correlación entre resistencia intacta y al corte | Descripción en campo Clasificación preliminar | Análisis microscópico Clasificación detallada |
| PROPIEDADES | Correlación entre resistencia y conductividad hidráulica Evaluación del potencial de separación | Estimación visual Examen en campo Ensayo de separación en campo | Cribado Medida de la humedad (hidrómetro) |
| PLASTICIDAD DE LOS FINOS | Clasificación Correlación con la resistencia al corte | Resistencia seca, dilatación y dureza | Límite de Atterberg en finos |
| RESISTENCIA INTACTA | Durabilidad Correlación con la resistencia al corte | Ensayo de carga puntual Dureza en campo | Ensayo triaxial Ensayo de compresión simple |
| RESISTENCIA AL CORTE | Criterio de rotura Estabilidad de escombreras | Ensayo de corte en campo Ángulo de reposo | Ensayos de corte directo o triaxial |
| MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA | Índice de hinchamiento Durabilidad Microestructura Clasificación | Ensayo de acidez para carbonatos | Difracción de R-X Límite de Atterberg en finos |
| DURABILIDAD | Reducción de la conductividad hidráulica | Meteorización de la superficie | Durabilidad al desmenuzarse |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA | Estimación de la infiltración Predicción de las condiciones piezométricas | Correlación basada en la granulometría | Compactación y permeabilidad |
| CONSOLIDACIÓN Y ASENTAMIENTO | Resistencia al corte Consolidación y asentamiento | Peso unitario a partir del esponjamiento | |
| GEOQUÍMICA | Impacto medioambiental Riesgo por lixiviación de metales pesados. Adsorción | Determinación de surgencias de agua | Lixiviación en columna Celdas de humedad Medida. |

3.4.5.2. Propiedades de los suelos del cimiento

✓ Descripción

Se debe realizar una descripción de los diferentes suelos que aparecen en el emplazamiento elegido. Dicha descripción debe incluir características tales como el color, la granulometría, la textura, el olor, la estructura, etc., que ayuden a la identificación y clasificación del suelo, además de indicar los procesos de meteorización que haya sufrido. La clasificación del suelo permitirá separar los distintos tipos de suelos que conforman el terreno y analizarlos por separado.

Las descripciones preliminares se suelen realizar en campo mediante la perforación de sondeos y reconocimientos. Las condiciones en campo no suelen ser ideales y algunas técnicas de muestreo no pueden proporcionar descripciones detalladas, por lo que se debe recurrir a ensayos en laboratorio, principalmente con microscopio.

✓ Propiedades y clasificación

Se deben determinar las propiedades de cada tipo de suelo que se haya identificado durante las investigaciones en campo. Dichas propiedades, como la granulometría y plasticidad, son fundamentales para la clasificación del suelo, mientras que la resistencia, permeabilidad y consolidación se deberán tener en cuenta en el diseño. Ciertos parámetros, como el contenido de humedad, densidad y peso específico proporcionan información referente a la relación volumen-peso que podrá ser usada para el cálculo del grado de consolidación, la presión de pre consolidación, la porosidad, cálculos de estabilidad, etc. El contenido de humedad natural también indica el estado del suelo "in situ" en relación con sus límites líquido y plástico.

Aunque existen numerosas clasificaciones, la más utilizada y mundialmente aceptada es la SCSU (Sistema de clasificación de suelos unificada), siendo aplicable a la mayoría de los tipos de suelo, excepto en el caso de suelos donde predominen los guijarros y grandes cantos rodados.

✓ **Conductividad hidráulica de suelos de cimentación.**

El conocimiento de la conductividad hidráulica es necesario para analizar las filtraciones, predecir las condiciones piezométricas, conocer la efectividad del recubrimiento y diseñar el sistema de drenaje. En la mayoría de las escombreras, será suficiente el conocimiento de la conductividad hidráulica a partir de relaciones empíricas basadas en las propiedades y descripción del suelo. Para casos más complejos, como la aparición de un medio ambientalmente sensible o dificultades en la cimentación, serán necesarias medidas más específicas basadas en ensayos en laboratorio.

✓ **Consolidación en cimentaciones.**

En aquellos casos en los que la cimentación de la escombrera se realice sobre suelos de grano fino, será necesario obtener datos sobre la consolidación que se pueda producir. Esta información será necesaria para predecir los posibles asentamientos y la generación de presiones intersticiales excesivas debido a la carga de la escombrera. Una presión intersticial excesiva puede reducir la estabilidad de la escombrera durante su construcción, por lo que el grado de seguridad a lo largo de la vida de la misma vendrá limitado por la disipación de la presión intersticial excesiva.

Los asentamientos debidos a la consolidación de los cimientos también pueden reducir las filtraciones, aumentando la resistencia al corte. Por otro lado, esta consolidación provoca deformaciones en el material de la escombrera con un

cambio en su resistencia al corte y en su comportamiento. Si los asentamientos son importantes, se producirá la rotura de las capas de drenaje, diques perimetrales, etc., por lo que se deberá tener muy en cuenta en el diseño.

✓ **Resistencia**

Las características resistentes de la cimentación serán muy importantes para definir su estabilidad y su capacidad portante. Para una estimación inicial, o cuando la escombrera se construya sobre estratos competentes, se adoptarán criterios conservadores basados en relaciones con la clasificación del suelo y sus propiedades, o a partir de ensayos sencillos en campo.

Cuando las condiciones de la cimentación sean difíciles, esté formada por suelos de grano fino, blando o susceptible de consolidación, o se prevea la generación de presiones intersticiales y otros efectos adversos, será necesario realizar ensayos en campo y en laboratorio más detallados. El número y tipo de ensayos a realizar dependerá de la complejidad del emplazamiento, de la naturaleza del suelo y de las condiciones de carga a las que va a ser sometido. Relacionando las características del terreno con los aspectos del diseño, se puede señalar que, en el vertido de estériles sin cohesión sobre un cimiento competente, la pendiente máxima de la escombrera será igual al ángulo de reposo de dichos estériles. El ángulo de reposo representa el límite inferior del ángulo de rozamiento interno del vertido y varía entre 30° y 40° . Cuando el cimiento esté nivelado y sea competente, además de poseer un drenaje adecuado, la altura alcanzada por estériles sin cohesión formando su ángulo de reposo es, prácticamente, ilimitada. Cuando se viertan estériles no cohesivos sobre cimientos blandos, la máxima altura permitida de la escombrera estará controlada por la resistencia al corte del cimiento.

Las alturas y pendientes máximas permitidas en escombreras que contengan materiales cohesivos y situadas sobre terrenos competentes estarán determinadas por la resistencia del material de la escombrera, mientras que si el cimiento tiene unas características blandas, la altura y la pendiente vendrán determinadas por la resistencia de dicho terreno.

✓ **Densidad “in situ”**

La densidad “in situ” de los suelos influye directamente en la resistencia al corte y capacidad de asentamientos del cimiento, además de la resistencia a la licuefacción, sobre todo en aquellos casos en que el cimiento esté formado por suelos arenosos o limosos. En esta situación, se podrán utilizar relaciones empíricas entre la densidad, el potencial de licuefacción y la resistencia a la penetración.

✓ **Compactación**

El conocimiento de las características de compactación del suelo del cimiento será necesario si en el diseño se contempla alguna construcción de protección, como bermas o revestimientos, que necesiten el uso de maquinaria de compactación. Las medidas en campo quedan restringidas, normalmente, a las medidas de densidad en sondeos mediante el uso de densímetros, mientras que el ensayo de compactación habitualmente utilizado en laboratorio será el Proctor modificado o estándar.

3.4.5.3. Sustrato rocoso del cimiento

Además de las características geológicas básicas del cimiento rocoso que, normalmente, serán evaluadas durante la fase de investigación en campo, se necesitarán hallar otras propiedades importantes en el diseño de la escombrera

que serán descritas a continuación y que se pueden observar en la tabla III.8. Los métodos de campo y de laboratorio para la caracterización de los parámetros importantes del lecho de roca también aparecen en este cuadro. En los casos en que aparezcan rocas con un comportamiento semejante a un suelo, se realizarán los análisis y ensayos descritos en el apartado anterior.

Tabla III.8: *Propiedades del sustrato rocoso del cimiento y ensayos a realizar.*

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2003

| PROPIEDAD DEL MATERIAL | APLICACIÓN | ENSAYO EN CAMPO | ENSAYO EN LABORATORIO |
|---|--|--|---|
| DESCRIPCIÓN: <ul style="list-style-type: none"> • Litología • Origen • Textura y microtextura | <ul style="list-style-type: none"> • Clasificación • Durabilidad • Correlación con resistencia intacta • Resistencia anisotrópica y planos de discontinuidad | <ul style="list-style-type: none"> • Descripción en campo • Clasificación preliminar | <ul style="list-style-type: none"> • Análisis microscópico • Clasificación detallada |
| RESISTENCIA INTACTA | <ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad de la cimentación • Capacidad portante | <ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de carga puntual • Dureza en campo | <ul style="list-style-type: none"> • Ensayo triaxial • Ensayo de compresión simple |
| RESISTENCIA AL CORTE DE LAS DISCONTINUIDADES | <ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad de cimentación | <ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de inclinación • Análisis retrospectivo de roturas naturales | <ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de corte directo |
| MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA | <ul style="list-style-type: none"> • Hinchamiento de arcillas • Durabilidad • Microestructura • Clasificación | <ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de acidez para carbonatos | <ul style="list-style-type: none"> • Difracción R-X • Límite de Atterberg • Análisis geoquímicos |
| DURABILIDAD | <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la resistencia y la capacidad portante • Reducción de la conductividad hidráulica | <ul style="list-style-type: none"> • Meteorización de la superficie | <ul style="list-style-type: none"> • Durabilidad al desmenuzarse • Ensayos de abrasión con sulfatos |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA | <ul style="list-style-type: none"> • Estimación de la infiltración • Predicción de las condiciones piezométricas | <ul style="list-style-type: none"> • Piezómetros • Ensayos de infiltraciones • Control de acuíferos | <ul style="list-style-type: none"> • Compactación y permeabilidad |

3.4.5.4. Propiedades del Sustrato rocoso del cimiento

- **Descripción**

Se debe preparar una descripción de cada uno de los tipos de rocas principales que se hayan encontrado durante las investigaciones en campo, y clasificarlas según su litología y origen. Una descripción y clasificación básica será útil para conocer las características generales del cimiento. Las estimaciones cualitativas preliminares de los parámetros más importantes, tales como resistencia a compresión y durabilidad, pueden basarse en valores típicos dados a cada tipo de roca hallada. En la mayoría de los casos, no serán necesarios análisis más detallados.

- **Resistencia**

La resistencia de la roca intacta y la resistencia al corte de las discontinuidades pueden influir en la estabilidad y capacidad portante de la cimentación. Las estimaciones preliminares de la resistencia a compresión pueden basarse en correlaciones empíricas o en ensayos de dureza en campo. Cuando sea necesaria una mayor información, se pueden realizar ensayos de carga puntual en muestras provenientes de los testigos de sondeos. Los ensayos de resistencia íntacta en laboratorio se hacen en aquellos casos en los que la cimentación rocosa sea muy blanda. Para estudiar la resistencia al corte de las discontinuidades se utilizan ensayos de inclinación en campo o ensayos de corte directo en laboratorio.

- **Mineralogía y petrografía**

La presencia de minerales arcillosos de baja resistencia o susceptibles de hinchamiento, y la aparición de microfracturas y otras texturas de la roca, pueden influir de manera importante en la durabilidad y resistencia de la

cimentación. Un conocimiento de la mineralogía de la roca puede ayudar en su clasificación y descripción. Los métodos para estudiar la mineralogía y petrografía de la arcilla en laboratorio incluyen la difracción de rayos X y el microscopio electrónico. La determinación de los límites de Atterberg también puede ser útil en la identificación de los minerales arcillosos.

- **Durabilidad**

La durabilidad de los materiales de la cimentación puede influir en la estabilidad a largo plazo. Las características de resistencia al corte y la capacidad portante pueden disminuir con el tiempo si el lecho de roca sufre un proceso de degradación. Un conocimiento cualitativo preliminar de la susceptibilidad de dicho lecho a la degradación se puede basar en observaciones de la meteorización de la superficie y en el hinchamiento o degradación de los testigos de sondeos. Si estos estudios iniciales indican que las características del lecho de roca facilitan la meteorización y degradación, se realizarán ensayos de durabilidad al desmoronamiento, que indican la susceptibilidad de la roca a la rotura mecánica.

- **Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica de la cimentación afecta a la filtración y a las condiciones piezométricas, y puede determinar la necesidad de instalación de revestimientos o medidas de control del drenaje. Cuando las investigaciones preliminares en campo señalen acuíferos importantes o condiciones adversas, será necesario realizar ensayos de conductividad hidráulica. El único método práctico de conocer dicha conductividad del lecho rocoso se basa en técnicas de control "in situ" tales como infiltración, piezómetros o sondeos.



proporcionar unas propiedades, como cohesión e impermeabilidad, que pueden ser aprovechados en el diseño. Un valor aproximado de la resistencia al corte puede obtenerse por correlación empírica con las propiedades descritas anteriormente, siendo los ensayos en laboratorio, tales como el corte directo y triaxial, los más indicados cuando se necesiten datos más exactos.

➤ **Densidad**

La densidad "in situ" del recubrimiento influirá en la resistencia al corte y en las características de asentamiento de la escombrera. Sin embargo, debido a la dificultad para hallar esta densidad y por su variación dentro de la propia escombrera, no es habitual obtener datos demasiado precisos de la misma.

Cuando el suelo superficial se vaya a utilizar como revestimiento o recubrimiento final, se debe realizar un ensayo de compactación del terreno que, normalmente, será un ensayo Proctor modificado.

➤ **Mineralogía y química**

La composición mineralógica y química del revestimiento puede ser importante en relación con el impacto ambiental. La presencia de ciertos tipos de arcillas puede fijar los elementos contaminantes o disminuir su liberación y, además, puede ser exigido un estudio químico básico del suelo para cumplir con la legislación vigente.

Si los ensayos del resto de materiales que aparecen en la escombrera indican un posible aumento de los elementos contaminantes, serán necesarios estudios más detallados del recubrimiento constituidos por ensayos de difracción de rayos X, determinación ácido-base, adsorción y conocimiento específico de dichos elementos contaminantes.

3.5. Construcción de escombreras

El método de construcción de escombreras tiene una gran importancia sobre la homogeneidad y estabilidad de la misma, predominando la estratificación horizontal o la paralela al talud. Además, se deberá prestar una especial atención al sistema de vertido. Así, se diferenciará el sistema de vertido directo desde camión o cinta, que será admisible en escombreras de pequeña envergadura y cuando no exista riesgo de rodadura de piedras, del sistema de vertido por empuje con tractor de orugas o pala. Por otro lado, el recrecido de la escombrera se debe realizar de la forma más homogénea posible, que será por capas o tongadas horizontales. Para este mismo fin, se evitará que los escombros de distinta naturaleza se combinen en una misma zona de la escombrera.

3.5.1. Preparación del cimiento y sistemas de drenaje

Dependiendo de la situación, tanto el control del drenaje como la preparación del cimiento puede jugar un papel importante en la estabilidad de la escombrera. Ambos aspectos deben ser contemplados en la etapa de diseño y controlarse durante la etapa de construcción u operación de dicha estructura.

3.5.1.1. Preparación del cimiento

Los trabajos de preparación de los terrenos a ocupar pueden ir desde un simple desbroce, con eliminación de la vegetación existente antes del vertido, hasta una completa retirada selectiva de los horizontes de suelo más superficiales y su posterior aprovechamiento en los trabajos de restauración, así como la deforestación previa de esas superficies. También se puede realizar la excavación de suelos de recubrimiento que, aun no siendo aptos para la restauración, ofrecen una baja capacidad portante o baja resistencia.



En la mayoría de los casos, tanto la cubierta vegetal como los suelos de cobertera afectan negativamente a la estabilidad de las escombreras.

En algunos emplazamientos se pueden precisar distintas actuaciones además de las indicadas, tales como el refuerzo o consolidación del material de la base de apoyo, o la construcción de un sistema de drenaje.

3.5.1.2. Drenaje

El control del agua es un aspecto básico en la construcción y operación de las escombreras. Las fuentes principales de agua que deben considerarse con vistas al drenaje de las escombreras y las superficies circundantes de éstas son las siguientes:

- Escorrentías de los terrenos que constituyen la cuenca de recepción de las escombreras.
- Precipitaciones directas de agua sobre la escombrera.
- Filtraciones del cimiento de apoyo o de laderas ocupadas por la escombrera.
- Labores subterráneas abandonadas que actúan como vías de drenaje de las explotaciones.
- Arroyos o cauces de agua existentes en emplazamientos de vaguada.

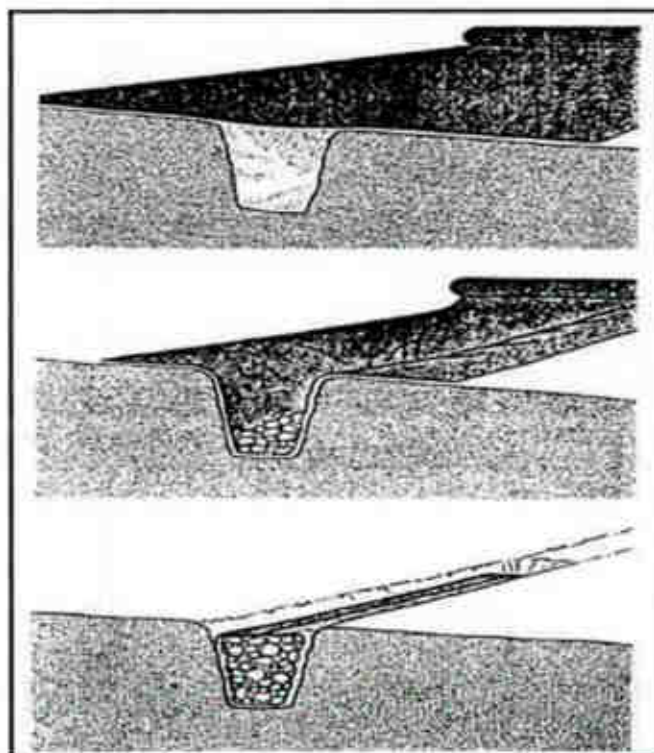
Los fenómenos principales que deben estudiarse con relación a estas fuentes de agua son: la estabilidad y erosión de las escombreras, así como la calidad de las aguas procedentes de dichos depósitos.

Existen ciertas normas o recomendaciones encaminadas a mejorar la resistencia de las masas de estériles frente a los deslizamientos, así como a rebajar los niveles de agua dentro de las estructuras. Así, la primera norma a



seguir consiste en la retirada de la vegetación y de los suelos del lugar de asentamiento. La descomposición de esta vegetación con el tiempo y la existencia de una capa de suelo, constituyen una zona de rotura probable por la baja resistencia al corte que presentan. En el caso de que estos materiales no puedan ser apartados, se recomienda la compactación o tratamiento de mejora de los mismos.

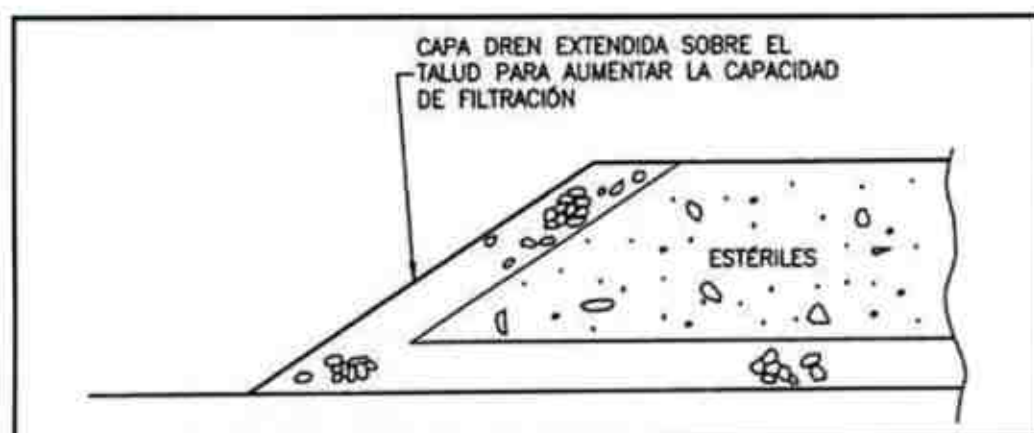
Si existe agua estancada en la base de apoyo deberá ser drenada antes de verter los primeros estériles o, si esto no es posible, rellenar dichas zonas con material de escollera. En zonas de surgencia de acuíferos se procederá a la captación y drenaje de las mismas con la doble finalidad de evitar el efecto de las presiones intersticiales del agua en la escombrera y conservar las fuentes y manantiales. En la figura III.5 se muestra la construcción de una zanja tipo “Frances”



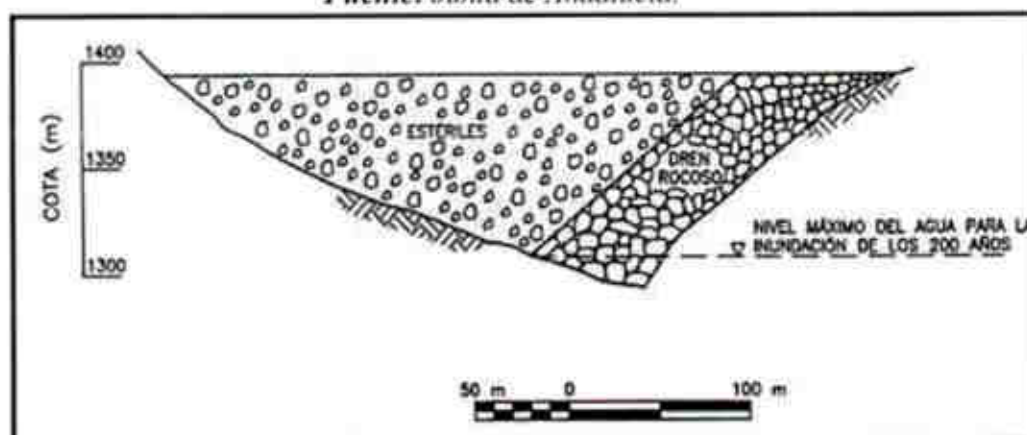
*Figura III.5: Colocación de geotextil en una zanja de drenaje (Dren Francés).
Fuente: Junta de Andalucía.*

Cuando las escombreras se construyan en terrenos montañosos ocupando vaguadas, se deberá proceder a la construcción previa de canales de desvío de los cauces naturales, aunque éstos sean estacionales, así como de sistemas de decantación aguas abajo de dichas estructuras.

Una alternativa recientemente utilizada en algunas explotaciones ha sido la de colocar drenes rocosos en las bases de las escombreras, constituidos por bloques de roca dura competente estratégicamente colocados o segregados naturalmente en el pie de los depósitos al efectuar el vertido directo de esos materiales, y a través de los cuales el agua puede circular fácilmente, figuras III.6 Y III.7.



*Figura III.6: Drenaje del talud de la escombrera.
Fuente: Junta de Andalucía.*



*Figura III.7: Colocación del drenaje rocoso
Fuente: Junta de Andalucía.*

En ciertos casos es necesaria la construcción de pequeñas presas o balsas de decantación aguas debajo de las escombreras, con el fin de eliminar los sólidos en suspensión de las aguas procedentes de estas estructuras y que garanticen así unos estándares de calidad de las aguas vertidas. En estos casos esas balsas deben construirse y estar operativas antes de que se proceda a la construcción de las escombreras.

Cuando sea previsible la contaminación química de las aguas, será preciso prever sistemas colectores de aguas superficial y, en su caso, subterránea, para su posterior tratamiento.

Inevitablemente, la infiltración aparecerá como el resultado de las precipitaciones directas sobre la superficie de las escombreras. De manera ideal, el agua percolará a través del cuerpo de la escombrera debido a la alta permeabilidad de la capa base (formada por bloques de roca gruesa estratégicamente colocados o por la propia segregación natural) que facilitará su salida de la escombrera.

Para canalizar el agua de escorrentía de las escombreras es necesario construir un dren perimetral al pie de cada terraza figura III.8 ; y para evacuar esta agua hacia los drenajes de la mina, es necesario construir graderías para así disipar la energía alcanzada por el agua, figura III.9.

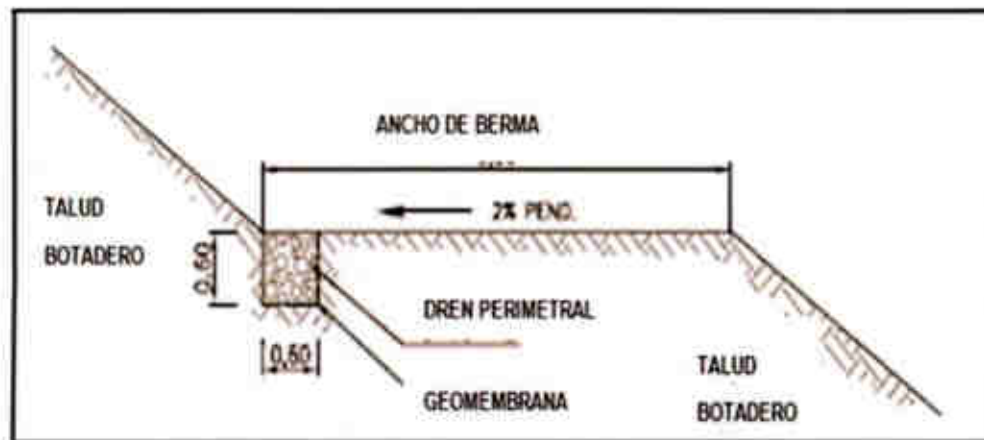


Figura III.8: Detalle de dren perimetral
Fuente: SEIA.

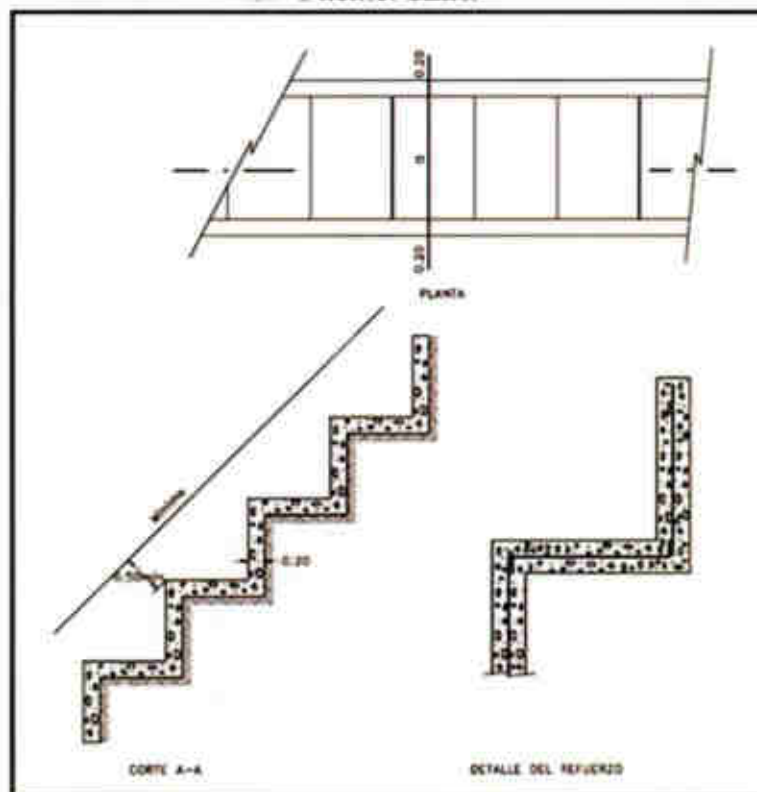


Figura III.9: Detalle de gradería.
Fuente: SEIA

3.5.2. Control de la calidad de los materiales

El material vertido puede variar considerablemente en su resistencia y durabilidad. Como con cualquier material ingenieril, son ideales las rocas duras y durables, y los fragmentos gruesos y angulares resistentes.

