

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Diseño de escombrera y centro de acopio para los estériles de mina de la concesión minera San Rafael, provincia de Santa Elena”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Nombre de la titulación
Ingeniero en Minas

Presentado por:

Andrés Díaz Valencia

Bryan José Rosado Zambrano

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres por el apoyo incondicional, puesto que son un soporte y motor para lograr mi objetivo, además, grandes consejos los cuales me han ayudado a crecer como persona y profesional.

Lo dedico especialmente a mi hermano Mathías por ser mi mayor motivación para nunca rendirme y ser esa persona por la cual me esfuerzo cada día más.

Andrés Díaz Valencia

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mis padres quienes son mis principales motivos de esfuerzo y dedicación diaria, por el apoyo incondicional que siempre he obtenido de ellos a lo largo de mi formación académica. A ellos que me han formado como una persona con valiosos principios de manera desinteresada, entregando todo por amor hacia mi persona.

A todas aquellas personas que nos apoyaron y guiaron para que este trabajo sea posible.

Bryan Rosado Zambrano

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a la “Asociación de mineros artesanales San Rafael” por permitirnos desarrollar el proyecto. A la MSc. Samantha Giménez por su ayuda y colaboración a lo largo del proyecto. A la universidad en general, maestros y compañeros por los conocimientos prestados a lo largo de nuestra formación profesional.

Autores

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Andrés Díaz Valencia y Bryan José Rosado Zambrano damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Andrés Díaz Valencia



Bryan José Rosado Zambrano

EVALUADORES

.....
MSc. Samantha Jiménez Olaya

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
MSc. Jesús Crespo Quintero

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este presente proyecto tiene como finalidad proponer un plan de cierre de mina para “La Asociación de mineros artesanales de San Rafael”, ubicado en la parroquia Chanduy, provincia de Santa Elena. La actividad minera en esta zona se viene realizando de manera desordenada, sin establecer una planificación en las operaciones, además, de no tener un criterio técnico para el plan de cierre y remediación ambiental.

Con este proyecto se propone un diseño de escombrera para los materiales estériles y capa vegetal, teniendo en consideración criterios técnicos y ambientales que faciliten la reutilización de estos materiales en la etapa de remediación y cierre minero. Se aprovecha el método de explotación a cielo abierto por descubiertas, empleado en la mina, con la finalidad facilitar la construcción de la escombrera, su planificación y remediación de los impactos ambientales ocasionados por la actividad minera.

Se estimaron los volúmenes de estériles y capa vegetal a remover en los 5 años previstos de explotación, siendo de 12,600 m³ y 2,037 m³ respectivamente. Además, se planificó la secuencia de construcción en los dos frentes de explotación y se sugiere como remediación la preparación de la capa vegetal para la siembra de 44,800 arbustos del tipo Chapra, especie forestal nativa de la zona, para la adecuación paisajística y minimización del impacto ambiental.

Palabras Claves: Escombrera, estériles, capa vegetal, remediación

ABSTRACT

This project aims to propose a mine closure plan for "La Asociación de mineros artesanales de San Rafael", located in Chanduy parish, Santa Elena province. Mining activity in this area has been carried out in a disorderly manner, without establishing planning in operations, also, of not having a technical criterion for the environmental closure and remediation plan.

This project proposes a design of the waste dump for the waste and topsoil, taking into consideration technical and environmental criteria that facilitate the reuse of these materials in the mine remediation and closure stage. The open-pit exploitation method used in the mine is used to facilitate the construction of the dump, its planning, and remedy the environmental impacts caused by the mining activity.

The volumes of waste materials and topsoil to be removed in the planned 5 years of exploitation were estimated, being 12,600 m³ and 2,037 m³ respectively, besides, the construction sequence was planned on the two exploitation fronts and the preparation of the topsoil for the planting of 44,800 Chapra-type shrubs, a native forest species in the area, for landscape adaptation and minimization of environmental impact.

Keywords: Waste dump, waste, topsoil, remediation.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
ÍNDICE GENERAL	9
ABREVIATURAS.....	¡Error! Marcador no definido.
SIMBOLOGÍA	12
ÍNDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
ÍNDICE DE PLANOS.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 1.....	15
1. Introducción	15
1.1 Descripción del problema	16
1.2 Justificación del problema	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 Marco Teórico	17
1.4.1 Fases de un proyecto minero	17
1.4.2 Escombreras.....	20
1.4.3 Tipos de estériles mineros	21
1.4.4 Lugar de emplazamiento	25
CAPÍTULO 2.....	27
2. METODOLOGÍA	27
2.1 Etapa 1: Recolección de datos.....	27

2.1.1	Geomorfología	29
2.1.2	Elementos de orientación del yacimiento.....	29
2.1.3	Propiedades físicas y químicas.....	30
2.1.4	Volúmenes de material estéril y vegetal	30
2.2	Etapa 2: Procesamiento de datos	31
2.2.1	Condiciones de la explotación.....	32
2.3	Etapa 3: Diseño y construcción de escombreras	33
2.3.1	Forma de las escombreras	33
2.3.2	Altura máxima.....	34
2.3.3	Factor de seguridad	34
2.3.4	Modelamiento tridimensional	36
2.4	Etapa 4: Restauración ambiental	37
2.4.1	Adecuación paisajística	38
2.4.2	Manejo y preservación de la capa vegetal.....	40
2.4.3	Tiempo del cierre de mina	40
CAPÍTULO 3.....		42
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	42
3.1	Altura máxima de escombrera.....	42
3.2	Factor de seguridad.....	42
3.2.1	Factor de seguridad eje X.....	44
3.2.2	Factor de seguridad eje Y	45
3.3	Análisis de resultados previos	45
3.4	Factor de seguridad del diseño	46
3.4.1	Factor de seguridad eje X.....	47
3.4.2	Factor de seguridad eje Y	48
3.5	Secuencia de construcción.....	48

3.5.1	Estimación de volúmenes de estéril y vegetal	49
3.5.2	Dimensionamiento de escombrera por día	50
3.5.3	Método de construcción.....	52
3.5.4	Planificación Semestral.....	54
3.6	Remediación ambiental.....	58
3.6.1	Elección de especie forestal	58
3.6.2	Método de plantación.....	58
3.7	Tiempo de siembra.....	60
CAPÍTULO 4.....		62
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	62
4.1	Conclusiones.....	62
4.2	Recomendaciones.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....		64
ANEXOS.....		65
Anexo A.....		66
Anexo B.....		66

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro cuadrado
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
Kg	Kilogramo
t	tonelada métrica
°	Grado sexagesimal
FS	Factor de seguridad

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tipos de escombreras según el lugar de emplazamiento	26
Figura 2.1 Diagrama de fases para el diseño de escombrera.	27
Figura 2.2 Mapa base del área de estudio	28
Figura 2.3 Representación tridimensional de la topografía de San Rafael.....	29
Figura 2.4 Esquema de una explotación por descubiertas	32
Figura 2.5 Escombrera tipo exenta.....	33
Figura 2.6 Casos de situación del nivel freático resueltos en ábacos	35
Figura 2.7 Ábaco N°2 de Hoek y Bray	36
Figura 2.8 Topografía inicial San Rafael	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3.1 Ábaco para el cálculo de la falla circular, condición No2.....	44
Figura 3.2 Ábaco para el cálculo definitivo de la falla circular, condición N°2	47
Figura 3.3 Ciclo de trabajo diario de los mineros de San Rafael	49
Figura 3.4 Esquema del sistema de explotación vista frontal.....	51
Figura 3.5 Dirección de avance en la zona norte	52
Figura 3.6 Dirección de avance en la zona Sur	53
Figura 3.7 Primer bloque de la escombrera zona norte.....	54
Figura 3.8 Segundo bloque de la escombrera zona norte	55
Figura 3.9 Tercer bloque de la escombrera zona norte.....	55
Figura 3.10 Primer semestre de construcción de escombrera en zona norte	56
Figura 3.11 Secuencia final de construcción en la zona norte	57
Figura 3.12 Secuencia final de construcción en la zona sur.....	57
Figura 3.13 Especie forestal elegida nativa de bosques secos	58
Figura 3.14 Esquema de la malla de siembra de arbustos.....	59
Figura 4.1.7 Secuencia de construcción 2do año.....	52
Figura 4.2.10 Secuencia de construcción final de la cota 45.....	53
Figura 4.3.11 Secuencia de construcción final de la cota 45.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.1 Características plásticas.....	23
Tabla 1.1.2 Propiedades mecánicas de las rocas.	23
Tabla 2.1 Cálculo de Reservas.....	31
Tabla 2.2 Especies forestales de bosque seco perteneciente a la provincia de Santa Elena	38
Tabla 3.1 Volúmenes anuales extraídos según el frente y la época del año.....	50
Tabla 3.2 Dimensiones de escombrera en cada año de explotación	51
Tabla 3.3 Planificación de la secuencia de construcción.....	56
Tabla 3.4 Planificación del cierre minero	61
Tabla 4.1 Cálculo de material estéril y capa vegetal.	66

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la parroquia Chanduy perteneciente al cantón Santa Elena se encuentra la comuna San Rafael, que cuenta con una tradición minera de más de 50 años, siendo esta la actividad principal como fuente de ingresos para su población. En la actualidad, la “Asociación de mineros artesanales San Rafael”, desarrolla la labor extractiva de materiales de construcción en la modalidad de cielo abierto (Maritínez, 2006).

Por cuestiones topográficas y climáticas, en la zona no se han desarrollado otras actividades económicas como la agricultura o ganadería, causando que la comunidad se vea obligada a tener la actividad minera como principal sustento y fuente de ingreso familiar.

La asociación minera se encuentra conformada por los mismos moradores de la comuna. Estas personas carecen de formación técnica y recursos económicos para la implementación de procesos técnicos y equipos adecuados que permitan una mejora en su productividad, enmarcados con los requerimientos legales (Barros, 2018).

En la concesión San Rafael se han realizado varios estudios, el más reciente titulado “*Diseño de explotación minera a cielo abierto para materiales de construcción*” (Gencón, 2020). Sin embargo, el proyecto antes mencionado se enfocó únicamente en el diseño de explotación y no abarcó el diseño de escombreras ni centros de acopio para material estéril y capa vegetal, siendo estas, necesarias para el cierre de mina y etapa de remediación ambiental.

Con base en lo antes mencionado, este proyecto tiene la finalidad de dar solución a la gestión de los materiales estériles y capa vegetal en el cierre de mina, proponiendo un diseño de escombreras que se adaptan a las condiciones del

terreno viéndose beneficiados los mineros de la Asociación de mineros artesanales San Rafael.

1.1 Descripción del problema

La Asociación San Rafael cuenta con una concesión minera destinada a la explotación de materiales de construcción. Esta área ya posee un diseño de explotación, sin embargo, no tienen el diseño de la escombrera y centros de acopio de material de cobertera. Cabe mencionar, que el diseño de estas estructuras de depósitos es de suma importancia, ya que estos materiales serán reutilizados en la remediación ambiental, en la etapa de cierre minero. Además, la construcción adecuada de la escombrera y la zona de acopio para el material de cobertera permitirá minimizar los impactos ambientales, principalmente el impacto visual y la generación de polvo.

1.2 Justificación del problema

Los mineros de la comuna San Rafael tienen un diseño de las actividades mineras, pero no se ha planificado el cierre de mina. Hoy en día sabemos que uno de los aspectos importantes a tomar en cuenta. Debido a esto, una correcta planificación del cierre de actividades se debe realizar para garantizar minimizar los impactos ambientales, tomando en consideración la carencia de recursos que se tienen en el sector, y sobre todo dando cumplimiento a la normativa minera ambiental.

Es muy conocido que a la hora de efectuar las actividades mineras se generan cantidades considerables de material estéril, además de un volumen importante de capa vegetal que debe ser retirada para acceder al material de interés. Debido a esto, es necesario el diseño de escombreras para estos materiales. Con este proyecto se pretende crear una sinergia entre las actuales actividades mineras de la zona con el futuro cierre de mina, viéndose beneficiada la comuna de San Rafael, ya que esta información les permitirá cumplir con los requerimientos ambientales y de esta manera evitar futuras sanciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Proponer un diseño de escombrera para material estéril y vegetal, teniendo en consideración criterios técnicos y ambientales que faciliten la reutilización de estos materiales en la etapa de remediación y cierre minero.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar las zonas idóneas para la construcción de escombreras y zonas de acopio, teniendo en cuenta aspectos geomecánicos y ambientales.
- Diseñar una escombrera de material estéril para el futuro proceso de cierre de mina.
- Preparar el terreno con la capa vegetal para la remediación ambiental y paisajísticas producto de la actividad minera.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Fases de un proyecto minero

A la hora de hablar de diseño de escombreras y centros de acopio para material estéril y capa vegetal, es necesario identificar a cuál de las etapas o fases mineras pertenecen estas actividades. Para esto, debe definir dichas etapas y la duración de cada una de ellas.

La vida de una mina ya sea desde gran minería hasta minería artesanal, está compuesta por diferentes etapas. Dichas etapas no son iguales en todos los países, pero aun así, tienen actividades con las cuales son fáciles de identificar y diferenciar. En el caso de Ecuador, siendo el mismo para esta tesis, según la Ley de Minería del 21 de mayo del 2018 Capítulo VII artículo 27, las fases de la actividad minera son:

- a) Prospección
- b) Exploración

- c) Explotación
- d) Beneficio
- e) Fundición
- f) Refinación
- g) Comercialización
- h) Cierre de mina

Donde se omiten las fases de Fundición y Refinación para la minería de los No Metálicos.

Según la Ley Minera del Ecuador (ASAMBLEA NACIONAL, 2018) “el Estado otorgará excepcionalmente concesiones mineras a través de un acto administrativo a favor de personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras, públicas, mixtas o privadas, comunitarias, asociativas y de auto gestión”. Por otra parte, el Ministerio Sectorial hará convocatorias para el remate o subasta de concesiones que hayan sido devueltas o revertidas al Estado. El Estado con los informes legales correspondientes autorizará la transferencia del título minero en un tiempo mínimo de dos años luego de su otorgamiento.

