

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Propuesta de un sistema de análisis de estabilidad
física para fines cierre de una pila de lixiviación,
Huancayo 2021**

Edgar Monzón Gonzales

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a mis padres y familiares por su apoyo incondicional. A esta gran institución de educación superior, Universidad Continental, por brindarme la oportunidad de lograr mi titulación, y a mi asesora Mg. Verónica Nelly Canales Guerra, por su apoyo incansable para lograr culminar esta tesis.

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis está dedicado a mis familiares, compañeros de estudios y amistades, con quienes compartimos momentos y anécdotas durante mi etapa de carrera universitaria; su apoyo moral e incondicional me permitió concluir mi carrera y realizar esta tesis de titulación, que resume lo aprendido y vivido con el objetivo de cumplir mis metas.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Justificación e importancia	3
1.5 Limitaciones de la presente investigación	4
1.6 Hipótesis	4
1.6.1 Variable	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes de la investigación.....	5
2.1.1 Antecedentes internacionales	5
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	6
2.2 Bases teóricas	7
2.2.1 Actividad minera	7
2.2.2 Actividades de cierre	7
2.2.2.1 Investigaciones geotécnicas.....	7
2.2.2.2 Excavación de calicatas	7
2.2.2.3 Muestreo	8
2.2.2.4 Ensayos de laboratorio.....	8
2.2.2.5 Investigaciones geofísicas.....	9
2.2.2.6 Estudio de peligro sísmico.....	9
2.2.2.7 Caracterización geomecánica del macizo rocoso.....	9
2.2.2.8 Estudio geológico	10
2.2.2.9 Nivel freático debajo de la cimentación.....	11
2.2.2.10 Modelo geotécnico.....	11
2.2.2.11 Herramienta computacional.....	11
2.2.2.12 Análisis de estabilidad física.....	11
2.2.2.13 Factor de seguridad.....	12
2.2.3 Plan de cierre de minas.....	12
2.2.4 Pila de lixiviación.....	13
2.2.5 Marco legal	13

2.2.5.1	Ley 13	
2.2.5.2	Ley de Reglamento de Cierre de Minas.....	14
2.2.5.3	Normas ambientales.....	14
2.2.5.4	Conceptos claves de cierre de minas	14
2.2.6	Definición de términos básicos.....	15
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		17
3.1	Método, tipo o alcance de la investigación.....	17
3.1.1	Métodos de investigación	17
3.1.1.1	Método general o teórico de la investigación	17
3.1.2	Alcance de la investigación	17
3.1.2.1	Tipo de investigación.....	17
3.1.3	Diseño de la investigación	17
3.1.4	Población y muestra.....	18
3.1.4.1	Población	18
3.1.4.2	Muestra	18
3.1.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	18
3.1.5.1	Técnicas de recolección de datos.....	18
3.1.5.2	Instrumentos de recolección de datos	19
3.2	Materiales y métodos.....	19
3.2.1	Etapa 1: Revisión de documentos y gestiones	20
3.2.2	Etapa 2: Investigaciones en campo	21
3.2.2.1	Plano de ubicación.....	21
3.2.2.2	Ejecución de las investigaciones en campo	23
3.2.3	Etapa 3: Procesamiento de la información.....	26
3.2.3.1	Procesamiento de las investigaciones de campo.....	26
3.2.3.2	Vista de planta y secciones geométricas de la pila de lixiviación en proceso de cierre.....	28
3.2.4	Etapa 4: Resultados, conclusiones y recomendaciones.....	31
3.2.4.1	Modelamiento geotécnico y obtención de resultados de análisis de estabilidad física de un pila de lixiviación en proceso de cierre.....	31
3.2.4.2	Ejemplo de análisis de estabilidad física en las secciones A-A y B-B	31
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		37
4.1	Presentación de resultados	37
4.2	Discusión de resultados.....	41
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES		44
<u>Anexos</u>		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Grupos de clasificación SUCS.....	8
Tabla 2: Interpretación de los valores de RMR (Bieniawski, 1989).....	10
Tabla 3: Factor de seguridad mínimo	12
Tabla 4: Relación de equipos, herramientas y materiales para el ejemplo	21
Tabla 5: Ejemplo de ubicación con coordenadas UTM para la excavación de calicatas.....	23
Tabla 6: Ejemplo de ubicación de ensayos geofísicos de refracción sísmica	25
Tabla 7: Ejemplo de ubicación de ensayos geofísicos de sondaje eléctrico vertical	25
Tabla 8: Ejemplo de resumen de calicatas y el tipo de suelo.....	26
Tabla 9: Software computacionales para el ejemplo de análisis de estabilidad física	29
Tabla 10: Ejemplo de resumen de calicatas y el tipo de suelo.....	37
Tabla 11: Clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Suelos (SUCS).....	38
Tabla 12: Clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Suelos (SUCS).....	38
Tabla 13: Ejemplo de resultados del ensayo SEV-1	39
Tabla 14: Ejemplo de resultados del ensayo RS	39
Tabla 15: Ejemplo de resultados de análisis de estabilidad física en una pila de lixiviación – Factor de seguridad (F.S)	40
Tabla 16: Factor de seguridad mínimo	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección de la pila de lixiviación.....	13
Figura 2: Ejemplo de una vista de planta de ubicación de calicatas en la pila de lixiviación..	22
Figura 3: Ejemplo de ubicación de ensayos geofísicos en una pila de lixiviación	22
Figura 4: Ejemplo de registro de excavación de calicata.....	24
Figura 5: Ejemplo de resultado del ensayo geofísico de refracción sísmica.....	27
Figura 6: Ejemplo del resultado del ensayo geofísico de sondaje eléctrico vertical.....	28
Figura 7: Ejemplo de vista de planta de corte de perfil A-A y B-B de una pila de lixiviación	30
Figura 8: Ejemplo de secciones A-A y B-B de una pila de lixiviación	30
Figura 9: Ejemplo del modelamiento geotécnico de la sección A-A de una pila de lixiviación.....	31
Figura 10: Ejemplo de análisis estático no drenado en la Sección A-A' - Tipo Falla Circular.....	32
Figura 11: Ejemplo de análisis pseudo-estático no drenado en la Sección A-A' - Tipo Falla circular	33
Figura 12: Ejemplo de análisis estático no drenado en la Sección A-A' - Tipo Falla Bloque.	33
Figura 13: Ejemplo de análisis pseudo-estático no drenado en la Sección A-A' - Tipo Falla Bloque.....	34
Figura 14: Ejemplo de análisis estático no drenado en la Sección B-B' - Falla tipo Circular.	34
Figura 15: Ejemplo de análisis pseudo-estático no drenado en la Sección B-B' - Falla tipo Circular	35
Figura 16: Ejemplo de análisis estático no drenado en la Sección B-B' - Falla tipo Bloque...	35
Figura 17: Ejemplo de análisis pseudo-estático no drenado en la Sección B-B' - Falla tipo Bloque	36

RESUMEN

Esta tesis tiene como objetivo presentar una propuesta de un sistema de análisis de estabilidad física para fines de cierre de una pila de lixiviación basada en el decreto para cierre de componentes mineros (Ley 28090) y su modificación (Ley 28507). Es una guía que interpreta la normativa vigente con la finalidad de determinar los procedimientos adecuados para el correcto análisis de estabilidad física. En los objetivos específicos se determinaron los estudios básicos de campo y el correcto análisis de estabilidad física de acuerdo con la normativa. La metodología aplicada es del modo inductivo/deductivo, debido a que parte de una observación general para establecer las fuentes. El tipo de investigación tiene un enfoque cuantitativo con un alcance descriptivo y el diseño es no experimental y no es transeccional. Los resultados de campo se obtuvieron a partir del procesamiento de la información de acuerdo con la norma 050 E de suelos y cimentaciones, información que se utilizó como data de entrada para diseñar el modelo geotécnico de la pila y, posteriormente, realizar las corridas de análisis de estabilidad utilizando un programa geotécnico. El resultado final se denomina factor de seguridad, cada valor indica si la pila de lixiviación es estable o inestable. Se concluye que en esta propuesta se ha adecuado a la normativa vigente, Ley 28507, que de manera implícita indica realizar análisis de estabilidad física en componentes mineros en cierre, pero no detalla los procedimientos de ejecución.

Palabras clave: cierre de minas, estabilidad física, pila de lixiviación.

ABSTRACT

This thesis aims to present a proposal for a physical stability analysis system for the closure of a heap leach based on the decree for closure of mining components Law No. 28090 and its amendment Law No. 28507. It is a guide that interprets to current regulations in order to determine the appropriate procedures for the correct analysis of physical stability. In the specific objectives, the basic field studies and the correct analysis of physical stability were determined according to the regulations. The applied methodology is inductive / deductive because it starts from a general observation to establish the sources. The type of research has a quantitative approach with a descriptive scope and the design is non-experimental and not transectional. The field results were obtained from the processing of the information according to the standard 050 E of soils and foundations, which was used as input data to carry out the geotechnical model of the pile and later carry out the stability analysis runs. using a geotechnical program. The final result is called the factor of safety, each value indicates whether the heap leach is stable or unstable. It is concluded that this proposal has been adapted to the current regulation law 28507 that implicitly indicates to carry out physical stability analysis in mining components in closure but does not detail the execution procedures.