En el extremo opuesto están los materiales con alto contenido de finos o que tienen una baja durabilidad y, por ello, una tendencia a romperse con el tiempo. Los materiales con un alto porcentaje de partículas de material meteorizado, o material que se deteriora con el paso del tiempo, pueden contribuir a que aparezca una variedad de problemas tales como la permeabilidad debido al cambio en el tamaño de las partículas, con un aumento de la presión de poro del agua y una menor resistencia al corte, pudiendo todo ello desembocar en una precaria estabilidad de la escombrera. Se puede establecer una clasificación de la calidad de los estériles basándose en el tamaño de grano y en su composición, como por ejemplo de la forma siguiente, figura III.10.

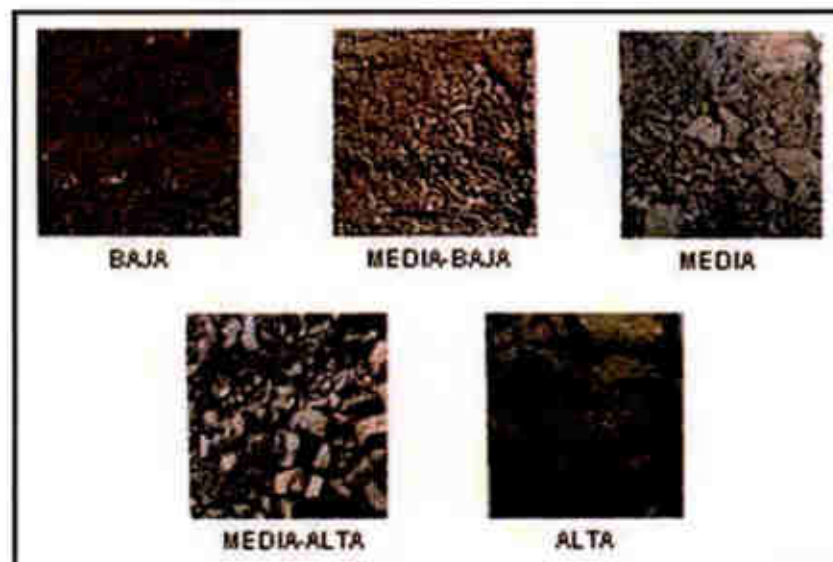


Figura III.10: Calidad de los estériles
Fuente: Junta de Andalucía.

- a) Calidad alta: predominancia de fragmentos de arenisca de tamaños mayores de 0,3 m.

- b) Calidad media-alta: predominancia de fragmentos de arenisca y limonita de 0,2-0,3 m de diámetro y con muestras de material arenoso y gravas.
- c) Calidad media: predominancia de fragmentos de arenisca y limonita menores de 0,1 m y muestras de tamaños finos.
- d) Calidad media-baja: areniscas y limonitas muy fragmentadas con muestras de rocas arcillosas y finos.
- e) Calidad baja: terreno vegetal, arcilla y muestras de rocas arcillosas muy fragmentadas.

La calidad de los estériles que aparecen en cada banco se puede estimar a partir de los testigos de los sondeos mediante la utilización de rayos gamma capaces de identificar los cambios en su composición en caso de que la inspección visual no sea definitiva. En general, la roca de calidad media y alta se suele utilizar como material de drenaje, mientras que las rocas de calidad inferior se colocarán en zonas cuya estabilidad esté garantizada (cerca del terreno natural, entre dos escombreras construidas con materiales de alta calidad, zonas de cimentaciones planas y zonas de mezcla con materiales de alta calidad). Por lo tanto, los materiales de baja calidad no se deberán utilizar en las capas o tongadas inferiores ya que será necesario crear un pie del talud fuerte y permanente capaz de soportar el resto de los vertidos.

Los suelos de recubrimiento deben excluirse del material vertido en las escombreras, así como las zonas que supongan una baja resistencia al corte o zonas que dificulten el drenaje. Los horizontes superficiales serán retirados y depositados en lugares concretos. Cuando ello no sea posible, los materiales podrán ser mezclados y vertidos, conjuntamente con los estériles, siguiendo

unos criterios preestablecidos. El objetivo es que los materiales más finos puedan rellenar los huecos que aparecen entre los fragmentos rocosos gruesos sin que tengan un efecto significativo sobre los parámetros resistentes del conjunto de estériles vertidos.

3.5.3. Operaciones de vertido

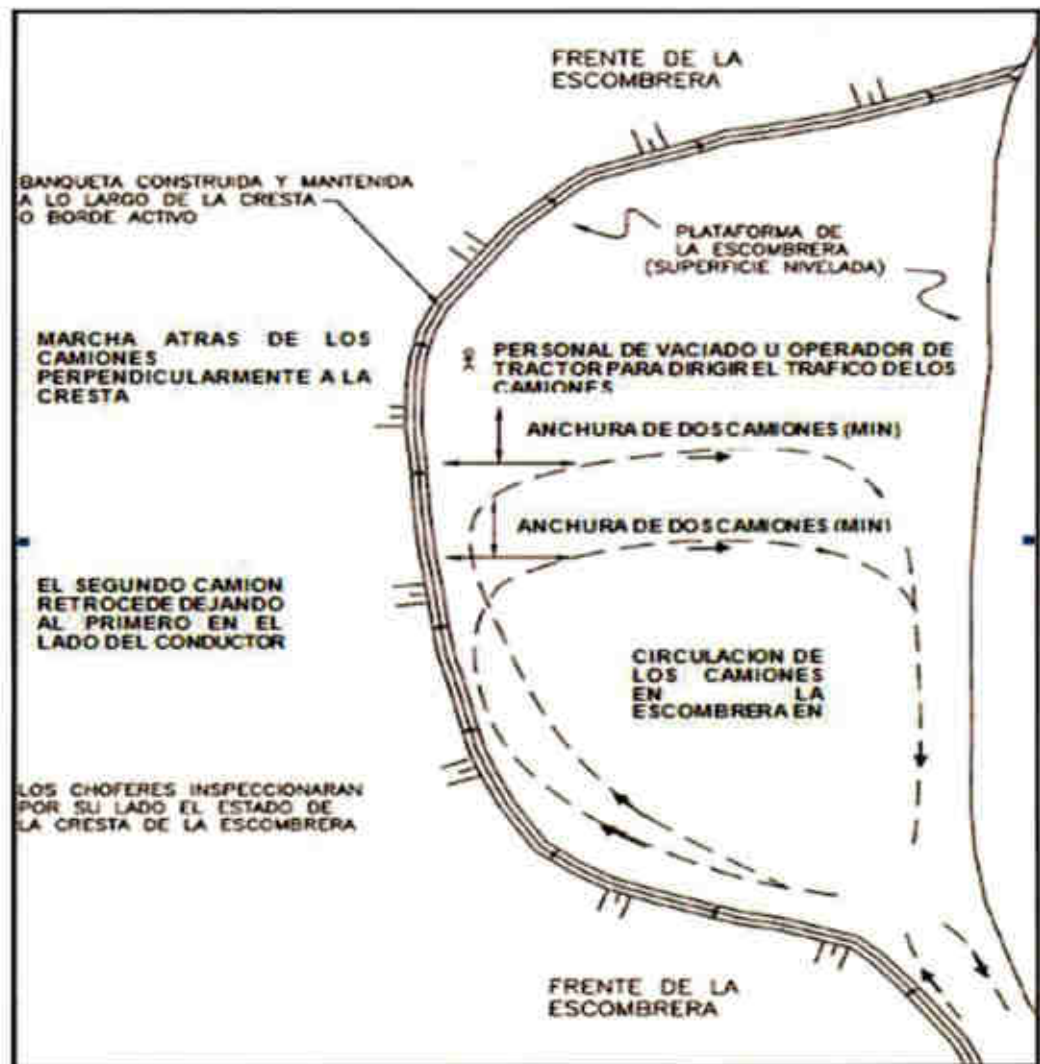
3.5.3.1. Procedimientos de vertido

Las normas generales de vertido son las siguientes:

- ❖ En general, se necesitará un operador en cada una de las zonas de vertido.
- ❖ En los casos en los que la cresta de vertido supere los 3 m de altura no se podrá verter sobre dicho banco, excepto que exista una banqueta de seguridad y un operario dirija los vehículos al punto de vertido.
- ❖ La altura de la banqueta debe ser, al menos, igual al radio máximo de las ruedas de los camiones de transporte.
- ❖ La banqueta de seguridad tiene la función de servir de guía y no se debe utilizar como un tope sobre el que apoyarse.
- ❖ La superficie de la banqueta se debe construir y mantener con una cierta inclinación hasta llegar al punto de vertido para evitar que los camiones caigan en el frente de la escombrera. Dicha superficie debe tener una inclinación de un 2 %, aproximadamente.
- ❖ Cuando dos o más camiones están vertiendo al mismo tiempo, se deberá guardar una distancia de seguridad equivalente, al menos, al ancho de dos camiones.

- ❖ Si no existe ningún operario en la escombrera, los camiones deben verter su carga sin alcanzar la cresta de la banqueta y, posteriormente, ésta será empujada por un tractor hasta el frente de vertido.

El esquema de una plataforma de vertido y los principales procedimientos del mismo se representan en la figura III.11:



*Figura III.11: Configuración de la plataforma de vertido.
Fuente: Junta de Andalucía.*

Los procedimientos que deben seguir los vehículos de transporte en el vertido de materiales serán los siguientes:

- ❖ La circulación de los camiones en la plataforma de vertido se realizará en el sentido de las agujas del reloj para que la visión de la escombrera por parte de los conductores sea nítida antes de llegar a la misma.
- ❖ Cuando el camión llegue a la escombrera, el conductor debe detenerlo para cerciorarse de las condiciones de la banqueta, del personal y de otros vehículos. El área de la escombrera debe ser segura y estar despejada.
- ❖ Los vehículos de transporte avanzarán marcha adelante hasta llegar al punto de vertido en el que deberán de dar la vuelta.
- ❖ Los camiones deberán dar la vuelta para situarse en la banqueta en el momento que indique el operario.
- ❖ Los camiones no abandonarán la banqueta hasta que la caja no se haya vaciado.
- ❖ La carga debe ser vertida de una vez.
- ❖ Los camiones no se deberán mover hasta que la caja no esté completamente vaciada.
- ❖ Los tractores son usados en la escombrera para realizar el mantenimiento de la superficie de vertido y de la berma de seguridad, además de empujar el material hasta el borde de vertido cuando sea necesario.

3.5.3.2. Ritmos de descarga

Los ritmos de descarga se suelen expresar en términos de volumen vertido por metro lineal de cresta y día ($m^3/m/día$), o en metros de cresta por día ($m/día$), siendo más habitual ésta última.

En un primer momento, el material recién vertido sufre un pequeño asentamiento, manteniendo el estado suelto inicial. Debido a las siguientes descargas este material quedará enterrado, incrementándose la tensión de carga, por lo que el material adoptará una configuración más densa y una mayor resistencia al corte. Por lo tanto, para estudiar la estabilidad será necesario conocer el asentamiento final de la superficie de la escombrera.

Existe una importante relación entre el ritmo de descarga y la estabilidad de la escombrera, tal como se ha podido observar en ciertos casos estudiados. Sin embargo, también existen otros factores que actúan en la estabilidad y que hacen que no sea fácil determinar unos ritmos de descarga generales. Entre dichos factores destacan los siguientes:

- **Condiciones piezométricas:** La descarga rápida de material saturado de grano fino incrementa el nivel piezométrico, disminuyendo la tensión efectiva. Con el tiempo, el terreno consolida, permitiendo una disminución de la presión intersticial que hace aumentar la tensión efectiva y la estabilidad.
- **Características del material vertido:** El aumento de densidad que experimenta el material al colocar sobre él nuevas capas de vertido, produce un aumento en la estabilidad debido al incremento en la resistencia al corte. Si el vertido se realiza con altos ritmos de descarga, puede que no se guarde el tiempo suficiente como para conseguir la densidad y resistencia al corte adecuados como para asegurar la estabilidad.
- **Altura de vertido:** Para un ritmo de descarga dado (m/día), una mayor altura de vertido implica una mayor cantidad de material. Por tanto,

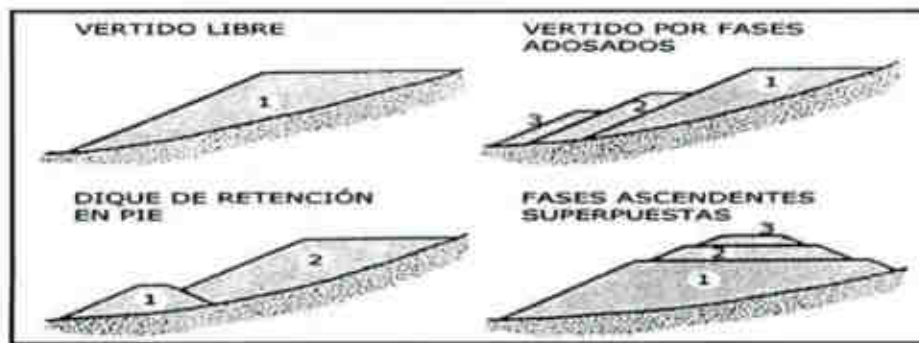
la tensión del material vertido y de la cimentación será mayor. (Carreño J. – Caracas 2013).

3.5.4. Métodos y sistemas constructivos

En el diseño de una escombrera se deben tener en cuenta una serie de consideraciones para determinar las distintas zonas de vertido, así como maximizar la longitud de la cresta de la escombrera. Esta planificación presenta dos ventajas:

- Si aparece una superficie de rotura en una zona del depósito o la subsidencia de la cresta es excesiva, las operaciones en esta parte de la escombrera pueden ser suspendidas hasta alcanzar condiciones estables.
- Si se puede verter sobre una gran longitud de cresta de talud, el ritmo de avance disminuirá, reduciéndose la carga aplicada sobre la cimentación y la correspondiente generación de altas presiones intersticiales en la zona del pie. Un ritmo lento de avance también permite una mayor consolidación de los materiales y un aumento en su resistencia al corte.

Los tipos de escombreras que pueden distinguirse de acuerdo con la secuencia constructiva de las mismas en terrenos con pendiente, que es el caso más habitual, son cuatro: vertido libre, por fases adosadas, con dique de pie y por fases superpuestas ver figura III.12.



*Figura III.12: Tipos de escombrera según la secuencia de construcción.
Fuente: Junta de Andalucía.*

La formación con vertido libre sólo es aconsejable en escombreras de pequeñas dimensiones y cuando no exista riesgo de rodadura de piedras aguas abajo. Se caracteriza por presentar en cada momento un talud que coincide con el ángulo de reposo de los estériles y una segregación por tamaños muy acusada. De los cuatro tipos es el más desfavorable geotécnicamente, aunque ha sido el más utilizado hasta épocas recientes.

Las escombreras con fases adosadas proporcionan unos factores de seguridad mayores, pues se consiguen unos taludes medios finales más bajos. La altura total puede llegar a suponer una limitación por consideraciones prácticas de acceso a los niveles inferiores.

Cuando los estériles que se van a verter no son homogéneos y presentan diferentes litologías y características geotécnicas, puede ser conveniente el levantamiento de un dique de pie con los materiales más gruesos y resistentes, de manera que actúen de muro de contención del resto de los estériles depositados. Esta secuencia constructiva es la que se suele seguir en aquellas explotaciones donde se extraen grandes cantidades de materiales arcillosos o finos, cuya deposición exigiría de otro modo grandes extensiones de terreno y presentaría un elevado riesgo de corrimientos, o cuando las condiciones de la base de apoyo no sean buenas.

El tipo de fases superpuestas y retranqueadas aporta una mayor estabilidad, ya que se disminuyen los taludes finales y se consigue una mayor compactación de los materiales.

Así pues, la secuencia constructiva de una escombrera incide directamente sobre la estabilidad de tales estructuras y sobre la economía de la operación, llegando a ser preciso en algunos casos una solución de compromiso entre ambos factores.

El recrecido de una escombrera debe realizarse de la manera más homogénea posible y de ello depende en gran medida la modalidad de vertido que se elija. Normalmente, los estériles se desplazan desde las minas hasta las escombreras por cintas transportadoras o por camiones, siendo habitual disponer de tractores para el extendido y empuje de estos materiales, así como el acondicionamiento del piso; aunque en algunos casos se realiza el vertido directamente desde los camiones hacia el talud de la escombrera, figura III.13. Los tractores permiten operar en unas mayores condiciones de seguridad, ya que los camiones no tienen que posicionarse al borde de los taludes, mientras que en los casos en que se utilicen cintas, permite disminuir los alargamientos y los cambios de ubicación de las mismas. Al mismo tiempo, se aminora el fenómeno de segregación con respecto al que se produce con el vertido libre. En estrecha relación con el procedimiento de vertido se encuentra el método de construcción, que puede ser por basculamiento final o en retroceso por terrazas, figura III.14.

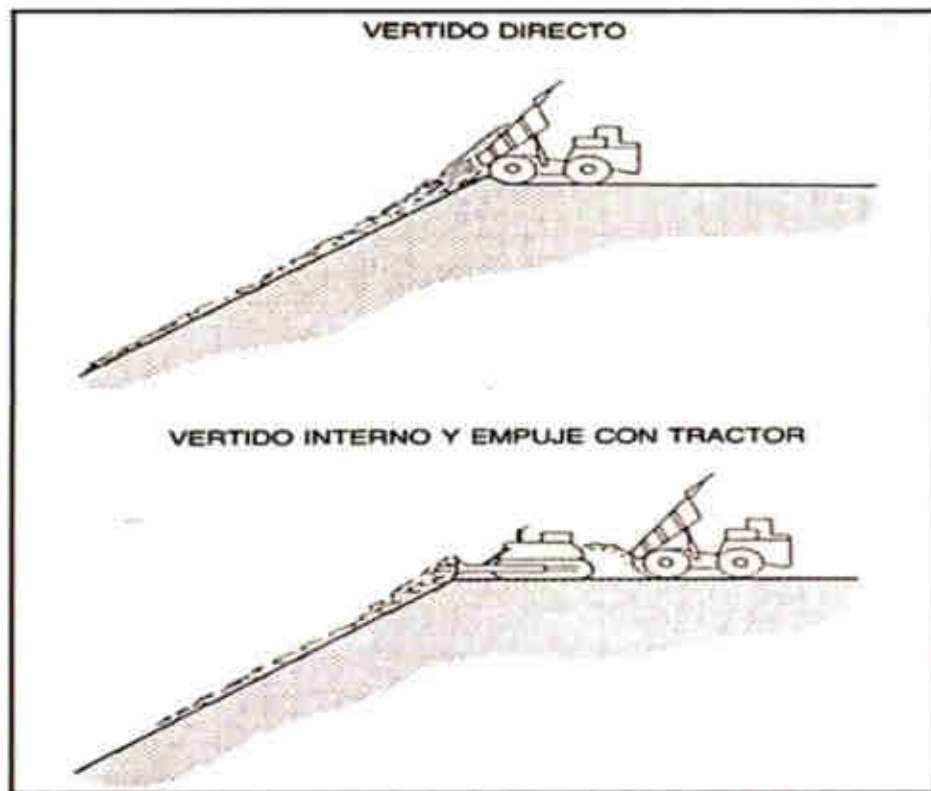


Figura III.13: Métodos de vertido en escombreras.
Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia.

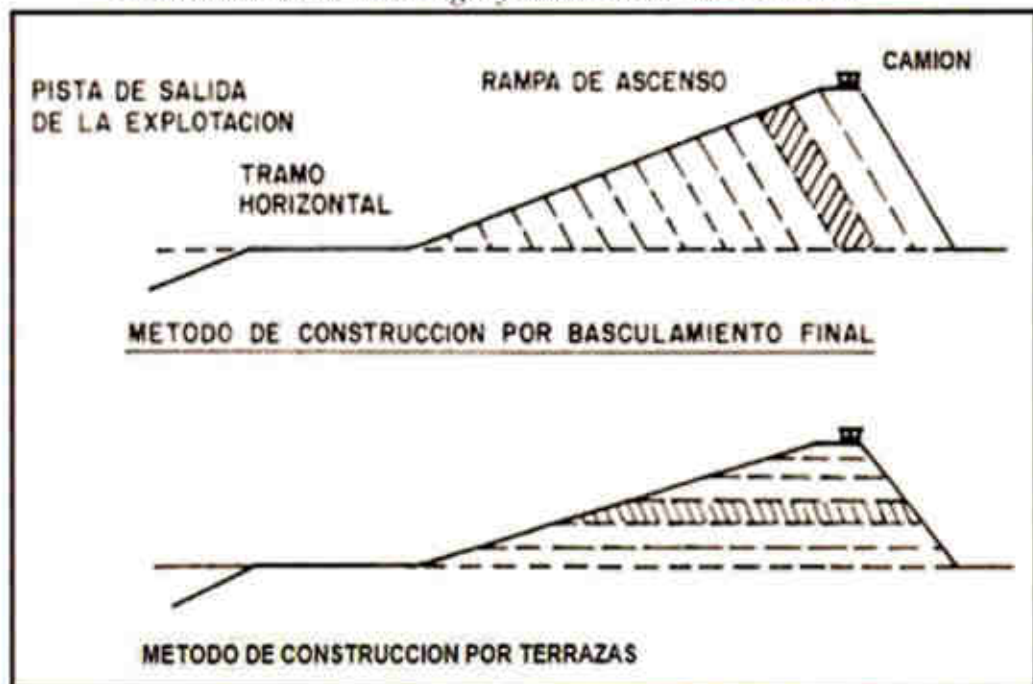


Figura III.14: Métodos de construcción de escombreras.
Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia.

El método de basculamiento final consiste en descargar los estériles desde una gran altura, consiguiendo las condiciones de drenaje por la segregación natural que sufre el material durante el descenso por rodadura. Los bloques grandes se encontrarán en el pie del talud, disminuyendo la granulometría en sentido ascendente.

Sin embargo, existen factores que impiden alcanzar las condiciones de estabilidad deseadas:

- A. Con rocas friables o poco resistentes a los choques y rozamientos (pizarras o esquistos) no se produce una segregación clara y suficiente, que permita un correcto drenaje de la masa de material que sustentan.
- B. Si el material es depositado en la plataforma de vertido y empujado hasta el borde del talud, se dificultará la diferenciación granulométrica y se crearán superficies planas compactadas y paralelas al talud general de avance, pudiendo actuar como planos de rotura por la escasa resistencia al corte en estas zonas.
- C. El vertido por gravedad proporciona ángulos de reposo con un coeficiente de seguridad próximo a 1. En rocas sedimentarias estos ángulos se aproximan a 37° . Por ello, y con el fin de garantizar las condiciones de estabilidad durante lluvias prolongadas, se recomienda tener un talud general de unos 20° .
- D. Las escombreras construidas con este método son más susceptibles a la erosión por las aguas de escorrentía a pesar de mantener taludes inferiores, pues las superficies son largas e ininterrumpidas, sin bermas o terrazas intermedias, y los taludes no pueden protegerse con vegetación hasta que se complete la construcción de la escombrera.

El método por terrazas consiste en depositar y compactar los estériles en capas, con lo que se aumenta notablemente la resistencia al corte y la capacidad de vertido, pues se reduce el efecto de esponjamiento.

Normalmente, la mayoría de las grandes escombreras se construyen en capas gruesas formando bancos con una altura vertical de 10 m o más. Estos bancos se realizan con el fin de minimizar la distancia vertical de transporte. La estabilidad de la escombrera se puede controlar a partir del espesor y longitud de las bermas y del espaciamiento vertical entre ellas. La construcción de escombreras en banco permite disminuir el ángulo del talud total.

La construcción de una escombrera se puede realizar en sentido ascendente o descendente. La construcción ascendente es la más habitual debido a que, como cada capa se construye sobre otra anterior ya finalizada, su comportamiento será suficientemente conocido y documentado. Cualquier superficie de rotura se extenderá a través de las capas anteriores, por lo que este método también funciona como un refuerzo del pie del talud y produce un confinamiento del cimiento, además de proporcionar siempre terreno firme para el apoyo del pie del talud.

3.6. Análisis de estabilidad de escombreras

3.6.1. Generalidades

Los análisis de estabilidad de taludes tales como los que se realizan en las escombreras de estériles mineros, es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta tanto en su diseño como durante la construcción y vida útil del depósito. Con este fin, se han desarrollado diversos métodos, modelos y



sistemas de evaluación de la estabilidad que ayudan a minimizar los errores y garantizar la suficiente seguridad frente a posibles roturas.

En este sentido, cabe destacar que la estabilidad de taludes es analizada, normalmente, por los métodos denominados de equilibrio límite a partir de los datos de resistencia del suelo, sin tener en cuenta su comportamiento tensional, y dando como resultado un factor de seguridad. Por otro lado, para estimar la magnitud del movimiento de los taludes se recurrirá a la utilización de métodos de elementos finitos, donde la definición de las tensiones sufridas por el suelo toma un papel muy importante. La aplicabilidad de estos y otros métodos de análisis de estabilidad es, en la mayoría de los casos, de carácter general, dándose aplicaciones de tipo particular y concreto en otros que serán posteriormente descritos.

La utilización de uno u otro método de análisis, vendrá definida por las características de la obra en estudio, tales como la geometría, el tipo de material de construcción o la presencia de agua, además de los parámetros que se deseen obtener en cada caso para determinar la estabilidad de las escombreras.

3.6.2. Factores que afectan la estabilidad

Existe una serie de factores que influyen sobre la estabilidad de una escombrera, entre los principales se pueden citar: configuración de la escombrera, pendiente del cimientó y grado de confinamiento, tipo de cimientó, propiedades del material vertido, método constructivo, condiciones climatológicas y piezométricas, ritmo de vertido y grado de sismicidad del lugar.

3.6.2.1. Configuración de la escombrera

El tamaño y la configuración de una escombrera tienen una relación directa sobre la estabilidad y el riesgo de rotura de la misma. Entre las variables geométricas a analizar está la altura de vertido, el volumen y el talud de vertido.

- ✚ Altura de vertido. Es la distancia vertical entre la cresta de la escombrera y la superficie del terreno sobre la cual está apoyada la escombrera. Este valor puede variar desde unos 20 m hasta superar los 400 m.
- ✚ Volumen vertido. Comúnmente expresado en m³ banco, se agrupan en pequeño (<1 Mm³), medio (1 a 50 Mm³) y grande (> 50 Mm³).
- ✚ Talud de vertido. Es el ángulo que forma la horizontal con la línea que va desde la cresta hasta el pie de la escombrera. Para conseguir la estabilidad de la escombrera, y dependiendo del grado de cohesión del material vertido, este ángulo puede ir desde los 26° hasta los 37°.

3.6.2.2. Pendiente del cimiento y grado de confinamiento

Ambos factores proporcionan estabilidad a la escombrera. Existirá un menor riesgo de deslizamiento o rotura de la estructura cuando la pendiente del cimiento no supere los 10° y se coloquen rellenos de contención en el pie de la escombrera.