La *prospección* consiste en identificar ciertas características generales y anomalías geológicas que permiten reconocer una zona probable de mineralización, a partir de estas anomalías se definen zonas de estudio para muestreos preliminares de la composición de la roca y suelo, pero tan solo de manera superficial. Es habitual que los geólogos recopilen información histórica acerca de la actividad minera precedente y que el área de estudio o donde se esté realizando la *prospección* estén disponibles dentro de concesión.

En muchas de las ocasiones, los concesionarios se dedican a obtener el otorgamiento de una concesión para posteriormente realizar la *prospección* y exploración de la zona con la finalidad de vender el proyecto a otras personas o empresas generalmente más grandes.

Previa a la fase de *exploración*, las compañías están obligadas a presentar una serie de informes al Ministerio de Ambiente, los cuales corresponden a los estudios de impacto ambiental. En dichos informes de impacto ambiental se deben especificar los posibles impactos al medio ambiente relevantes que se puedan producir a partir de las labores mineras. Además, se deben agregar los mecanismos de mitigación de dichos impactos y/o remediación(Sánchez Santoyo, 2018, p. 68).

La *exploración* es una fase minera esencial, en ella se realizan los estudios mineros, geológicos y económicos a detalle con la finalidad de determinar la factibilidad del proyecto. Entre los factores importantes que determinan la factibilidad son la calidad del macizo rocoso, composición mineralógica del yacimiento, dimensionamiento y cuantificación de reservas, estudios de mercado del mineral de interés, facilidad de acceso al cuerpo mineralizado, entre otros.

En base a las reservas minerales, cuantificadas en la fase de *explotación*, se determina si es rentable llevar a cabo a la fase de explotación del yacimiento. Se clasifica de manera favorable cuando la cantidad de reservas representan una rentabilidad y de forma inoportuna cuando las reservas cuando la viabilidad depende netamente de las condiciones en las que se encuentre el mercado.

Una vez, en la fase de *exploración*, se determina ser favorable la explotación del yacimiento se procede con el diseño de explotación, infraestructuras y la planificación de las todas las labores, sin dejar a un lado la fase de *cierre de mina*, siendo esta una de las más importantes ya que sin ella no se otorgarán los permisos correspondientes a la *explotación*.

Con los permisos en regla, cálculos de reservas y una correcta planificación, se procede a iniciar la fase de *explotación y beneficio*. En esta fase se deben construir las infraestructuras para el minado, en base al transporte y el procesamiento del mineral (de ser el caso); de la mano a estas actividades, se deben cumplir los acuerdos de ocupación temporal con los que se haya llegado con las comunidades aledañas, medidas de protección en las labores y la remediación ambiental, contratación de

personal y designación de personal encargados de la seguridad (Sánchez Santoyo, 2018, p. 68).

Normalmente, según La Ley Minera del Ecuador (2018), encontramos procesos físicos, químicos y/o metalúrgicos a los que se someten los minerales producto de la *explotación*. En el caso de la concesión San Rafael, tendremos solo procesos físicos para obtener los materiales de construcción que consta de un sistema de tamizado para separar los diferentes productos que ellos brindan.

Luego de las etapas de explotación y beneficio, nos encontramos en una fase de comercialización, que “consiste en la compraventa de minerales o la celebración de otros contratos que tengan por objeto la negociación de cualquier producto resultante de la actividad minera”.

Nos encontraremos finalmente con las etapas de *remediación y cierre de mina*. En esta etapa final nos enfocamos en los impactos ambientales generados por las actividades mineras realizadas en la zona. Consiste en el retiro de maquinaria, equipos utilizados en la *explotación y beneficio*, desmantelamiento de las instalaciones con el fin de reutilización o reciclaje. Se da inicio a la restauración final o, que en muchas ocasiones, seguir con el plan de remediación ya que normalmente esta fase va avanzando simultáneamente con las etapas anteriores (Secretaría de Economía, 2015)

1.4.2 Escombreras

Las actividades mineras generan grandes cantidades de material sin valor pero que son necesarios de extraer para poder llegar al cuerpo mineralizado (a lo que se le llaman excavaciones de preparación), este material puede contener baja ley de mineral de interés o directamente no tener nada. Estos residuos de los procesos mineros son acumulados en zonas específicas con su propio diseño de construcción con la finalidad de minimizar impactos ambientales, a esta acumulación de material estéril se lo denomina escombrera.

En la deposición de este material estéril se desaconseja la mezcla de tamaños de partícula en especial las partículas finas que ocasionan la formación de lodos dando lugar a un difícil control y una dudosa estabilidad.

Tradicionalmente, la forma de implementar las escombreras se ha realizado buscando la facilidad de transporte y ocupación de terrenos ya que esta actividad no se es considerada como inversiones sino más bien costos; en algunos casos se han dado accidentes importantes provocando impactos ambientales considerables por lo que los estudios para el diseño de las escombreras deben ser más minuciosas (Aranibar Aguilar, 2017). Se aconseja disponer de normas de buena práctica y criterios de ejecución.

1.4.3 Tipos de estériles mineros

Las propiedades de los estériles mineros influyen directamente en la estabilidad y el diseño de las escombreras. En la práctica se recurre a experiencias similares en conjunto a clasificaciones empíricas propuestas por diferentes autores a la hora del diseño de estas estructuras. Lo más acertado es realizar estudios y determinar los ensayos adecuados para todas las propiedades mecánicas del material que se van a verter en la escombrera.

La resistencia, durabilidad y granulometría de los estériles varían considerablemente en cada lugar estudiado y sobre la geología y operaciones mineras. Se pueden realizar ciertas generalizaciones referentes a la calidad esperada de los estériles, y el diseño debe atenerse a la caracterización más exacta de la resistencia, durabilidad y granulometría, y sus variaciones más probables. La planificación de las fases de vertido puede minimizar los problemas producidos por materiales de mala calidad, tales como la inclinación adecuada del talud o la instalación de una capa de drenaje (Donaire Marquez et al., 2013).

1.4.3.1 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. La granulometría puede variar con el tiempo debido a que los materiales experimentan cambios físicos y químicos al entrar en contacto con el aire y el agua (oxidación, esponjamiento, meteorización y otros).

Para caracterizar los materiales de una escombrera, es necesario obtener su curva granulométrica y determinar el tamaño máximo de partículas, así como realizar un análisis en laboratorio de la fracción fina. Un método más exacto para determinar la granulometría consiste en hacer un cribado en campo de todos los materiales que se vierten en la escombrera, pero es poco empleado porque su coste es muy alto (Donaire Marquez et al., 2013, pp. 2–3).

1.4.3.2 Plasticidad de los finos

Al existir presencia de finos es importante determinar los Límites de Atterberg (Límite líquido y Límite plástico) en laboratorio. Un factor importante para tener en cuenta para la resistencia al corte del material es la plasticidad de los finos presentes, y debe ser indicativa del tipo de minerales arcillosos contenidos en él. Los Límites de Atterberg también se calculan en rocas sedimentarias de tamaño fino mediante una desagregación mecánica. En términos generales para materiales como la arcilla fina, gruesa y arenosa nos basaremos en los datos de la Tabla 1.1 sobre las características plásticas.

Tabla 1.1.1 Características plásticas.

SUELO	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Arcilla fina	32	18	14
Arcilla gruesa	80	28	52
Arcilla arenosa	40	20	20

Fuente: Pit Slope Manual (1980)

1.4.3.3 Resistencia Intacta

La resistencia de los fragmentos de roca intactos influye en la durabilidad y resistencia al corte de los materiales de la escombrera. Se requiere de conocimientos del material intacto para realizar métodos empíricos utilizados para determinar la resistencia al corte. Estudios preliminares en pequeñas escombreras donde se encuentran sometidas 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, ensayos de dureza en campo y con el índice de carga puntual en los testigos de perforación. Según la Tabla 1.2 tenemos algunos valores de propiedades mecánicas representativos de ciertas rocas.

Tabla 1.1.2 Propiedades mecánicas de las rocas.

TIPO DE ROCA	COEFICIENTE DE POISSON	MÓDULO DE DEFORMACION (kPa)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kPa)
Diorita	0,26-0,29	75-108	69-103
Gneiss	0,15-0,20	83-119	41-83
Granito	0,23-0,27	73-86	59-172
Caliza	0,27-0,30	87-108	31-103
Cuarcita	0,12-0,15	82-97	103-138
Pizarra	0,15-0,20	79-112	21-55
Arenisca	0,15-0,35	28-69	55-138

Fuente: Pit Slope Manual (1980)

1.4.3.4 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; se puede producir la degradación por los efectos de congelación/descongelación, hinchamientos o desgaste; oxidación; filtración y cambios químicos; además de deformaciones inducidas por los cimientos o reagrupamientos internos y migración de finos

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 (Aranibar Aguilar, 2017).

1.4.3.5 Consolidación y asentamiento

Los procesos de consolidación y asentamiento ocurren antes y después de la construcción de las escombreras, influyen en la densidad y en las características de resistencia al corte de dichas estructuras. Se recomienda construir las escombreras de

manera homogénea porque de no ser así la estructura puede sufrir diferentes esfuerzos de compactación.

Debido a la granulometría, generalmente gruesa de la mayoría de los estériles de mina dificulta los ensayos en laboratorio y generan resultados no representativos. Se suele hacer estimaciones preliminares de densidad, dichos valores se encuentran basados normalmente en factores de esponjamiento conocidos, tolerantes a la consolidación y asentamientos. Los factores de esponjamiento suelen rondar en el rango de 1.2 y 1.5, dependiendo de los tipos de material, métodos de construcción de escombrera, entre otros (Donaire Marquez et al., 2013, pp. 2–17).

1.4.4 Lugar de emplazamiento

Las escombreras deben ubicarse, preferentemente, sobre terrenos llanos o en superficie con pendiente moderada, con la finalidad de que se construyan sobre un cimiento firme, estable y poco deformable. El diseño de las estructuras no debe contener en su zona de influencia a viviendas, núcleos urbanos, vías de comunicación o redes de servicios.

Se entiende como zona de influencia el área que puede ser afectada por: caída de escombros, deslizamientos globales o parciales. Esta zona de influencia será mayor cuanto más finos sean los escombros y más elevada sea la pendiente del terreno original, se recomienda la construcción de muros o diques de contención, barreras dinámicas o cunetas de recogida.

La elección de emplazamiento de escombreras depende de factores netamente económicos, ambientales, técnicos y socioeconómicos. Entre criterios específicos se encuentran la distancia de transporte desde el frente de explotación hasta la escombrera, afectando directamente el costo de operación. La capacidad de almacenamiento necesaria, dispuesta por la cantidad de estériles a mover y restricciones ecológicas existentes en el área de implantación (Donaire Marquez et al., 2013).

Como se observa en la Figura 1.1, en función del lugar de emplazamiento y de su configuración, las escombreras pueden clasificarse en los siguientes tipos: de vaguada, de divisoria, exenta y rellenos de huecos.

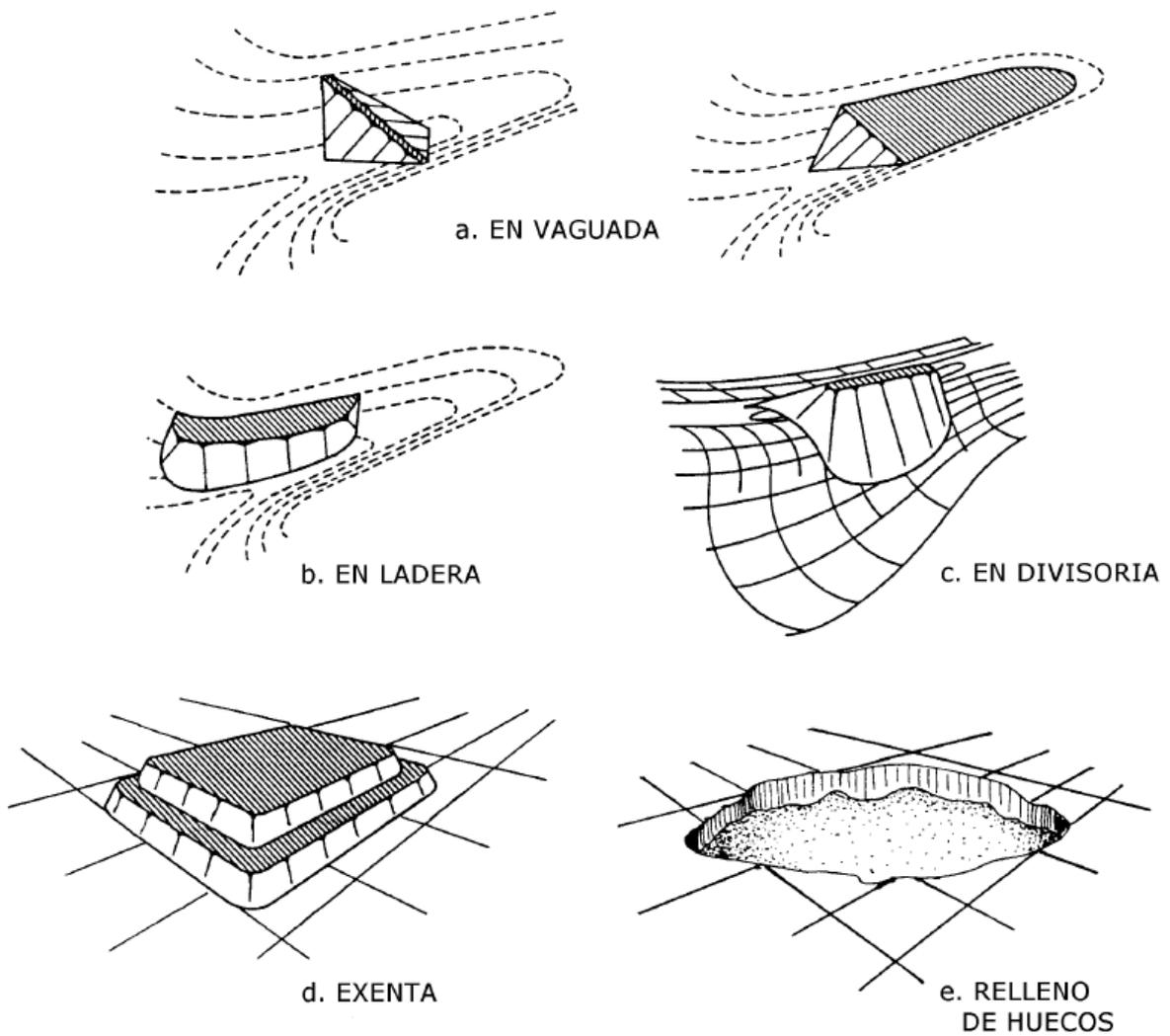


Figura 1.1 Tipos de escombreras según el lugar de emplazamiento

Fuente: Junta de Andalucía (2013)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La concesión minera de la comuna San Rafael, ubicada en la parroquia Chanduy, cantón Santa Elena, se ve en la necesidad de determinar una zona y diseño de escombrera destinada para el alojamiento de material estéril y capa de vegetal cuya función a futuro será proporcionar estos materiales de escombros para la fase de cierre de la concesión y la remediación ambiental. En la Figura 2.1 se presenta resumidamente en diagrama las fases de procesos que se llevaron a cabo para el diseño de escombrera.