Keywords: mine closure, physical stability, leach pad.

INTRODUCCIÓN

Las unidades mineras que operan a cielo abierto procesan sus minerales en depósitos llamados *pilas de lixiviación*. Estas estructuras se construyen con la capacidad de almacenar millones de toneladas de mineral. Las pilas funcionan mediante el sistema de goteo continuo de solución química sobre el mineral de oro que se encuentra depositado. La acumulación de desmonte de suelo y roca mineralizada forma bancos de hasta 10 metros de altura con separaciones adecuadas entre niveles denominados ancho de banquetas, de hasta 11 metros, y también se utiliza como acceso auxiliar para ingreso de vehículos mineros (1).

Durante la etapa de operación, el área de geotecnia de la unidad minera verifica constantemente que la pila en su totalidad se encuentre en condiciones estables. El estudio de análisis de estabilidad física se realiza dos veces al año y sirve para tener un control interno, y también es presentado ante las entidades gubernamentales durante las fiscalizaciones (2).

Cuando el recurso mineral se agota, la pila de lixiviación entra a la etapa de cierre definitivo. El Ministerio de Energía y Minas, a través del Congreso de la República, ha publicado el Decreto Ley 28090, modificado mediante la Ley 28507, su Reglamento (D.S. N.º 033-2005-EM), anexos y las modificaciones de esta mediante los Decretos Supremos N.ºs 035-2006-EM, 045-2006-EM y 013-2019-EM, que establece de manera implícita el cierre de la pila de lixiviación (3).

La referida ley determina un alcance de todas las actividades que se deben realizar en la etapa de cierre para diferentes estructuras que se encuentran declaradas dentro de la unidad minera. El análisis de estabilidad física es una de las actividades principales que contempla la ley vigente para el proceso de cierre. Esta actividad se encuentra contemplada en la ley de manera implícita, pero no indica los procedimientos básicos que se deben realizar hasta llegar a los resultados.

Por esta razón, se propone un sistema de análisis de estabilidad física para fines de cierre de una pila de lixiviación. El objetivo general de este trabajo es determinar los procedimientos adecuados que permitan realizar el correcto análisis de estabilidad física; en tanto que los objetivos específicos empiezan con los estudios básicos de campo y el procesamiento final de donde se obtienen los resultados denominados factor de seguridad. El método aplicado es del modo inductivo/deductivo, debido a que parte de una observación general para establecer las fuentes. El tipo de investigación es cuantitativa y con alcance descriptivo, no experimental transeccional. Después de realizar las investigaciones de campo, se procesará la información, se hará un modelo geotécnico y se generarán secciones que sirven para efectuar las corridas de análisis de estabilidad física. El resultado final, denominado factor de seguridad, determinará

si la pila se encuentra en condiciones estables o inestables. La interpretación del valor que se obtiene es numérica; cuando es mayor o igual que 1.1, se encuentra estable; cuando es menor que 1.1, se encuentra inestable. Al concluir este trabajo, se verificará si esta propuesta cumple con el objetivo general y los objetivos específicos propuestos, y que se encuentran adecuados a la normativa vigente, Ley 28507, que de manera implícita indica realizar análisis de estabilidad física en componentes mineros en cierre, pero no detalla los procedimientos.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento del problema

Las unidades mineras que se encuentran operativas a nivel internacional y nacional están conformadas por diferentes estructuras. Para un sistema de explotación a tajo abierto, tienen una planta de beneficio, una pila de lixiviación, tajo de minerales, botadero de desmonte de mina, depósito de material orgánico e inorgánico, accesos mineros y componentes auxiliares como son oficinas, ambientes para almacén, taller de mecánica, polvorín y un establecimiento de salud. En un sistema de explotación subterránea no se utiliza la pila de lixiviación; en este sistema de operación, el mineral se procesa en la planta por el método llamado flotación y el componente principal es la planta de molienda y chancado (8).

La pila de lixiviación tiene la función de acumular millones de toneladas métricas de minerales que provienen en forma diseminada impregnadas en los suelos y bloques de rocas que se extraen del tajo de minerales denominado *open pit*, por ser un método de explotación a cielo abierto (5).

El apilamiento se realiza mediante la conformación de bancos y rampas que sirven para el tránsito de los vehículos cargados de mineral. La vida útil de la pila se determina en tres etapas: (a) construcción, (b) operación, y (c) cierre parcial o definitivo. La vida útil depende del tonelaje de mineral proyectado por extraer del tajo, el mismo que será separado del desmonte. Cuando se acumula el volumen proyectado, que generalmente son millones de toneladas métricas, y se alcanza el llenado horizontal y vertical de mineral, la pila ingresa a la etapa de cierre definitivo (6).

Chile es un país que se dedica a la extracción y procesamiento de minerales; la pila de lixiviación es una estructura que ingresa dentro de la faena minera y el análisis de estabilidad física es una actividad principal que se realiza para fines de mitigación de impactos ambientales (7).

En el Perú, una de las actividades principales que contempla la norma de cierre de minas es el análisis de estabilidad física. Esta actividad se regula en la Ley 28090, modificada mediante Ley 28507, el Reglamento (DS N.º 033-2005-EM), anexos y las modificaciones de esta mediante los Decretos Supremos N.ºs 035-2006-EM, 045-2006-EM y 013-2019-EM.

El estudio de estabilidad física que requiere la pila de lixiviación sirve para garantizar la estabilidad total de la estructura durante la etapa de operación, cierre y poscierre. En esta etapa se realiza el análisis de estabilidad física de acuerdo con un cronograma establecido, que permite verificar si la pila se encuentra en condiciones estables o inestables (8).

Las autoridades gubernamentales fiscalizan minuciosamente el cumplimiento de la actividad por parte del titular minero con mayor importancia a la pila de lixiviación. Debido a que su

operación está sujeta al regado continuo de soluciones con cianuro, la inestabilidad de la pila ocasionaría grandes daños ambientales.

Por todo lo expuesto, se llega a la formulación del problema en el 1.2.

El análisis de estabilidad física se realiza cumpliendo cuatro procedimientos básicos: (a) recolección de la información existente, (b) investigaciones de campo, (c) procesamiento de información, y (d) resultados, conclusiones y recomendaciones (3). En el punto 1.2 se formula el problema.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuáles son los procedimientos adecuados, de acuerdo con la normativa vigente, para el correcto análisis de estabilidad física en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021?

1.2.2 Problemas específicos

¿Cuáles son los estudios básicos de campo adecuados, de acuerdo con la normativa vigente, en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021?

¿Cuál es el correcto análisis de estabilidad física, de acuerdo con la normativa vigente, en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar los procedimientos adecuados, de acuerdo con la normativa vigente, para el correcto análisis de estabilidad física en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir los estudios básicos de campo, de acuerdo con la normativa vigente, en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021.

- Determinar el correcto análisis de estabilidad física, de acuerdo con la normativa vigente, en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021.

1.4 Justificación e importancia

Ambiental: Esta propuesta de crear un sistema de análisis de estabilidad física para fines de cierre de una pila de lixiviación permitirá controlar mejor los taludes de las pilas de lixiviación que se encuentran en proceso de cierre. Al garantizar la estabilidad física de la pila, los taludes y el entorno ambiental estarán más seguros, se mantendrán firmes y no colapsarán en el tiempo; la flora, la fauna, el agua, el suelo y el aire no se verán afectados ni su normal funcionamiento se verá interrumpido. Esta propuesta se desarrolla interpretando la norma ambiental de cierre de minas, Ley 28090, modificada mediante Ley 28507, el Reglamento (DS N.º 033-2005-EM), anexos y las modificaciones de esta mediante los Decretos Supremos N.ºs 035-2006-EM, 045-2006-EM y 013-2019-EM (9).

Social: Con la propuesta de crear un sistema de análisis de estabilidad física para fines de cierre de una pila de lixiviación se protege el medio ambiente y todo lo que hay en él. Aguas abajo de la pila de lixiviación existe un entorno ambiental variado: fuentes de agua (como los riachuelos), sembríos y hasta centros poblados. Mantener seguros y estables los taludes de la pila de lixiviación evitará un impacto negativo en el medio ambiente y su entorno, manteniendo la calidad de vida de personas, animales y plantas (9).

Económica: Tener una propuesta para un sistema de análisis de estabilidad física de una pila de lixiviación en proceso de cierre permitirá al titular minero planificar mejor sus actividades de campo y de gabinete, así como evitar demoras en la ejecución del cierre de la pila de lixiviación, ya que utilizará esta propuesta como guía para la ejecución desde el inicio hasta el término; minimizando horas hombre, se minimizarán los impactos sociales y ambientales durante la ejecución y se logrará obtener resultados en tiempos menores (9).