3.6.2.3. Tipo del cimiento

Debido a que es el punto de contacto entre las estructuras y el terreno, las condiciones del cimiento se configuran como el principal factor que aporta estabilidad a una escombrera. Se puede clasificar en tres tipos: competente



(materiales resistentes), medio (suelo que gana resistencia por consolidación) y débil (suelos blandos con surgencias de agua).

3.6.2.4. Calidad del material vertido

Las propiedades de los materiales depositados en las escombreras, como clasificación granulométrica, durabilidad y resistencia, determinan su calidad y el grado de estabilidad de la escombrera. Se considera material de buena calidad cuando se refiere a rocas resistentes, poco alteradas y que contienen menos del 10 % de partículas finas.

3.6.2.5. Método de construcción

Generalmente las escombreras se construyen mediante una serie de plataformas en sentido ascendente o descendente. La ventaja de una secuencia ascendente es que el pie de cada plataforma estará soportado por la plataforma inferior, lo que favorece la estabilidad de la estructura. En la elección del método constructivo de una escombrera hay que tener en cuenta la distancia de transporte, la forma de vertido, el grado de accesibilidad, la capacidad disponible y la estabilidad requerida. Para mejorar la estabilidad de una escombrera se puede recurrir al aterrazado y a la formación de plataformas de poca altura con vertidos desde los contornos de la misma.

3.6.2.6. Condiciones piezométricas y climatológicas

La aparición de filtraciones en el cimiento y en el interior de la escombrera genera un riesgo potencial de desestabilización. Los climas lluviosos afectan de igual forma a la creación de superficies freáticas.

3.6.2.7. Ritmo de vertido

Una causa de rotura de las escombreras es la debida a los ritmos intensos de vertido o de avance de la cresta, ya que generan una elevada presión intersticial en el cimientado y no hay tiempo suficiente para la consolidación de los materiales vertidos ni para desarrollar una adecuada resistencia que garantice la estabilidad de la escombrera.

3.6.3. Clasificación del grado de estabilidad de las escombreras - Índice INESTEC.

Una forma de valorar el grado de estabilidad de una escombrera consiste en asignar una puntuación a cada uno de los factores que afectan a la estabilidad de la misma, tabla III.10. En función de un intervalo de las distintas condiciones se hace una descripción cualitativa y se le puntúa según un rango de valores. El grado de estabilidad total de la escombrera se calcula sumando los valores individuales de todos los factores, la puntuación máxima que se puede alcanzar es 1800.

Teniendo en cuenta los diversos factores y sus interrelaciones se deben identificar las actuaciones desestabilizantes de una escombrera. Por sí solos estos factores no permiten realizar una fácil valoración cuantitativa, por ello, la clasificación de estabilidad de la escombrera resulta bastante subjetiva. La clasificación presentada es de uso fácil y considera un acertado rango de aplicación, pero, al ser un concepto nuevo, puede ser mejorado mediante ajustes y muestreos (INESTEC 2013).

Tabla III.10: Clasificación de estabilidad de escombreras – Índice INESTEC.

| FACTORES PRINCIPALES QUE AFECTAN A LA ESTABILIDAD | | DESCRIPCIÓN O INTERVALO DE CONDICIONES | | CALIFICACIÓN |
|---|-------------------|--|--|--------------|
| ACCIÓN DE LA ESCOMBRERA | Altura de vertido | Pequeña | < 50 | 0 |
| | | Media | 50 m - 100 m | 50 |
| | | Grande | 100 - 200 m | 100 |
| Muy grande | | > 200 m | 200 | |
| Volumen vertido | Pequeño | < 1 Mm ³ | 0 | |
| | Medio | 1 - 50 Mm ³ | 50 | |
| | Grande | > 50 Mm ³ | 100 | |
| Talud de vertido | Tendido | < 26° | 0 | |
| | Medio | 26° - 35° | 50 | |
| | Escarpado | > 35° | 100 | |
| PENDIENTE DEL CIMIENTO | | Suave | < 10° | 0 |
| | | Medio | 10° - 25° | 50 |
| | | Escarpado | 25° - 32° | 100 |
| | | Extremo | > 32° | 200 |
| GRADO DE CONFINAMIENTO | | Confinada | <ul style="list-style-type: none"> Talud cóncavo en planta o perfil Relleno de valle o vaguada, con berma de contención en pie Aterrazado del cimiento de apoyo | 0 |
| | | Moderadamente confinada | <ul style="list-style-type: none"> Banqueo natural o aterrazado del talud Taludes variables, diversidad topográfica natural limitada Vertidos en vaguadas, en fondo de valle, en ladera o exenta | 50 |
| | | No confinada | <ul style="list-style-type: none"> Talud convexo en planta o perfil Vertido en ladera o divisoria sin confinamiento No aterrazado o banqueo en el desarrollo | 100 |
| TIPO DE CIMIENTO | | Competente | <ul style="list-style-type: none"> Materiales de la base de apoyo resistentes o muy resistentes frente a los estériles vertidos No sometidos a presiones de poro adversas Estructura geológica favorable | 0 |
| | | Medio | <ul style="list-style-type: none"> Intermedio entre competente y débil Suelo que gana resistencia con la consolidación Presión de poros que se disipa con ritmo de carga controlada | 100 |
| | | Débil | <ul style="list-style-type: none"> Suelos blandos, capacidad portante blanda Presión de poro adversa bajo carga Condiciones hidrológicas adversas, surgencias y manantiales Resistencia sensible a esfuerzos cortantes, licuefacción potencial | 200 |
| CALIDAD DEL | | Alta | <ul style="list-style-type: none"> Resistente y durable Menos de 10 % finos | 0 |

| | | | |
|---|---------------|--|-------------|
| MATERIAL VERTIDO | Media | <ul style="list-style-type: none"> Resistencia media, durabilidad variable 10 % al 25 % finos | 100 |
| | Mala | <ul style="list-style-type: none"> Predominantemente rocas débiles de baja durabilidad Más del 25 % finos, estériles de cobertera | 200 |
| MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN | Favorable | <ul style="list-style-type: none"> Tongadas menores de 25 m, plataformas amplias Vertido desde los contornos Construcción ascendente Banqueado a aterrazado | 0 |
| | Combinada | <ul style="list-style-type: none"> Tongadas entre 25 y 50 m Método de construcción combinado | 100 |
| | Desfavorable | <ul style="list-style-type: none"> Tongadas grandes > 50 m, plataformas estrechas Vertido libre siguiendo líneas de rotura del talud Construcción descendente | 200 |
| CONDICIONES PIEZOMÉTRICAS | Favorables | <ul style="list-style-type: none"> Presiones piezométricas bajas, sin filtraciones en cimentación Aparición improbable de superficie freática en la escombrera Precipitaciones bajas Infiltración pequeña en la escombrera | 0 |
| | Medias | <ul style="list-style-type: none"> Presión piezométrica media, algunas filtraciones en el cimiento Posible desarrollo limitado de superficie freática en la escombrera Precipitaciones medias Alta infiltración en escombreras | 100 |
| | Desfavorables | <ul style="list-style-type: none"> Presiones piezométricas altas Fuertes precipitaciones Potencial alto de desarrollo de superficies freáticas o niveles de aguas colgadas en la escombrera | 200 |
| RITMO DE VERTIDO | Bajo | <ul style="list-style-type: none"> Menor de 25 m³ por m lineal de cresta por día Ritmo de avance de la cresta < 0,1 m por día | 0 |
| | Medio | <ul style="list-style-type: none"> De 25 a 200 m³ por m lineal de cresta por día Ritmo de avance de la cresta de 0,1 a 1 m por día | 100 |
| | Alto | <ul style="list-style-type: none"> Más de 200 m³ por metro lineal de cresta por día Ritmo de avance > 1,0 m por día | 200 |
| SISMICIDAD | Bajo | <ul style="list-style-type: none"> Sismicidad baja | 0 |
| | Medio | <ul style="list-style-type: none"> Sismicidad media | 50 |
| | Alto | <ul style="list-style-type: none"> Sismicidad alta | 100 |
| CALIFICACIÓN MÁXIMA POSIBLE DE ESTABILIDAD | | | 1800 |

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007.

Para simplificar la clasificación de estabilidad de las escombreras en función al riesgo de rotura y el nivel de esfuerzo, se pueden agrupar en cuatro clases, tabla III.11.

Tabla III.11: Clases de estabilidad de escombreras y actuaciones recomendadas.

| CLASE DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERA | RIESGO DE ROTURA | RECOMENDACIONES PARA LA INVESTIGACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN | CALIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DE LA ESCOMBRERA (INESTEC) |
|------------------------------------|------------------|--|--|
| I | Inexistente | <ul style="list-style-type: none"> • Reconocimiento básico del emplazamiento. • Documentación básica • Escasos ensayos de laboratorio • Comprobación rutinaria de estabilidad, posiblemente usando ábacos • Restricciones mínimas en la construcción • Auscultación visual exclusivamente | < 300 |
| II | Bajo | <ul style="list-style-type: none"> • Reconocimiento del emplazamiento general • Pueden requerirse pozos en el terreno y toma de muestras • Algunos ensayos de laboratorio • La estabilidad puede o no influir en el diseño • Se requiere análisis de estabilidad básico • Restricciones limitadas en la construcción • Auscultación con instrumentos y visual rutinaria | 300 - 600 |
| III | Medio | <ul style="list-style-type: none"> • Investigación del emplazamiento detallada • Pueden requerirse pozos, sondeos y otras investigaciones in-situ • Pueden necesitarse muestras inalteradas • Ensayos de laboratorio detallados, incluyendo propiedades índices, resistencia al corte, durabilidad, etc. • La estabilidad influye y afecta al diseño • Análisis de estabilidad detallado, requiriendo Auscultación con instrumentación amplia para confirmar el diseño, documentar el comportamiento y establecer límites de carga | 600 - 1200 |
| IV | Alto | <ul style="list-style-type: none"> • Investigación del emplazamiento detallada • Pueden requerirse pozos y calicatas • Pueden necesitarse sondeos y posiblemente otras investigaciones in-situ • Se necesitan muestras inalteradas • Ensayos de laboratorio detallados, incluyendo propiedades índices, resistencia al corte, durabilidad, etc. • Consideraciones generales de estabilidad | > 1200 |

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia.

3.6.4. Evaluación de riesgos

El riesgo se puede definir como el producto entre la probabilidad de ocurrencia (azar) y la severidad de las consecuencias (exposición). El azar se mide en términos de frecuencia, en probabilidad de ocurrencia o en magnitud de eventos adversos, mientras que la exposición se mide en función al grado de cercanía, al período de exposición y al impacto potencial.

La evaluación del riesgo de una escombrera puede ayudar a mejorar su seguridad y las condiciones medioambientales porque previene y pone los medios para disminuir la probabilidad de accidentes por fenómenos internos (surgencias, escapes, asentamientos, roturas, etc.), o externos que, indudablemente, tienen un efecto negativo sobre el entorno.

Por lo general, en las escombreras existen dos fuentes de riesgo: la estabilidad física (rotura de la escombrera) y la estabilidad química (formación de aguas ácidas).

Según el tipo de actuación y el método de control del riesgo, se pueden agrupar en tres áreas: seguridad de personas y equipos, riesgo en instalaciones y riesgo medioambiental (Carreño J. – Caracas 2013).

3.6.4.1. Seguridad de personas y equipos

Uno de los aspectos principales que afectan a la operación de vertido en una escombrera es la seguridad del personal y de la maquinaria. Por ello, el principal objetivo del diseño y de la secuencia constructiva es minimizar la probabilidad de ocurrencia de rotura. Aunque el grado de seguridad es mayor en grandes operaciones de vertido, un acertado diseño puede minimizar el riesgo y reducir el tiempo de exposición.

3.6.4.2. Riesgo en instalaciones

Tanto la mina como la planta de tratamiento que se encuentren emplazadas cerca de las escombreras, están expuestas a sufrir daños por posibles roturas de estas estructuras.

Por ello, es necesario realizar una evaluación del riesgo potencial en función del tamaño y forma de la escombrera, las distancias que alcanzarán los materiales en el caso de rotura y la probabilidad de impactar sobre las instalaciones (equipos móviles y fijos, balsas de sedimentación, diques de contención, etc.).

3.6.4.3. Riesgo medioambiental

En la valoración del riesgo potencial sobre el medio ambiente debido a la existencia de una escombrera, se deben considerar todos los escenarios posibles, incluida la evaluación del probable impacto resultante de la rotura de la misma en el caso más desfavorable.

3.6.5. Tipos de roturas de escombreras

Los fenómenos de inestabilidad más frecuentes observados en escombreras corresponden a los tipos siguientes:

- ❖ Deslizamientos superficiales, típicos de escombros sin cohesión.
Normalmente, son rápidos y no suelen afectar a grandes volúmenes, salvo que se produzca una alteración sustancial de su geometría, por ejemplo, por socavación.
- ❖ Deslizamientos profundos, de tipo aproximadamente circular o mixto, con tramos paralelos a un contorno de base. Suelen tener una evolución en el tiempo condicionada por fenómenos de fluencia, rotura

progresiva, etc., y, generalmente, afectan a masas importantes de escombros. Predominan en materiales con rozamiento y cohesión.

Los problemas de estabilidad general pueden venir forzados por el establecimiento de un nivel freático alto en el cuerpo de la escombrera, bien por cubrir surgencias naturales o por embalsarse agua en zonas de vaguada.

Las causas principales de inestabilidad suelen ser, figura III.15.

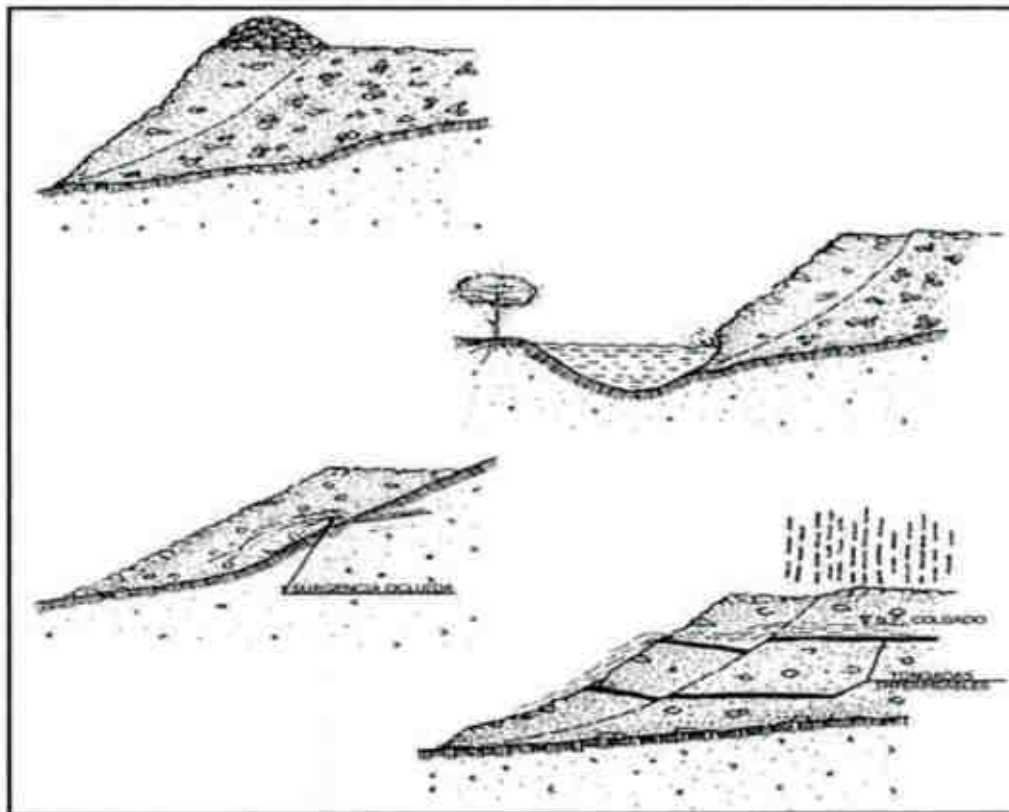


Figura III.15: Causas de inestabilidad de escombreras.

Fuente: ITGE, 2006.

- ❖ Sobrecarga anormal del borde de la escombrera, por ejemplo, acumulando descargas de dumpers sin proceder a su extendido.
- ❖ Creación de taludes más escarpados de los admisibles por excavación o recorte, erosión superficial, fenómenos de subsidencia, etc.

- ❖ Eliminación del soporte natural al pie de la escombrera, por ejemplo, por socavación fluvial, apertura de zanjas en el terreno de cimentación, etc.
- ❖ Creación de presiones intersticiales por ascenso del nivel freático al no existir sistema de drenaje o quedar inutilizado y, más frecuentemente, al ocluir cursos estacionales o surgencias.
- ❖ Erosión interna como consecuencia de la filtración generada por las causas anteriores.
- ❖ Inundación del pie de escombreras situadas próximas a cauces fluviales.
- ❖ Fenómenos dinámicos como voladuras, hincas de pilotes, impactos de vertido, etc.

Para seleccionar una apropiada técnica de análisis de estabilidad en escombreras, así como para elaborar el programa de control, es necesario conocer la teoría básica sobre deformación y rotura de estas estructuras.

3.6.5.1. Rotura de borde

También conocida como rotura de cresta, este tipo de rotura se produce, generalmente, en escombreras con crestas de fuertes pendientes, con alto contenido de materiales finos y cohesivos, y cuando el ritmo de vertido ha sido rápido. En algunos casos ocurre en zonas de fuertes precipitaciones, donde se genera una importante presión intersticial en el material fino, así como la pérdida de la cohesión aparente.

La rotura de borde también puede ocurrir cuando el material de la escombrera es deleznable y crea una baja permeabilidad cuando es vertido por

tongadas, permitiendo desarrollar una presión intersticial alta. Las altas precipitaciones y las fuertes pendientes también pueden iniciar la rotura de escombreras con materiales gruesos.

Por lo general, la rotura de borde ocurre debajo del área de la cresta, sin embargo, el cuerpo de la escombrera y el cimiento no se ven afectados.

Es más probable que se produzca la rotura de borde en escombreras construidas mediante vertido directo a grandes alturas y rápido crecimiento de la cresta, o cuando el material vertido contiene gran cantidad de finos y es degradable.

3.6.5.2. Rotura planar.

La rotura planar consiste en el desplazamiento del material vertido a lo largo de un plano de debilidad situado en el interior de la escombrera. Si el plano de debilidad no corta el talud de la escombrera, la rotura se produce en el pie. Este plano de debilidad se crea durante la fase de construcción de la escombrera debido a la mala calidad del material o la presencia de gran cantidad de finos que forman una capa aproximadamente paralela al frente de vertido.

La alta presión intersticial en el interior de la escombrera también puede contribuir a la formación de la rotura planar y, si el plano de debilidad es paralelo a la superficie de vertido, la rotura es muy similar a la del caso de rotura de borde, excepto cuando la superficie de rotura es generada por un hundimiento interno de la escombrera y la rotura resultante es sustancialmente más pronunciada.

3.6.5.3. Rotura rotacional

Consiste en el movimiento del material vertido en la escombrera o el cimienta a lo largo de una superficie de rotura en forma circular o curvilínea, que puede estar provocada por rápidos ritmos de descarga y vertido de material débil o fino en la escombrera. Este tipo de rotura también puede iniciarse por las altas presiones intersticiales debido a la presencia de agua en el interior de la escombrera.

3.6.5.4. Rotura en flujo

Este tipo de rotura puede estar provocada por el deslizamiento de materiales saturados y derrumbamiento o colapso del talud de la escombrera. Generalmente, son roturas de poca profundidad acompañadas de la fluidificación del material saturado, o parcialmente saturado, en la cresta o en el frente de la escombrera.

La saturación de los materiales de la escombrera, por lo general, se debe a las altas precipitaciones y la infiltración superficial, así como a las surgencias de agua en el interior de la escombrera.

El volumen y la velocidad del flujo del material pueden incrementarse pendiente abajo y, debido a la erosión de la base, la fuerza del flujo irá aumentando.

El riesgo de rotura por flujo será mayor cuando se trata de materiales de poca densidad, de rellenos flojos o compuesto por materiales finos.

3.6.6. Métodos de análisis de estabilidad

Para comprender el comportamiento de una escombrera, es fundamental un conocimiento adecuado de las condiciones del cimienta y de las propiedades

del material. Basándose en estos conocimientos, se podrán estudiar diferentes alternativas para la configuración de la escombrera y una evaluación inicial del tipo de inestabilidad de la misma. Por lo tanto, los criterios de diseño se desarrollan tomando los resultados de los análisis de estabilidad como base.

El paso más importante en la etapa de análisis es la determinación del tipo de rotura crítica. En muchos casos, este tipo de rotura puede ser fácilmente hallada basándose en la configuración de la escombrera o en las propiedades del material. Sin embargo, cuando estos factores son más complejos, se debe realizar un análisis preliminar de los posibles tipos de rotura, fase donde los métodos gráficos son muy aconsejables debido a su rapidez.

Una vez que el tipo de rotura ha sido claramente definido, se llevará a cabo un análisis detallado utilizando cualquier técnica posteriormente detallada. En la mayoría de los casos, los resultados dados por los diferentes métodos son comparables, por lo que para cada caso existen varios métodos aplicables.

Cuando las condiciones de la cimentación y las propiedades de los materiales sean complejas y no estén bien definidas, se puede complicar la obtención fiable del mecanismo de rotura. Además, ciertos tipos de rotura se comprenden mejor que otros, algunas técnicas de análisis son muy complejas, y puede que no modelicen correctamente el caso en estudio. En estos casos, es conveniente realizar un diseño más conservador, con altos factores de seguridad y una geometría más conservadora.

Existe una gran variedad de métodos para el estudio de la estabilidad de taludes, aunque, en principio, se pueden dividir en dos grandes grupos:

- ✓ Métodos de cálculo en deformaciones: tienen en cuenta las deformaciones del terreno, así como las leyes de la estática.

- ✓ Métodos de equilibrio límite: se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable.

Estos últimos se suelen dividir en métodos exactos y no exactos, dependiendo de la naturaleza de sus resultados. En la mayoría de los casos prácticos no aparece una solución exacta debido a la geometría de la superficie de rotura, y se deberá recurrir a simplificaciones o hipótesis previas. Además, un cálculo riguroso exigiría considerar la anisotropía de los escombros, las variaciones de resistencia con los niveles de tensiones en cada punto de la eventual superficie de deslizamiento, efectos de forma, etc. Por lo tanto, no está justificado tal refinamiento dado el tipo de estructura y la gran incertidumbre respecto a la naturaleza de los estériles y sus variaciones a lo largo de la vida de la estructura.

En general, los métodos de análisis también se pueden dividir en aquellos que tienen en cuenta las tensiones totales, donde no se considera la presión intersticial, por lo que serán aplicables a casos donde ésta sea desconocida o cuando el estudio se vaya a realizar a corto plazo, y los que tienen en cuenta las tensiones efectivas, que se considera el método más versátil y adecuado, aplicable a estudios a largo plazo donde las condiciones intersticiales sean conocidas.

Los métodos de equilibrio límite no exactos, a su vez, se subdividen en métodos que consideran el equilibrio global del terreno, y en métodos de fajas (rebanadas), que consisten en la división de la masa deslizante en fajas verticales en donde se realiza un estudio de estabilidad individual, y que representa el método más utilizado.



En particular, los métodos de fajas se pueden dividir en dos grupos:

- ✦ Métodos aproximados: en estos casos no se cumplen todas las ecuaciones de la estática. En este apartado se incluirán los métodos de Fellenius, Jambu y Bishop modificado.
- ✦ Métodos precisos: estos métodos cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los métodos de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop completo pertenecen a este grupo.

Si el valor obtenido está por debajo del exigido se procede a rediseñar geométricamente la escombrera o a mejorar las condiciones de drenaje. Se indican los Factores de Seguridad mínimos para los diferentes escenarios posibles.

Tabla III.12: Coeficientes de seguridad mínimos requeridos en el proyecto de escombreras.

| CASO I: Implantaciones sin riesgo para personas, instalaciones o servicios. | | | |
|--|------|------|------|
| H ≤ 15 m o V ≤ 25 000 m ³ , o H > 15 m en escombreras en manto Pueden constituirse con el ángulo de vertido de los escombros (F≈1) | | | |
| | F2 | F1 | |
| 15 < H ≤ 30 m | 1,20 | 1,10 | |
| H > 30 m | 1,30 | 1,20 | |
| CASO II: Implantaciones con riesgo moderado | | | |
| | F3 | F2 | F1 |
| H ≤ 15 m o V ≤ 25 000 m ³ , o H > 15 m en escombreras en manto | 1,20 | 1,15 | 1,00 |
| 15 < H ≤ 30 m | 1,35 | 1,25 | 1,10 |
| H > 30 m | 1,45 | 1,30 | 1,15 |
| CASO III: Implantaciones con riesgo elevado. Se proscriben las escombreras en manto sin elementos de contención o desviación al pie. | | | |
| | F3 | F2 | F1 |
| H ≤ 20 m | 1,40 | 1,20 | 1,10 |
| H > 20 m | 1,60 | 1,40 | 1,20 |

Fuente: ITGE, 2006.

Con respecto a la tabla anterior se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Esta tabla corresponde a escombreras de la minería de carbón, realizadas de acuerdo con estas recomendaciones, relativamente homogéneas y en las que los finos cohesivos o de lavadero no influyen de manera apreciable en la estabilidad.
- Los coeficientes de seguridad corresponden a las situaciones siguientes:

F1: Escombreras normales, sin efectos de aguas freáticas y en cuya estabilidad no influye el cimentado.

F2: Escombreras sometidas a filtración, agua en grietas o fisuras, y riesgo de deslizamiento por la cimentación.

F3: Situaciones excepcionales de inundación, riesgo sísmico, etc.

- Los valores de F indicados son para escombreras exentas o en ladera con inclinación de hasta el 8 %. En el caso de vaguadas encajadas (ancho máximo \approx altura) puede admitirse una reducción del 10 %, llegando al 3 % para vaguadas con ancho máximo \approx 2,5 veces la altura.

En laderas de inclinación superior al 8 % los coeficientes de F se incrementan en los valores siguientes:

$$\text{CASO I: } F = 0,10$$

$$\text{CASO II: } F = (0,03(\alpha - 0,08))^{1/2}$$

$$\text{CASO III: } F = (0,07(\alpha - 0,08))^{1/2}$$

siendo α la inclinación de la ladera en tanto por 1, con $\alpha \approx \Phi$.

Se supone que los parámetros geotécnicos se han determinado mediante ensayos. En el caso de estimación, éstas deben justificarse, mayorando los

coeficientes de la tabla en un 10-15 %, según la fiabilidad de las estimaciones (INESTEC, 2013).

3.6.6.1. Método del equilibrio límite (M.E.L.)

Los métodos de equilibrio límite (los más utilizados) analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzan resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una superficie de rotura. Se basa en:

- ❖ La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- ❖ El criterio de rotura de Mohr-Coulomb.
- ❖ La definición de “Coeficiente de seguridad”.

Los problemas de estabilidad son estáticamente indeterminados, y para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partida diferentes según los métodos. Así mismo, se asumen las siguientes condiciones:

- ❖ La superficie de rotura debe ser postulada con una geometría tal que permita que ocurra el deslizamiento, es decir, será una superficie cinemáticamente posible.
- ❖ La distribución de las fuerzas actuando en la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos (peso específico del material, presión de agua, etc.).
- ❖ La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

Con estas condiciones, se establecen las condiciones de equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistentes. Los análisis proporcionan el valor del factor de seguridad del talud para la superficie

analizada, referido al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan. Es decir, el coeficiente F por el que deben dividirse las fuerzas tangenciales resistentes (o multiplicarse las fuerzas desestabilizadoras) para alcanzar el equilibrio estricto:

$$F = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

Una vez evaluado el coeficiente de seguridad de la superficie supuesta, es necesario analizar otras superficies de rotura, cinemáticamente posibles, hasta encontrar aquella que tenga el menor coeficiente de seguridad, F_{min} , la cual se admite como superficie potencial de rotura del talud, y F_{min} se toma como el correspondiente al talud en cuestión.