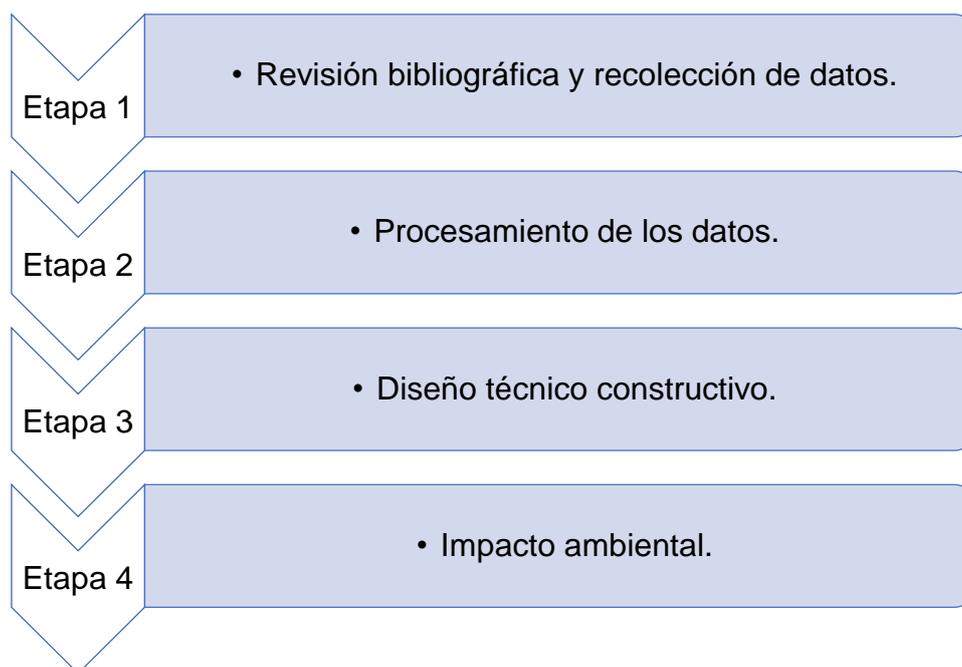


Figura 2.1 Diagrama de fases para el diseño de escombrera.

2.1 Etapa 1: Recolección de datos

Nos ubicamos en la comuna de San Rafael ubicada en la Provincia de Santa Elena, parroquia Chanduy, su asentamiento se encuentra en la zona sureste de la provincia, con límites; al norte con la comuna El Azúcar, al sur con las comunas Chanduy y Engunga, al este con la comuna Zapotal y al oeste con la comuna Manantial

de Chanduy. La concesión se encuentra atravesada por la autopista E40 dividiendo el área en la zona norte y la zona sur.

Por el Norte se encuentra el canal de trasvase de Guayaquil, en dirección noroeste a suroeste se encuentra atravesada por una quebrada en dirección noroeste a suroeste, la misma que es de época invernal, se encuentra en zona plana con elevaciones de cota máxima en promedio de 40 metros con ligeras elevaciones como se muestra en la Figura 2.2 (Gencón, 2020).

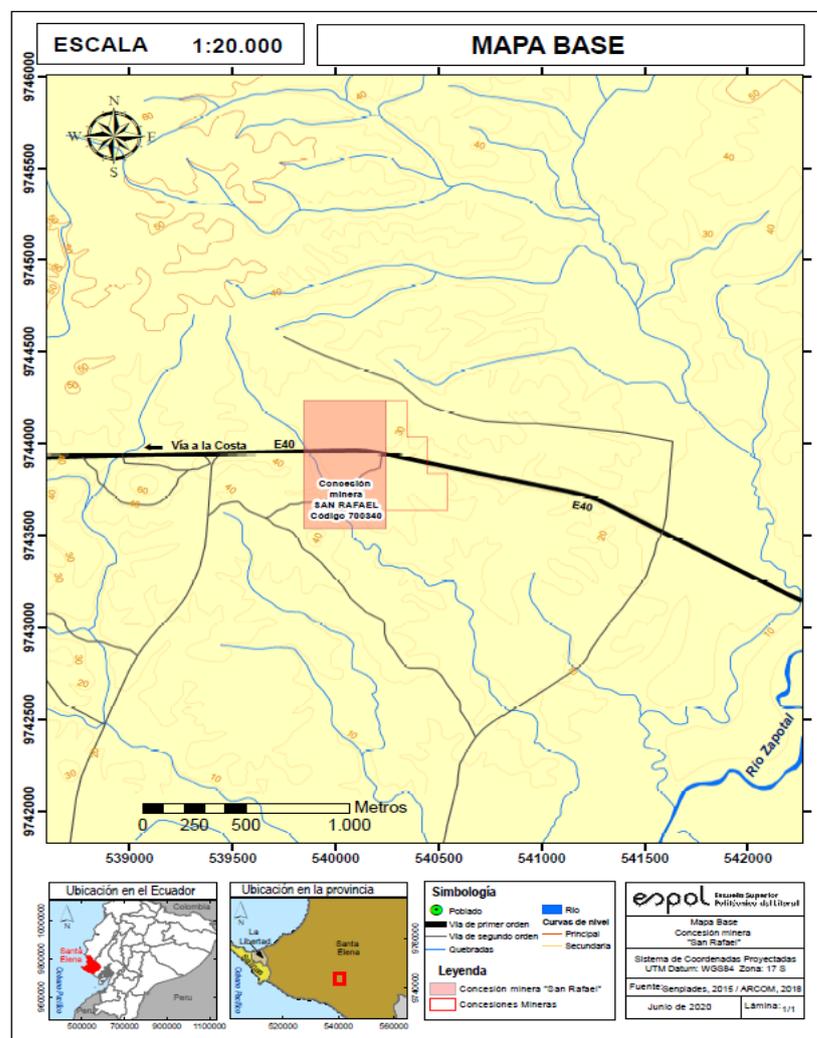


Figura 2.2 Mapa base del área de estudio

Fuente: SEMPLADES, 2015 y ARCOM, 2018.

2.1.1 Geomorfología

En general, el relieve de la zona son ondulaciones suaves que van entre 10 m.s.n.m hasta 30 m.s.n.m en altitud, además las colinas son aterrazadas, es decir con forma de mesetas y las pendientes oscilan entre 10%-20%. La concesión se encuentra ubicada en una zona de depresión (cotas bajas) lo que hace factible la depositación de material sedimentario, que está formando la Cuenca Progreso. El área de explotación minera es difícil de catalogar geomorfológicamente ya que no cuenta con una forma definida sino una serie de excavaciones, como se muestra en la Figura 2.3.

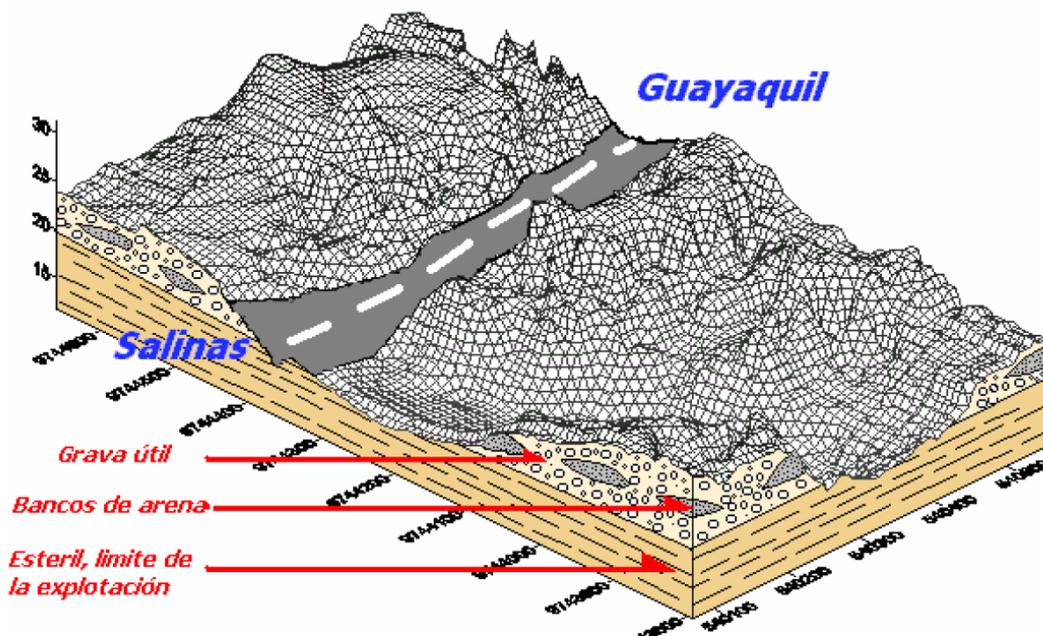


Figura 2.3 Representación tridimensional de la topografía de San Rafael

Fuente: Angélica Becerra (2003)

2.1.2 Elementos de orientación del yacimiento

El depósito se puede observar a en su totalidad extendiéndose hacia el este. Este depósito está compuesto por gravas y arena con una potencia media de 3.98 m, y con una cobertura de 80 cm. aproximadamente. Específicamente, el yacimiento se compone por arena fina, arena gruesa, gravilla y grava menuda con una granulometría que va desde $D_{80} = 0.12$ mm. Hasta $D_{80} = 32$ mm. Materiales como las gravas y arenas

se consideran incompetentes, ya que poseen una cohesión aproximadamente de 5 Kg/cm².

2.1.3 Propiedades físicas y químicas

En el estudio realizado por Becerra (2003) se realizaron ensayos de laboratorio al material con la finalidad de determinar las propiedades físicas y químicas del yacimiento de San Rafael, dichos ensayos fueron los siguientes:

- Ensayo de Abrasión de los Ángeles.
- Densidad Aparente.
- Porcentaje de absorción de agua.
- Resistencia de los agregados por medio de sulfatos.

Los resultados de los ensayos se detallan a continuación:

- Porcentaje de desgaste por medio del Ensayo de Abrasión de los Ángeles fue de 19.58 %.
- Densidad de volumen del árido seco: 2.59 t/ m³
- Densidad del árido saturado superficialmente: 2.61 t/ m³
- Densidad aparente: 2.65 t/m³
- Porcentaje de absorción del agua: 0.95 %
- Prueba de resistencia de los agregados mediante sulfatos: desgaste 3.27 %.

2.1.4 Volúmenes de material estéril y vegetal

Según el estudio realizado por Gencón (2020), se detallan los volúmenes a trabajar, dentro de los 5 años de explotación, de los materiales de interés, estéril y vegetal como se observa en la Tabla 2.1.

- Capa vegetal: 1634.63 m³.
- Material estéril: 12414.10 m³.

Tabla 2.1 Cálculo de Reservas.

Estación	Área (m ²)				Volumen (m ³)			
	Capa Vegetal	Estéril	Reserva probada	Reserva probable	Capa Vegetal	Estéril	Reserva probada	Reserva probable
0+050	1,71	6,88	93,13	57,21	85,25	344,15	4656,25	2860,60
0+100	0,84	5,07	153,11	104,29	63,53	298,80	6155,88	4037,48
0+150	0,93	12,60	132,67	82,90	44,03	441,70	7144,40	4679,63
0+200	1,24	7,86	70,24	172,12	54,20	511,40	5072,68	6375,33
0+250	1,12	13,41	104,19	228,14	59,00	531,65	4360,73	10006,33
0+300	0,97	6,24	115,38	1041,05	52,15	491,18	5489,08	31729,75
0+350	0,60	10,79	161,61	337,74	39,15	425,73	6924,58	34469,80
0+400	0,54	3,87	99,15	319,04	28,53	366,50	6519,03	16419,53
0+450	17,71	123,13	351,24	522,23	456,30	3175,03	11259,73	21031,68
0+500	0,62	23,02	145,48	371,72	458,25	3653,75	12417,98	22348,73
0+550	2,89	18,91	93,43	182,87	87,90	1048,18	5972,90	13864,80
0+600	0,99	5,13	29,36	100,86	97,00	600,88	3069,90	7093,20
0+650	1,16	5,33	35,59	102,67	53,60	261,33	1623,73	5088,25
0+700	1,07	5,23	32,48	101,77	55,75	263,85	1701,53	5110,90
				Total	1634,63	12414,10	82368,35	185115,98

Fuente: (Gencón, 2020)

Los volúmenes obtenidos en la Tabla 2.1 fueron a partir de un modelo de perfiles geológicos.

2.2 Etapa 2: Procesamiento de datos

Según el estudio realizado en el “*Proyecto de Explotación del Yacimiento San Rafael*” (Becerra, 2003). Se menciona que el sistema de explotación empleado por los mineros de concesión San Rafael es el método de cielo abierto por descubiertas que “consiste en el avance unidireccional de un módulo con un solo banco desde el que se efectúa el arranque del estéril y vertido de éste al hueco de las fases anteriores” (Herrera & Ortiz, 2006).