Importancia de la investigación: La propuesta de un sistema de análisis de estabilidad física es muy importante para la etapa de abandono y cierre de una pila de lixiviación en minería superficial. El aseguramiento físico de la estructura permite dar seguridad al entorno ambiental y social donde se encuentre instalada. El titular y la zona de influencia directa e indirecta tendrán un impacto positivo respecto de su economía, debido a que la pila no

representará ningún peligro para la salud humana y tampoco ocasionará daños ambientales que requieran ser manejados con una partida económica (6).

1.5 Limitaciones de la presente investigación

El trabajo de investigación denominado *Propuesta de un sistema de análisis de estabilidad física para fines de cierre de una pila de lixiviación* es una guía que muestra cuatro etapas básicas para realizar actividades en componentes mineros de la misma característica y función, basada en el Decreto Ley N.º 28090 y modificada mediante la Ley 28507.

Por ningún motivo se debe utilizar esta guía para realizar actividades de cierre en otros componentes mineros.

1.6 Hipótesis

Los procedimientos propuestos para el correcto análisis de estabilidad física de la pila de lixiviación en proceso de cierre cumplen con la normativa vigente.

1.6.1 Variable

Sistema de análisis de estabilidad física, de acuerdo con la normativa vigente para el cierre adecuado de la pila de lixiviación.

En el Anexo I se muestra la matriz de consistencia (p. 50) y en el Anexo II, la operacionalización de variables (p. 51).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

En la tesis denominada *Análisis probabilístico de estabilidad de taludes en el relleno sanitario Parque Ecoindustrial Miramar* se elabora una guía metodológica para analizar los lixiviados mediante la elaboración de un modelo de estabilidad que evalúa algunos de los factores que se relacionan con un talud artificial, teniendo en cuenta las presiones que genera la presencia de agua y lixiviado en el interior de las celdas (9).

En el artículo 137 del Reglamento del SEA de Chile se presenta un plan de cierre de una faena minera, especificando un conjunto detallado de técnicas y actividades que el titular minero deberá realizar desde que inician las operaciones mineras con la finalidad de prevenir, minimizar o controlar los riesgos y efectos negativos que se puedan generar en la vida e integridad de las personas, así como controlar los efectos medioambientales comprometidos, tendientes a asegurar la estabilidad física (7).

El *Manual de derrumbes...* se constituye en una guía metodológica que permite entender todo lo relacionado con los derrumbes que se dan de forma natural y en otros casos inducidos por las actividades del hombre. El propósito fundamental de este manual es dar a conocer históricamente los diferentes derrumbes significativos que han sucedido en Estados Unidos y las causas que los han originado. Las políticas anticuadas de uso de la tierra no reflejan una planificación óptima del uso de tierras vulnerables a deslizamientos; es por ello que también se originan diferentes derrumbes que ocasionan grandes pérdidas económicas (10).

La *Guía para el manejo de depósitos de relaves* presenta un plan de cierre definitivo que se relaciona con las medidas para garantizar la estabilidad física y química. Se proponen los monitoreos periódicos a largo plazo, planes y mantenimiento, construcción y recuperación de las instalaciones al cierre y el manejo de aguas (11).

La guía para evaluar estudios de impacto ambiental semidetallados de proyectos mineros muestra un alcance que se debe realizar en cada actividad minera, debido a que la afectación no solo se da durante la existencia de las actividades mineras, sino como pasivos ambientales. La estabilidad física presenta parámetros claves para caracterizar el riesgo a sismos de alta intensidad que puedan afectar las instalaciones de la mina y causar consecuencias catastróficas, tales como rupturas y fallas de la presa de relaves (5).

2.1.2 Antecedentes nacionales

La *Guía ambiental para el control de la estabilidad* de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina muestra una serie de técnicas que se realizan en los proyectos que se encuentran en etapa conceptual, en etapa operativa y, finalmente, cuando llegan a la etapa de cierre. Como alcance general se muestran los pasos para una estabilización uniforme que garantice el cierre definitivo mediante métodos de estabilización (12).

El Ministerio de Energía y Minas, en el *Reglamento para el cierre de minas*, determina que el estudio de estabilidad física tiene carácter estable para tiempos cortos, medianos y a largo plazo que se aplica a instalaciones mineras como es una pila de lixiviación, siendo el propósito no generar riesgos, accidentes o alguna contingencia que afecte al medio ambiente y a las personas (3).

La *Guía ambiental para proyectos de lixiviación en pilas* establece que uno de los objetivos principales es la caracterización de locaciones, que consiste en identificar y evaluar a detalle las condiciones de los materiales de fundación que se utilizarán en los cimientos y las condiciones hidrogeológicas aplicadas a las aguas subterráneas. Parte de los estudios básicos que se realizan en el sitio donde se construirá la pila de lixiviación son los estudios de geotecnia, información fundamental para establecer las bases de los cimientos, el sistema de drenaje, relleno estructural y la altura de apilamiento de mineral (8).

La *Guía para el manejo de pilas de lixiviación* determina que el manejo de los lixiviados se realiza después de la construcción, una vez que se ha confirmado que la estructura se encuentra estable físicamente, lista para operar. El manejo del drenaje de lixiviados se centra en colectarlos y llevarlos a la planta de procesamiento donde se realizará la recuperación del oro (6).

El plan de cierre de la Unidad Minera Tucari describe las actividades de cierre y que se enmarcan en la estabilidad física de los componentes principales y secundarios, como es la pila de lixiviación en los sectores n.º 1, n.º 2 y, especial, tajo abierto y botaderos (13).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Actividad minera

Las actividades mineras son aquellas actividades que se ejecutan dentro del área de una concesión que contiene diferentes tipos de minerales metálicos (3).

Para desarrollar esta actividad, las empresas concesionarias deben cumplir una serie de requisitos englobados en la Ley de Minería, como los siguientes: Concesión minera o Contrato de explotación, Permiso de uso del terreno superficial, Estudio de impacto ambiental, Licencia de uso de agua, Licencia social y Autorización de inicio; en algunos casos es de Reinicio de operaciones en mediana y gran minería, pequeña minería, minería artesanal (14).

2.2.2 Actividades de cierre

2.2.2.1 Investigaciones geotécnicas

Son las labores que se realizan en el área de estudio de la pila de lixiviación. Están relacionadas con el estudio de los suelos y las rocas encontradas en la superficie o al interior del subsuelo (15).

Durante las investigaciones geotécnicas se realizan una serie de ensayos que se practican en los suelos y las rocas. Los ensayos más conocidos son el sondeo de penetración estándar (SPT), el penetrómetro dinámico ligero (DPL, *Light dynamic penetrometer*), la prueba de penetración por cono (CPT, *cone penetration test*), el ensayo de densidad relativa (método del cono de arena), la humedad relativa (ensayo por el método del humidómetro Speedy). También forman parte de las investigaciones geotécnicas las perforaciones diamantinas que se hacen con la finalidad de conocer los estratos de suelo y roca. Las muestras que se obtienen son testigos circulares de suelo y rocas (16).

2.2.2.2 Excavación de calicatas

En la *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina* se establece que mediante la excavación de calicatas se obtiene información importante del terreno de fundación en evaluación, porque permite conocer sus propiedades físicas naturales (12).

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

En la publicación sobre el sistema unificado de clasificación de suelos (Unified Soil Classification System [USCS]), se muestra la nomenclatura de evaluación de suelos que permite describir la textura y el tamaño de las partículas (16).

En la Tabla 1, se aprecian los grupos de clasificación SUCS.

Tabla 1: Grupos de clasificación SUCS

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien gradada	w
Arena	s	Pobrementemente gradada	p
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	c	Arcilloso	c
Orgánico	o	Límite líquido alto (>50)	H
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	L

Nota. G, s, M, c, o, H, L: Cada sigla pertenece a una descripción del tipo de suelo que se encontró durante la excavación de una calicata para el ejemplo (10). Adaptado de R. M. N.º 406-2018-VIVIENDA.

2.2.2.3 Muestreo

La *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina* indica que se debe realizar muestreos de suelos y rocas en las áreas donde se están haciendo labores de excavación de calicatas. El muestreo consiste en tomar una medida de suelo y roca representativa y expresada en kilogramos. Una vez terminado el muestreo, se envía al laboratorio geotécnico especializado en suelos y rocas (12).

2.2.2.4 Ensayos de laboratorio

Se realizan en las muestras de suelos y rocas extraídas de las calicatas excavadas para conocer con mayor detalle las propiedades físicas y mecánicas de cada muestra (12).

Los ensayos de laboratorio más comunes son:

- Distribución del tamaño del grano
- Gravedad específica
- Densidad relativa

- Límites Atterberg
- Humedad - densidad
- Compresión triaxial
- Consolidación
- Permeabilidad

2.2.2.5 Investigaciones geofísicas

La *Guía de estudios geofísicos* muestra un conjunto de técnicas de prospección que se desarrollan a partir de métodos físicos y geoeléctricos que permiten determinar la presencia de cuerpos y estructuras en el subsuelo que no pueden verse superficialmente, debido a que sus propiedades físicas son distintas al medio que les rodea. Mediante la geofísica, se pueden encontrar en el subsuelo cuerpos de agua, yacimientos minerales, estructuras de suelo y roca subterránea, fallas geológicas, cavernas y túneles subterráneos (17).