Las fuerzas actuando sobre un plano de rotura o deslizamiento potencial, suponiendo que no existen fuerzas externas sobre el talud, son las debidas al peso del material, W , a la cohesión, c , y a la fricción, Φ , del plano. El coeficiente de seguridad viene dado por:

$$F = (Rc + R\Phi) / S$$

Siendo:

$$Rc = \text{fuerzas cohesivas} = cA$$

$$R\Phi = \text{fuerzas friccionales} = W \cos\alpha \operatorname{tg}\Phi$$

$$S = \text{fuerzas que tienden al deslizamiento} = W \operatorname{sen}\alpha$$

$$A = \text{área del plano de rotura}$$

En caso de existir presión de agua sobre la superficie de rotura, siendo U la fuerza total debida al agua sobre la superficie A :

$$R\Phi = (W \cos\alpha - U) \operatorname{tg}\Phi$$

Existen varios métodos para el cálculo del coeficiente de seguridad por equilibrio límite, más o menos complejos, desarrollados fundamentalmente para su aplicación a materiales tipo suelo. Los métodos analíticos proporcionan el coeficiente de seguridad a partir de la resolución inmediata de ecuaciones simples (método de Taylor, de Fellenius), mientras que los métodos numéricos necesitan, para su resolución, sistemas de ecuaciones y procesos de cálculo iterativo; en esta categoría se encuentran los métodos de Morgensten y Price, de Spencer, etc.

Los métodos de equilibrio límite se clasifican en:

- Métodos que consideran el análisis del bloque o masa total.
- Métodos que consideran la masa dividida en rebanadas o fajas verticales

Mientras que los primeros son válidos para materiales homogéneos, y únicamente realizan el cómputo y la comparación de fuerzas en un punto de la superficie de rotura, los segundos pueden considerar materiales no homogéneos, y conllevan una serie de hipótesis propias sobre la localización, posición y distribución de las fuerzas que actúan sobre las rebanadas; el cálculo de las fuerzas actuantes se hace para cada una de las rebanadas en que se ha dividido el talud, integrándose finalmente los resultados obtenidos. Los métodos de rebanadas más comunes son el de Bishop modificado y el de Jambu, válido para el análisis de roturas curvas el primero y de roturas curvas, planas y poligonales el segundo.

CAPITULO IV

4. APLICACIÓN DE LA GEOTECNIA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS

4.1. Conceptos básicos.

Según la revista Caminos Naturales - Madrid 2015, el término "geotecnia" hace alusión al conjunto de reconocimientos y ensayos o pruebas realizadas al terreno y a la interpretación de los datos obtenidos en los mismos, que permiten caracterizar los diversos suelos presentes en la zona de estudio y sus propiedades, en función de los objetivos y características del proyecto.

El estudio geológico-geotécnico debe contener todos los datos relevantes para la correcta ejecución del proyecto y se elabora en base a ensayos de campo y de laboratorio adecuados al tipo de proyecto, incluyendo las recomendaciones propias en función de la naturaleza de las actuaciones (explanadas, estructuras, taludes, etc.).

Todo ello hace que sea necesario establecer las directrices para determinar la necesidad y aplicación de los estudios geotécnicos en la redacción de los proyectos de Caminos Naturales.

En el presente capítulo se recoge el apartado de geología y geotecnia de cada una de las actuaciones contempladas en este manual, con las consideraciones necesarias para facilitar la redacción del documento referido a dicho aspecto.

4.2. Criterios específicos.

4.2.1. Estudio geológico y geotécnico.

Todos los proyectos constructivos deben contener un Estudio geológico y geotécnico que incluya los siguientes puntos:

- ✓ Introducción. En este apartado se indican las hojas y cuadrantes del Mapa Topográfico Nacional que en cada caso se estudian, así como la metodología seguida y el autor o autores del trabajo.
- ✓ Características generales. Este epígrafe recoge una serie de aspectos que permiten efectuar un encuadre de la zona dentro del territorio en el que se localiza: climatología, topografía, geomorfología y estratigrafía general, así como tectónica y sismicidad.
- ✓ Estudio de zonas. Basándose en la caracterización geomorfológica efectuada en el punto anterior, se divide el área de trabajo en zonas relativamente homogéneas, para las que se efectúa un estudio de detalle que incluye, entre otros aspectos, cortes geológicos, columnas estratigráficas, y la determinación de grupos litológicos, para los que se define su litología, estructura y características geotécnicas fundamentales. Estos aspectos se deben reflejar, a su vez, en la cartografía correspondiente que se incluirá en el estudio.
- ✓ Conclusiones generales. En el apartado correspondiente a las conclusiones, se ponen de manifiesto, desde un punto de vista eminentemente práctico y aplicado a la ejecución del proyecto, los

principales aspectos y problemas relativos a la topografía, hidrología, litología, geomorfología y geotecnia.

- ✓ Información sobre yacimientos. Se dará una visión sucinta de las principales canteras y yacimientos rocosos y granulares activos en la zona del proyecto, acompañada de un mapa o esquema resumen.
- ✓ Planos. Se adjuntarán los siguientes planos con la correspondiente escala mínima de presentación:
 - Geológico 1/200.000.
 - Geomorfológico 1/200.000.
 - Suelos 1/200.000.
 - Geotécnico 1/200.000.
 - Litológico-estructural 1/50.000.

Cada uno de los planos irá acompañado de su correspondiente leyenda en la que se reflejarán, de manera resumida, las características principales señaladas en los restantes apartados para cada zona.

- ✓ Reportaje fotográfico. El estudio deberá incluir un reportaje fotográfico y la localización de las fotografías.

4.2.2. Prospecciones de campo.

Se detallan los análisis más utilizados en la caracterización geotécnica, teniendo en cuenta su fiabilidad, la rapidez en la ejecución y la conveniencia de su aplicación en función del tipo de terreno.

Cada uno de los ensayos recibirá una identificación formada por una letra, que indica plataforma, desmonte, terraplén o estructura, y un número de orden dentro de cada tipo.

4.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos para la investigación.

Las técnicas utilizadas para la recolección de datos fueron:

- ✓ Delimitar las coordenadas UTM de la zona de estudio: Definir el área a evaluar en un plano de coordenadas U.T.M.
- ✓ Elegir los posibles lugares donde se pudieran realizar las escombreras, mediante una evaluación de la topografía de la zona.
- ✓ Recojo de muestras y caracterización geotécnica tanto de los materiales a verter en las escombreras, como de los que componen los posibles sitios de emplazamiento, mediante análisis de campo y de laboratorio.
- ✓ Fijar los parámetros de diseños para la construcción de las escombreras, según las características geotécnicas de los materiales que las componen.
- ✓ Proponer un sistema de construcción de las escombreras que garantice la estabilidad y seguridad de los trabajadores, mediante la utilización de técnicas adecuadas.
- ✓ Proponer el diseño más recomendable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

Los instrumentos a utilizar para la recopilación de datos serán:

- ✓ Búsqueda e información dispersa, referente a factores que interviene en cada de las etapas de la investigación.
- ✓ Utilización de técnicas y herramientas geotécnicas con el fin de conocer el área disponible para las escombreras y el volumen de material que se puede depositar en las mismas.
- ✓ Aplicación de métodos informáticos y de una serie de cálculos analíticos.

- ✓ Ensayos de laboratorio de muestras tanto de los materiales a verter en las escombreras como de los materiales del emplazamiento.

4.3.1. Delimitación y elección del terreno para el diseño de escombrera.

Para la delimitación y elección del terreno para las escombreras como primer trabajo se hizo estudios de campo donde se identificó el terreno adecuado para el diseño. Para la elección se tomaron los siguientes parámetros.

- ❖ **Topografía:** Después de un recorrido se eligió el terreno puesto que presenta una pendiente de 15 %, y una extensión aproximada 4406.7 m² (0.44 Ha) en plataforma, estos parámetros son adecuados para llevar adelante el diseño. El terreno elegido está enmarcado en las siguientes coordenadas UTM – WGS84/19S-ANTABAMBA, se muestra tabla IV.1.

Tabla IV.1: Coordenadas de delimitación del terreno para el diseño de la escombrera.

| | | |
|------------------|--------------|---------|
| Vértice 1 | <i>Norte</i> | 8426586 |
| | <i>Este</i> | 715211 |
| | <i>Cota</i> | 3753 |
| Vértice 2 | <i>Norte</i> | 8426674 |
| | <i>Este</i> | 715179 |
| | <i>Cota</i> | 3710 |
| Vértice 3 | <i>Norte</i> | 8426688 |
| | <i>Este</i> | 715141 |
| | <i>Cota</i> | 3710 |
| Vértice 4 | <i>Norte</i> | 8426766 |
| | <i>ESTE</i> | 715183 |
| | <i>COTA</i> | 3753 |

Fuente: elaboración propia.

- ❖ **Presencia y cursos de agua:** El terreno elegido se encuentra a 80 metros de una quedara donde cursa un riachuelo que en épocas de avenida muestra caudal considerarle y en épocas de estudio el riachuelo en ocasiones llega a secarse completamente. La presencia de aguas subterráneas que emergen de las labores mineras se da con poca intensidad. Las escorrentías serán

quienes afecten con frecuencia la escombrera, por ello se considera en los estudios estabilidad de la escombrera (cargas de escorrentía).

- ❖ **Agricultura y ganadería:** Se descartó que el terreno elegido sea útil para realizar actividades agrícolas y ganaderas por parte de los pobladores de Pachaconas.
- ❖ **Distancia de acarreo:** Las labores mineras de AMAPA S.R.L en promedio se encuentran a 40 metros del terreno elegido lo cual demandará un tiempo de recorrido bastante bajo por lo que se reducirá los costos de acarreo y eficiencia de los tiempos de producción.
- ❖ **Seguridad y Medio Ambiente:** Este fue uno de los criterios importantes para la elección, puesto que no muestra riesgos de deslizamiento y huaycos, también brinda seguridad al personal puesto que por debajo del terreno no se encuentran labores mineras. Además, los controles ambientales en este terreno son más factibles puesto que se pueden diseñar controles ambientales.

4.3.2. Recojo de muestras para la caracterización geotécnica.

Luego de la delimitación y ubicación del terreno se hizo el trabajo de recojo de muestras. A continuación, en la tabla IV.2 se detalla el método y criterios del muestreo.

Tabla IV.2: Detalles del muestreo en campo.

| | |
|--|---|
| Método de recojo de muestras de suelo | Calicata |
| Número de puntos de muestreo | 4 |
| Herramientas y materiales a utilizar | Pico, pala, picota, wincha, cuarteador, pala tipo cucharón, barreta y punta. Cuderno de anotes, marcador, cinta mashki, bolsas herméticas, cámara digital, GPS, formatos de identificación. |
| EPPs | Mamehuco, guantes, lente, casco, zapato punta acero, chaleco de seguridad y corta viento. |

Fuente: Elaboración Propia.

Considerando el método y criterios de muestreos se procedieron a excavar las calicatas, para lo cual se necesitó la ayuda de personal con lo cual se concretó el trabajo de muestreo. Se presentan y anexan las imágenes del trabajo realizado, así como en las figuras V.1 Y V.2, se muestran las columnas estratigráficas del terreno y del estéril. En la Detalle de las muestras recogidas:

Tabla IV.3: Detalles de las muestras recogidas en campo.

| NOMBRE DE MUESTRA | DETALLE - REFERENCIA | PROFUNDIDAD | PESO DE LA MUESTRA | COORDENADAS UTM - WGS84 |
|-------------------|---|-------------|--------------------|-----------------------------------|
| MCPT-001 | Muestra de Calicata Principal del Terreno: Muestra de la plataforma principal para el diseño de escombrera. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 2.5 m | 35 Kg | N: 8426713 E:715175 Z: 3726 |
| MCT-002 | Muestra de Calicata del Terreno: Muestra de los vértices-esquinas de la plataforma principal para el diseño de la escombrera. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 2 m | 25 Kg | N: 8426741 E:715167 Z: 3738 |
| MCT-003 | Muestra de Calicata del Terreno: Muestra de los vértices-esquinas de la plataforma principal para el diseño de la escombrera. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 2 m | 25 Kg | N: 8426694 E:715150 Z: 3712 |
| MCT-004 | Muestra de Calicata del Terreno: Muestra de los vértices-esquinas de la plataforma principal para el diseño de la escombrera. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 1.8 m | 18 Kg | N: 8426731 E:715197 Z: 3715 |
| MCEM-001 | Muestra de Calicata - Estéril de Mina: Muestra de la escombrera representativa de las labores de AMAPA. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 1.8 m | 30 Kg | N: 8426788 E:715214 Z: 3772 |

Fuente: Elaboración Propia.

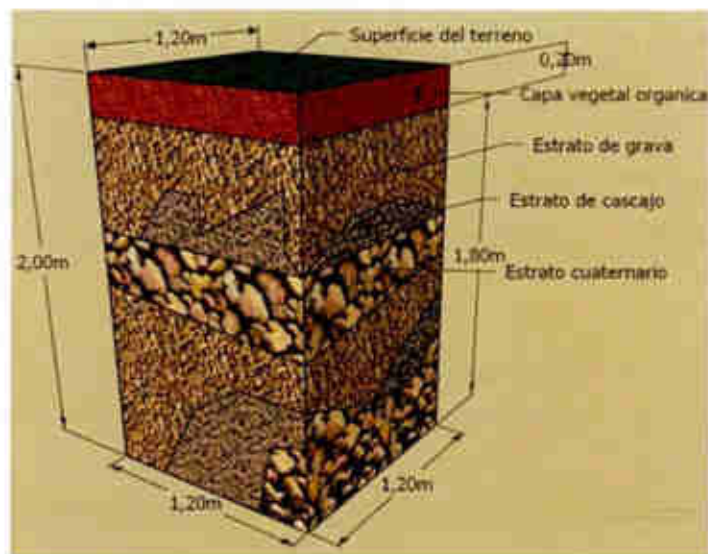


Figura IV.1: Columna estratigráfica de las calicatas en el terreno.
Fuente: Elaboración Propia.

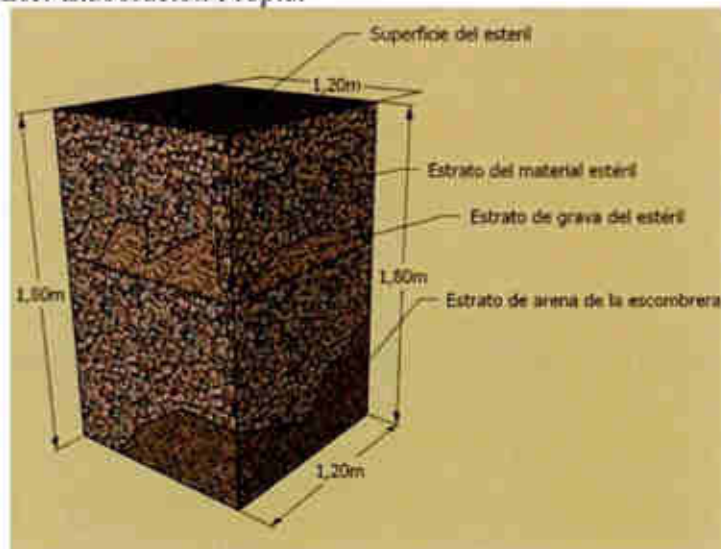


Figura IV.2: Columna estratigráfica de la calicatas del estéril.
Fuente: Elaboración Propia.

4.3.3. Ensayos de laboratorio.

Las muestras recogidas en campo fueron enviadas al laboratorio GEOFAL S.A.C., quienes hicieron los ensayos de laboratorio de suelos de las muestras enviadas. Se solicitó que hagan un reporte a nivel de resultados de algunas propiedades físicas y mecánicas del suelo, de las muestras enviadas.

A continuación, se detalla los ensayos de laboratorio hechos por GEOFAL S.A.C.

4.3.3.1. Ensayos estándar.

Se tomaron muestras alteradas de las excavaciones (calicata) para la ejecución del ensayo estándar de clasificación de suelos y propiedades físicas en el laboratorio, como se pudo apreciar cada muestra fue identificada convenientemente y embalada en bolsas de polietileno, los ensayos se ejecutaron siguiendo las normas de la American Society For Testing and Materials (ASTM).

En la tabla IV.4, se muestra los resultados del Análisis granulométrico por tamizado: ASTM D-422.

Tabla IV.4: Granulometría de las muestras enviadas al laboratorio.

| Muestra | Profundidad | Granulometría % | | | Clasificación | |
|----------|-------------|-----------------|-------|-------|---------------|--------|
| | | Grava | Arena | Finos | SUCS | AASHTO |
| MCPT-001 | 2.5 m | 42.2 | 53.5 | 4.3 | GW | A-1 |
| MCT-002 | 2 m | 44.7 | 50.5 | 4.8 | GW | A-2 |
| MCT-003 | 2 m | 47.8 | 46.4 | 5.8 | GP | A-3 |
| MCT-004 | 1.8 m | 44.3 | 52.2 | 3.5 | GW | A-4 |
| MCEM-001 | 1.8 m | 47.5 | 38.2 | 14.3 | GP | A-5 |

Fuente: Reporte de laboratorio – GEOFAL SAC.

4.3.3.2. Ensayos especiales.

A. Ensayo Proctor Modificado.

El ensayo se ejecutó siguiendo la norma: ASTM D-1557 de la American Society For Testing and Materials (ASTM), tabla IV.5.

Tabla IV.5: Densidad y humedad de las muestras enviadas al laboratorio.

| Muestra | Profundidad | Densidad Máxima (gr/cm ³) | Humedad Óptima (%) |
|----------|-------------|---------------------------------------|--------------------|
| MCPT-001 | 2.5 m | 1.880 | 9.534 |
| MCT-002 | 2 m | 1.942 | 5.538 |
| MCT-003 | 2 m | 1.984 | 1.315 |
| MCT-004 | 1.8 m | 1.856 | 9.828 |
| MCEM-001 | 1.8 m | 2.300 | 14.139 |

Fuente: Reporte de laboratorio – GEOFAL SAC.

B. Ensayo de Corte Directo.

A las muestras alteradas obtenidas, se le realizaron los ensayos de corte directo para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. Dicho ensayo se realizó sobre una muestra remodelada a la densidad de campo. Para la determinación de los parámetros mecánicos se realizaron según la norma: Corte directo ASTM-D 3080, ver resultados en la tabla IV.6.

Tabla IV.6: Cohesión y ángulo de fricción de las muestras enviadas al laboratorio.

| Muestra | Profundidad | Cohesión (Kg/cm ²) | Angulo de fricción (°) |
|----------|-------------|--------------------------------|------------------------|
| MCPT-001 | 2.5 m | 0.142 | 27.3 |
| MCT-002 | 2 m | 0.159 | 25.2 |
| MCT-003 | 2 m | 0.164 | 25.8 |
| MCT-004 | 1.8 m | 0.147 | 26.3 |
| MCEM-001 | 1.8 m | 0.306 | 22 |

Fuente: Reporte de laboratorio – GEOFAL SAC.

❖ Demostración de los valores de la cohesión y ángulo de fricción:

Basándonos en la ecuación de Coulomb:

$$\text{Esf. Corte} = Tg(\text{ángulo de fricción}) * \text{Esf. Normal} + \text{Cohesión, o también.}$$
$$t = \sigma \tan(\phi) + c.$$

Dónde:

t es el esfuerzo cortante

σ es el esfuerzo normalizado

ϕ es el ángulo de fricción interna, y

c es la cohesión.

Entonces del reporte de laboratorio (Anexos – figura VI.04) obtenemos:

$$\text{MCPT-001: } y = 0.5161x + 0.142; \text{ Entonces: Cohesión}=0.142 \text{ kg/cm}^2; \theta^\circ=27.3$$

$$\text{MCT-002: } y = 0.4706x + 0.159; \text{ Entonces: Cohesión}=0.159 \text{ kg/cm}^2; \theta^\circ=25.2$$

$$\text{MCT-003: } y = 0.4834x + 0.164; \text{ Entonces: Cohesión}=0.164 \text{ kg/cm}^2; \theta^\circ=25.8$$

$$\text{MCT-004: } y = 0.5161x + 0.147; \text{ Entonces: Cohesión}=0.147 \text{ kg/cm}^2; \theta^\circ=26.3$$

$$\text{MCEM-001: } y = 0.404x + 0.306; \text{ Entonces: Cohesión}=0.306 \text{ kg/cm}^2; \theta^\circ=22$$

Para obtener la cohesión y el ángulo de fricción del terreno asumiendo un criterio estadístico promediamos los valores de las 4 calicatas del terreno:

$$\checkmark \text{ Cohesión promedio del terreno} = \frac{(0.142+0.159+0.164+0.147)}{4} = 0.153 \text{ kg/cm}^2$$

Se tiene que $1 \text{ Kg/cm}^2=98.067 \text{ kPa}$

$$\text{Cohesión promedio del terreno} = 0.153 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \frac{98.067 \text{ kPa}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 15 \text{ kPa}; \text{ este valor de}$$

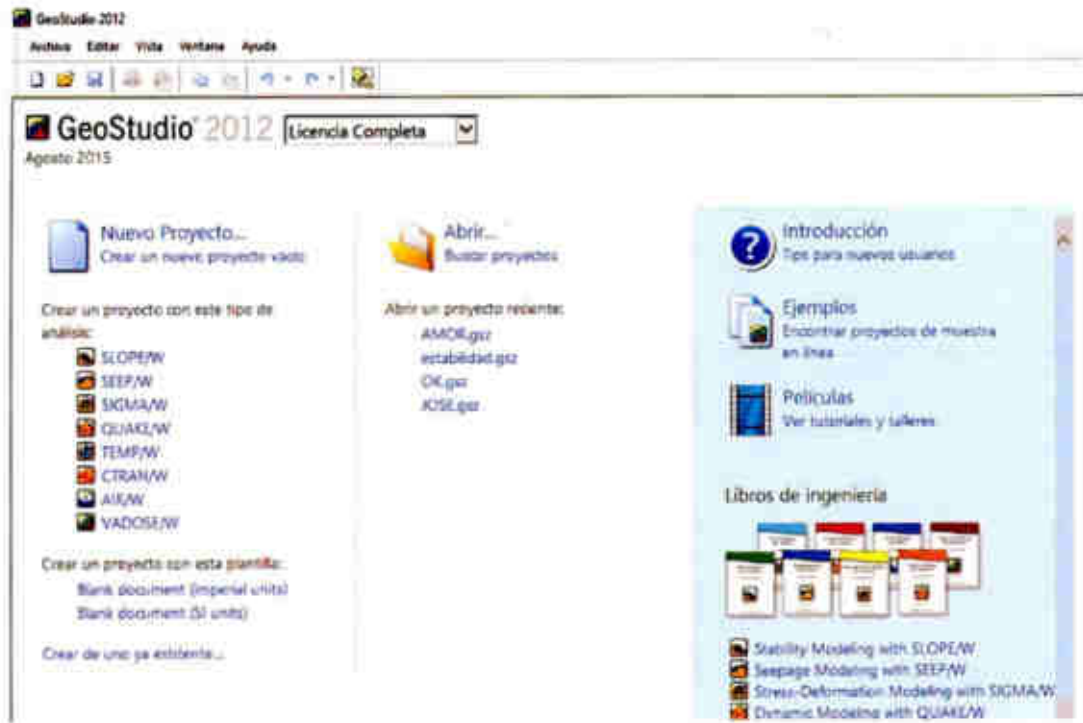
la cohesión nos servirá para el modelamiento de estabilidad en el geoestudio.

$$\checkmark \text{ Ángulo de promedio fricción del terreno} = \frac{27.3+25.2+25.8+26.3}{4} = 26.15^\circ$$

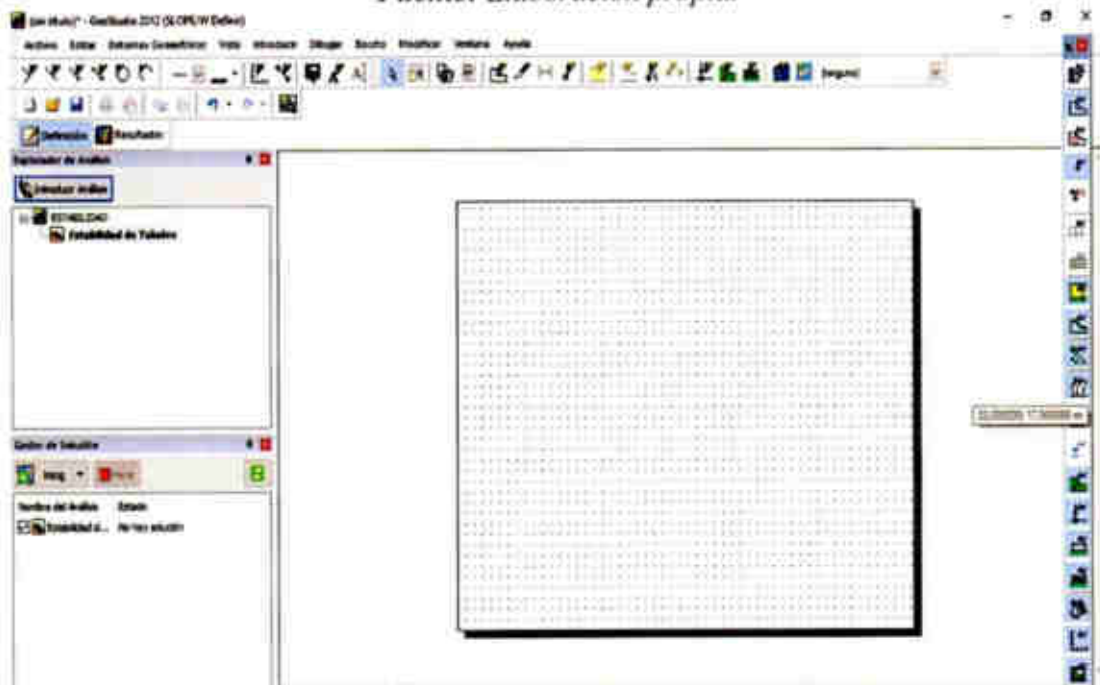
4.4. Diseño de escombreras mediante el programa GeoStudio – Slope/W.

Según el libro “Introducción al uso del programa SLOPE/W 2017”, cuyo autor es German López Pineda, este programa es un componente de un completo paquete de productos geotécnicos denominado GeoStudio. Una de las más poderosas características de este enfoque integrado es que habré las puertas a los tipos de análisis del más amplio y más complejo espectro de problemas, incluyendo el uso de los elementos finitos computarizado y destacando la presión de agua en el análisis de estabilidad. No solamente hace un enfoque integrado ampliando las posibilidades de análisis, sino que puede ayudar a superar algunas limitaciones de las fórmulas de equilibrio límite. Si bien, no es necesario utilizar este avance destacado ya que SLOPE / W puede ser usado como un producto individual, sin duda hay un aumento de la capacidad del programa, utilizándolo como uno de los

componentes de una gama completa de programas de software geotécnicos. La pantalla principal del programa se ve como la figura IV.3 y figura IV.4.