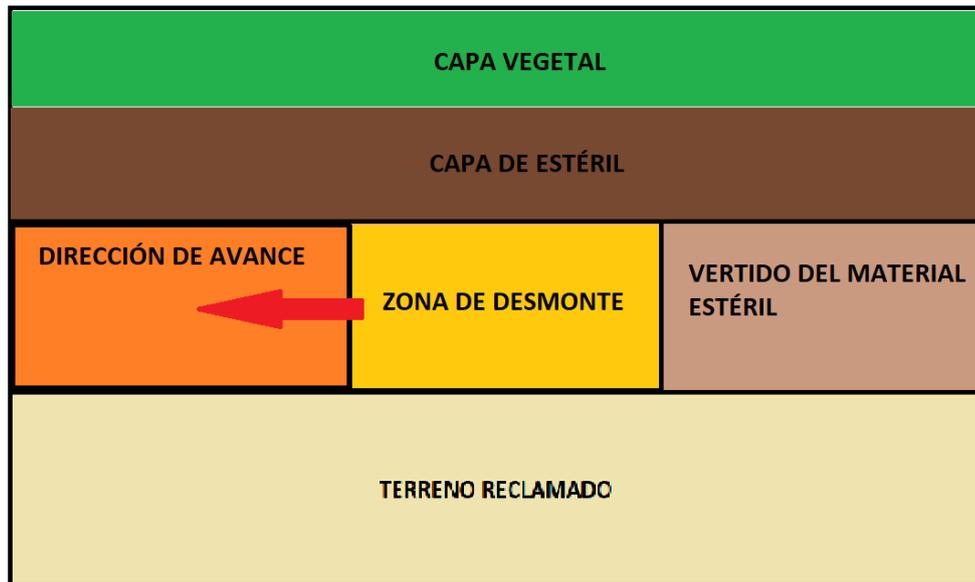


Figura 2.4 Esquema de una explotación por descubiertas

Fuente: Autores de este documento

2.2.1 Condiciones de la explotación

Las condiciones para la explotación por el método de descubiertas en la concesión San Rafael son:

- Altura del banco: 4.78 m.
- Anchura del tajo: 5 m.
- Ángulo de cara del talud: 35°.
- Producción diaria: 12 m³/día

Enfocándonos un en el material estéril, tenemos que las propiedades físicas de estos materiales son las siguientes:

- Composición de material estéril: Arena (fina y gruesa) y arcilla.
- Ángulo de rozamiento interno 35°.
- Cohesión del material: 0.5 Kg/cm²
- Densidad aparente: 2.65 t/m³

2.3 Etapa 3: Diseño y construcción de escombreras

Teniendo claro las condiciones operativas y las propiedades del material estéril que se tiene en la zona, es hora de hablar del diseño que las escombreras van a tener y su forma de construcción. Para ello es importante tener en cuenta la forma que estas van a tener, la altura máxima que pueden llegar a tener y el factor de seguridad, garantizando que las actividades mineras sean más seguras.

2.3.1 Forma de las escombreras

Generalmente, al hablar de material estéril de mina, se nos viene a la cabeza que el tipo de estéril son partículas de roca con tamaños considerables entre varios centímetros a llegar a sobre pasar el metro de diámetro. Al hablar del material estéril de la concesión San Rafael estamos hablando de una mezcla de material arcilloso y arena (fina y gruesa) por lo que nos da a entender que debemos tratar este material como suelo por su baja granulometría que está por debajo de los 2 mm.

Según Donaire Marquez et al. (2013) existen 5 tipos de escombreras conforme al tipo de construcción, en nuestro caso, el tipo de escombrera a elegir es la llamada Exenta, como se muestra en la Figura 2.5.

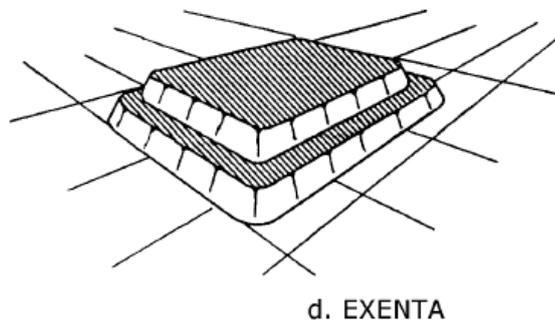


Figura 2.5 Escombrera tipo exenta

Fuente: Donaire Marquez et al. (2013)

2.3.2 Altura máxima

Una vez definido el tipo de escombrera a diseñar, es necesario calcular la altura máxima permitida que pueda soportar nuestra construcción con el fin de que no se generen roturas o fallas a largo plazo. Según Eduardo Pérez (2005) nos encontramos, para la estabilidad de taludes, en un caso general donde se tiene una cohesión y ángulo de rozamiento interno del material. Se plantea, con un factor de seguridad igual a 1, la siguiente ecuación para hallar la altura crítica o permitida para el talud:

(2.1)

$$H_{crítica} = \frac{4c'}{\gamma} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

Donde:

- $H_{crítica}$: Altura máxima del talud.
- c' : Cohesión del material.
- γ : Densidad aparente del material.
- φ' : Ángulo de rozamiento interno del material.

2.3.3 Factor de seguridad

Por lo expuesto anteriormente, estamos tratando con un suelo compuesto por material arcilloso y arena por lo que las posibles fallas o roturas para tener en cuenta son las fallas circulares. Esto se da cuando las partículas son muy pequeñas comparadas con el tamaño del talud, para el cálculo del factor de seguridad, para este método, se toman ciertas hipótesis como que el material es homogéneo, la resistencia al corte está en función de la cohesión y ángulo de fricción y, además, la falla ocurre sobre una superficie circular de deslizamiento que atraviesa el pie del talud (Pérez, 2005).

Es importante tener en cuenta las condiciones hidrogeológicas de la zona en cuestión. Hoek y Bray (Hoek and Bray, 1981) presentan el uso de ábacos para este tipo de fallas que, dependiendo del nivel freático, se calcula el factor de seguridad. En la Figura 2.6 se pueden apreciar las diferentes condiciones del flujo de agua subterránea

de la zona y en la Figura 2.7 el ábaco para determinar el factor de seguridad según las condiciones de nuestra escombrera.

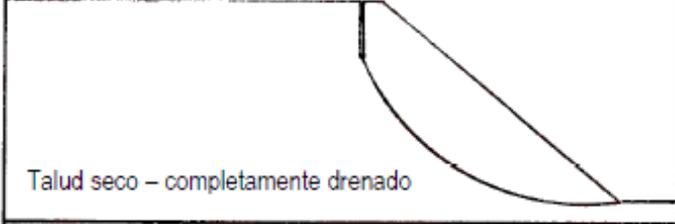
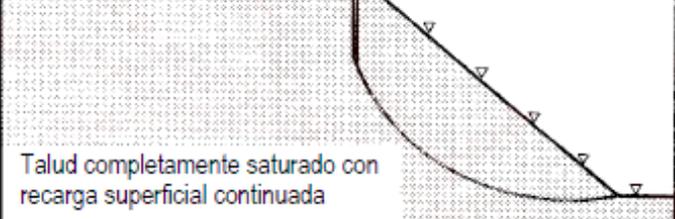
Condiciones del flujo de agua subterránea	Ábaco
 <p data-bbox="411 719 807 752">Talud seco – completamente drenado</p>	1
 <p data-bbox="411 954 754 1014">Salida del agua a 1/8 de la altura del talud</p>	2
 <p data-bbox="411 1200 754 1261">Salida del agua a 1/4 de la altura del talud</p>	3
 <p data-bbox="411 1447 754 1507">Salida del agua a 1/2 de la altura del talud</p>	4
 <p data-bbox="411 1693 775 1753">Talud completamente saturado con recarga superficial continuada</p>	5

Figura 2.6 Casos de situación del nivel freático resueltos en ábacos

Fuente: Hoek y Bray (1981)

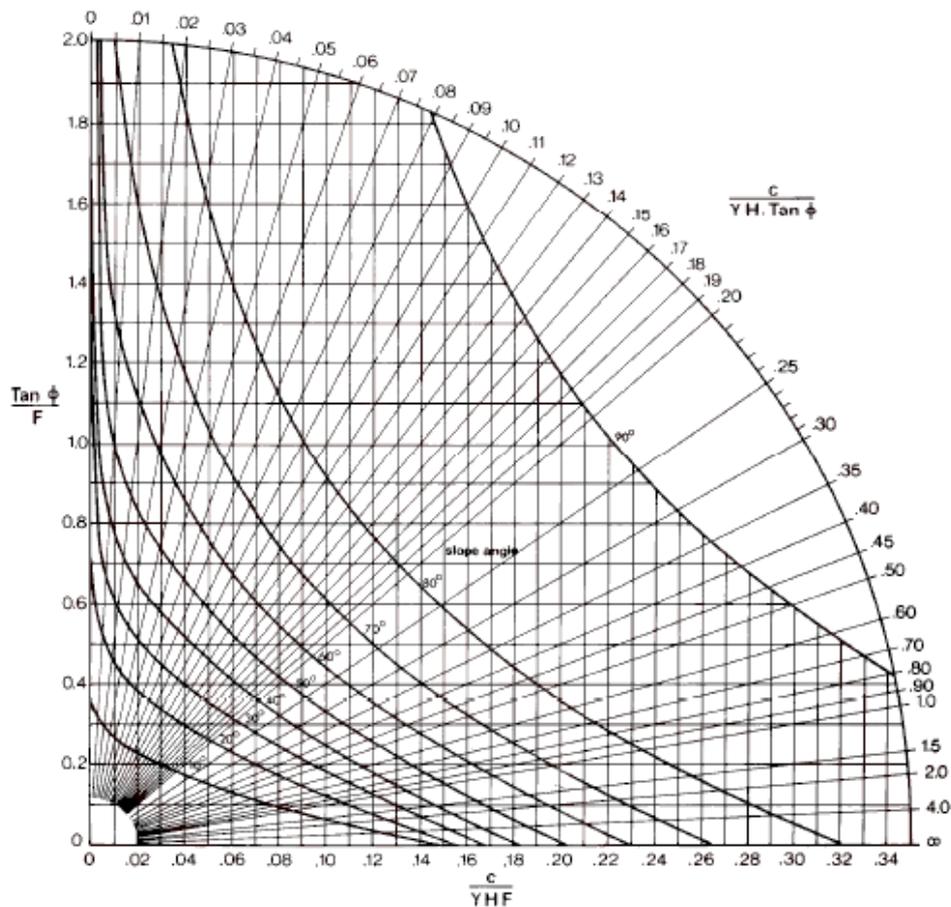


Figura 2.7 Ábaco N°2 de Hoek y Bray

Fuente: Hoek y Bray (1981)

2.3.4 Modelamiento tridimensional

Una vez hechos los cálculos de la altura máxima que requiere la escombrera propuesta y obtener los valores de factor de seguridad que garantiza la estabilidad del diseño, se procedió a su modelamiento en el software minero RecMin de licencia libre para este proceso.

Para ello, fue necesario el uso del mapa topográfico realizado por J. Gencón en su proyecto “*Diseño de explotación minera a cielo abierto para materiales de construcción*” (Gencón, 2020). En él se delimita limita el área de la explotación, la carretera E40 que divide el área en la zona norte y la zona. Nosotros tomamos los parámetros propuestos en el estudio antes citado para simular la excavación final que se tendrá en los 5 años previstos, hasta la cota 45, de la actividad minera, para poder

estimar, mediante el software minero Recmin, los volúmenes de estériles y capa vegetal que se tienen.

2.3.4.1 Generación de bloques para planificación constructiva

Para realizar una planificación mediante el uso de bloques de construcción en el software, es necesario preparar el terreno simulando la excavación final prevista hasta la cota 45 como se mencionó anteriormente para poder modelar la escombrera propuesta. Una vez preparado el terreno, se planifican bloques de manera semanal de acuerdo a los volúmenes de estéril y vegetal que se manejan en este periodo de tiempo y finalmente se hace una simulación de la secuencia de construcción semestralmente de manera que se pueda apreciar con claridad los avances que se tienen.

Uno de los parámetros claves a tener en cuenta es la dirección de avance en cada una de las zonas de la concesión. Se debe establecer que los primeros 6 meses del año, época de invierno, se trabaja en la zona norte, debido a que las escorrentías se dirigen en dirección norte a un canal que conecta con un río construido por los mineros hace algunos años. Los 6 meses restantes, época de verano, en la zona sur siendo este uno de los motivos por lo que se decidió plantear la simulación por semestres.

Las direcciones de avance en la zona norte son de sur a norte y del desbanque es de este a oeste, de manera contraria en la zona sur, la dirección de avance es de norte a sur, pero se mantiene la dirección de desbanque de este a oeste. Estos parámetros eran necesarios establecer para el modelamiento en 3D que se propone.

2.4 Etapa 4: Restauración ambiental

Finalmente, en la **etapa 4**, se plantea una serie de medidas para mitigar los efectos producto de las actividades mineras en la concesión de San Rafael y proponer un uso de las escombreras desarrolladas en este proyecto para el correcto cierre minero.

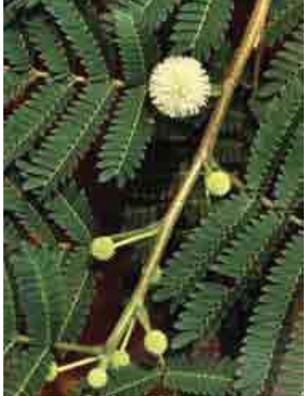
2.4.1 Adecuación paisajística

En la restauración ambiental de la zona se busca minimizar el impacto visual que se genera con la actividad minera ya que estas no generan mayores impactos al medio como lo podría generar estériles generadores de drenaje ácido o maquinaria generadoras de polvo y vibraciones a comunidades aledañas.