2.2.2.6 Estudio de peligro sísmico

En el estudio de peligro sísmico se define la probabilidad de que en un lugar pueda ocurrir un movimiento sísmico de diferentes intensidades de valor igual o diferente a un valor fijado en el estudio. Este modelo predice de manera probabilística las aceleraciones máximas que podrían ocurrir en cualquier punto del país en el basamento rocoso. El peligro sísmico evalúa la sismicidad, la tectónica y la sismotectónica del área de interés, con la finalidad de determinar el peligro sísmico probabilístico para un área determinada de estudio (12).

2.2.2.7 Caracterización geomecánica del macizo rocoso

La *Guía metodológica para la evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes* describe los parámetros y características del basamento rocoso superficial y subterráneo. Las pilas de lixiviación se asientan sobre basamentos rocosos que pocas veces afloran superficialmente. Será normal, entonces, que con el transcurso del tiempo ciertos sectores de la mina sean inundados o sufran deslizamientos, generados por el incremento en la presión de poros o cambios en la resistencia al corte que ha sufrido el macizo rocoso. Los mecanismos de rotura se clasifican en rotura plana, cuña, vuelco y circular (18).

La clasificación geomecánica RMR (del inglés *rock mass rating*) es una referencia mundial que fue realizada por Bieniawski en el año 1973. Posteriormente tuvo modificaciones, siendo aceptada nuevamente en el año 1989. El índice RMR básico de una roca se obtiene estimando valores de varios parámetros. El RMR₇₆ y el RMR₈₉ son los más utilizados en la evaluación de basamento rocoso y para determinar la extensión de dominios geomecánicos en una mina, sea superficial o subterránea (19).

En la Tabla 2, se muestra la interpretación de valores de RMR.

Tabla 2: Interpretación de los valores de RMR (Bieniawski, 1989)

Calidad del macizo	RMR	Clasificación del macizo rocoso
Roca muy buena	81 - 100	I
Roca buena	61 - 80	II
Roca regular	41 - 60	III
Roca mala	21 - 40	IV
Roca muy mala	0 - 20	3

Nota: El puntaje total del RMR está definido por: $RMR = (i) + (ii) + (iii) + (iv) + (v) - \text{Ajuste}$ por orientación de discontinuidades. Adaptado de Osinergmin, 2017.

2.2.2.8 Estudio geológico

La *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina* muestra la importancia de efectuar el estudio geológico de sitio, porque a través de él se identifica la presencia de fallas activas o inactivas, la presencia de labores mineras abandonadas o activas, inestabilidad del sitio que pueda generar derrumbes, desprendimientos, o el tipo de área existente, si es plana, empinada, ondulada; se identifica qué tipo de superficie se encuentra, que puede ser rocosa o suelo compacto, o suelo suelto. Se identifica la propensión de un sitio a riesgos geológicos. Los estudios geológicos sirven para analizar la estabilidad de estos materiales, incluyendo la excavación y remoción de materiales que pueden tener mayor influencia en las futuras construcciones o cambio de ubicación del sitio (12).

En la *Guía ambiental para proyectos de lixiviación en pilas* se estudia a nivel de detalle la ubicación de la instalación, se identifican y evalúan los peligros geológicos que tendrán un impacto sobre la integridad de las instalaciones por construir (8).

2.2.2.9 Nivel freático debajo de la cimentación

En el estudio de recarga del agua subterránea con aguas residuales urbanas se verificó que el nivel freático o manto freático se halla en el subsuelo y en muchos casos aflora en la superficie terrestre. La única manera de ubicar el nivel freático en el subsuelo es mediante la construcción de pozos de observación que permitan conocer la fluctuación del agua subterránea (20).

2.2.2.10 Modelo geotécnico

La *Guía metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes* muestra cómo se desarrolla el modelo geotécnico que se elabora después de realizar un reconocimiento concreto del basamento rocoso y su entorno. Los submodelos que constituyen la información base del modelo geotécnico pueden considerar modelos geológicos, estructurales, sobre calidad del basamento rocoso y los modelos estratigráficos de los suelos superficiales que se encuentran sobre el basamento rocoso. En el modelo geotécnico se representan gráficamente los estratos encontrados y sus características (18).

2.2.2.11 Herramienta computacional

En la guía de herramientas computacionales se establece que se debe utilizar un *software* de modelamiento adecuado para realizar el análisis de estabilidad física. La obtención del factor de seguridad y la determinación de la posición de la superficie de falla crítica conforman la base del análisis de estabilidad de física en taludes, y se realizan con métodos determinísticos o probabilísticos. La resistencia al corte de Mohr-Coulomb está caracterizada por los parámetros ángulo de fricción interna y cohesión; es el modelo de material más simple que se utiliza en un análisis de estabilidad de taludes. En el método de equilibrio límite se obtiene el factor de seguridad y la posición de la superficie de falla crítica en taludes (21).

2.2.2.12 Análisis de estabilidad física

La *Guía ambiental para proyectos de lixiviación en pilas* determina que el análisis de estabilidad física en taludes se realiza con la finalidad de evaluar y confirmar que las estructuras sean estables o inestables en períodos de retorno a

corto, mediano y largo plazo. El resultado que se obtiene del análisis de estabilidad física es el *factor de seguridad* (8).

2.2.2.13 Factor de seguridad

La *Guía ambiental para proyectos de lixiviación en pilas* establece el método para la evaluación de la estabilidad de un talud. El método consiste en seleccionar una sección bidimensional de una pila de lixiviación, definiendo una superficie de probable falla donde se calcula el factor de seguridad a lo largo de la superficie proyectada. La evaluación de la estabilidad de la pendiente requiere una cuidadosa selección de la superficie de falla más probable por suceder, así como un método técnicamente correcto y consistente para calcular el factor de seguridad (8). En la Tabla 3 se muestran los factores mínimos de seguridad para el talud.

Tabla 3: Factor de seguridad mínimo

Escala	Consecuencia de falla	Factor mínimo estático ^c	Factor Mínimo pseudo-estático ^d	Probabilidad máxima de falla $P(F < 1)$ ^b
Banco	Bajo - Alto	1.10 ^a	-	20 -50 %
Inter-rampa	Bajo	1.15 – 1.20	1.00	25 %
	Moderado	1.20	1.00	20 %
	Alto	1.20 – 1.30	1.10	10 %
Overall	Bajo	1.20 – 1.30	1.00	15 - 20 %
	Moderado	1.30	1.05	10 %
	Alto	1.30 – 1.50	1.10	5 %

Nota: Adaptado de Rennat, 1997. a) 1.10: Valor referencial de un factor de seguridad que se obtiene al realizar el análisis de estabilidad física para el ejemplo. b) %: Probabilidad máxima de falla de acuerdo con el factor de seguridad obtenido para la estructura analizada para el ejemplo. c) Factor mínimo estático: Valor que se obtiene en una estructura estática para el ejemplo. d) Factor mínimo pseudo-estático: Valor que se obtiene en una estructura con un nivel de sismicidad para el ejemplo.

2.2.3 Plan de cierre de minas

El reglamento para el cierre de minas indica que el plan de cierre de minas es un instrumento de gestión ambiental que está conformado por varias actividades técnicas y legales que son ejecutadas obligatoriamente por el titular de actividad minera. El objetivo del plan de cierre es rehabilitar las áreas utilizadas y que han sido perturbadas, con la finalidad de que alcancen las características de un ecosistema compatible o amigable y en un ambiente saludable y adecuado para el desarrollo de la vida y la conservación del paisaje, y todos los seres vivos (3).

2.2.4 Pila de lixiviación

La *Guía ambiental* indica que la pila de lixiviación es una instalación minera para la producción de metales preciosos y cobre. La lixiviación de minerales preciosos se da en la parte centro del norte del Perú. La lixiviación de los metales de cobre se da en el sur del Perú. Las pilas de lixiviación se encuentran ubicadas en diversos entornos climáticos y físicos. La técnica de construcción es mediante capas impermeabilizadas tanto expansivas como reutilizables.

El plan de abandono y restauración final muestra los procedimientos de funcionamiento de la pila de lixiviación, que es por riego continuo, tal como se aprecia en la figura 1. En la parte inferior de la pila se lixivía el mineral, luego es transportado a la planta de procesamiento para la obtención del oro. Sobre el nivel del terreno natural se coloca un sistema de subdrenaje para captar aguas subterráneas; sobre ello se coloca una capa de material de suelo de baja permeabilidad y se reviste una geomembrana y un sistema de tuberías ranuradas con una capa de grava filtro que permite coleccionar y conducir la solución de la lixiviación filtrada a la poza de solución (1).

Los minerales diseminados de suelo y roca para ser lixiviados se colocan en capas que forman un talud de 8.0 m de altura con un equilibrio de 1.5H:1.0V, y se deja una berma de 11.0 m de ancho, siendo el talud promedio del relleno de 2.5H:1.0V.