*Figura IV.3: Pantalla principal del programa GeoStudio 2012.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura IV.4: Ventana para hacer el modelamiento con GeoStudio – SLOPE/W.
Fuente: Elaboración propia.*

4.4.1. Características del programa

El programa a cuyo uso nos vamos a introducir tiene fundamentalmente en su versión 2004 las siguientes características:

4.4.1.1. Métodos de cálculo

- ❖ Ordinario (Fellenius).
- ❖ Bishop simplificado.
- ❖ Janbu simplificado.
- ❖ Spencer.
- ❖ Morgentern-Price.
- ❖ Cuerpo de Ingenieros Americanos. (I y II)
- ❖ Lowe-Karafath.
- ❖ Sarma.
- ❖ Método de equilibrio limite generalizado (GLE).
- ❖ Método de los elementos finitos.

4.4.1.2. Geometría y estratigrafía

La introducción de los condicionantes geométricos es muy versátil y se adapta prácticamente a cualquier geometría:

- ✓ Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones.
- ✓ Definición de grietas de tracción.
- ✓ Parcialmente sumergidos.

4.4.1.3. Superficie de deslizamiento

Dispone de distintos sistemas de modelización de las superficies de rotura:

- ✓ Malla de centros y límites de radios.
- ✓ Superficies de rotura poligonales, con o sin centro.
- ✓ Por bloques.
- ✓ Zonas de entrada salida acotando los posibles círculos de rotura.

- ✓ Búsqueda automática de superficies de rotura.
- ✓ Optimización de búsqueda de superficies de rotura.

4.4.1.4. Presión hidrostática

- ✚ Coeficiente de presión de agua.
- ✚ Superficie piezométrica.
- ✚ Presión hidrostática para cada punto.
- ✚ Contornos de presiones hidrostáticas.

4.4.1.5. Propiedades de los suelos

Con objeto de modelizar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios modelos de comportamiento.

- Tensiones totales y efectivas (σ y σ').
- Resistencia al corte sin drenaje ($\varphi = 0$), $\tau = c$.
- Resistencia al corte cero (agua, $c = 0$ y $\varphi = 0$).
- Materiales impenetrables (lechos rocosos).
- Criterios de rotura bilineales.
- Incrementos de la cohesión con la profundidad.
- Resistencia al corte anisótropo.
- Criterios de rotura específicos.
- Modelo de Hoek y Brown para taludes rocosos

4.4.1.6. Tipos de cargas

- Cargas superficiales
- Cargas lineales.
- Cargas sísmicas
- Anclajes y bulones (activos y pasivos)

CAPITULO V.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.—

5.1. Análisis y discusión de resultados.

5.1.1. Caracterización geotécnica del terreno.

La caracterización geotécnica en una escombrera se hace necesaria a la hora de diseñar la misma, ya que la geometría de la escombrera depende de los resultados de estos estudios. Los dos parámetros geotécnicos más importantes son la cohesión y el ángulo de rozamiento interno de los suelos en sus diferentes capas que fueron identificados a la hora de hacer el muestreo (columna estratigráfica); ya que de estos parámetros dependerán la inclinación final del talud de la escombrera, que incide directamente en la capacidad de la misma. Este fenómeno se hace más notable cuanto mayor sea el tamaño de la escombrera. Los valores de dichos parámetros se obtendrán de los ensayos de laboratorio.

5.1.1.1. Caracterización geotécnica de la capa vegetal.

Al realizar las calicatas de muestreo se identificó que la capa vegetal tiene un espesor de 0.2 m. (20 cm.) por lo que se considera como capa de recubrimiento. No amerita hacer estudios geotécnicos porque cuando se

implemente la escombrera esta capa vegetal será retirada y dispuesta a otro lugar para uso que se vea conveniente.

5.1.1.2. Caracterización geotécnica del terreno.

Se hicieron 3 calicatas de muestreo en la plataforma, estas muestras fueron enviadas a laboratorio los cuales fueron sometidos a ensayos de tamizado, corte directo y Proctor modificado dando los siguientes resultados. El criterio para hacer 3 puntos de muestreo en el terreno se basa en los criterios geotécnicos puesto que se quiere conocer las propiedades geotécnicas en diferentes puntos del lugar de estudio. Como la extensión del terreno abarca 2190 m² entonces amerita hacer 3 puntos de muestreo a profundidad mayor o igual a 1.8 metros.

En función a los resultados de los ensayos de laboratorio se hace la caracterización geotécnica y la clasificación del terreno, también bajo un criterio estadístico se promedian los resultados de las 3 calicatas de muestreo para tener un resultado promedio del terreno:

- **Granulometría:**

El terreno presenta una granulometría promedio de 44.75% de grava, 50.65% de arena y 4.6% de finos. Según la SUCS se clasifica como grava bien graduada (GW) por presentar <5% del material fino y <50% en el tamiz #4, según el AASHTO el suelo del terreno se clasifica en grupo A-1 por presentar <50% en el tamiz #10. En función a estos resultados el suelo del terreno tiene:

Comportamiento mecánico = Excelente

Capacidad de drenaje = Excelente.

- **Densidad y humedad:**

El terreno tiene una densidad promedio de 1.916 Tm/m³, peso específico de 18.9 kN/m³ y humedad promedio de 6.55%. según estos resultados el terreno es considerado bueno para su estabilidad por su poca presencia de agua y su densidad cercano a 2 Tm/m³.

- **Cohesión y ángulo de fricción:**

La cohesión promedio del terreno es de 0.153 kg/cm² (15kPa), ángulo de fricción promedio de 26.15°. De acuerdo a estos resultados el terreno presenta una cohesión favorable para hacer construcciones y un ángulo de fricción óptimo para resistir cargas considerables.

5.1.1.3. Caracterización geotécnica del estéril.

Para la caracterización del estéril se hizo una sola calicata de muestreo porque a lo largo de la unidad minera el material estéril es homogéneo y por ende presentan igual propiedades geotécnicas.

- **Granulometría:**

El estéril presenta 47.5% de grava, 38.2% de arena y 14.3% de finos. Según la SUCS el terreno se clasifica como grava pobremente graduada (GP), por presentar >12% de finos y <50% en el tamiz #4, según el AASHTO el estéril es de tipo A-1 por presentar <50% en el tamiz #10. En función a estos resultados el material estéril tiene:

Comportamiento mecánico = Bueno a Excelente

Capacidad de drenaje = Excelente.

- **Densidad y humedad:**

El estéril tiene una densidad promedio 2.3 Tm/m³, peso específico 23 kN/3 y una humedad de 14.14%. El material estéril tiene considerable presencia de agua y una densidad superior a 2 Tm/m³ por lo que se le debe considerar criterios de estabilización y/o reforzamiento del terreno, puesto que el terreno presenta una densidad inferior.

▪ **Cohesión y ángulo de fricción:**

La cohesión del estéril es de 0.306 kg/cm² (30kPa), ángulo de fricción promedio de 22°. De acuerdo a estos resultados el estéril presenta una cohesión favorable para ser emplazado en el terreno estudiado.

5.1.2. Análisis de estabilidad de la escombrera.

Como se ha mencionado anteriormente la explotación en la unidad minera Minaspatá se genera estéril que es uniforme a lo largo de la producción tratándose de material arcilloso en su mayoría y ocasionalmente bolones de roca y grava.

En primer lugar, se aplicará el método INESTEC, descrito en la parte teórica de esta investigación, para obtener una clasificación del grado de estabilidad de las escombreras. Este método consiste en dar un puntaje a cada uno de los factores que afectan la estabilidad de una escombrera, dependiendo de las condiciones y de las características de diseño previstas para la construcción de la misma. Luego, se realiza una sumatoria de los puntajes individuales; a partir de esta sumatoria se establece la clase de estabilidad de la escombrera y se presentan una serie de recomendaciones de diseño y construcción para cada caso.

A continuación, en la tabla V.1 se presenta una tabla que resume las características de las escombreras y los puntajes respectivos de cada una de ellas.

Tabla V.1: Ponderación y clasificación de la escombrera según el INESTEC
Fuente: Elaboración Propia.

| Factores que afectan la estabilidad | | Descripción de condiciones | Clasificación |
|-------------------------------------|------------------|--|---------------|
| Configuración de la escombrera | Altura | Media (<50m) | 0 |
| | Volumen | Medio (<1 Mm ³) | 0 |
| | Talud de vertido | Inclinado (>35°) | 100 |
| Pendiente del terreno de apoyo | | Suave (25° - 32°) | 100 |
| Grado de confinamiento | | Moderadamente Confinada (con berma de apoyo en pie) | 50 |
| Tipo de cimiento | | Competente (materiales apoyo resistentes frente a los estériles vertidos) | 0 |
| Calidad del material vertido | | Media (10% - 25 % de finos) | 100 |
| Método de construcción | | Favorable (Talud general 1.3:1) | 0 |
| Condiciones piezométricas | | Favorables (presiones piezométricas bajas, aparición improbable de superficies freáticas en la escombrera) | 0 |
| Ritmo de vertido | | Bajo (menor de 8 m3 por metro por día) | 50 |
| Sismicidad | | Bajo (sismicidad baja) | 0 |
| Puntaje total | | | 400 |

Según la clasificación de estabilidad de escombreras INESTEC se trata de una escombrera con clasificación de estabilidad tipo II (300 – 600) – (Puntaje total = 400). A continuación, en la tabla V.2 se presenta un cuadro resumen donde se indican las recomendaciones para la investigación, diseño y construcción de este tipo de escombrera.

Tabla V.2: Características y detalles de la escombrera clasificada según el INESTEC

| Clase de estabilidad de la escombrera | Riesgo de Rotura | Recomendaciones para la investigación, diseño y construcción | Clasificación de la estabilidad de la escombrera (INESTEC) |
|---------------------------------------|------------------|--|--|
| II | Bajo | <p>Reconocimiento del emplazamiento general. Pueden requerirse calicatas en el terreno y toma de muestras. Algunos ensayos de laboratorio.</p> <p>La estabilidad puede o no influir en el diseño. Se requiere análisis de estabilidad básico. Restricciones limitadas en la construcción. Inspección con instrumentos y visual rutinaria.</p> | 300 - 600 |

Fuente: Elaboración Propia.

Para el análisis de estabilidad de las escombreras se utilizará el software GEO – SLOPE 2012, el cual permite realizar el cálculo de estabilidad mediante varios métodos de análisis, como Fellenius, Janbu, Morgentern-Price, Bishop simplificado, entre otros.

5.1.2.1. Estabilidad del terreno.

Después de haber elegido el terreno en función a los criterios mencionados en el apartado 5.1.1, en función a los ensayos de laboratorio y la caracterización geotécnica se hizo el modelamiento para ver el comportamiento de estabilidad del terreno.

❖ Modelamiento Estático del Terreno

Parámetros considerados:

Cohesión=15 KPA,

Peso específico=18.9 kN/m³.

Angulo de fricción=26.15°.

La figura V.1, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico dada por el método Bishop, el factor de seguridad es de 2.148, lo cual nos indica que el terreno es estable y adecuado para el diseño de la escombrera.

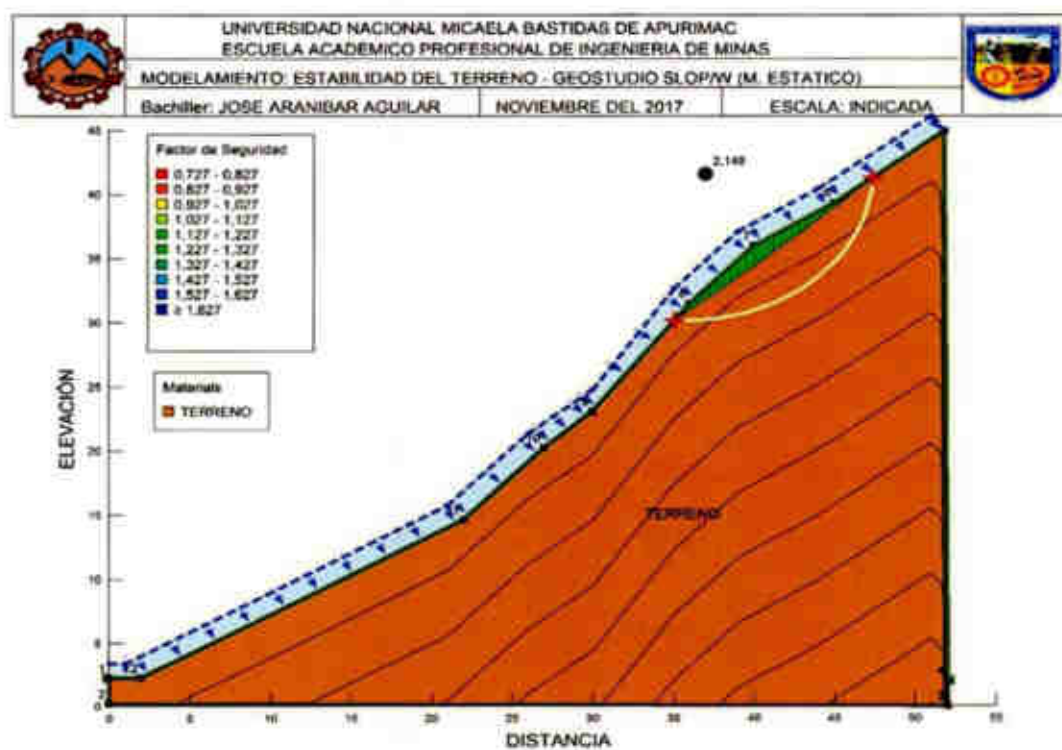
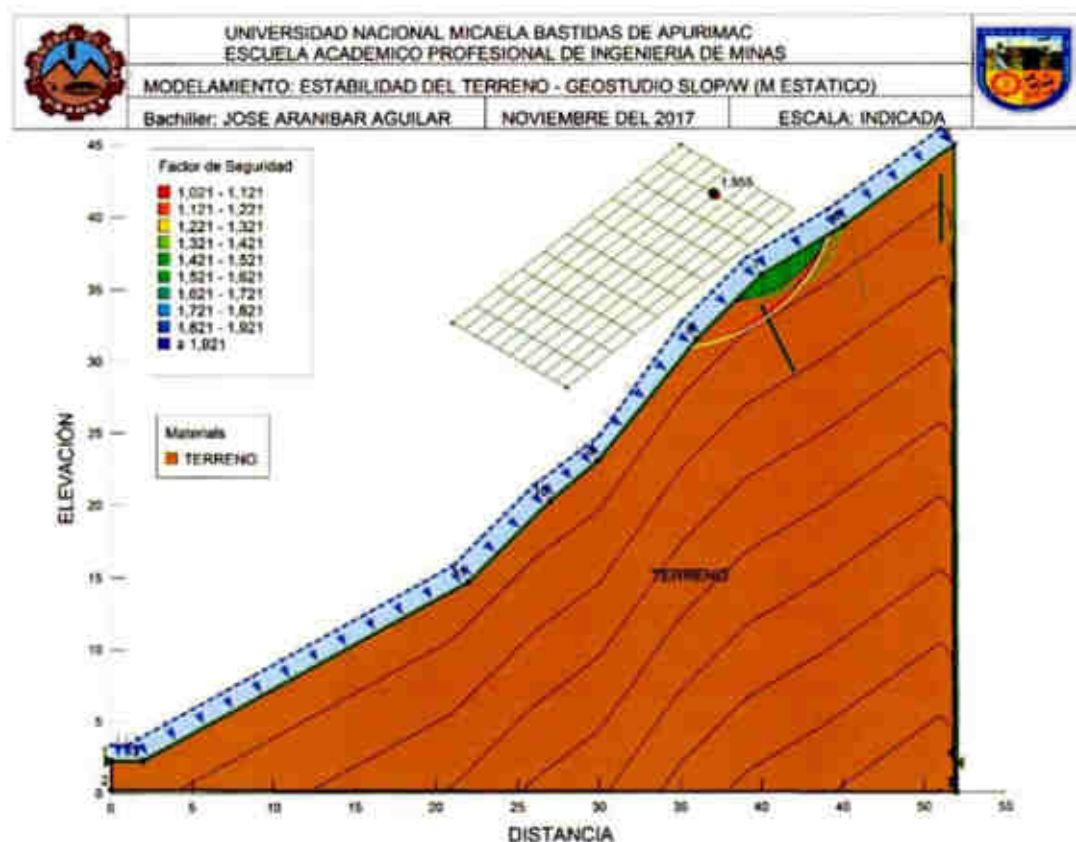


Figura V.1: Modelamiento estático del terreno mediante el método Bishop.
Fuente: Elaboración Propia.

La figura V.2, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico dada por el método Spencer, el factor de seguridad es de 1.955, este resultado también indica que el terreno es estable y adecuado para el diseño de la escombrera.



*Figura V.2: Modelamiento estático del terreno mediante el método Spencer
Fuente: Elaboración Propia.*

❖ Modelamiento Pseudo-Estático del terreno.

En este modelamiento se aplica coeficientes sísmicos, el cual nos mostrara como actúa el terreno frente a la ocurrencia de un terremoto o temblor.

Cohesión=15 KPA,

Peso específico=18.9 kN/m³.

Angulo de fricción=26.15°

Coefficiente sísmico horizontal=0.2

Coeficiente sísmico vertical= 0.15

La figura V.3, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico y con la ocurrencia de un movimiento sísmico. El método Bishop nos da un factor de seguridad de 1.020. Claramente el FS disminuye de 2.148 a 1.020 lo cual indica que en casos de mismos el terreno colapsaría con facilidad.

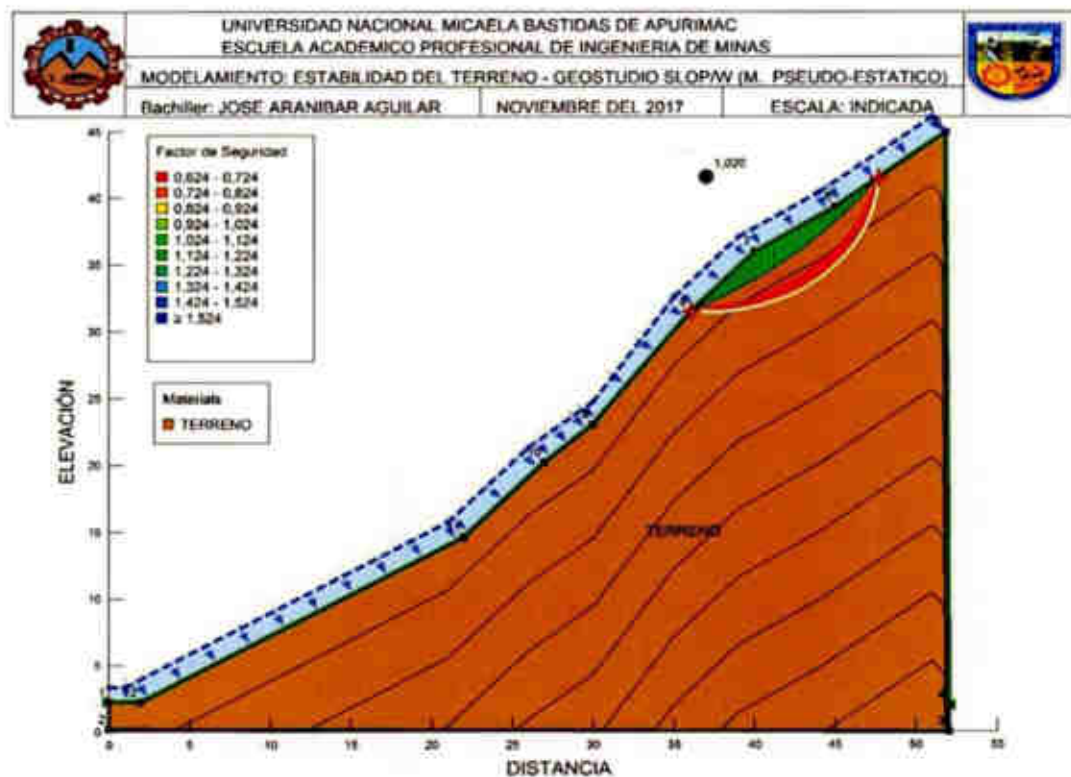


Figura V.3: Modelamiento pseudo-estático del terreno mediante el método Bishop.
Fuente: Elaboración Propia.

La figura V.4, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico y con la ocurrencia de un movimiento sísmico. El método Spencer nos da un factor de seguridad de 1.087. Claramente el FS disminuye de 1.995 a 1.087 lo cual indica que en casos de mismos el terreno colapsaría con facilidad.

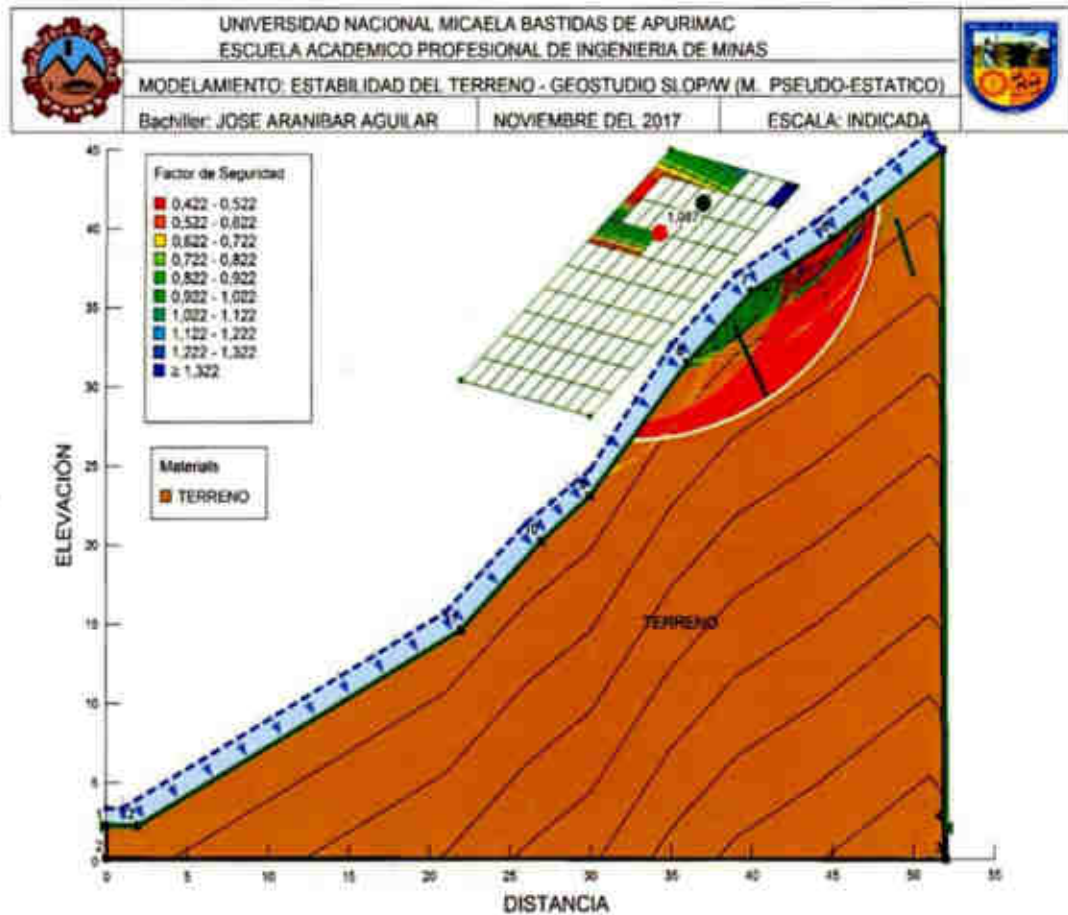


Figura V.4: Modelamiento pseudo-estático del terreno mediante el método Bishop.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla V.3: Resumen del modelamiento estabilidad estático y pseudo-estático del terreno.

| RESUMEN DEL MODELAMIENTO DEL TERRENO | |
|--------------------------------------|---------------------|
| Análisis estático | |
| Método de análisis | Factor de seguridad |
| Bishop | 2.148 |
| Spencer | 1.955 |
| Análisis pseudo-estático | |
| Bishop | 1.02 |
| Spencer | 1.087 |

Fuente: Elaboración Propia.

5.1.2.2. Estabilidad de la escombrera

Tomando en cuenta la caracterización geotécnica y las dimensiones propuestas para la escombrera se realizó el modelamiento de la escombrera, tabla V.4.

➤ Características del diseño propuesto para la escombrera:

Tabla V.4: Características del diseño de la escombrera.

| Características | Descripción |
|-----------------------------------|------------------------|
| Área de escombrera | 2190 m ² |
| Capacidad de almacenamiento | 9216.40 m ³ |
| Superficie de plataforma superior | 5 m X 25 m |
| Inclinación de talud | 1.3:1 |
| Angulo general | 37.57° |
| Cota inicial | 3710 msnm |
| Cota final | 3753 msnm |

Fuente: Elaboración propia.

❖ Modelamiento Estático de la escombrera:

Parámetros considerados del terreno:

Cohesión=15 KPA,

Peso específico=18.9 kN/m³,

Angulo de fricción=26.15°

Parámetros considerados del estéril:

Cohesión= 30 KPA

Peso específico= 23 kN/m³.

Angulo de fricción=22°

La figura V.5, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico dada por el método Bishop, el cual nos da un factor de seguridad de 1.449, lo cual nos indica que la escombrera es estable.