Según estudios previos realizados en la zona, "Diseño de explotación minera del yacimiento San Rafael y propuesta de elaboración de baldosas hidráulicas, Santa Elena" (Barros, 2018), nos encontramos en un ecosistema del tipo bosque seco, para ello se han analizado las especies forestales de este tipo de bosques por parte del Ministerio del Ambiente. Para esto se presentan los tipos de árboles y arbustos que podemos encontrar en la zona de estudio como se muestra en la Tabla 2.4

Tabla 2.2 Especies forestales de bosque seco perteneciente a la provincia de Santa Elena

Nombre Científico	Nombre común	Imagen
<i>Leucaena trichodes</i>	Chapra o Pela caballo	
<i>Cordia lutea Lam</i>	Overal o muyuyo	

<p><i>Jatropha curcas</i></p>	<p>Piñón</p>	
<p><i>Inga spectabilis</i></p>	<p>Guaba o guaba vaina de machete</p>	
<p><i>Leucaena leucocephala</i></p>	<p>Leucaena o Chapra</p>	

Fuente: Aguirre Mendoza & Ministerio del Ambiente de Ecuador (2012)

2.4.1.1 Técnica de silviculturales

Según Avedaño (2014), para la plantación de las especies de arbóreas y/o arbustivas, se deben tener en cuenta las siguientes técnicas:

- Limpiar el área donde se va a realizar la plantación del polvo generado por la actividad minera.
- Abrir un hueco de al menos 0.3 m de profundidad por 0.4 m de diámetro.
- Mezclar la tierra con abono orgánico en una proporción de 3:1.
- Llenar el hueco con la mezcla de tierra y abono.
- A los ocho días sembrar los arbustos en el terreno preparado.
- Se recomienda hacer la siembra en días poco soleados o al caer la tarde.

Además, se recomienda inspeccionar diariamente el crecimiento de los arbustos y regar permanentemente después de las 5 p.m.

2.4.2 Manejo y preservación de la capa vegetal

En el momento que se realiza el desbroce del bloque a explotar se espera tener una adecuada remoción del suelo orgánico, cobertura vegetal y posterior traslado a la escombrera del bloque anterior desalojado, esto con el fin de conservar las propiedades físicas y químicas para la fertilidad del mismo.

Las acciones por desarrollar para el manejo y preservación de la capa vegetal son las siguientes:

- Verter la capa vegetal y dispersarla en la escombrera.
- Evitar la compactación de la capa orgánica.
- Proteger la capa vegetal de agentes erosivos.
- Extender uniformemente el suelo sobre la escombrera.
- Evitar el paso de personal sobre la escombrera con herramientas o maquinaria en el área de la escombrera.

2.4.3 Tiempo del cierre de mina

Como se ha mencionado anteriormente, la explotación del yacimiento y la construcción de la escombrera, se desarrollan simultáneamente. Es por ello que el tiempo que toma el cierre de mina se ve reducido. Los tiempos están directamente

relacionados en el tiempo que se toma en preparar el terreno, sembrar los arbustos hasta el crecimiento final de la vegetación.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Altura máxima de escombrera

Como se mencionó en el capítulo anterior, se cuenta con un caso general de estabilidad de taludes por lo que se hará uso de la Ecuación 2.1 para el cálculo de la altura máxima permitida para un equilibrio de fuerzas en la escombrera y evitar el colapso.

(2.1)

$$H_{crítica} = \frac{4c'}{\gamma} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

Donde:

- $H_{crítica}$: Altura máxima del talud.
- c' : 0.5 Kg/cm²
- γ : 2.65 t/m³
- φ' : 35°

$$H_{crítica} = \frac{4(0.5)}{2.65} \tan\left(45^\circ + \frac{35^\circ}{2}\right)$$

$$\mathbf{H_{crítica} = 1.45 \text{ metros}}$$

El método nos sugiere una altura de 1.45 metros, dato que será usado para calcular el factor de seguridad de la escombrera con dicho valor.

3.2 Factor de seguridad

Para este cálculo es necesario tener en cuenta la aportación del agua subterránea, es decir, el nivel freático. Si bien es cierto, nos encontramos en una zona desértica donde pasa la mayoría del año sin llover y donde los ríos más cercanos no tienen mayor aportación con el nivel freático y se podría considerar la condición de completamente drenado, pero en las épocas de invierno las precipitaciones son bastante altas y en pequeños intervalos de tiempo, es por eso por lo que se eligió el

ábaco 2 que se muestra en la Figura 2.6, ya que se podría tener cierta influencia de dichas aguas.

Teniendo en cuenta la aportación de las aguas subterráneas debemos tomar el ábaco N°2 como se muestra en la Figura 2.7. Para obtener los valores de factor de seguridad es necesario realizar la siguiente operación:

(3.1)

$$\frac{c'}{\gamma * H * \tan(\varphi')}$$

Donde:

- H: 1.45 m
- c' : 0.5 Kg/cm²
- γ : 2.65 t/m³
- φ' : 35°

$$\frac{0.5}{2.65 * 1.45 * \tan(35)} = \mathbf{0.186}$$

Colocando el valor obtenido en la Figura 2.8 tenemos lo siguiente:

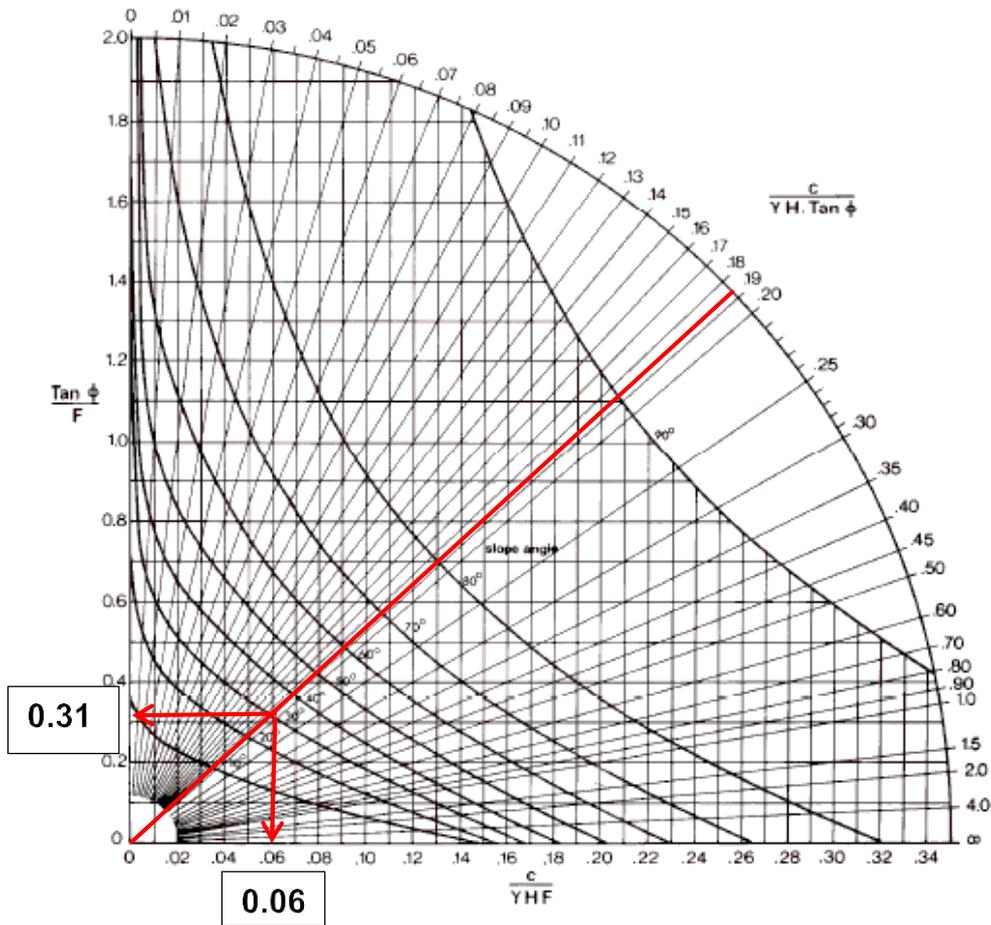


Figura 3.1 Ábaco para el cálculo de la falla circular, condición No2

Fuente: Autores de este documento.

No se encuentra la curva para un ángulo de talud de 35° por lo que se toma la más cercana y la peor condición que sería la curva de 30°. Las coordenadas resultantes son (0.06,0.31), posteriormente se puede usar una de las dos ecuaciones mostradas en la Figura 2.8 para el cálculo del FS pero en este caso usaremos ambas.

3.2.1 Factor de seguridad eje X

La coordenada en el eje X da un valor de 0.06, el cual se iguala a la ecuación mostrada en la Figura 2.8:

(3.2)

$$\frac{c'}{\gamma * H * FS} = 0.06$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma * H * 0.06}$$

Reemplazando los valores de cohesión, densidad aparente y altura.

$$FS = \frac{0.5}{2.65 * 1.45 * 0.06}$$

$$FS = 2.17$$

3.2.2 Factor de seguridad eje Y

La coordenada en el eje Y da un valor de 0.31, el cual se debe igualar a la siguiente ecuación:

(3.3)

$$\frac{\tan(\varphi')}{FS} = 0.31$$

$$FS = \frac{\tan(\varphi')}{0.31}$$

Reemplazando el valor del ángulo de fricción interna.

$$FS = \frac{\tan(35)}{0.31}$$

$$FS = 2.25$$

3.3 Análisis de resultados previos

Para una altura de escombrera de 1.45 m, el ábaco nos genera factores de seguridad de 2.17 y 2.25, ambos factores de seguridad son mayores que 1 por lo que nos garantiza estabilidad. Ahora bien, por cada metro de avance nos encontraremos

con una potencia media de 80 cm de estéril y 30 cm de capa vegetal dando un total de 1.10 m. En base a esta altura se hará la escombrera ya que al sobrepasar dicha altura habría un déficit de material para la construcción.

Para una altura de 1.45 m los factores de seguridad eran bastante aceptables por lo que se espera que para una altura de 1.10 m también lo sea. A continuación, se procede a calcular los nuevos factores de seguridad con el nuevo diseño.

3.4 Factor de seguridad del diseño

Repetiremos el procedimiento anterior, pero con la una altura de la escombrera de 1.10 m y haciendo uso de la Ecuación 3.1.

$$\frac{c'}{\gamma * H * \tan(\varphi')}$$

Donde:

- H: 1.10 m
- c' : 0.5 Kg/cm²
- γ : 2.65 t/m³
- φ' : 35°

$$\frac{0.5}{2.65 * 1.10 * \tan(35)} = \mathbf{0.244}$$

Usando el ábaco de la Figura 2.7 realizamos los nuevos cálculos:

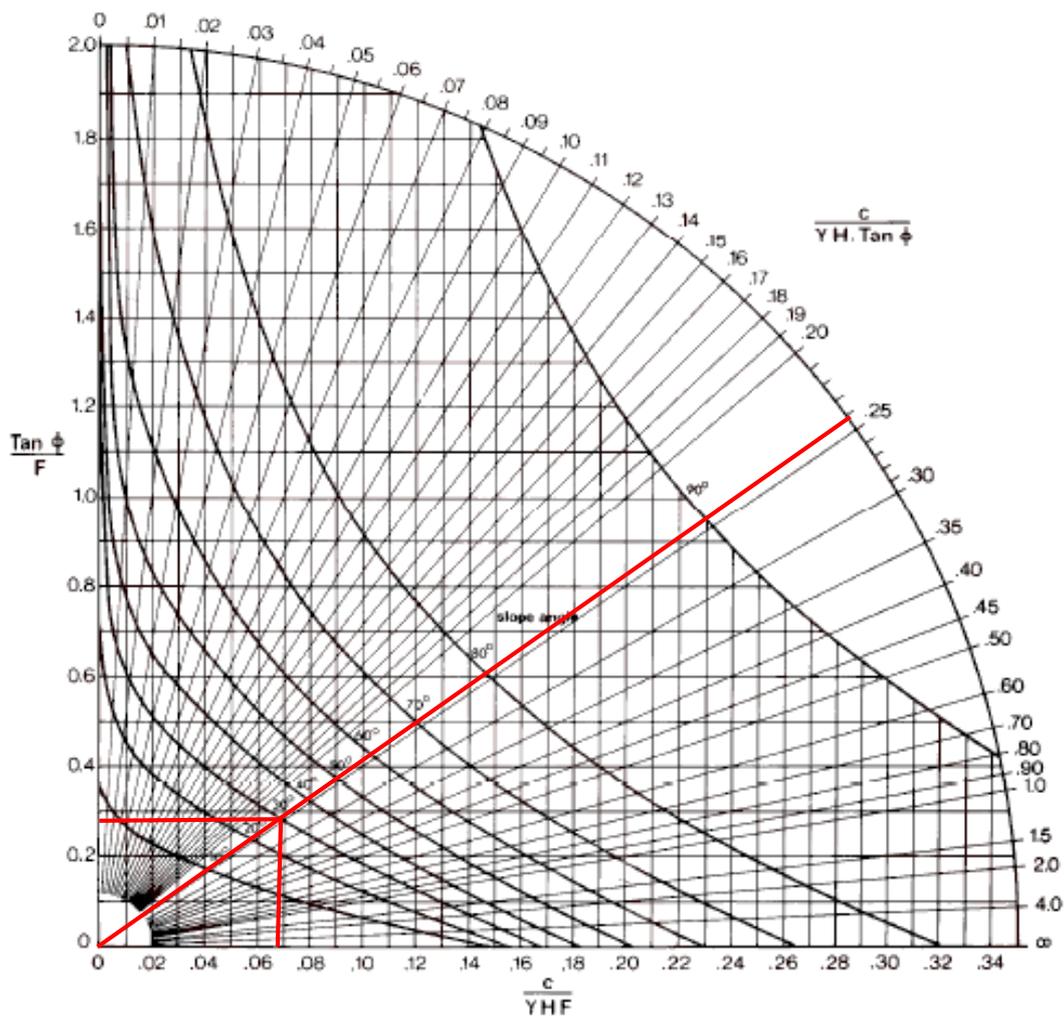


Figura 3.2 Ábaco para el cálculo definitivo de la falla circular, condición N°2

Fuente: Autores de este documento

Para este nuevo diseño, las coordenadas son (0.068,0.28). ahora procedemos con los cálculos de los factores de seguridad repitiendo el procedimiento realizado anteriormente:

3.4.1 Factor de seguridad eje X

Para la coordenada en X tenemos 0.068 el cual lo igualaremos a la Ecuación 3.2:

$$\frac{c'}{\gamma * H * FS} = 0.068$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma * H * 0.068}$$

Reemplazando los valores de cohesión, densidad aparente y altura.

$$FS = \frac{0.5}{2.65 * 1.10 * 0.068}$$

$$FS = 2.52$$

3.4.2 Factor de seguridad eje Y

Para la coordenada en Y tenemos 0.28 el cual lo igualaremos a la Ecuación 3.3:

$$\frac{\tan(\varphi')}{FS} = 0.28$$

$$FS = \frac{\tan(\varphi')}{0.28}$$

Reemplazando el valor del ángulo de fricción interna.

$$FS = \frac{\tan(35)}{0.28}$$

$$FS = 2.50$$

3.5 Secuencia de construcción

Una vez determinado los parámetros de diseño de escombrera y que el factor de seguridad sea el adecuado, pasamos a cómo será construida la escombrera. En el capítulo 2 se especifica que el método de explotación, que se emplea en la concesión San Rafael, es a cielo abierto por el método de descubiertas, además, se tiene una

producción diaria de 12 m³/día, que incrementa en un 10% anualmente por los 5 años previstos por J. Gencón en su diseño de explotación.