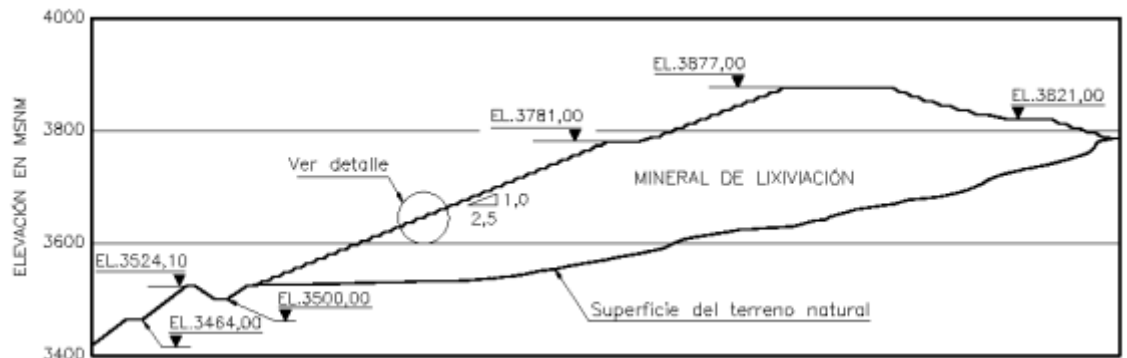


Figura 1. Sección de la pila de lixiviación

Nota: Tomada de Greystar Resources Ltd., 2009, p. 15.

2.2.5 Marco legal

2.2.5.1 Ley

La principal norma legal que regula los planes de cierre de minas es la Ley 28090, modificada con la Ley que regula el cierre de minas (Ley 28507, en adelante, la Ley), y Reglamento para el cierre de minas, aprobado por DS 033-

2005 EM2 (en adelante, el Reglamento). Además, existe un conjunto de todas las normas legales que regulan los aspectos ambientales de las operaciones mineras.

Se recomienda revisar el marco legal antes de elaborar un plan de cierre de minas. Entre otras fuentes, se puede visitar la página web del Ministerio de Energía y Minas (<http://www.minem.gob.pe>) para obtener las últimas versiones de las normas aquí citadas u otras relevantes que pudieran ser promulgadas en el futuro (2).

2.2.5.2 Ley de Reglamento de cierre de minas

El Reglamento de cierre de minas establece los procedimientos y condiciones para la presentación, revisión, aprobación y actualización del Plan de cierre de minas y la correspondiente garantía financiera, así como las condiciones y procedimientos para la ejecución del Plan de cierre de minas, liquidación o ejecución de la garantía financiera y seguimiento de las actividades en el sitio después del cierre.

Un plan de cierre de minas debe ser elaborado por una entidad consultora debidamente inscrita en el registro que para el efecto administra la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM), de conformidad con los Decretos Supremos 016-2005-EM y 039-2005-EM3 (2).

2.2.5.3 Normas ambientales

El artículo 18 D.S. N.º 016-93-EM indica que los titulares de la actividad minera en operación podrán suscribir un contrato con el Ministerio de Energía y Minas con base en el Plan de adecuación del manejo ambiental (PAMA) y/o Estudio de impacto ambiental (EIA) presentado, el cual formará parte integrante del mismo. El contrato será de adhesión y su modelo será aprobado por resolución del Ministerio de Energía y Minas. La Dirección General de Minería dispondrá cada seis meses la verificación del cumplimiento del contrato (22).

2.2.5.4 Conceptos claves de cierre de minas

El artículo 7º, para los efectos del presente Reglamento, adopta las definiciones contenidas en el artículo 2º del Título Preliminar del Reglamento para la protección ambiental en las actividades minero-metalúrgicas, aprobado por

Decreto Supremo N.º 016-93-EM y sus respectivas modificatorias, siempre que no se opongan a lo dispuesto en el presente artículo.

El artículo 10º del Reglamento define la jerarquía de los objetivos generales y el contenido de un Plan de cierre de minas. Los objetivos específicos de cierre de la mina son establecidos para cada proyecto y son aprobados por la autoridad competente. El cierre de minas incluye actividades que inician desde la elaboración del plan de cierre conceptual hasta la realización de las actividades de cierre progresivo (3).

El artículo 25º de ejecución de medidas de cierre progresivo señala que el titular de actividad minera está obligado a cumplir de manera eficaz y oportuna con las medidas de cierre progresivo establecidas en el plan de cierre de minas aprobado, durante la vida útil de su operación minera, debiendo ejecutarlas en forma inmediata cuando cesen las operaciones mineras en las áreas o instalaciones que correspondan, conforme con el cronograma aprobado por la autoridad competente. Solo podrán ser objeto de cierre final, las labores, áreas e instalaciones que por razones operativas no hayan podido cerrarse durante la etapa productiva o comercial (3).

2.2.6 Definición de términos básicos

- **DGAAM:** La Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros es el órgano de línea encargado de implementar acciones en el marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (3).
- **DGM:** La Dirección General de Minería es el órgano de línea que autoriza las actividades de exploración y explotación; otorga concesiones de beneficio, transporte minero y labor general; aprueba los programas de inversión y estudios de factibilidad correspondientes y vela por el cumplimiento de los contratos de estabilidad tributaria (3).
- **DIA:** La Declaración de Impacto Ambiental es un documento en el cual se recogen los resultados de una evaluación del impacto ambiental por consecuencia de una actividad (3).
- **EIA:** El Estudio de Impacto Ambiental es un documento que el titular minero presenta al Estado para demostrar que cuenta con un plan de acción para manejar los posibles impactos sobre el ambiente y las comunidades que lo rodean (23).
- **MINEM:** El Ministerio de Energía y Minas es la entidad del Poder Ejecutivo encargada del sector energético y minero del Perú (3).

- **PAMA:** El Programa de Adecuación y Manejo Ambiental es un instrumento que permite al titular minero alinearse con la legislación medioambiental del Perú (3).
- **PCM:** El Plan de Cierre de Minas es un instrumento de gestión ambiental que está conformado por varias actividades técnicas y legales que son ejecutadas obligatoriamente por el titular de actividad minera (3).
- **Estabilidad física:** Actividad que se realiza con la finalidad de evaluar y confirmar que el talud y/o taludes de diferentes estructuras construidas a base de tierra y concreto sí son estables o inestables. El análisis de estabilidad es un estudio que contempla actividades de campo y gabinete (12).
- **Factor de seguridad:** Es el resultado del estudio de análisis de estabilidad física, son valores enteros con decimales que tienen una interpretación solo para la estructura a base de tierra o concreto en evaluación (12).
- **Pila de lixiviación:** La pila de lixiviación es una instalación minera aplicable en el Perú para la producción de metales preciosos y cobre (8).
- **Investigaciones geotécnicas:** Son actividades de campo que se realizan en un área determinada de estudio y están relacionadas con el estudio de los suelos y las rocas que podrían ser superficialmente o el interior del subsuelo (12).
- **Excavación de calicatas:** La excavación de una calicata es de mucha utilidad para las investigaciones geotécnicas, porque permite conocer la naturaleza del terreno de fundación, parte del suelo superficial y su composición (12).
- **Estudio geológico:** Mediante el estudio de la geología se logra identificar el tipo de área superficial y subterránea que hay en una zona de estudio; parte de ello es la geodinámica, la geomorfología, la fisiografía y la geología estructural, que permite detectar si hubo avalanchas, desprendimientos y derrumbes (12).
- **Modelo geotécnico:** La guía de herramientas computacionales muestra cómo en el modelo geotécnico se representan gráficamente los estratos encontrados de suelo y roca y sus características físicas y mecánicas (21).
- **Herramienta computacional:** La guía de herramientas computacionales indica que el software de diseño geotécnico sirve para realizar el análisis de estabilidad física de una estructura construida a base de tierra o de concreto. El resultado que se obtiene se llama factor de seguridad, que determina la posición de la superficie de falla más crítica del análisis de estabilidad física de taludes (21).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1 Método, tipo o alcance de la investigación

3.1.1 Métodos de investigación

3.1.1.1 Método general o teórico de la investigación

La investigación se desarrolla dentro del método científico del modo inductivo/deductivo. Se hace una observación general para establecer las fuentes de donde se realice la recolección de datos, tomando las características encontradas como es la información del lugar, administrativa y legal de acuerdo con la normativa vigente con fines de cierre de una pila de lixiviación (24).

3.1.2 Alcance de la investigación

3.1.2.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada con enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo. Como fuente de información del estudio, en la fase 1 se tomarán registros de campo sin alterar sus características, la información administrativa será una fuente referencial y la Ley 28057 se revisará y aplicará, pues es la base legal de todo el procedimiento. La información que se revisa y describe en la fase 1, se procesa en la fase 2, en donde se elabora el sistema de análisis de estabilidad física para el cierre adecuado de una pila de lixiviación.