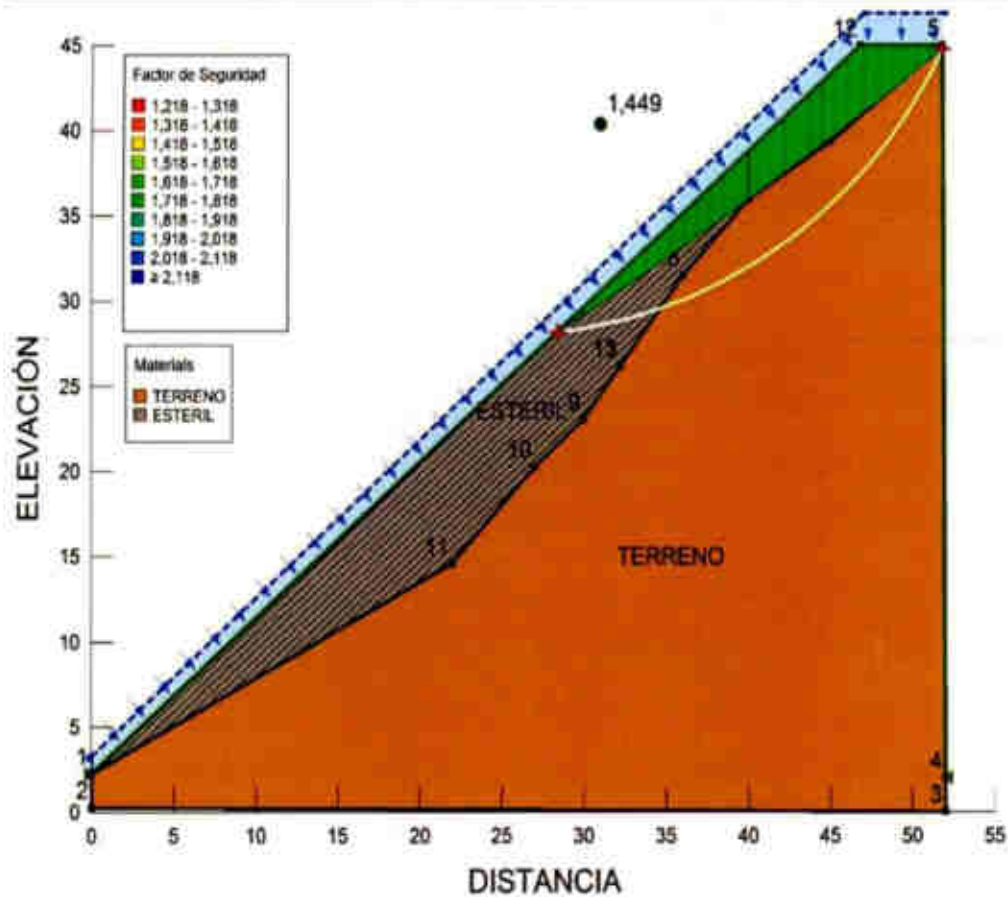
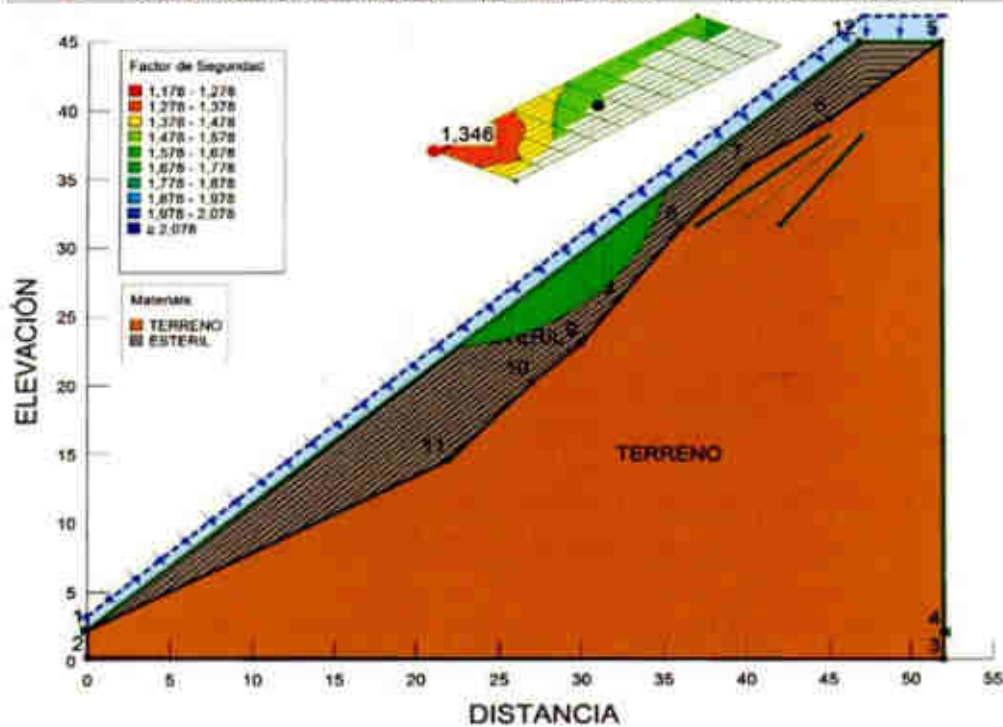


Figura V.5: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera mediante el método Bishop
Fuente: Elaboración Propia

La figura V.6, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico dada por el método Spencer, el cual nos da un factor de seguridad de 1,346, este método también indica que el estéril en la escombrera es estable y adecuado para su diseño.



*Figura V.6: Modelamiento estático de la escombrera mediante el método Spencer.
Fuente: Elaboración Propia.*

❖ **Modelamiento Pseudo-Estático de la escombrera:**

| | |
|--|---|
| Parámetros considerados del terreno: | Cohesión= 30 KPA |
| Cohesión=15 KPA, | Peso específico= 23 kN/m ³ . |
| Peso específico=18.9 kN/m ³ . | Angulo de fricción= 22 ° |
| Angulo de fricción=26.15° | Coefficiente sísmico horizontal=0.2 |
| Parámetros considerados del estéril: | Coefficiente sísmico vertical=0.1 |

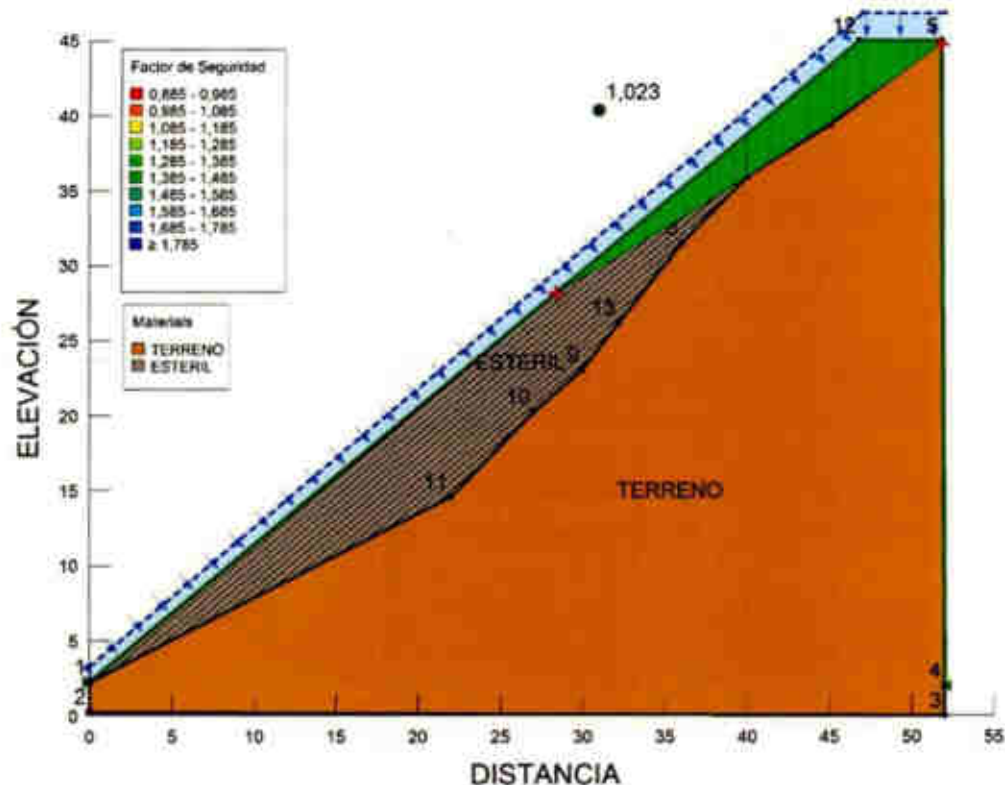


Figura V.7: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera mediante el método Bishop.
Fuente: Elaboración Propia

La figura V.7, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico y con la ocurrencia de un movimiento sísmico mediante el método Bishop, el cual nos da un factor de seguridad de 1.023. Claramente el FS disminuye de 1.449 a 1.023 este último FS nos indica que la escombrera colapsaría en caso de sismo.

La figura muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico y con la ocurrencia de un movimiento sísmico mediante el método Spencer, el cual nos da un factor de seguridad de 0.989. Claramente el FS disminuye de 1.346 a 0.989. El FS 0.989 está por debajo del mínimo factor de seguridad que es 1 por tanto la escombrera no estaría considerada como estable en caso de sismo.

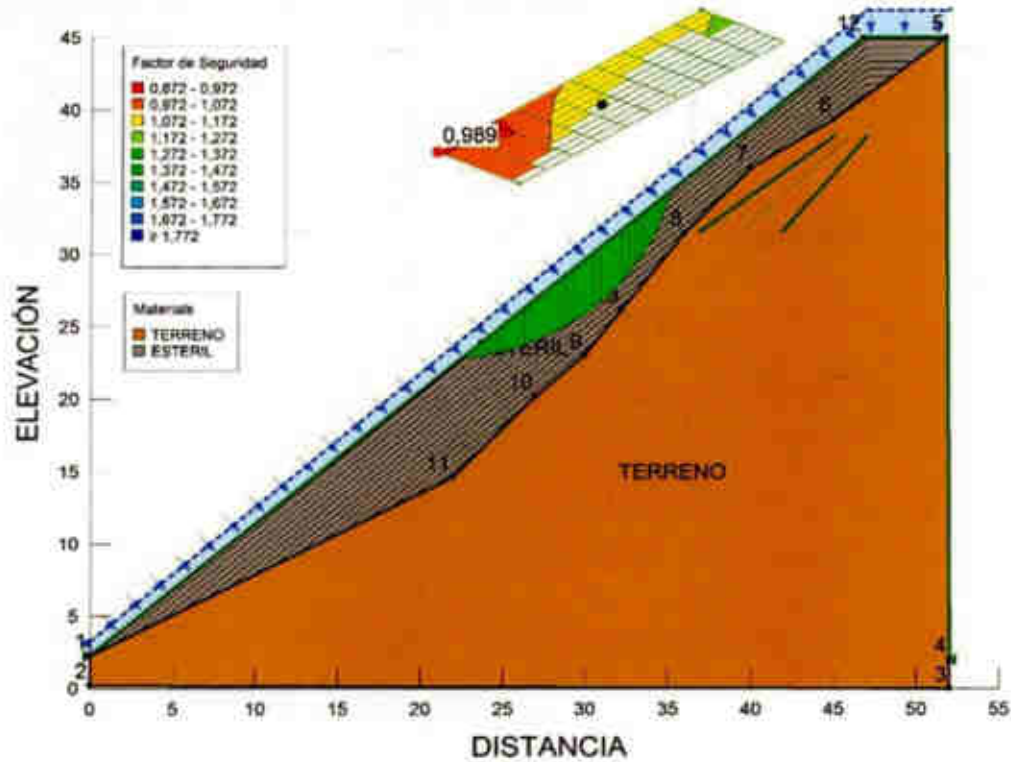


Figura V.8: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera mediante el método Spencer.

Fuente: Elaboración Propia.

Para revertir esta situación se propone hacer soportes en el terreno para asegurar la estabilidad de la escombrera.

Tabla V.5: Resumen del modelamiento de estabilidad estático y pseudo-estático de la escombrera.

| RESUMEN DEL MODELAMIENTO DE LA ESCOMBRERA | |
|---|---------------------|
| Análisis estático | |
| Método de análisis | Factor de seguridad |
| Bishop | 1.449 |
| Spencer | 1.346 |
| Análisis pseudo-estático | |
| Bishop | 1.023 |
| Spencer | 0.989 |

Fuente: Elaboración Propia.

5.1.2.3. Estabilidad de la escombrera reforzada.

Al aplicar cargas sísmicas a la escombrera se observa que el FS está por debajo del mínimo, por lo que mediante un análisis minucioso y aplicando los conocimientos geotécnicos se propone reforzar la escombrera mediante dos muros de contención en el terreno que son ubicados según el modelamiento. A continuación, se detallan los modelamientos de la escombrera con los muros de contención en el terreno.

❖ Modelamiento Estático de la escombrera reforzada:

| | |
|---|---|
| Parámetros considerados del terreno: | Peso específico= 23 kN/m ³ . Angulo de fricción= 22 ° |
| Cohesión=15 KPA, Peso específico=18.9 kN/m ³ . Angulo de fricción=26.15° | Parámetros considerados para el muro de contención: Cohesión= 0KPA |
| Parámetros considerados del estéril: Cohesión= 30 KPA | Peso específico= 27.5kN/m ³ . Angulo de fricción= 23 ° |

La figura V.9, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico de la escombrera reforzada mediante un muro de contención. El método Bishop, nos da un factor de seguridad de 1.840. Nótese que al aplicar dos muros de contención estratégicamente ubicados el FS mejora dando estabilidad a la escombrera.

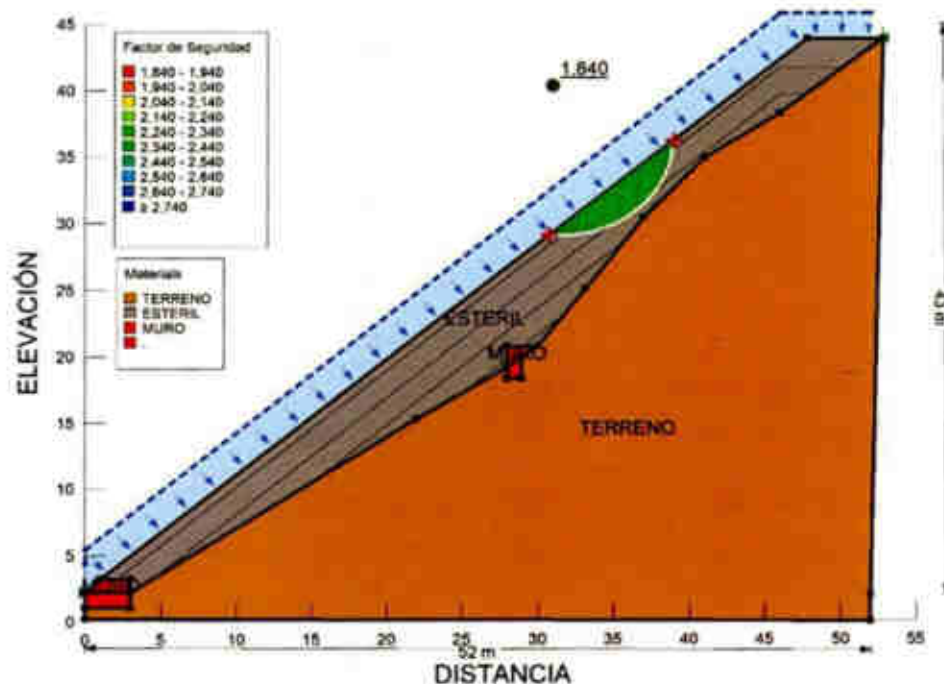


Figura V.9: Modelamiento estático de la escombrera reforzada mediante el método Bishop. Fuente: Elaboración Propia.

La figura muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico de la escombrera reforzada mediante un muro de contención. El método Spencer, nos da un factor de seguridad de 1.741. Nótese que al aplicar dos muros de contención estratégicamente ubicados el FS mejora dando estabilidad a la escombrera.

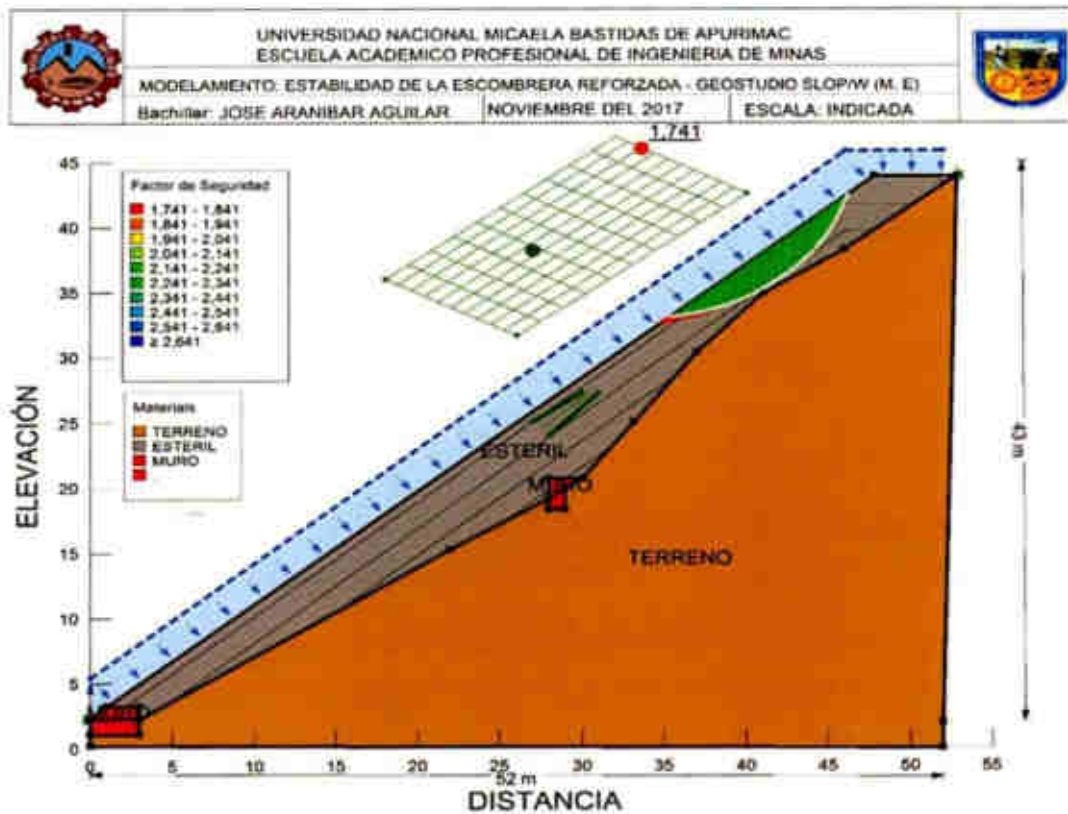


Figura V.10: Modelamiento estático de la escombrera reforzada mediante el Spencer.
Fuente: Elaboración Propia.

❖ **Modelamiento Pseudo-Estático de la escombrera:**

Parámetros considerados del terreno:

Cohesión=15 KPA.

Peso específico=18.9 kN/m³.

Angulo de fricción=26.15°

Parámetros considerados del estéril:

Cohesión= 30 KPA

Peso específico= 23 kN/m³.

Angulo de fricción= 22 °

Parámetros considerados para el muro de contención:

Cohesión= 0KPA

Peso específico= 27.5kN/m³.

Angulo de fricción= 23 °

Coefficiente sísmico horizontal=0.2

Coefficiente sísmico vertical=0.15.

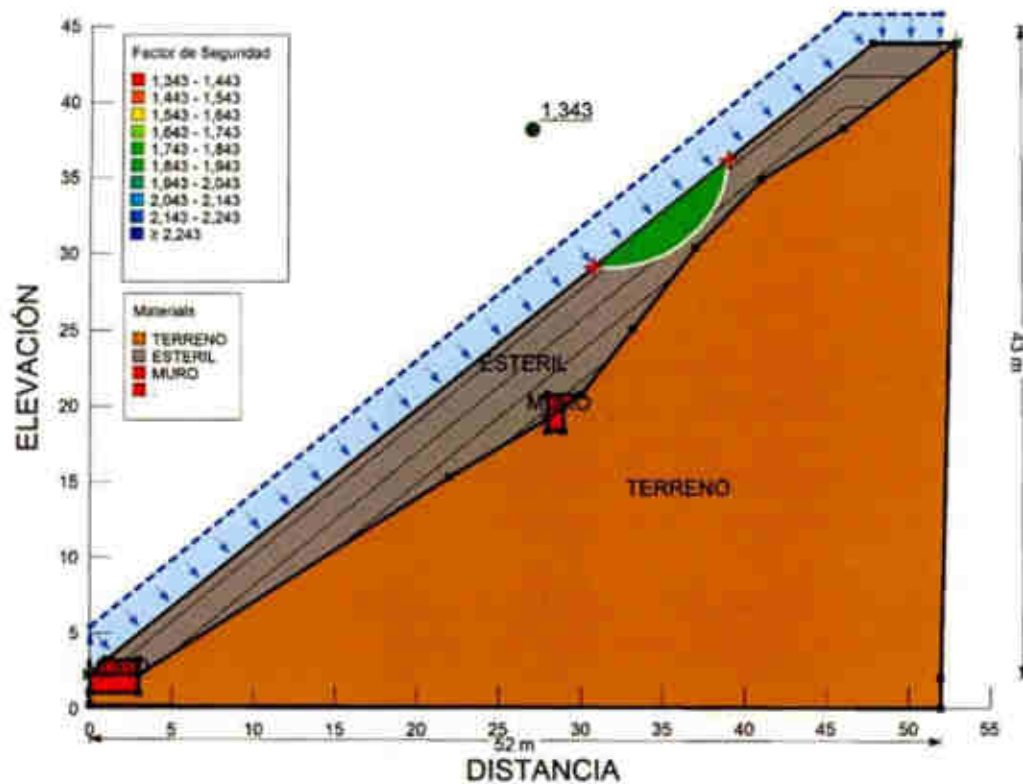


Figura V.11: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera reforzada mediante el Bishop. Fuente: Elaboración Propia

La figura V.11, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico de la escombrera al construir muros de contención, además están sometidos a la ocurrencia de un movimiento sísmico. El método Bishop nos da un factor de seguridad 1.343. en modelamiento estático el FS es de 1.840, al aplicar cargas sísmicas a la escombrera reforzada con dos muros de contención el FS disminuye a 1.343 lo cual se encuentra por encima del FS mínimo para la estabilidad de la escombrera. Por lo tanto, el criterio de implementar dos muros de contención es adecuado puesto que mejora la estabilidad del terreno y por ende la estabilidad de la escombrera.

La figura V.12, muestra la superficie de deslizamiento en el caso más crítico al aplicar cargas sísmicas a la escombrera reforzada con 2 muros de contención. El método Spencer nos da un factor de seguridad de 1.334, nótese que el resultado está por encima del FS mínimo para garantizar la estabilidad de la escombrera.

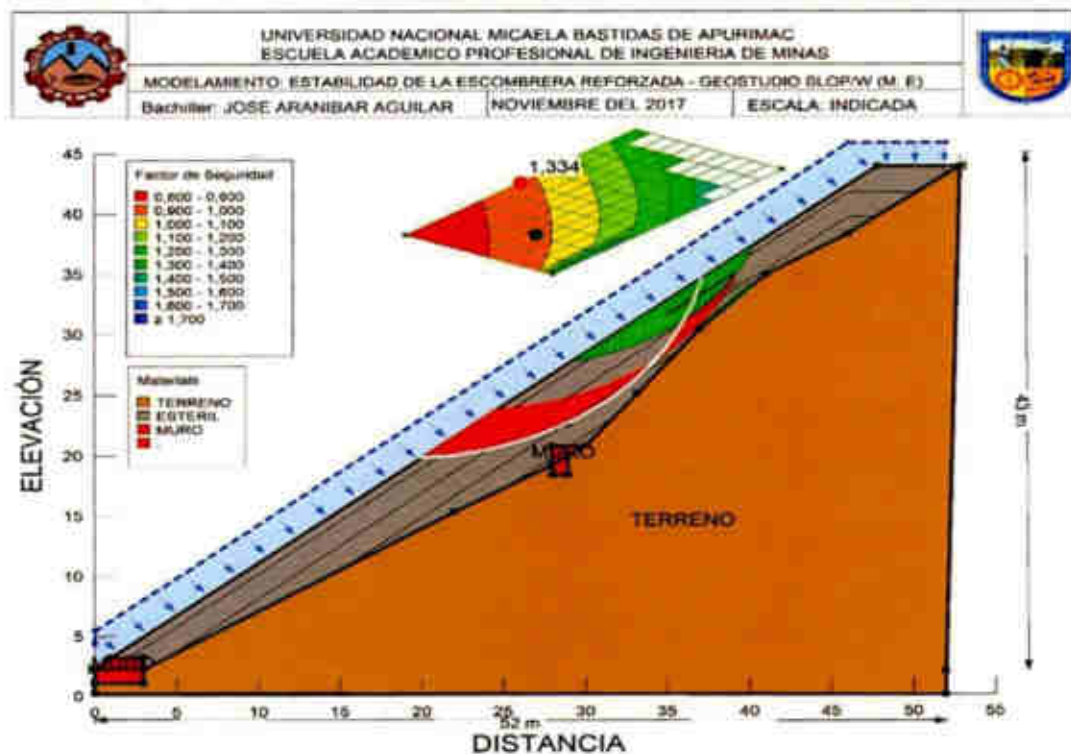


Figura V.12: Modelamiento pseudo-estático de la escombrera reforzada mediante el Spencer. Fuente: Elaboración propia

Tabla V.6: Resumen del modelamiento de estabilidad estático y pseudo-estático de la escombrera reforzada.

| RESUMEN DEL MODELAMIENTO DE LA ESCOMBRERA REFORZADA | |
|---|---------------------|
| Análisis estático | |
| Método de análisis | Factor de seguridad |
| Bishop | 1.840 |
| Spencer | 1.741 |
| Análisis pseudo-estático | |
| Bishop | 1.343 |
| Spencer | 1.334 |

Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Seguridad de la escombrera: Especificaciones técnicas para la construcción de las escombreras

En este ítem se describe la seguridad de la escombrera mediante el sistema constructivo de escombreras y el sistema de drenaje de la escombrera. Cabe destacar que cada uno de estos aspectos ha sido propuesto tomando en cuenta los resultados de los ensayos de laboratorio, la caracterización geotécnica y el modelamiento estático y pseudo-estático del terreno y de la escombrera.

5.1.3.1. Sistema de seguridad para de la escombrera

Como ya se ha indicado anteriormente las escombreras de la unidad minera Minasata estarán ubicadas directamente sobre un terreno de buena calidad (tipo II según clasificación de INSETEC). Por otro lado, se tiene una pendiente máxima del terreno de implantación de 15%.

El tipo de secuencia a seguir para la construcción de la escombrera será el denominado como fases superpuestas y compactadas, ya que este tipo de construcción aporta una mayor estabilidad al disminuir los taludes finales y aumentar las propiedades resistentes de los estériles mediante la compactación, a la vez que se aumenta la capacidad de almacenamiento de la escombrera, pues se reduce el factor de esponjamiento.

Como se mostró en los modelamientos se construirá dos bases de apoyo firme a la escombrera, se procederá a colocar bases rocosas en la base y otro en la parte media del talud del terreno, estas bases estarán constituidos por bloques de roca dura estratégicamente colocados, el cual tendrá unos 2 m de espesor y 3 m de altura (figura V.13). En lo posible se tratará de construir estas bases de soporte rocoso con material resistente (bloques de cuarcita), por ser estos de

mejor cálida. Este procedimiento contribuirá con la estabilidad de la escombrera.

La colocación del material se realizará mediante construcción de muros a cargo de un maestro de obra, debiéndose disponer de volquetes para el transporte de material y retroexcavadora para la preparación y excavación de los cimientos, también equipos y herramientas adecuado para asegurar las dimensiones propuestas. Una vez construidos los muros de contención se comenzará con el vertido del estéril a la escombrera.

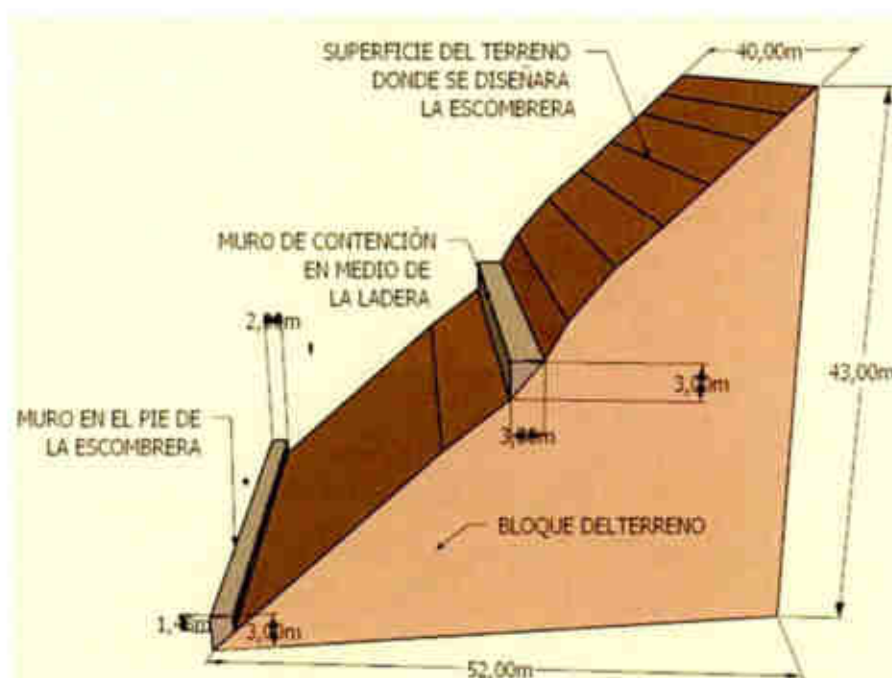


Figura V.13: Muros de contención para el reforzamiento del terreno y superficie del terreno donde se dispondrá el material estéril.