Para cumplir con nuestro objetivo, (nos vemos en la obligación de agregar una actividad más, siendo esta la construcción de la escombrera se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3 Ciclo de trabajo diario de los mineros de San Rafael

Fuente: Autores de este documento

3.5.1 Estimación de volúmenes de estéril y vegetal

En el estudio realizado por J. Gencón (2020), se describe que el terreno es relativamente plano con poca variación en las elevaciones, además, detalla que la capa vegetal se encuentra presente hasta la cota 50 y la capa estéril desde la cota 50 hasta la 47.5. de esta manera generamos los bloques de explotación tal y como se tiene previsto en los próximos 5 años. Si bien es cierto, la topografía del lugar no es contante, existen zonas que alcanzan los 59 m.s.n.m y, otras incluso, los 50 m.s.n.m.

Por lo antes mencionado, se esperaba que el crecimiento de los volúmenes a tratar de estéril y vegetal aumentaran en un 10% anualmente como se tenía previsto en el incremento de la producción, pero este incremento anual no se ve evidenciado en los cálculos realizados en el software como se observa en la Tabla 3.1, debido a que existen zonas donde se concentra más capa vegetal que en otras que ocurre lo contrario.

Tabla 3.1 Volúmenes anuales extraídos según el frente y la época del año.

		Volumen vegetal m ³		Volumen estéril m ³	
		Frente norte	Frente sur	Frente norte	Frente sur
Año1	Invierno	65	0	1260	0
	Verano	0	50	0	1260
Año2	Invierno	491	0	1260	0
	Verano	0	548	0	1260
Año3	Invierno	290	0	1260	0
	Verano	0	325	0	1260
Año4	Invierno	74	0	1260	0
	Verano	0	124	0	1260
Año5	Invierno	0	0	1260	0
	Verano	0	70	0	1260
Total		920	1117	6300	6300
		2037		12600	

Fuente: Autores de este documento

Se debe aclarar que los volúmenes teóricos de estéril y vegetal eran de 12,414.10 m³ y 1,634.63 m³ respectivamente, pero los volúmenes obtenidos, mediante el software Recmin, fueron de 12,600 m³ y 2037 m³.

Además, de esta tabla se puede deducir los volúmenes diarios de material, siendo de 7.30 m³/día el primer año, 9.88 m³/día el segundo año, 8.70 m³/día el tercer año, 7.55 m³/día el cuarto año y 7.20 m³/día el quinto año.

3.5.2 Dimensionamiento de escombrera por día

La escombrera propuesta se construye simultáneamente a la explotación sobre el área explotada el día anterior. Se podrían definir 3 zonas siendo, de derecha a

izquierda, la zona de escombrera, zona de desmonte y frente de explotación, como se muestra en la Figura 3.4.

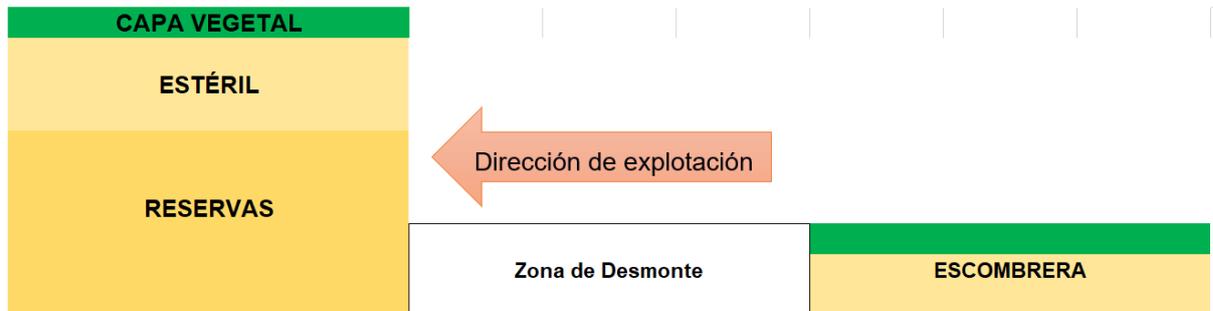


Figura 3.4 Esquema del sistema de explotación vista frontal.

Fuente: Autores de este documento

En la zona de la escombrera es el espacio vacío donde los trabajadores verterán el material estéril y vegetal para la posterior construcción. Dicha área tiene las mismas dimensiones que el frente de explotación, de esta manera, las dimensiones de la escombrera que tendrían cada año según el volumen de material diario a tratar se ven a continuación en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Dimensiones de escombrera en cada año de explotación

Año	X (m)	Y (m)	Z (m)	Volumen (m ³)
1	1.33	5.00	1.10	7.30
2	1.80	5.00	1.10	9.88
3	1.58	5.00	1.10	8.70
4	1.37	5.00	1.10	7.55
5	1.31	5.00	1.10	7.20

Fuente: Autores de este documento

Donde:

X: Ancho de la escombrera.

Y: Profundidad de la escombrera.

Z: Altura de la escombrera.

La profundidad de la escombrera es constante ya que comprende la misma profundidad del frente de explotación, la altura de la escombrera se encuentra compuesta por 0.80 m de material estéril y 0.30 m de capa vegetal y, finalmente, podemos observar como el ancho varia producto a los diferentes volúmenes de material que se tiene en cada año como se muestra en la Tabla 3.1, cabe recalcar que este ancho puede variar con un ± 0.20 m debido a la existencia de mayor o menor cantidad de material en la zona que nos encontremos.

3.5.3 Método de construcción

El método de construcción puede ser una tarea sencilla pero necesaria. La forma en la que se va a construir la escombrera es la misma del avance de la explotación, es decir, de sur a norte y de este a oeste (en el caso de la zona norte) como se observa en la Figura 3.5 y, de norte a sur y este a oeste (en el caso de la zona sur) como se observa en la Figura 3.6.

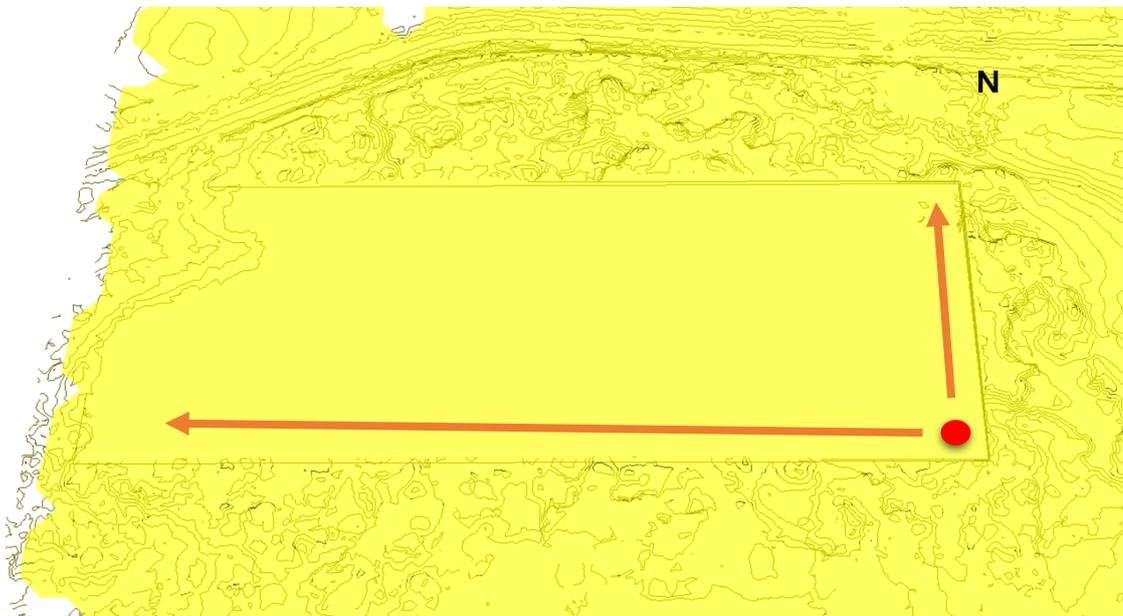


Figura 3.5 Dirección de avance en la zona norte

Fuente: Autores de este documento

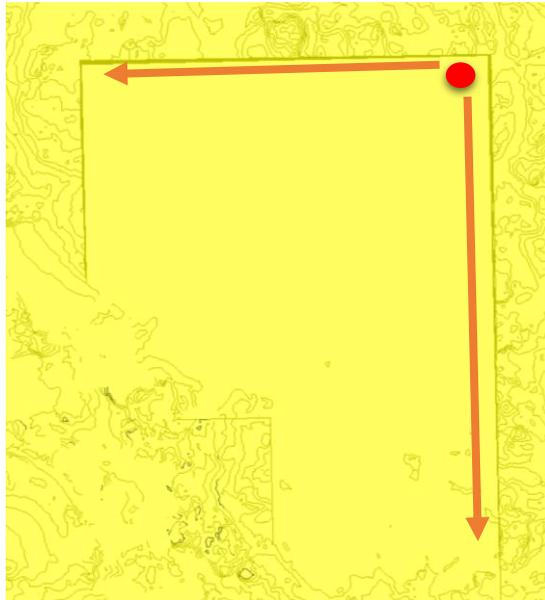


Figura 3.6 Dirección de avance en la zona Sur

Fuente: Autores de este documento

Para la construcción de la escombrera se deben seguir los siguientes pasos:

1. Realizar el desbroce del frente de explotación, acomodando este material en dirección contraria al frente de explotación, es decir, en la zona de construcción de la escombrera. Tratando de separar la capa vegetal de la estéril.
2. Se debe esparcir el material estéril en el área de construcción de manera uniforme y posteriormente compactar el material con el fin de conseguir una rigidez del mismo y evitar que, por las propiedades físicas del material, se desmorone o que exista una pérdida de material por acción de las corrientes de viento propias del lugar.
3. Agregar y compactar el material hasta tener una altura de 0.80 m.
4. Terminado con el estéril, se esparce la capa vegetal sobre la escombrera de manera uniforme hasta obtener un espesor de 0.30 m esta capa se debe compactar suavemente para evitar que se pierda por acción de las corrientes de

aire, pero no compactar excesivamente ya que se pierde ciertas propiedades del suelo para la fertilidad.

3.5.4 Planificación Semestral

Para una mejor visualización, se modelaron los bloques de las escombreras por cada semana de trabajo ya que, al manejar volúmenes tan bajos, no se logra observar un cambio notorio en el software. Cada bloque se irá colocando a medida que avanza la explotación como se observa en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9.

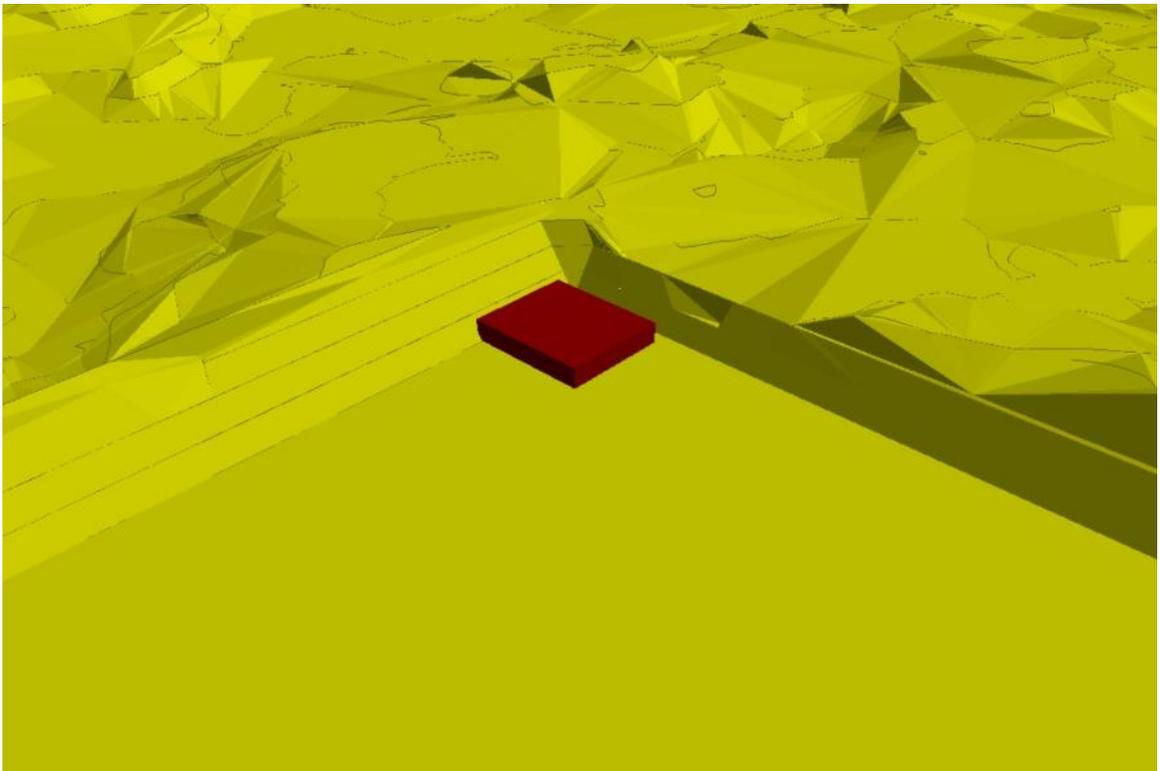


Figura 3.7 Primer bloque de la escombrera zona norte

Fuente: Autores de este documento



Figura 3.8 Segundo bloque de la escombrera zona norte

Fuente: Autores de este documento



Figura 3.9 Tercer bloque de la escombrera zona norte

Fuente: Autores de este documento

De esta manera se irán construyendo los bloques de las escombreras hasta obtener una planificación semestral como se observa en la Figura 3.10.