3.1.3 Diseño de la investigación

La investigación no experimental transeccional se analiza con una sola variable que es la estabilidad física de la pila de lixiviación con fines de cierre. Los datos recogidos en campo no sufren modificación alguna, se mantienen con su descripción, que permite el modelo geotécnico y la corrida para obtener los resultados, según el siguiente esquema:

O ———▶ X

Sistema de análisis de estabilidad física: X

Donde:

X: es la única variable, sistema de análisis de estabilidad física

O: es la observación realizada

3.1.4 Población y muestra

3.1.4.1 Población

Las unidades mineras cuentan con áreas específicas de operaciones. La pila de lixiviación, las pozas de adsorción, desorción y regeneración, el proceso de Merrill Crowe y la concentradora de minerales se encuentran dentro del conjunto de componentes de la *planta de beneficio*.

3.1.4.2 Muestra

La muestra es la pila de lixiviación en donde se recogerán datos de sus principales características: información del lugar, información administrativa y la normativa legal que se utiliza en el estudio. A continuación, se describe el procedimiento del muestreo.

- Datos de campo:
 - Investigaciones geotécnicas: se recolecta información del lugar seleccionando zonas aleatorias por conveniencia dentro del límite de la pila de lixiviación. En el suelo de fundación se excava y se obtienen muestras representativas, de las cuales se describen las características principales que cumplen un rol importante en el modelo geotécnico.
 - Investigaciones geofísicas: usando un lector digital, se recoge información del lugar mediante la inyección de energía eléctrica al subsuelo para obtener la representación gráfica.
- Datos administrativos - documentos referenciales: se selecciona la información relevante que se refiere a la pila de lixiviación, tal como el expediente de construcción, informes técnicos, planos de ingeniería y de topografía, estudios geotécnicos, geofísicos y de peligro sísmico.
- Documentos legales: se verifica que la norma legal vigente describa los procedimientos adecuados para el cierre de la pila de lixiviación.

3.1.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.1.5.1 Técnicas de recolección de datos

La técnica para recolectar datos del estudio se apoya en la observación, la descripción y la revisión de la información existente basada en documentos técnicos de construcción, documentos administrativos, documentos legales e información relevante para el cierre de la pila de lixiviación. En el sitio se toma información según las zonas elegidas, se describe en fichas y formatos de campo.

3.1.5.2 Instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se realiza mediante dos fuentes:

- Datos de campo: Para las investigaciones geotécnicas, los datos se recogen en fichas de campo elaboradas en Excel e impresas en papel, las cuales están diseñadas para abarcar las características que se puedan encontrar en la zona de estudio. En gabinete, los datos recogidos son llenados en las hojas de Excel.

En las investigaciones geofísicas, los datos se recogen en fichas de campo y luego se procesan en datos de Excel.

Los datos del subsuelo mediante el método geoelectrico permiten recoger información de los estratos de suelo y roca que se encuentran debajo de la superficie de la pila de lixiviación. Esta información geofísica es un dato de entrada en el modelo geotécnico para el análisis de estabilidad física (15).

El estudio de peligro sísmico lo proporciona el titular minero. Este documento lo realiza con un especialista en riesgo sísmico, y su uso es para diseñar pilas de lixiviación y otros componentes mineros. La información se analiza según la ubicación y se determina un comportamiento sísmico adecuado (12).

El estudio se adecúa con los datos establecidos en la norma E.030 de ingeniería sismorresistente (25).

- Documentos administrativos: Es información muy importante, porque contiene el expediente de construcción de la pila de lixiviación. Incluye la parte constructiva y las etapas que tuvo hasta llegar a la parte operativa donde fue recibido mineral proveniente del tajo, cuando ha llegado a su máximo nivel de almacenamiento de mineral e ingresa a la etapa de cierre. Todo eso se refleja en documentos digitales que son entregados por la unidad minera. Para recibir el expediente digital, se crea una carpeta exclusiva con el nombre de 'Información recibida'.

3.2 Materiales y métodos

En el proceso de cierre de una pila de lixiviación se recomienda cumplir cuatro etapas:

- Etapa 1: Revisión de documentos y gestiones:
 - Administrativos

- Legales, etc.
- Gestiones de permisos y logística
- Adaptación y validación de todos los instrumentos de recolección de datos por utilizar
- Etapa 2: Investigaciones de campo
 - Plano de ubicación
 - Ejecución de las investigaciones en campo
 - Registro de excavación de calicatas en fichas
 - Registro de ensayos geofísicos en fichas y aparatos electrónicos
- Etapa 3: Procesamiento de información
 - Procesamiento de las investigaciones en campo
 - De las excavaciones de calicatas
 - De los ensayos geofísicos
 - Vista de planta y secciones geométricas de la pila de lixiviación en proceso de cierre
- Etapa 4: Resultados, conclusiones y recomendaciones
 - Modelamiento geotécnico y obtención de resultados de análisis de estabilidad física de la pila de lixiviación en proceso de cierre

3.2.1 Etapa 1: Revisión de documentos y gestiones

- Datos administrativos - documentos referenciales: se seleccionó la información relevante que se refiere a la pila de lixiviación como son el expediente de construcción, informes técnicos, planos de ingeniería y de topografía, estudios geotécnicos, geofísicos y de peligro sísmico.
- Documentos legales: se verifica que la norma legal vigente describa los procedimientos adecuados para el cierre de la pila de lixiviación.
- Gestiones de permiso y logística: Las actividades que se realizan en campo requieren contar con permisos para ingresar y transitar en el área de e zona industrial y operativa de la unidad minera. La logística que se utiliza en los trabajos de campo emplea todos los equipos necesarios para realizar las excavaciones de calicatas y ensayos geofísicos. En la tabla 4, se muestra la logística asignada para el estudio de recolección de información de campo.

Tabla 4: Relación de equipos, herramientas y materiales para el ejemplo

Ítem	Descripción	Cantidad	Uso
1	Fichas de campo en Excel e impresas	50	Recolección de datos de campo geotécnico
2	Cámara digital y/o celular con cámara	1	Registro fotográfico
3	Equipos de muestreo de suelos y rocas	2	Muestreo para laboratorio geotécnico
4	Bolsas plásticas, botellas esterilizadas y <i>sticker</i>	10 c/u	Muestreo de suelos y rocas
5	Combo de 4 lb, cuchara, palana, picota	1 c/u	Remoción de suelo y roca para muestreo
6	1 sismógrafo Geode de 24 canales	1	Recolector de datos geofísicos
7	1 cable sísmico de en metros	120	Conector de geófonos geofísicos
8	Geófonos de 4.5 Hz y 14.5 Hz.	24	Transmisor de energía eléctrica subsuelo
9	Batería de 12 voltios	1	Abastecimiento de energía para geofísica

- Adaptación y validación de todos los instrumentos de recolección de datos por utilizar: las fichas de campo, antes del inicio de actividades, son revisadas según la norma que garantice la correcta recolección de datos en campo. La norma que refiere las investigaciones geotécnicas es la E 050 de suelos y cimentaciones (16).

3.2.2 Etapa 2: Investigaciones en campo

3.2.2.1 Plano de ubicación

Calicatas

En un plano georreferenciado en AutoCad se encuentra el diseño geométrico de la pila de lixiviación donde se realizará el muestreo de suelo y rocas mediante excavación de calicatas.

En la figura 2 se aprecia el ejemplo de la vista de planta donde se muestran las calicatas ubicadas sobre la superficie en proceso de cierre.

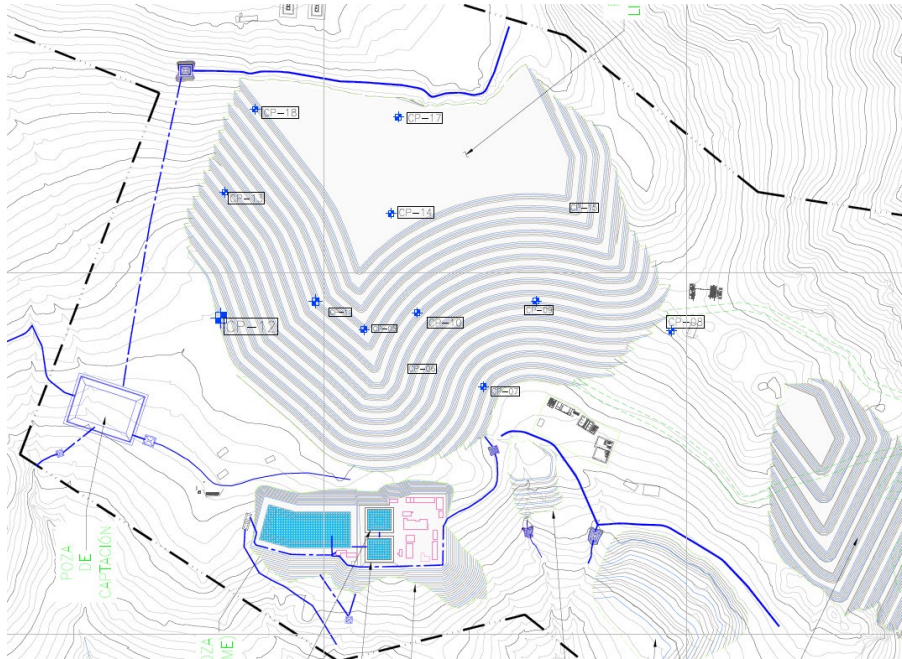


Figura 2: Ejemplo de una vista de planta de ubicación de calicatas en la pila de lixiviación

Geofísica

En un plano georreferenciado en AutoCAD se encuentra el diseño geométrico de la pila de lixiviación donde se realizará la ubicación de los ensayos geofísicos propuestos para el ejemplo. En la figura 3 se aprecia la vista de planta donde se muestra la distribución de los ensayos geofísicos de refracción sísmica (RS) y sondaje eléctrico vertical (SEV).