Fuente: elaboración propia.

5.1.3.2. Sistema de drenaje de la escombrera.

En el terreno no hay presencia de agua subterránea y el nivel freático se encuentra a gran profundidad, esto fue constatado en las calicatas de muestreo. Por lo que la única fuente de agua que afectará a las escombreras es la de escorrentía.

Para canalizar la evacuación de las aguas en la escombrera se prevé la construcción de dos drenes perimetrales ubicados en la base de la escombrera la plataforma de la parte superior de la escombrera, los mismos evitarán la erosión de la base del talud por acción de las aguas de escorrentía, al mismo tiempo se canaliza las aguas que serán conducidos al riachuelo más cercano. En la figura V.14 se presenta el diseño en perfil de este sistema de drenaje.

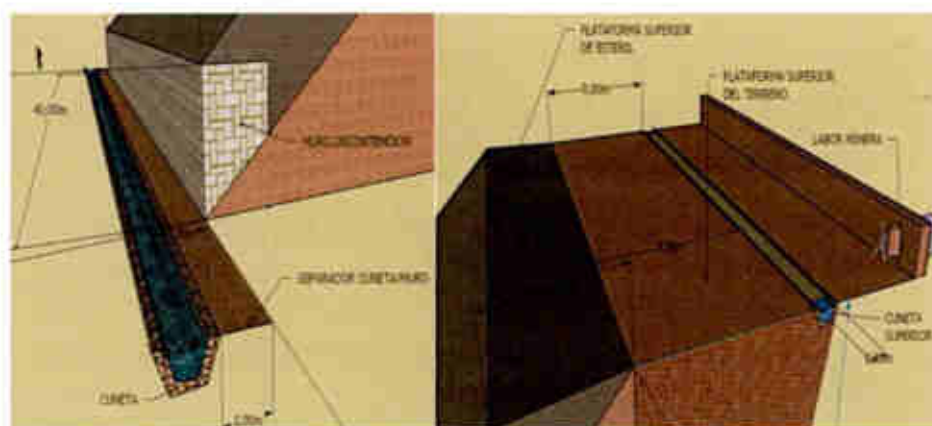


Figura V. 14: Sistema de drenaje – diseño de cunetas.
Fuente: elaboración propia.

5.1.4. Control ambiental de la escombrera.

El control ambiental de la escombrera se hará tomando en cuenta los siguientes criterios.

5.1.4.1. Barreras aislantes

Se cubrirá la base de la escombrera con geo membrana lo cual evitará que el drenaje ácido de mina haga contacto con los terrenos fuera de la escombra. Antes de la disposición del estéril al terreno, la parte superficial de terreno será cubierta por gravas de caliza lo cual permitirá reducir la acidez del agua cuando el estéril entre en contacto con la escorrentía y posteriormente drene al terreno.

5.1.4.2. Restauración de la capa vegetal y forestación.

La capa vegetal que será retirada del terreno para disponer el estéril estará dispuesta en un lugar cercano a la escombrera. A medida que se acumule y compacte el estéril la capa vegetal será restaurada donde progresivamente se realizará revegetación. Dentro de la escombrera también se harán reforestaciones a medida que se compacte y acumule los estériles, esta acción a largo plazo brindará estabilidad, control de erosión y derrumbes en la escombrera (cierre y restauración de escombrera).

5.2. Prueba de hipótesis.

Luego de analizar y discutir los resultados del proyecto de investigación de las hipótesis se comprobó:

- ❖ Que, el diseño de la escombrera es adecuado puesto que mediante la caracterización geotécnica tanto del terreno y del material estéril se comprobó que sus propiedades físicas y geotécnicas son óptimas para el diseño de la escombrera.
- ❖ Que, la elección del terreno es apropiada puesto que se consideraron criterios de delimitación y elección como: topografía, presencia de agua, agricultura, ganadería, distancia de acarreo.
- ❖ Que, el diseño de la escombrera es seguro ya que mediante análisis de estabilidad se demostró que tanto el terreno y la escombrera tienen factores de seguridad mayor a 1.
- ❖ Que, para el diseño de la escombrera se consideran controles ambientales tales como: barreras aislantes y restauración de la capa vegetal

CONCLUSIONES

Después de realizado el trabajo de investigación "Geotecnia aplicada al diseño de escombreras para las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L – Pachaconas, Antabamba", se concluye lo siguiente:

- ✓ La capacidad de la escombrera es de 9216.40 m³. Tomando en cuenta el volumen de estéril a depositar, la escombrera se ubica en la categoría de medianas a pequeñas.
- ✓ La capa vegetal está compuesta por suelos con un desarrollo pedogenético incipiente y se clasifican dentro del orden de los inceptisoles. Este tipo de material no se caracteriza geotécnicamente, serán retirados del terreno para la disposición del estéril y dispuestos en un lugar cercano a la escombrera para su posterior restauración.
- ✓ Para el análisis de estabilidad de la escombrera, se hicieron 5 calicatas de muestreo, los cuales fueron enviados al laboratorio de GEOFAL S.A.C., donde se efectuaron ensayos de laboratorio que sirvieron para la caracterización geotécnica y el modelamiento geotécnico de estabilidad del terreno y del material estéril que será depositado en la escombrera.
- ✓ La caracterización geotécnica el estéril presenta una granulometría gruesa uniforme, ángulo de fricción promedio 26.15°, cohesión promedio 0.153 kg/cm²=15kPa, densidad promedio 1.926 Tm/m³ y peso específico 23 KN/m³. Estas propiedades geotécnicas son buenas por lo que el terreno es considerado como estable.
- ✓ La caracterización geotécnica el material estéril presenta una granulometría gruesa uniforme, ángulo de fricción promedio 22°, cohesión promedio 0.306 kg/cm²=30 kPa, densidad promedio 2.344 Tm/m³ y peso específico 23

KN/m³. Estas propiedades geotécnicas son buenas por lo que el material estéril es considerado como estable.

- ✓ Se diseñó de la escombrera de tipo cuña - trapezoidal, con una inclinación de talud de 1.3:1, altura de 43 m, plataforma superior 25 m X 5 m y 40 m de base.
- ✓ Tomando en cuenta los resultados de la clasificación de la escombrera según en INESTEC, se puede concluir que la escombrera tiene una estabilidad tipo II por lo tanto el riesgo de rotura es bajo y la estabilidad es buena para el diseño e implantación de la escombrera.
- ✓ Para el modelamiento de estabilidad de la escombrera se utilizó el programa GeoStudio 2012-SLOPE/W, los análisis fueron mediante el método Bishop y el método Spencer. El modelamiento del terreno y del estéril se hicieron con un análisis estático y análisis pseudo-estático.
- ✓ El modelamiento de estabilidad del terreno arrojó un factor de seguridad mínimo de 2.149 (método Bishop) y 1.955 (método Spencer) con un análisis estático, al aplicarle cargas sísmicas arrojó un factor de seguridad mínimo de 1.020 (método Bishop) y 1.087 (método Spencer) con un análisis pseudo-estático. Estos factores de seguridad están por encima del factor de seguridad recomendado que es de 1.2 (para un análisis estático) para este tipo de escombreras. Por lo cual se concluye que el terreno que se presenta es estable.
- ✓ El modelamiento de estabilidad del material la escombrera arrojó un factor de seguridad mínimo de 1.449 (método Bishop) y 1.346 (método Spencer) con un análisis estático, al aplicarle cargas sísmicas arrojó un factor de seguridad mínimo de 1.023 (método Bishop) y 0.989 (método Spencer) con un análisis pseudo-estático. Estos factores de seguridad están por encima del factor de seguridad recomendado que es de 1.2 (para un análisis estático) para este tipo

de escombreras. De ocurrir un movimiento sísmico la escombrera, ante ello se propone la construcción de soportes para mejorar más la estabilidad del terreno.

- ✓ El modelamiento de estabilidad de la escombrera reforzada arrojó un factor de seguridad mínimo de 1.840 (método Bishop) y 1.733 (método Spencer) con un análisis estático, al aplicarle cargas sísmicas arrojó un factor de seguridad mínimo de 1.330 (método Bishop) y 1.485 (método Spencer) con un análisis pseudo-estático. Estos factores de seguridad están por encima del factor de seguridad recomendado que es de 1.2 (para un análisis estático) para este tipo de escombreras. Los soportes mejoraron notablemente la estabilidad de la escombrera, aun asumiendo un escenario de movimiento sísmico.
- ✓ Los criterios de seguridad de la escombrera son la construcción dos muros de contención con la finalidad de estabilizar el terreno, estos muros serán construidos antes de la evacuación del estéril. Se construirá dos drenes perimetrales uno al pie de la escombrera y otro en la plataforma de la parte superior de la escombrera, estos permitirán la recolección de las aguas de escorrentía, el cual evitara la erosión de la base del talud por efecto del agua, al mismo tiempo las aguas de escorrentía se canalizarán al riachuelo más cercano.
- ✓ Para el control ambiental se utilizará geomembrana a lo largo del muro de contención en la base de la escombrera, otra alternativa es el uso de caliza a lo largo del terreno y finalmente la restauración de la capa vegetal y forestación de la escombrera a medida que la escombrera se incremente en tamaño y logre compactarse.

RECOMENDACIONES.

Una vez realizada la investigación "Geotecnia aplicada al diseño de escombreras para las labores mineras del grupo AMAPA S.R.L – Pachaconas, Antabamba", se recomienda lo siguiente:

- Realizar un levantamiento topográfico de las zonas cercanas al límite de la explotación, para así tener un conocimiento más detallado de las condiciones topográficas del terreno.
- Depositar en la escombrera materiales de apertura de labores mineras, plataformas de trabajo y trabajos que ocasionen movimiento de material.
- Construir los drenes perimetrales de acuerdo a lo especificado en el diseño, para que se garantice el drenaje superficial de las escombreras.
- Hacer un estudio detallado de costos y presupuestos para la implementación del diseño de la escombrera, ya que la presente investigación tiene como finalidad proponer un diseño de escombrera tomando en consideración los conocimientos geotécnicos.
- Hacer un estudio más detallado para el control ambiental de la escombrera y de la unidad minera Minaspata.
- Buscar aliados estratégicos como la Dirección Regional de Energía y Minería – Apurímac, autoridades locales y regionales y la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, con la finalidad de proponer el presente trabajo de investigación en las distintas unidades mineras de pequeña minería y minería artesanal, para el plan de manejo de escombreras.

BIBLIOGRAFÍA

1. Actis (2008). ESCOMBRERAS “Ubicación, estabilidad y contaminación ambiental”. Buenos Aires, Argentina.
2. Alva H. J., (2005), *Ensayos de Laboratorio*, Lima, Perú. Plataforma de investigación Católica.
3. Andalué Ambiental Ltda., (2007), *Remediación de suelos proyecto reparación y rehabilitación vía férrea Arica*, Visviri, Chile. Revista Codelco.
4. Arteaga. J. C. (2006). Geología y Geotecnia del Área de las Obras de Derivación del Proyecto de Optimización del Sistema de Relaves de la Mina Andaychagua. Lima, Perú. Revista Rumbo Minero.
5. Aruntani, (2013), *Control y mitigación de los efectos de la actividad*, Lima, Perú. Revista Rumbo Minero.
6. Carreño O. & Juan C. (2008). *Diseño de Escombreras de la Mina de Roca Fosfática (concesión riecito), Cerro Riecito*, Caracas, Venezuela. Portal de investigación caracas.
7. Cenzano Flores C. J., (2015), *Acciones de supervisión minera en la región Pasco*. Lima, Perú. Revista Rumbo Minero.
8. Cervantes R. E. (2014). Catálogo de Equipos del Laboratorio de Geotecnia. México. Artículo web: Universidad Vera Cruz.
9. Cisneros, J., (2003), *Diseño de explotación a cielo abierto*, Quito, Ecuador. Editorial Quito, edición 2008.
10. Cometa T. S. & Mendez N. (2016). Correlación entre los resultados obtenidos en el ensayo. Editorial Lanus.
11. García, H. F., (2006), *Estudios Geotécnicos*, Huesca, España. Editorial Madrid, 3ra edición.

12. Gonzáles, V. L., (2002), *Ingeniera Geológica*, Madrid, España. Editorial Madrid.
13. Hita J. M. (2007). Estudio para la Implantación de un Sistema de “Codisposición” de Residuos Mineros. Bogota, Colombia. Ministerio de minería Colombia.
14. INECO (2013), *Instrucciones Generales para trabajos de Geología-Geotecnia*. Madrid, España. Editorial Madrid.
15. López, J. C., (S.A), *Manual de peroración y voladura de rocas*. Editorial López J. edición 2003.
16. López, P. G., (2010), *Introducción al Uso del Programa Slope/W 2007*. Editorial universidad de Córdoba.
17. Mamani P.– Compañía Minera Antamina (2011). Construcción de botaderos de gran altura. Lima, Perú. Artículo de investigación web: Antamina.
18. Matteis, A. F., (2003), *Geología y Geotecnia: “Estabilidad de Taludes”*, Argentina. Portal Web.
19. Minera Santa Rosa – Mina Aruntani S.A.C (2006). “Plan de Cierre de la Mina Aruntani S.A.C. – Minera Santa Rosa”. Lima, Perú. Revista informativa Aruntani 5ta edición.
20. Ministerio de transporte y comunicaciones (2016). Manual de Ensayo de Materiales. Lima, Perú. Editorial Ministerio de Transporte.
21. Montoya M. I. (2012). Inicio de operaciones mina en el tajo abierto Coimolache. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Revista Rumbo Minero.
22. Orbis T. (2010). Catálogo de Ensayos del Laboratorio de Geotecnia, Materiales, Restauración y Rocas Ornamentales. Madrid, España. Documento web.
23. Oswaldo O. S., Godelia Canchari S. y Mauro Giraldo P. – UNMSM (2011). Diseño de Disposición Conjunta de Relaves y Desmonte en la Mina Yauricocha. Lima, Perú. Revista informativa Yahuricocha.

24. Paihua G. T. (2010). Diseño de minas a tajo abierto. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Plataforma de investigación UNI.
25. Pedroza R. A. (2014). Algunos aportes de la geotecnia a la práctica minera. Santiago, Chile. Revista BHP-Billintong, 6ta edición.
26. Piña, A. B., (2014), *Escombreras*, Caracas, Venezuela. Portal de investigación caracas.
27. Robles B. D. (2014). Estudio de Suelos. Mariño, Venezuela. Editorial Caracas.
28. Saez, E., (2010), *Fundamentos de Geotecnia ICE-1603*, Santiago de Chile, Chile. Revista Codelco.
29. Salomón M. O. (2011). Impacto ambiental producido por los botaderos de desmonte y pads de lixiviación en la Mina Santa Rosa de Puno. Tacna, Perú. Revista Rumbo Minero.
30. Verruijt, A., (1995), *Computational Geomechanics*, Boston, Estados Unidos. Artículo científico en la web.
31. Villanueva M. & E. L (2012). Caracterización Geotécnica y Diseño de Botaderos en Mina. Lima, Perú. Revista informativa Yanacocha.

ANEXOS



Anexo I: Plano de ubicación de la unidad minera Minaspata (AMAPA S.R.L)

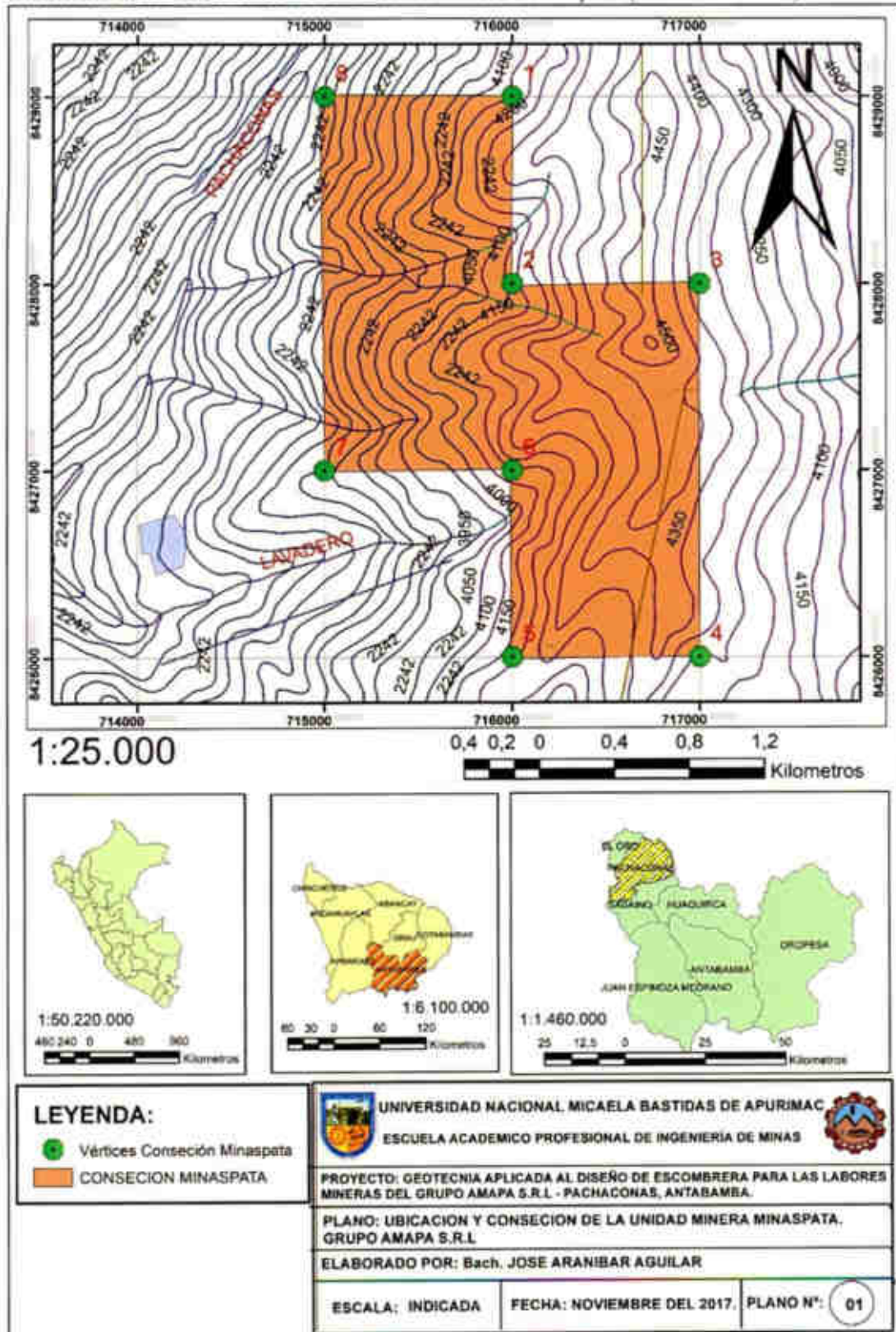


Figura VI.1: Plano de ubicación de la unidad minera Minaspata (AMAPA S.R.L)
 Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2: Plano de ubicación y área para el diseño de la escombrera.

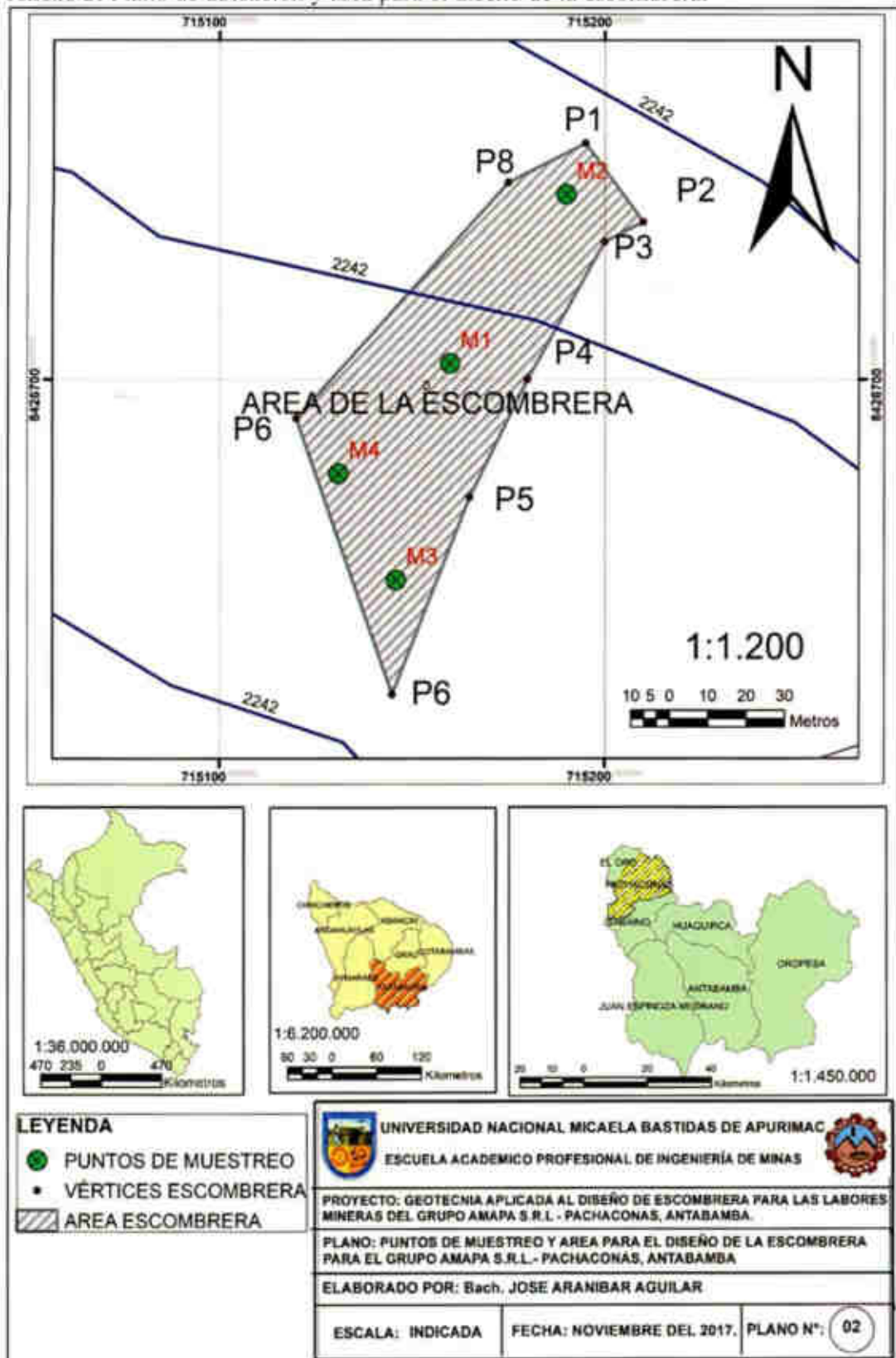


Figura VI.2: Plano de ubicación y área para el diseño de la escombrera.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Trabajo en campo.



Figura VI.3:(Parte superior) Calicata de muestreo en el punto central y panorama de evacuación indiscriminada de material estéril. : (Parte inferior) : Identificación de muestras y calicata de muestreo del material estéril
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Reporte de laboratorio *GEOFAL S.A.C.*



ESTUDIO DE SUELOS PARA EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: "GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L – PACHACONAS, ANTABAMBA".



A SOLICITUD DE: JOSE ARANIBAR AGUILAR.
UBICACIÓN DEL PROYECTO: U.M. MINASPATA
Distrito de Pachaconas
Provincia de Antabamba
Departamento de Apurímac

Octubre, 2017


CECILIA LINARES
INGENIERA CIVIL
TUS 12012004

WEB: www.geofal.com.pe E-MAIL: laboratorio@geofal.com.pe / geofal.sac@gmail.com
Av. Marañón N° 763, Los Olivos – Lima / Teléfono 01 522-1834

*Figura VI.4: Reporte de laboratorio GEOFAL S.A.C.
Fuente: GEOFAL S.A.C.*

INDICE

| | |
|-----------------------------------|---|
| 1. GENERALIDADES | 3 |
| 1.1. Antecedentes | 3 |
| 1.2. Objetivo del estudio | 3 |
| 1.3. Normatividad | 3 |
| 2. RECEPCIÓN DE MUESTRAS | 4 |
| 2.1. Detalles de las muestras: | 4 |
| 3. ENSAYO DE LABORATORIO | 5 |
| 3.1. Ensayos estándar | 5 |
| 3.2. Ensayos especiales | 5 |
| 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 6 |
| 4.1. Conclusiones | 6 |
| 4.2. Recomendaciones | 7 |
| 5. REFERENCIAS | 7 |

FIGURA

| | |
|------------|-----------------------------|
| ANEXO I: | PLANOS |
| ANEXO II: | INVESTIGACIONES GEOTECNICAS |
| ANEXO III: | ENSAYOS DE LABORATORIO |
| ANEXO V: | PANEL FOTOGRAFICO |



INGENIERA CIVIL
C.O. Nº 11720

Estudio de suelos para el proyecto de investigación: "GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L. - PACHACONAS, ANTABAMBA".

(Continua Figura.VI.4)

2. RECEPCIÓN DE MUESTRAS.

El 25 de octubre al promediar las 16:50 horas se recogieron las muestras en la agencia de viajes de la empresa Internacional Palomino ubicado en Javier Luna Pizarro 335, Cercado de Lima. Las muestras fueron enviados de Abancay, Apurímac y a nombre de Jose Arantizar Aguilar.

2.1. Detalles de las muestras:

Las muestras se recogieron con las siguientes características.

| Muestras para Ensayo de Laboratorio de Suelos para el Proyecto "GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L – PACHACONAS, ANTABAMBA". | | | | |
|--|---|-------------|--------------------|-----------------------------------|
| NOMBRE DE MUESTRA | DETALLE - REFERENCIA | PROFUNDIDAD | PESO DE LA MUESTRA | COORDENADAS UTM - WGS84 |
| MCPT-001 | Muestra de Calicata Principal del Terreno: Muestra de la plataforma principal para el diseño de escombrera. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 2.5 m | 35 Kg | N: 8426586 E:715260 Z: 3719 |
| MCT-002 | Muestra de Calicata del Terreno: Muestra de los vértices-esquinas de la plataforma principal para el diseño de la escombrera. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 2 m | 25 Kg | N: 8426587 E:715273 Z: 3724 |
| MCT-003 | Muestra de Calicata del Terreno: Muestra de los vértices-esquinas de la plataforma principal para el diseño de la escombrera. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 2 m | 25 Kg | N: 8426618 E:715265 Z: 3723 |
| MCT-004 | Muestra de Calicata del Terreno: Muestra de los vértices-esquinas de la plataforma principal para el diseño de la escombrera. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 1.8 m | 18 Kg | N: 8426561 E:715251 Z: 3715 |
| MCEN-001 | Muestra de Calicata - Estaril de Mina: Muestra de la escombrera representativa de las labores de AMAPA. Debidamente cuarteada, identificada y hermetizada (Embalado). | 1.8 m | 30 Kg | N: 8426669 E:715231 Z: 3717 |

Estudio de suelos para el proyecto de investigación: "GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L – PACHACONAS, ANTABAMBA".