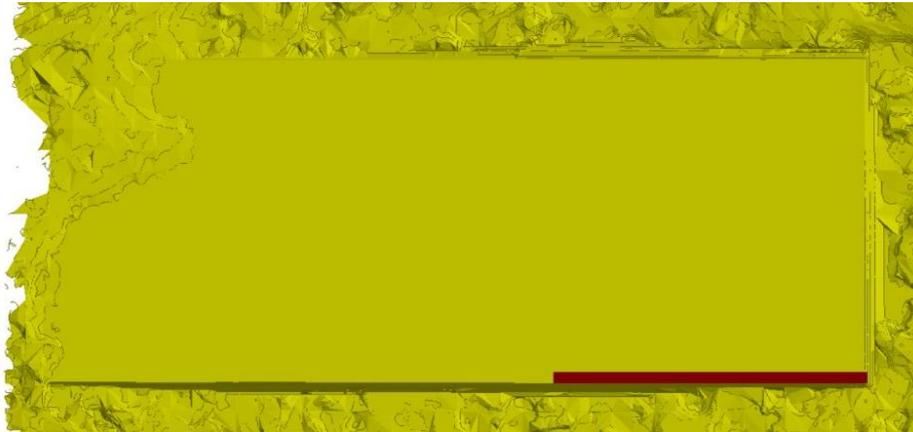


Figura 3.10 Primer semestre de construcción de escombrera en zona norte

Fuente: Autores de este documento

Como se menciona en el inciso 3.5.1 de este documento, se planifica semestralmente producto del cambio de frente de explotación debido a las precipitaciones que ocurren en los meses de invierno, para ello se planifica la secuencia de construcción anual como se observa en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Planificación de la secuencia de construcción.

		Año 1												Año 2												Año 3												Año 4												Año 5											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Frente	Norte	█	█	█	█								█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
	Sur					█	█	█	█	█							█	█	█	█	█	█							█	█	█	█	█	█							█	█	█	█	█	█							█	█	█	█	█	█			

Fuente: Autores de este documento

De esta manera, obtuvimos la simulación de construcción de las escombreras tanto para la zona norte como para la zona sur como se observa en la Figura 3.11 y Figura 3.12.

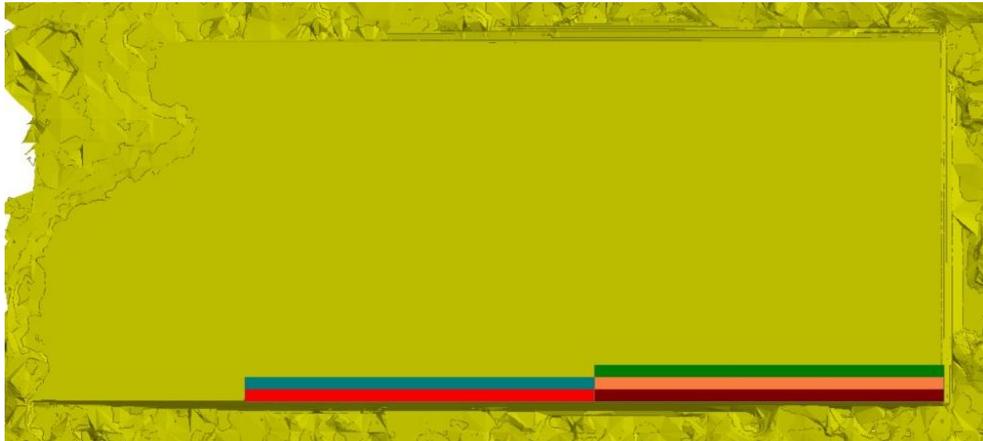


Figura 3.11 Secuencia final de construcción en la zona norte

Fuente: Autores de este documento



Figura 3.12 Secuencia final de construcción en la zona sur

Fuente: Autores de este documento

Como podemos observar, la construcción de las escombreras no abarca toda el área de explotación y esto es debido a que a la mina le queda un aproximado tiempo de vida de 40 años (según los cálculos obtenidos en el software Recmin) por lo que extendimos el diseño de la escombrera a lo largo de las áreas norte y sur. Cabe recalcar que este diseño está previsto hasta la cota 45 que es en la cota hasta donde se tienen las reservas probadas.

Para ello se simuló cómo quedarían las escombreras al culminar la actividad minera como se muestra en la Figura 5.5 y Figura 5.10 en el apartado de Anexos.

3.6 Remediación ambiental

3.6.1 Elección de especie forestal

La especie forestal que se va a tomar en cuenta para la reforestación de la zona es la *Leucaena Trichodes*, también llamada Chapra o Pela caballo por los lugareños. Este tipo de arbusto es muy usado en las remediaciones de las obras civiles en los taludes para construcción de carreteras con el fin de dar un diseño paisajístico y fortalecer la cara de los taludes gracias a sus raíces que le darán firmeza. También esta especie es usada como leña y la goma que vierte la planta se aplica para provocar la caída del pelo del cuero cabelludo (Aguirre Mendoza & Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2012).



Figura 3.13 Especie forestal elegida nativa de bosques secos

Fuente: Aguirre Mendoza & Ministerio del Ambiente de Ecuador (2012)

3.6.2 Método de plantación

La plantación se debe realizar una vez terminada la preparación del terreno y aprovechar las épocas de invierno, es decir, las épocas lluviosas entre los meses de

diciembre a abril para evitar los días soleados y reducir costos en el riego de las plantas.

La plantación está directamente relacionada a la extensión del terreno y a la separación adecuada para el crecimiento de los arbustos. Según la ficha de la especie *Leucaena Trichodes* “Introducción de 90 variedades de *Leucaena leucocephala* (C. Lam) De Wit a las condiciones del CATIE” (Cubillos, n.d.), se recomienda sembrar realizando una malla de 1 x 1 m como se muestra en la Figura 2.8, si se desea acelerar el crecimiento de las plantas se debe agregar polietileno (7 x 20 cm) a la mezcla de tierra y abono en relaciones (3:1:1), de esta manera se plantea sembrar un total de 44,800 arbustos.

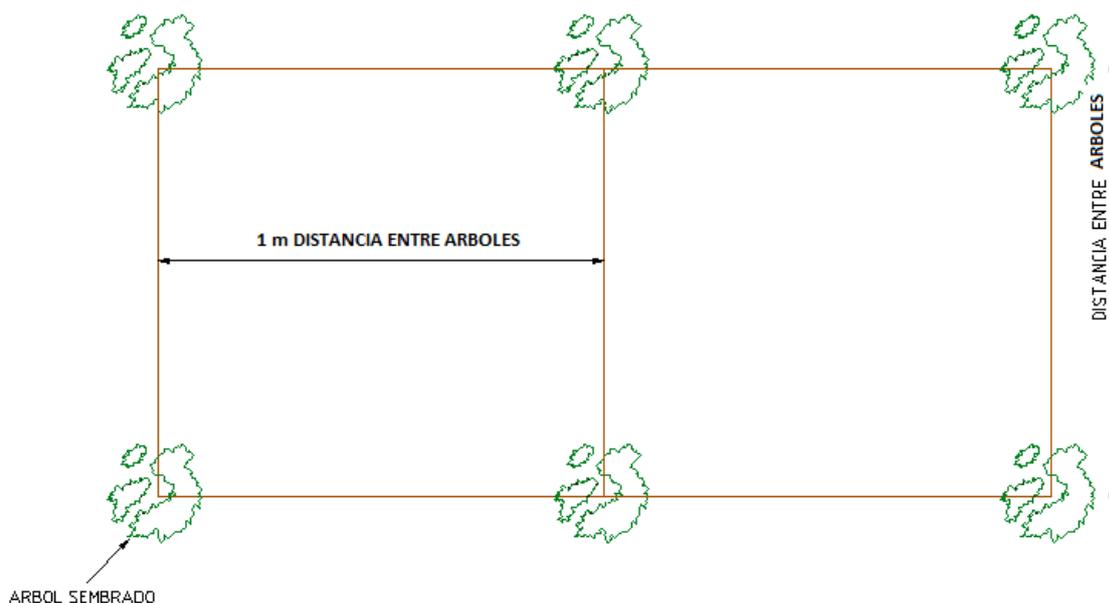


Figura 3.14 Esquema de la malla de siembra de arbustos

Fuente: Avedaño Morales (2014)

La malla propuesta para la siembra de Chapra se encuentra diseñada para adaptarse a la zona como bosque seco típico del cantón de Santa Elena, aun así, dicha malla puede ser modificada a gusto, necesidad y facilidad de los mineros de San Rafael. Las especies forestales mencionadas en la Tabla 2.4 se pueden sembrar en

mallas de 1 x 1 m o de mayores dimensiones con el fin de minimizar costos y tiempos de reforestación y remediación del medio.

3.7 Tiempo de siembra

Se sabe que una persona puede sembrar aproximadamente entre 40 a 50 semillas por día teniendo en cuenta desde la preparación de la mezcla de la capa vegetal con el abono en las proporciones 3:1 hasta la colocación de la semilla como se ha mencionado en incisos anteriores.

La siembra de los arbustos de Chapra se propone posterior a la explotación para evitar la contaminación de la mezcla con el polvo generado por dicha actividad y, además, por el poco personal que manejan de 6 trabajadores. Si dicho personal trabaja constante para la siembra arbustiva se espera que en un tiempo de 5 a 6 meses se termine el proceso de siembra de las 44,800 semillas de Chapra en toda el área de la escombrera.

En adición, debemos tomar en cuenta el tiempo que toma la planta en crecer, según la ficha de la especie forestal (Rose, 1987). Esta especie toma alrededor de 2.5 a 3 años en crecer, por lo que es necesario que en este tiempo se haga un seguimiento diario que consta del riego constante los primeros 6 meses y monitoreo cada mes del crecimiento de las plantas. Es importante resaltar que estos 6 meses de riego constante se pueden hacer en épocas de invierno, de esta manera aprovechamos las precipitaciones y evitamos el gasto de consumo de agua externa que no poseen con facilidad los moradores.

Es así como se determina el tiempo de cierre de mina, dando un total de aproximadamente 3.5 años para un correcto cierre de actividades mineras, minimizar impactos ambientales y camuflar la zona trabajada con el paisaje que caracteriza a esta zona.

Tabla 3.4 Planificación del cierre minero

Etapa	Labor	Años																			
		1				2				3				4							
		Trimestres																			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Preparación	Mezcla orgánica	■	■																		
	Riego	■	■			■	■			■	■			■	■						
	Siembra Norte	■																			
	Siembra Sur		■																		
Monitoreo	Control de crecimiento		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
Cierre	Inspección de autoridades																	■	■		

Fuente: Autores de este documento

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se propuso el diseño de las escombreras en las zonas de trabajo norte y sur del tipo excenta que sirve, además, para el plan de cierre minero propuesto.
- Se determinaron los volúmenes de material estéril y vegetal que se extraerán en la actividad minera siendo de 12,600 m³ y 2,037 m³ respectivamente, que podrían representar un gran impacto ambiental si no son tratados o almacenados adecuadamente.
- El diseño de las escombreras dependía directamente del tipo de material a tratar, siendo estos arena y arcilla. Por lo tanto, la altura establecida para el diseño fue de 1.10 m, dándonos un factor de seguridad de 2.50 lo que significa una estabilidad de por vida a pesar de que estemos tratando con este tipo de material antes mencionado.
- Los volúmenes diarios entre capa estéril y capa vegetal a manejar para la construcción de las escombreras serán de 7.30 m³/día el primer año, 9.88 m³/día el segundo año, 8.70 m³/día el tercer año, 7.55 m³/día el cuarto año y 7.20 m³/día el quinto año.
- La construcción de las escombreras tomará 5 años en finalizarlas, que será el mismo tiempo que tomará en culminar la etapa de extracción ya que se aprovechó el método de explotación empleado para trabajar a la par dicha etapa con la etapa de cierre de mina.
- Se determinó la siembra de la especie forestal *Leucaena Trichodes* o también llamada Chapra con el fin de adecuar paisajísticamente la zona afectada por la

explotación minera y esta, a su vez, ayude a la escombrera a mantener su estabilidad gracias a sus raíces.

- Se estableció la planificación para la etapa de cierre de mina que toma un tiempo de 3.5 años desde que culmina la etapa de explotación hasta el cierre definitivo de las actividades garantizando así una buena práctica minera por parte de los mineros artesanales de la comuna San Rafael.