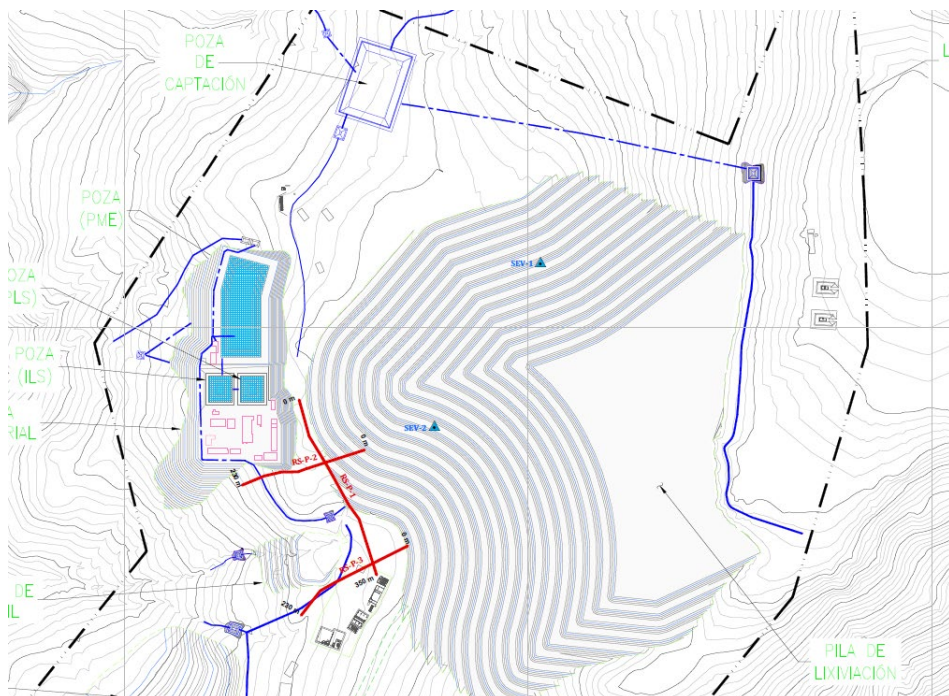


Figura 3: Ejemplo de ubicación de ensayos geofísicos en una pila de lixiviación

3.2.2.2 Ejecución de las investigaciones en campo

Excavación de calicatas

En el área de la pila de lixiviación, para el ejemplo se ha propuesto realizar la excavación de calicatas (ver figura 2). Esta actividad consiste en excavar desde la superficie hasta una profundidad adecuada, luego se extrae muestra de suelo y roca en cantidades representativas. Estas son llevadas al laboratorio, donde se realizan los ensayos necesarios que permiten conocer las propiedades físicas y mecánicas (16). Las calicatas se georreferencian con coordenadas UTM. En la Tabla 5 se muestra un ejemplo de ubicación.

Tabla 5: Ejemplo de ubicación con coordenadas UTM para la excavación de calicatas

Calicata	Coordenadas UTM (WGS 84)		Profundidad (m)	Cota (m s.n.m.)
	Este	Norte		
CP-05	615,632.00	8'337,667.00	4.50	3,860
CP-06	615,558.00	8'337,589.00	4.10	3,863
CP-07	615,514.00	8'337,420.00	2.30	3,843
CP-08	615,667.00	8'337,074.00	3.00	3,895
CP-09	615,691.00	8'337,311.00	3.50	3,874
CP-10	615,667.00	8'337,557.00	2.30	3,854
CP-11	615,390.00	8'337,767.00	2.50	3,867
CP-12	615,656.00	8'337,963.00	2.50	3,846
CP-13	615,916.00	8'337,955.00	2.50	3,896
CP-14	615,872.00	8'337,611.00	2.00	3,908
CP-15	615,899.00	8'337,250.00	2.50	3,918
CP-17	616,072.00	8'337,596.00	1.50	3,971
CP-18	616,088.00	8'337,892.00	1.70	3,958

Nota: CP-05: Código de calicata según numeración ubicadas en la pila para el ejemplo.
Coordenadas UTM: Ubicación georreferenciadas para el ejemplo.

Se realiza un registro en las fichas de recolección, se llenan los datos importantes de la calicata tomando en cuenta la medida estratigráfica de la composición del suelo según las capas que existan. Como complemento al registro, se toma una fotografía. En la Figura 4 se muestra un ejemplo del correcto llenado de una ficha de campo.

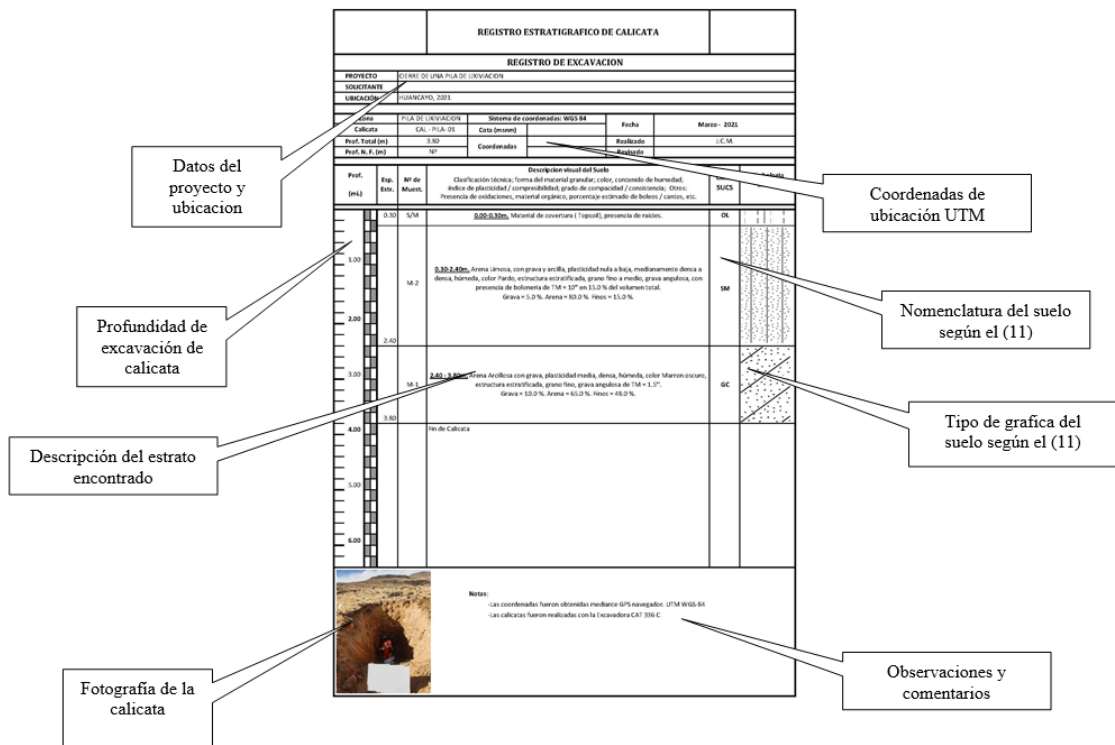


Figura 4: Ejemplo de registro de excavación de calicata

Ensayos de laboratorio

De las muestras que se obtiene de la excavación de calicatas se realizan ensayos de laboratorio de suelos y rocas que cumplen con la norma técnica peruana (NTP) y American Society for Testing and Materials (ASTM) (16). Los ensayos necesarios se muestran a continuación:

- Análisis granulométrico por tamizado
- Gravedad específica
- Densidad relativa
- Límites Atterberg
- Humedad relativa
- Compresión triaxial
- Consolidación
- Permeabilidad
- Compresión uniaxial y simple

Investigaciones geofísicas

En el ejemplo propuesto, la investigación geofísica se lleva a cabo en el área superficial y geométrica de pila de lixiviación. La ubicación se realiza en un plano georreferenciado (Figura 3). El método geofísico consiste en inducir a la superficie del subsuelo energía mediante una herramienta llamada geófono, que es un transmisor de energía eléctrica al subsuelo.

Durante el recorrido en el subsuelo, por medio de los valores que se registra en el lector llamado sismógrafo, se determina la resistencia que permite interpretar si el recorrido de la energía es suelo seco suelto, suelo seco compacto, suelo húmedo compacto, suelo húmedo suelto, suelo saturado, roca blanda y roca dura. Los métodos geofísicos que guardan estrecha relación con la geotecnia son el método geofísico llamado *sondaje eléctrico vertical* y *refracción sísmica*. La información geofísica se utiliza en el modelamiento geotécnico. En las Tablas 6 y 7 se muestra un ejemplo de ubicación.