(Continúa Figura.VI.4)

Cuadro N.º 07
Resumen de los ensayos Próctor de suelo (ASTM D - 1557)

| Muestra | Profundidad | Densidad Máxima [g/cm³] | Humedad Óptima (%) |
|----------|-------------|-------------------------|--------------------|
| MOPF-001 | 2.5 m | 1.880 | 9.534 |
| MCT-002 | 2 m | 1.942 | 5.538 |
| MCT-003 | 2 m | 1.964 | 1.315 |
| MCT-004 | 1.8 m | 1.856 | 9.828 |
| MCEM-001 | 1.8 m | 2.300 | 14.139 |

Los certificados de los ensayos de Proctor modificado se presentan en el Anexo III

Ensayo de Corte Directo

A la muestra alterada obtenida de la calicata C-1, se realizó el ensayo de corte directo para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. Dicho ensayo se realizó sobre una muestra remodelada a la densidad de campo. Para la determinación de los parámetros mecánicos se realizaron según la norma: Corte directo ASTM-D 3080.

| Muestra | Profundidad | cohesión (kg/cm²) | Angulo de fricción (°) |
|----------|-------------|-------------------|------------------------|
| MOPF-001 | 2.5 m | 0.142 | 27.3 |
| MCT-002 | 2 m | 0.159 | 25.2 |
| MCT-003 | 2 m | 0.164 | 25.8 |
| MCT-004 | 1.8 m | 0.147 | 26.3 |
| MCEM-001 | 1.8 m | 0.306 | 22 |

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se cumplió con lo solicitado, puesto que se reporta en el presente informe los resultados debidamente detallados.
- Las condiciones en las que fueron enviadas las muestras facilitaron con el trabajo de laboratorio por lo que los resultados tienen mayor validez.



ESTELINA LAYME
 INGENIERA CIVIL
 C.O. Nº 171204

Estudio de suelos para el proyecto de Investigación: "GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBREERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L. - PACHACONAS, ANTABAMBA".

(Continúa Figura.VI.4)

4.2. Recomendaciones

- Los resultados del presente estudio son recomendados solo para la zona investigada, y respaldada ningún otro lugar, ni tipo de obra diferente a las estudiadas.
- La interpretación de los resultados se deben hacer previo conocimiento de los fundamentos de geotecnia.

5. REFERENCIAS

1. Terzaghi, K. Y R. B. Peck (1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley, New York.
2. Vesic, A. (1973), "Análisis de la Capacidad de Carga de Cimentaciones Superficiales", JOMFD, ASCE, Vol 99.
3. Roy Whitlow Fundamentos de la Mecánica de Suelos, 2da edición Bristol, Julio de 1989.
4. Braja M. Das, Fundamentos de Ingeniería de geotécnica, 1ra edición, México – 2001.
5. Braja M. Das, Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones – Séptima edición - 2011
6. Delgado Vargas, Manuel, Ingeniería de cimentaciones-Fundamentos e Introducción al análisis geotécnico, 2da edición, México - 1996.
7. Lambe, T.W. & Whitman, R.V., Mecánica de suelos, 7ma edición, México – 1990.
8. Reglamento Nacional de Edificaciones (2003), "Norma E-050 de Suelos y Cimentaciones", Lima – Perú.
9. Reglamento Nacional de Edificaciones (2006), "Norma Técnica de Edificaciones E-030-Diseño Sísmorresistente", Lima – Perú.
10. Crespo Villalaz, Mecánica de suelo y cimentaciones sexta edición.

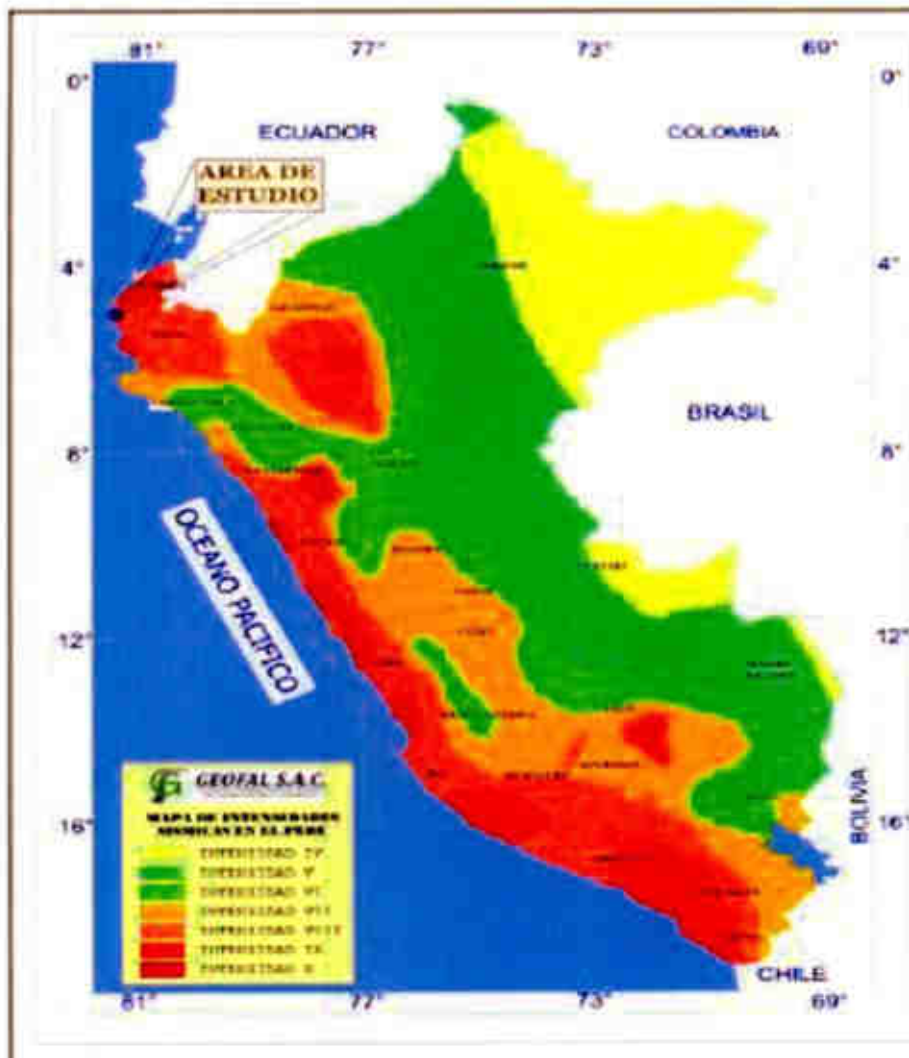


COAGUAYLA
INGENIERA CIVIL
CUI: 114 47 12124

Estudio de suelos para el proyecto de investigación: "GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRENAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L – PACHACONAS, ANTABAMBA".

(Continúa Figura.VI.4)

ANEXO I – Mapa de sismicidad a nivel nacional



[Signature]
 ING. COCA LIMA
 INGENIERIA CIVIL
 TALLER AP 02008

Estudio de suelos para el proyecto de investigación: "GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRETERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L - PACHACONAS, ANTARUMBA"

(Continua Figura.VI.4)

ANEXO II – “ENSAYOS DE LABORATORIO”

ANÁLISIS MECÁNICO POR TAMIZADO

(ASTM D-422)

SOLICITANTE: JOSE ARANIBAR AGUILAR

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS PARA EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: “GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L – PACHACONAS, ANTABAMBA”.

UBICACIÓN: PACHACONAS, ANTABAMBA – APURÍMAC.

FECHA: 28 octubre-2017

REGISTRO: 217-28/JAA01

REALIZADO: J.G.C.

REVISADO: Ing. I.C.I.



| Muestra | | MCPT-001 | | | Muestra | | MCT-002 | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|----------|-------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------|--------|------------|------|--|--|
| Profundidad | | 2.5 m | | | Profundidad | | 2 m | | | | | |
| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO | PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%) | Malla | mm. | % que Pasa | ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO | PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%) | Malla | mm. | % que Pasa | | | |
| | | Tamiz | | | | | | Tamiz | | | | |
| | | 3" | 76.2 | 100 | | | | 3" | 76.2 | 100 | | |
| | | 2" | 50.8 | 99.5 | | | | 2" | 50.8 | 99.8 | | |
| | | 1 1/2" | 38.1 | 99.1 | | | | 1 1/2" | 38.1 | 99.8 | | |
| | | 1" | 25.4 | 98.5 | | | | 1" | 25.4 | 98.3 | | |
| | | 3/4" | 19.05 | 96.4 | | | | 3/4" | 19.05 | 96.1 | | |
| | | 3/8" | 9.525 | 60.7 | | | | 3/8" | 9.525 | 59.8 | | |
| | | No#4 | 4.75 | 57.8 | | | | No#4 | 4.75 | 55.2 | | |
| | | 8 | 2.36 | 38.9 | | | | 8 | 2.36 | 39.6 | | |
| | | 16 | 1.19 | 33.7 | | | | 16 | 1.19 | 35.6 | | |
| | | 30 | 0.6 | 31.8 | | | | 30 | 0.6 | 31.3 | | |
| 40 | 0.42 | 29.6 | | 40 | 0.42 | 29.3 | | | | | | |
| 50 | 0.3 | 27.6 | | 50 | 0.3 | 28.4 | | | | | | |
| 100 | 0.149 | 24.7 | | 100 | 0.149 | 26.7 | | | | | | |
| 200 | 0.074 | 4.3 | | 200 | 0.074 | 4.8 | | | | | | |
| RESUMEN - RESULTADOS | | | | RESUMEN - RESULTADOS | | | | | | | | |
| % GRAVA | 42.2 | 39.2 | D10 | mm | % GRAVA | 44.7 | 40.7 | D10 | mm | | | |
| | | Fina | 2.9 | | | | Fina | 4.3 | | | | |
| | | Gruesa | 2 | D30 | mm | | | Gruesa | 0.9 | | | |
| % ARENA | 53.5 | 26.2 | | | % ARENA | 50.5 | 25.1 | | | | | |
| | | Media | 25.2 | D60 | mm | | | Media | 25.1 | | | |
| | | Fina | 25.2 | | | | Fina | 25.5 | | | | |
| % FINO | 4.3 | | | | % FINO | 4.8 | | | | | | |
| Clasificación | SUCS (ASTM D-3282) | | | GW | Clasificación | SUCS (ASTM D-3282) | | | GW | | | |
| Clasificación | SUCS (ASTM D-2487) | | | A-2 | Clasificación | SUCS (ASTM D-2487) | | | A-1 | | | |

| Muestra | | MCT-003 | | | Muestra | | MCEM-003 | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|---------|-------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------|--------|------------|------|--|--|
| Profundidad | | 2 m | | | Profundidad | | 1.8 m | | | | | |
| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO | PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%) | Malla | mm. | % que Pasa | ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO | PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%) | Malla | mm. | % que Pasa | | | |
| | | Tamiz | | | | | | Tamiz | | | | |
| | | 3" | 76.2 | 100 | | | | 3" | 76.2 | 100 | | |
| | | 2" | 50.8 | 100 | | | | 2" | 50.8 | 100 | | |
| | | 1 1/2" | 38.1 | 99.7 | | | | 1 1/2" | 38.1 | 100 | | |
| | | 1" | 25.4 | 98.5 | | | | 1" | 25.4 | 95.3 | | |
| | | 3/4" | 19.05 | 97.3 | | | | 3/4" | 19.05 | 88.4 | | |
| | | 3/8" | 9.525 | 61.4 | | | | 3/8" | 9.525 | 61.3 | | |
| | | No#4 | 4.75 | 52.2 | | | | No#4 | 4.75 | 52.5 | | |
| | | 8 | 2.36 | 41.2 | | | | 8 | 2.36 | 36.6 | | |
| | | 16 | 1.19 | 33.2 | | | | 16 | 1.19 | 32.4 | | |
| | | 30 | 0.6 | 32.6 | | | | 30 | 0.6 | 29.2 | | |
| 40 | 0.42 | 31.7 | | 40 | 0.42 | 25.7 | | | | | | |
| 50 | 0.3 | 30.5 | | 50 | 0.3 | 23.6 | | | | | | |
| 100 | 0.149 | 22.5 | | 100 | 0.149 | 16.5 | | | | | | |
| 200 | 0.074 | 5.8 | | 200 | 0.074 | 14.3 | | | | | | |
| RESUMEN - RESULTADOS | | | | RESUMEN - RESULTADOS | | | | | | | | |
| % GRAVA | 47.8 | 38.5 | D10 | mm | % GRAVA | 47.5 | 38.7 | D10 | mm | | | |
| | | Fina | 9.2 | | | | Fina | 8.8 | | | | |
| | | Gruesa | 3.2 | D30 | mm | | | Gruesa | 2.1 | | | |
| % ARENA | 46.4 | 19.3 | | | % ARENA | 38.2 | 24.7 | | | | | |
| | | Media | 25.9 | D60 | mm | | | Media | 24.7 | | | |
| | | Fina | 25.9 | | | | Fina | 11.4 | | | | |
| % FINO | 5.8 | | | | % FINO | 14.3 | | | | | | |
| Clasificación | SUCS (ASTM D-3282) | | | GP | Clasificación | SUCS (ASTM D-3282) | | | GP | | | |
| Clasificación | SUCS (ASTM D-2487) | | | A-1 | Clasificación | SUCS (ASTM D-2487) | | | A-1 | | | |

Estudio de suelos para el proyecto de investigación: “GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L – PACHACONAS, ANTABAMBA”.

(Continua Figura.VI.4)

**ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO
(ASTM D-1557)**

SOLICITANTE: JOSE ARANIBAR AGUILAR

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS PARA EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: "GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS PARA LAS LABORES MINERA DEL GRUPO AMAPA S.R.L - PACHACONAS, ANTABAMBA".

UBICACIÓN: PACHACONAS, ANTABAMBA - APURÍMAC

FECHA: 25 octubre 2017

REGISTRO: 217-28/JA01

REALIZADO: J.G.C.

REVISADO: Ing

| Muestra | MCPT-001 | Profundidad | 2.5 m | Muestra | MCT-002 | Profundidad | 2 m |
|---------------------------------------|----------|-------------|-------|---------------------------------------|---------|-------------|-------|
| Compacción | | | | | | | |
| Prueba Nº | 1 | 2 | | Prueba Nº | 1 | 2 | |
| Número de capas | 5 | 5 | | Número de capas | 5 | 5 | |
| Número de golpes | 25 | 25 | | Número de golpes | 25 | 25 | |
| Peso suelo + molde (gr.) | 6315 | 6494 | | Peso suelo + molde (gr.) | 6321 | 6460 | |
| Peso molde (gr.) | 4340 | 4340 | | Peso molde (gr.) | 4340 | 4340 | |
| Peso suelo compactado (gr.) | 1975 | 2154 | | Peso suelo compactado (gr.) | 1981 | 2120 | |
| Volumen del molde (cm ³) | 956 | 956 | | Volumen del molde (cm ³) | 956 | 956 | |
| Densidad húmeda (gr/cm ³) | 2.066 | 2.253 | | Densidad húmeda (gr/cm ³) | 2.072 | 2.218 | |
| Humedad (%) | | | | | | | |
| Tara Nº | 1 | 2 | | Tara Nº | 1 | 2 | |
| Tara + suelo húmedo (gr.) | 310.6 | 451.3 | | Tara + suelo húmedo (gr.) | 324 | 443.8 | |
| Tara + suelo seco (gr.) | 315.4 | 424.8 | | Tara + suelo seco (gr.) | 318.35 | 431.5 | |
| Peso de agua (gr.) | 5.2 | 26.5 | | Peso de agua (gr.) | 5.85 | 10.3 | |
| Peso de tara (gr.) | 225.4 | 225.4 | | Peso de tara (gr.) | 225.4 | 225.4 | |
| Peso de suelo seco (gr.) | 90 | 199.4 | | Peso de suelo seco (gr.) | 92.55 | 206.1 | |
| Humedad (%) | 5.8 | 13.3 | | Humedad (%) | 6.3 | 5.0 | |
| Volumen del molde (cm ³) | 48.2 | 105.31 | | Volumen del molde (cm ³) | 48.2 | 105.31 | |
| Densidad Secca (gr/cm ³) | 1.866 | 1.895 | | Densidad Secca (gr/cm ³) | 1.928 | 1.957 | |
| Muestra | MCT-003 | Profundidad | 2 m | Muestra | MCT-004 | Profundidad | 1.8 m |
| Compacción | | | | | | | |
| Prueba Nº | 1 | 2 | | Prueba Nº | 1 | 2 | |
| Número de capas | 5 | 5 | | Número de capas | 5 | 5 | |
| Número de golpes | 25 | 25 | | Número de golpes | 25 | 25 | |
| Peso suelo + molde (gr.) | 6324 | 6490 | | Peso suelo + molde (gr.) | 6333.7 | 6441.2 | |
| Peso molde (gr.) | 4340 | 4340 | | Peso molde (gr.) | 4340 | 4340 | |
| Peso suelo compactado (gr.) | 1984 | 2150 | | Peso suelo compactado (gr.) | 1993.7 | 2103.2 | |
| Volumen del molde (cm ³) | 956 | 956 | | Volumen del molde (cm ³) | 956 | 956 | |
| Densidad húmeda (gr/cm ³) | 2.075 | 2.349 | | Densidad húmeda (gr/cm ³) | 2.085 | 2.200 | |
| Humedad (%) | | | | | | | |
| Tara Nº | 1 | 2 | | Tara Nº | 1 | 2 | |
| Tara + suelo húmedo (gr.) | 371.5 | 439 | | Tara + suelo húmedo (gr.) | 315.4 | 418 | |
| Tara + suelo seco (gr.) | 320.4 | 435.9 | | Tara + suelo seco (gr.) | 309.4 | 432.9 | |
| Peso de agua (gr.) | 3.1 | 3.1 | | Peso de agua (gr.) | 6.35 | 25.1 | |
| Peso de tara (gr.) | 225.4 | 225.4 | | Peso de tara (gr.) | 225.4 | 225.4 | |
| Peso de suelo seco (gr.) | 95 | 210.5 | | Peso de suelo seco (gr.) | 84 | 207.5 | |
| Humedad (%) | 3.2 | 1.5 | | Humedad (%) | 7.6 | 12.1 | |
| Volumen del molde (cm ³) | 48.2 | 105.31 | | Volumen del molde (cm ³) | 48.2 | 105.31 | |
| Densidad Secca (gr/cm ³) | 1.970 | 1.999 | | Densidad Secca (gr/cm ³) | 1.824 | 1.970 | |

| Muestra | MCIM-001 | Profundidad | 1.8 m |
|---------------------------------------|----------|-------------|-------|
| Compacción | | | |
| Prueba Nº | 1 | 2 | |
| Número de capas | 5 | 5 | |
| Número de golpes | 25 | 25 | |
| Peso suelo + molde (gr.) | 6646.4 | 6750.4 | |
| Peso molde (gr.) | 4340 | 4340 | |
| Peso suelo compactado (gr.) | 2306.4 | 2410.4 | |
| Volumen del molde (cm ³) | 956 | 956 | |
| Densidad húmeda (gr/cm ³) | 2.413 | 2.521 | |
| Humedad (%) | | | |
| Tara Nº | 1 | 2 | |
| Tara + suelo húmedo (gr.) | 350.9 | 504.2 | |
| Tara + suelo seco (gr.) | 335.7 | 468.9 | |
| Peso de agua (gr.) | 15.2 | 35.3 | |
| Peso de tara (gr.) | 225.4 | 225.4 | |
| Peso de suelo seco (gr.) | 110.3 | 243.5 | |
| Humedad (%) | 13.8 | 14.5 | |
| Volumen del molde (cm ³) | 48.2 | 105.31 | |
| Densidad Secca (gr/cm ³) | 2.287 | 2.401 | |



Estudio de suelos para el proyecto de investigación: "GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L - PACHACONAS, ANTABAMBA".

(Continua Figura.VI.4)

ANEXO II - FOTOGRAFIAS



Estudio de suelos para el proyecto de investigación: ****GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRERAS PARA LAS LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L - PACHACONAS, ANTADAMBA****

Fuente: GEOFAL S.A.C

Anexo 5: Modelamiento de la escombrera.

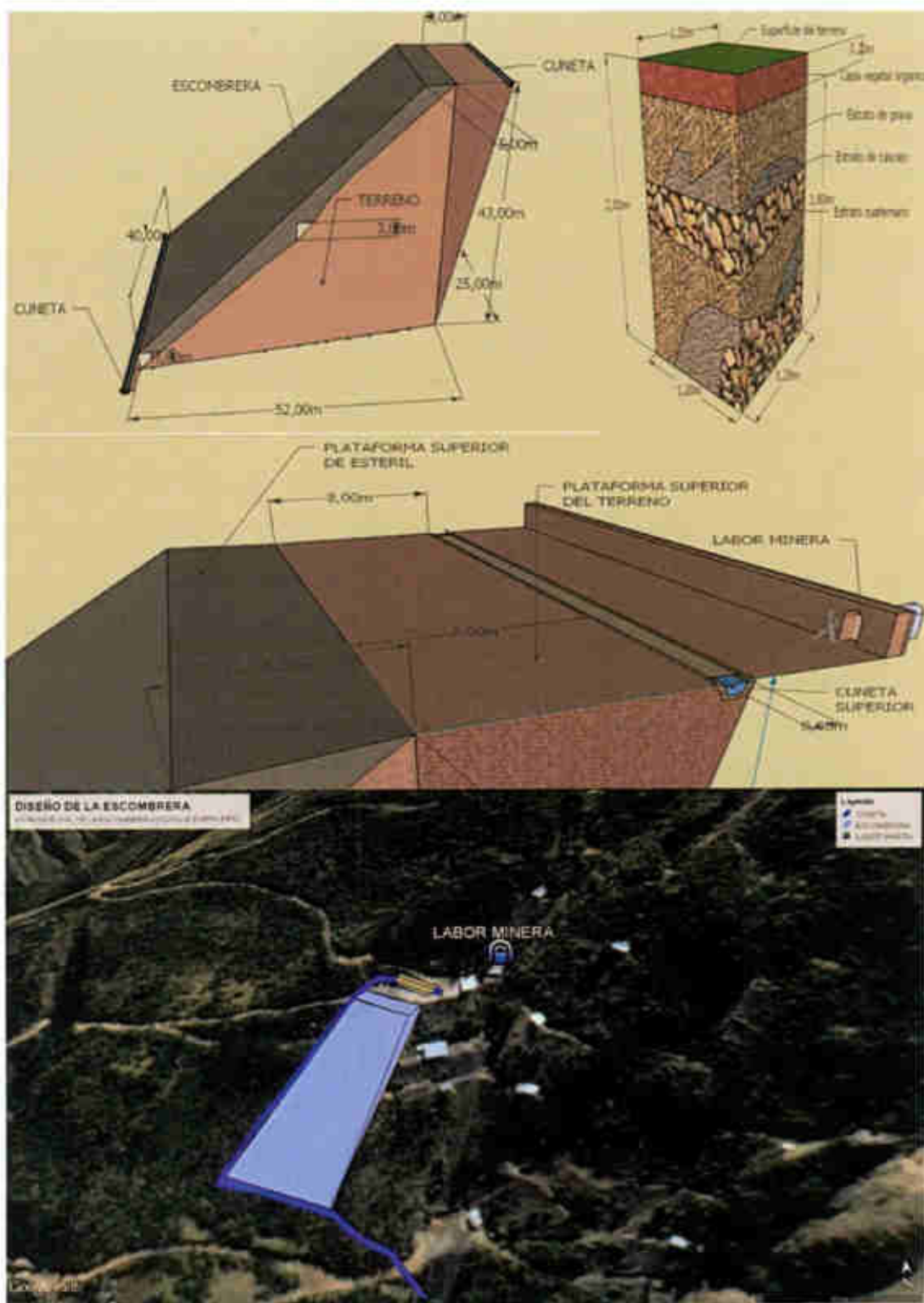


Figura VI.5: (Arriba) Modelamiento de la escombrera y columna estratigráfica de la calicata. (Medio) Cuneta en la parte superior de la escombrera. (Abajo) Modelamiento de la escombrera en Google Earth Pro.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6: Copia de seguridad y certificado de modelación en GeoStudio – SLOP/W.

Slip Slices

| | X (m) | Y (m) | PWP (KPA) | Base Normal Stress (KPA) | Frictional Strength (KPA) | Cohesive Strength (KPA) |
|----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Slice 1 | 22,713657 | 22,841598 | 14,897971 | 14,277379 | -0,27093688 | 30 |
| Slice 2 | 23,122901 | 22,898311 | 18,159041 | 20,588922 | 0,98092732 | 30 |
| Slice 3 | 23,552144 | 22,967694 | 21,295853 | 26,6283 | 2,1544484 | 30 |
| Slice 4 | 23,971588 | 23,049956 | 24,306562 | 32,365335 | 3,2559557 | 30 |
| Slice 5 | 24,390631 | 23,145264 | 27,188936 | 37,808098 | 4,2904199 | 30 |
| Slice 6 | 24,809875 | 23,253948 | 29,940319 | 42,962546 | 5,2613214 | 30 |
| Slice 7 | 25,229119 | 23,376308 | 32,557594 | 47,830217 | 6,1705401 | 30 |
| Slice 8 | 25,648362 | 23,512712 | 35,087132 | 52,407953 | 7,0182672 | 30 |
| Slice 9 | 26,067606 | 23,665589 | 37,37473 | 56,667983 | 7,8029396 | 30 |
| Slice 10 | 26,486849 | 23,829435 | 39,565537 | 60,636239 | 8,5211968 | 30 |
| Slice 11 | 26,906093 | 24,010818 | 41,603962 | 64,295219 | 9,1678628 | 30 |
| Slice 12 | 27,325336 | 24,208357 | 43,48356 | 67,580886 | 9,7359514 | 30 |
| Slice 13 | 27,74458 | 24,42293 | 45,196888 | 70,4841 | 10,216697 | 30 |
| Slice 14 | 28,163824 | 24,655298 | 46,735327 | 72,970272 | 10,599606 | 30 |
| Slice 15 | 28,583067 | 24,906518 | 48,088851 | 74,999302 | 10,872928 | 30 |
| Slice 16 | 29,002311 | 25,17779 | 49,245738 | 76,525493 | 11,021736 | 30 |
| Slice 17 | 29,421554 | 25,47092 | 50,192188 | 77,497359 | 11,032005 | 30 |
| Slice 18 | 29,840798 | 25,786378 | 50,911809 | 77,857257 | 10,886668 | 30 |
| Slice 19 | 30,260041 | 26,127373 | 51,384939 | 77,540703 | 10,567615 | 30 |
| Slice 20 | 30,679285 | 26,495936 | 51,587698 | 76,475198 | 10,055203 | 30 |
| Slice 21 | 31,098529 | 26,895009 | 51,49065 | 74,57822 | 9,3279841 | 30 |
| Slice | 31,517772 | 27,328541 | 51,056848 | 71,753919 | 8,3621603 | 30 |

File Information

File Version: 8.15

Created By: jose aranibar aguilar

Last Edited By: jose aranibar aguilar

Revision Number: 50

Date: 14/11/2017

Time: 9:25:23

Tool Version: 8.15.1.11236

File Name: ANALISI ESTATICO TERRENO.gsz

Directory: D:\TESIS JOSE ARANIBAR AGUILAR\DISEÑO\

Last Solved Date: 14/11/2017

Last Solved Time: 9:25:29

*Figura VI.6: Copia de seguridad y certificado de modelación en GeoStudio – SLOP/W.
Fuente. Elaboración propia.*