4.2 Recomendaciones

- Realizar al menos 2 calicatas en la zona norte y zona sur de la concesión de 2 a 4 metros con la finalidad de confirmar las reservas inferidas y adaptar el diseño de escombrera al nuevo diseño de explotación.
- En caso de alargar la vida de la mina en la concesión San Rafael, se deberá seguir las mismas indicaciones para la construcción de las escombreras y el plan de cierre minero.
- Realizar el plan de remediación después de la etapa de explotación ya que, en caso de confirmar las reservas inferidas por debajo de la cota 45, sea mucho más fácil desplazar y reacomodar la escombrera ya construida.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre Mendoza, Z., & Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2012). Especies Forestales Bosques Secos Ecuador. *Bosques Secos En Ecuador y Su Diversidad*, 74. <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Bosques-Secos4.pdf>
- Aranibar Aguilar, J. (2017). *GEOTECNIA APLICADA AL DISEÑO DE ESCOMBRETERAS EN LABORES MINERAS DEL GRUPO AMAPA S.R.L PACHACONAS, ANTABAMBA*. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.
- ASAMBLEA NACIONAL. (2018). *Ley de Minería del República del Ecuador*. 60. <http://www.controlminero.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/08/Ley-de-Minería-21-mayo-2018.pdf>
- Avedaño Morales, L. M. (2014). *Planeamiento Minero Para La Explotación a Cielo Abierto De Puzolana Correspondiente Al Título Minero L 0764-15 Ubicado En El Municipio De Paipa, Departamento De Boyacá*.
- Barros, D. R. N. (2018). *DISEÑO DE EXPLOTACIÓN MINERA DEL YACIMIENTO SAN RAFAEL Y PROPUESTA DE ELABORACIÓN DE BALDOSAS HIDRÁULICAS, SANTA ELENA*.
- Becerra, A. (2003). *Proyecto de Explotación del Yacimiento San Rafael*. 7(0), 14.
- Cubillos, G. (n.d.). *Introducción de 90 variedades de Leucaena leucocephala (C. Lam) De Wit a las condiciones del CATIE*.
- Donaire Marquez, M., Lopez Jimeno, C., Aduvire Pataca, O., García Bermúdez, P., & Vaquero Díaz, I. (2013). *GUÍA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESCOMBRETERAS*. Junta de Andalucía, 296.
- Gencón, J. C. T. (2020). *Diseño de explotación minera a cielo abierto para materiales de construcción*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Herrera, J., & Ortíz, F. (2006). *Métodos de Minería a Cielo Abierto*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, 119.
- Maritínez, M. C. (2006). *Polo de Promoción Minero Ambiental en el Contexto de la Agenda Local 21: Península de Santa Elena (Ecuador)*.
- Pérez, E. A. (2005). *Estabilidad de taludes homogéneos*. 61.
- Rose, Z. (1987). *Leucaena leucocephala (Lam.) Wit, L. De. (1987). Phytologia* 63, 63, 304–306.
- Sánchez Santoyo, A. Y. (2018). *Durmiendo sobre oro y plata , un suelo incómodo : La pobreza en pueblos mineros de Chihuahua y Zacatecas , 2000 y 2010 , según etapas de vida de la mina*. FLACSO México.
- Secretaría de Economía. (2015). *Manual del inversionista en el sector minero en Mexico*. Secretaría de Economía, 74. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/385468/MANUAL_DEL_INVERSI ONISTA.pdf

ANEXOS

ANEXO A

Volumen de material de la escombrera final en la cota 45

Tabla 4.1 Cálculo de material estéril y capa vegetal.

	Bloque de explotación Norte m ³	Bloque de explotación Sur m ³	Total m ³
Capa Vegetal	21.600	45.600	67.200
Total, semestral	504	504	1.008
Capa Estéril	57.600	121.600	179.200
Total, semestral	1.680	1.680	3.360

Fuente: Autores de este documento

Los cálculos se los obtuvo en el modelamiento 3D por modelo de bloques en el software Recmin.

ANEXO B

Secuencias de construcción de las escombreras tanto para la zona norte como para la zona sur:

Norte:



Figura 4.1 Secuencia de construcción 2do año

Fuente: Autores de este documento



Figura 5.2 Secuencia de construcción 3er año

Fuente: Autores de este documento

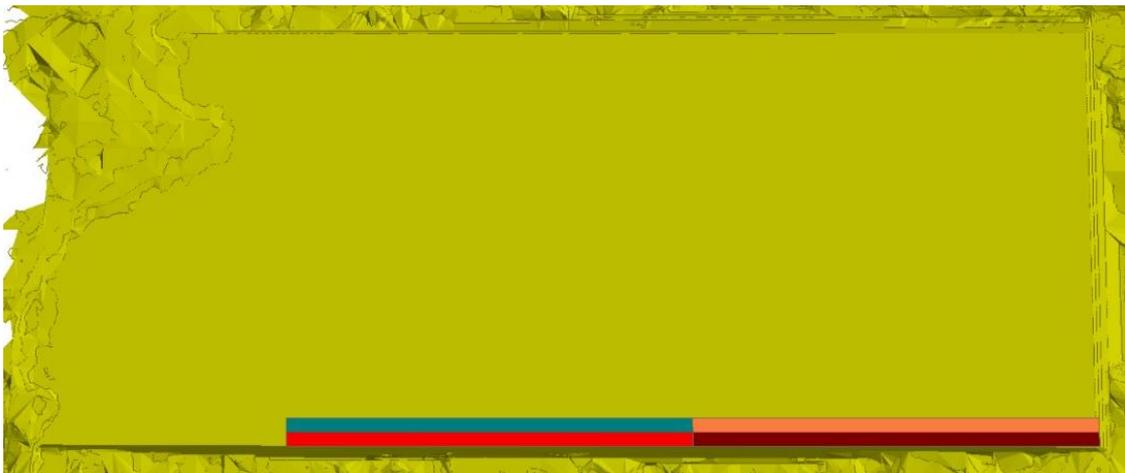


Figura 4.2 Secuencia de construcción 3er año

Fuente: Autores de este documento



Figura 4.3 Secuencia de construcción 6to año

Fuente: Autores de este documento

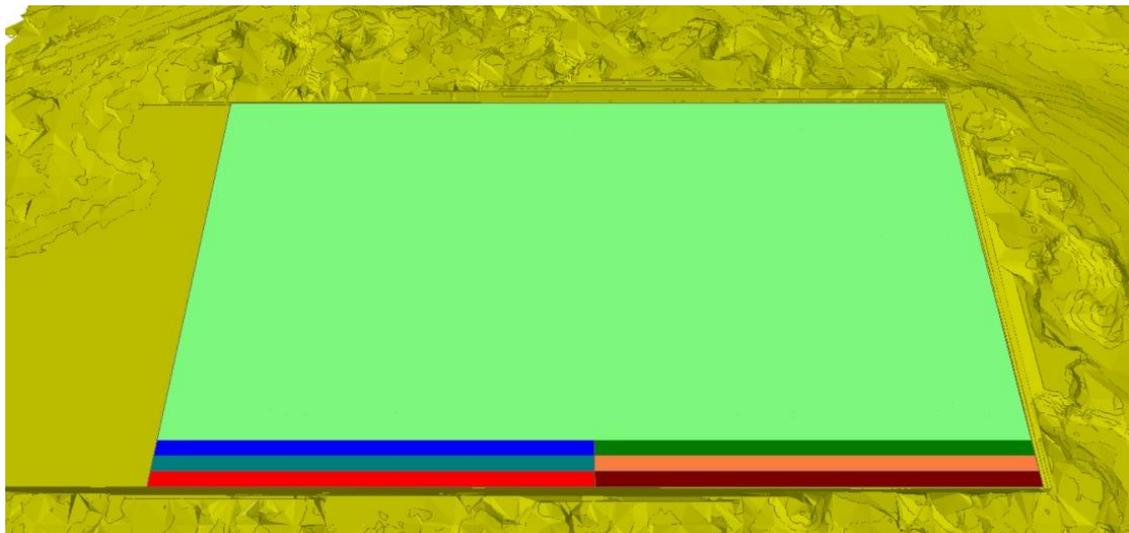


Figura 4.4 Secuencia de construcción final de la cota 45

Fuente: Autores de este documento

Sur:

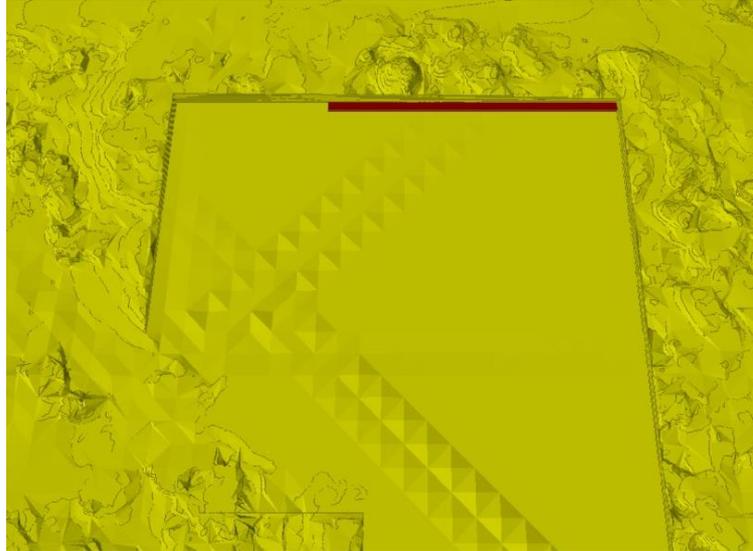


Figura 4.5 Secuencia de construcción 1er año

Fuente: Autores de este documento

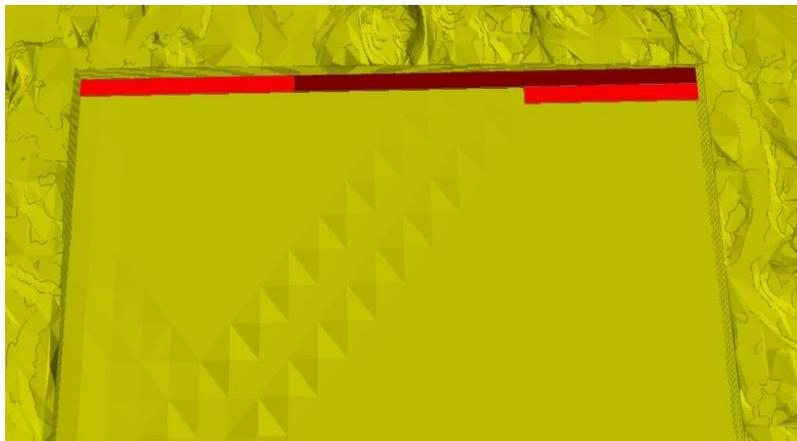


Figura 4.6 Secuencia de construcción 2do año

Fuente: Autores de este documento



Figura 4.7 Secuencia de construcción 3er año

Fuente: Autores de este documento

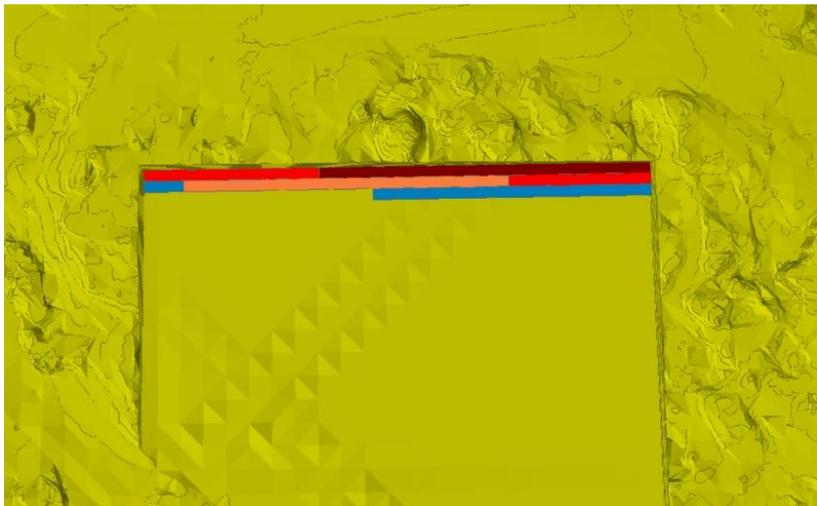


Figura 4.8 Secuencia de construcción 4to año

Fuente: Autores de este documento

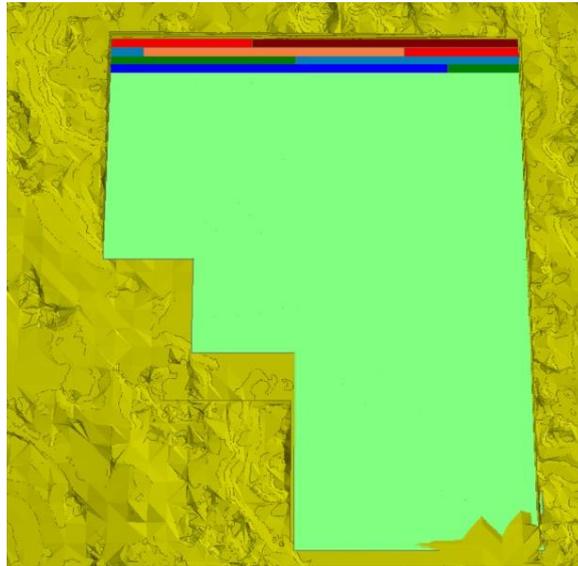


Figura 4.9 Secuencia de construcción final de la cota 45
Fuente: Autores de este documento

Concesión vista en planta finalizada:

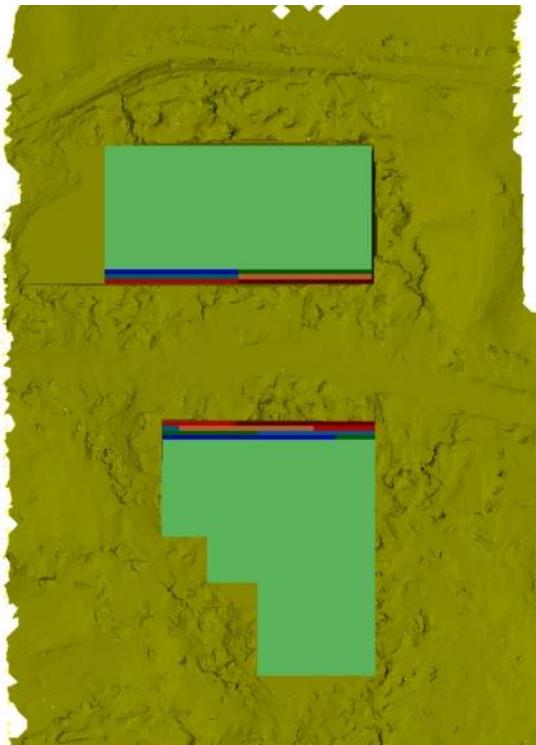


Figura 4.10 Secuencia de construcción final de la cota 45
Fuente: Autores de este documento