Tabla 6: Ejemplo de ubicación de ensayos geofísicos de refracción sísmica

Código	Inicial		Final	
	Coordenadas UTM		Coordenadas UTM	
	Este	Norte	Este	Norte
RS-P-1	615319.09	8337595.00	615452.12	8337294.68
RS-P-2	615430.48	8337508.62	615220.87	8337449.68
RS-P-3	615505.04	8337343.09	615324.38	8337223.06

Nota: RS-P1: Refracción sísmica pila - 1. Coordenadas UTM: Ubicación georreferenciadas para el ejemplo.

Tabla 7: Ejemplo de ubicación de ensayos geofísicos de sondaje eléctrico vertical

Código	Coordenadas UTM	
	Este	Norte
SEV-1	615735	8337834
SEV-2	615552	8337551

Nota: Sondaje eléctrico vertical (SEV). Coordenadas UTM: Ubicación georreferenciadas para el ejemplo.

3.2.3 Etapa 3: Procesamiento de la información

3.2.3.1 Procesamiento de las investigaciones de campo

- **Excavación de calicatas**

De los registros en las fichas de campo y los ensayos de laboratorio se obtienen los resultados finales del tipo de suelo existente para cada calicata (16). En la Tabla 8, se muestra un ejemplo.

Tabla 8: Ejemplo de resumen de calicatas y el tipo de suelo

Estructura	Calicata	Coordenadas UTM WGS 84			Tipo de suelo
		Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	
Pila de lixiviación	CP-05	615632	8337667	3860	CL
	CP-06	615558	8337589	3863	CL
	CP-07	615514	8337420	3843	GC
	CP-08	615667	8337074	3895	SC
	CP-09	615691	8337311	3874	MH
	CP-10	615667	8337557	3854	CH
	CP-11	615690	8337767	3867	CL
	CP-12	615656	8337963	3846	CL
	CP-13	615916	8337955	3896	GC
	CP-14	615872	8337611	3908	GM
	CP-15	615899	8337250	3918	SM
	CP-17	616072	8337596	3971	GC
	CP-18	616088	8337892	3958	GC
	CP-9A	615676	8337264	3882	GC

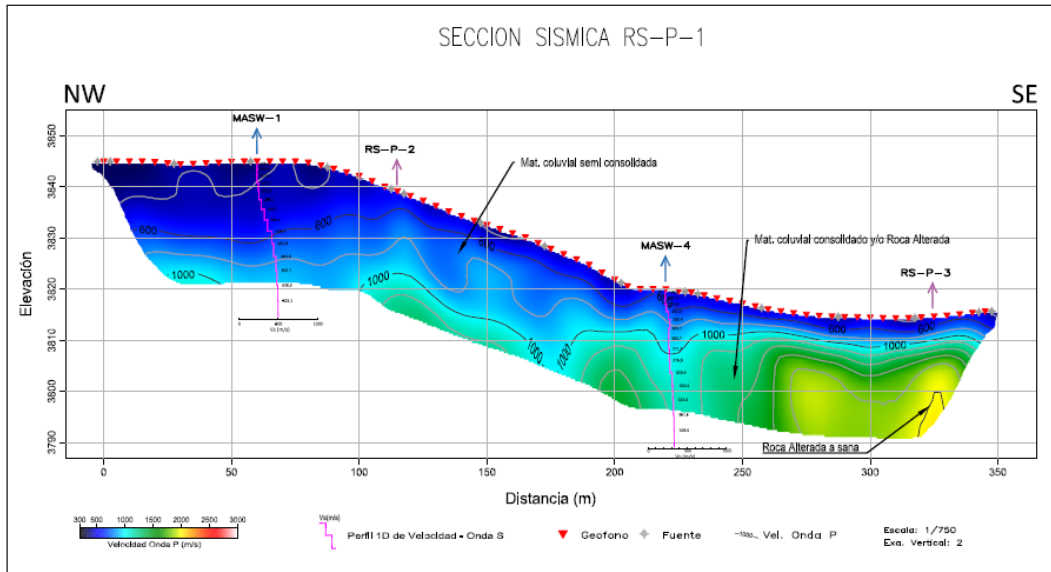
Interpretación de tipo de suelo de acuerdo con la Tabla 1 para el ejemplo: CL: Arcilla de baja plasticidad / GC: Grava arcillosa / SC: Arena arcillosa / MH: Limo de alta plasticidad / CH: Arcilla de alta plasticidad / GM: Grava limosa / SM: Arena limosa

Nota: La información del tipo de suelo se obtiene mediante el registro de las fichas en campo y los resultados de los ensayos de laboratorio.

En el Anexo III se muestran los registros de recolección de datos de excavación realizados en campo, los cuales se han interpretado y procesado (p. 52).

- **Ensayos geofísicos**

La información geofísica recolectada en campo se procesa mediante un programa computacional y se obtiene la resistividad por cada estrato de suelo encontrado. En las Figuras 5 y 6, se aprecia un modelo de ensayo geofísico de refracción sísmica (RS) y otro de sondaje eléctrico vertical (SEV):



LEYENDA	DESCRIPCIÓN
	Capa de depósito coluvial (grava, arena en matriz (limo arcillosa) cubierto de material cuaternario semi consolidado.
	Capa conformada de material coluvial consolidado y roca alterada y/o fracturada.
	Capa conformada de roca fracturada a sana.

Figura 5: Ejemplo de resultado del ensayo geofísico de refracción sísmica

Nota: Los colores indican los tipos de estratos de suelo y roca encontrados: Color azul/celeste: capa de grava, arena, limos y arcillas blandas a duras / Color verde/naranja: capa de suelo compuesto de gravas, arenas y roca blanda a fracturada. / Color rojo/magenta: capa conformada de roca fracturada a roca sana.

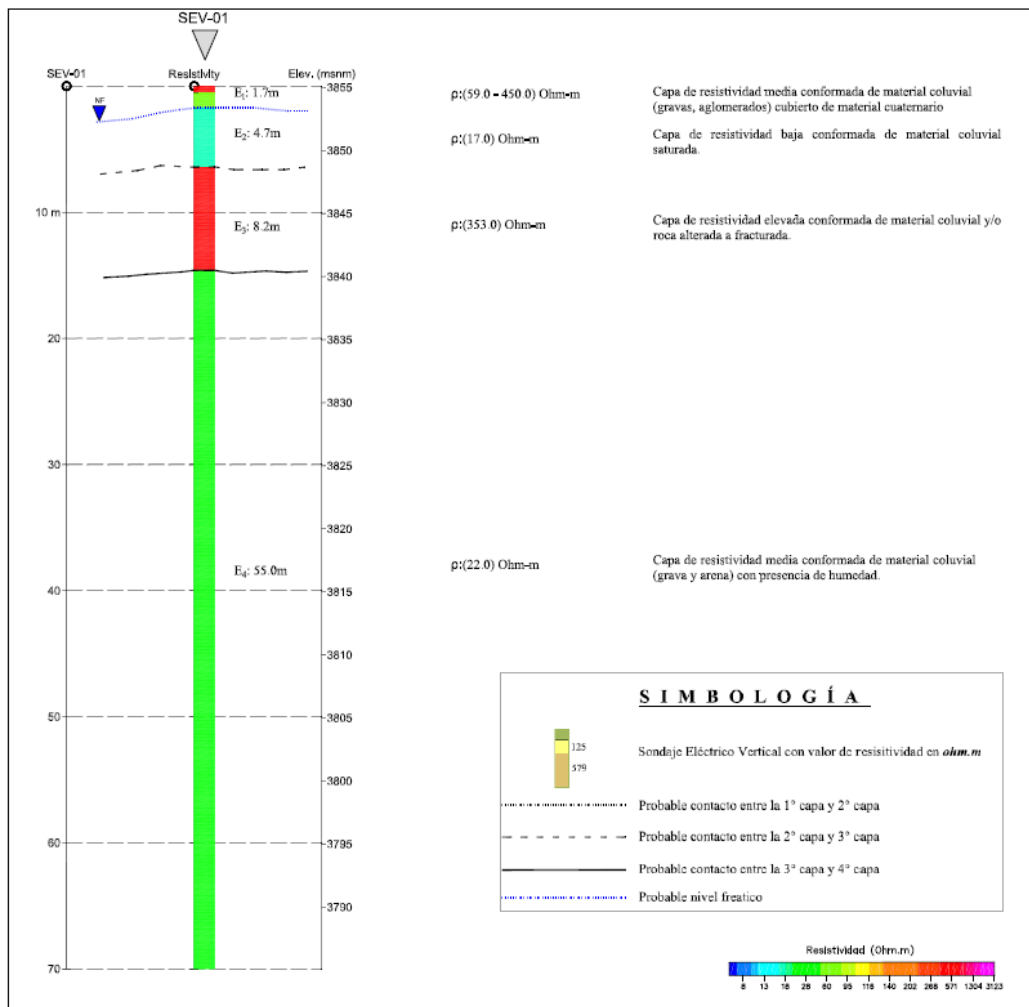


Figura 6: Ejemplo del resultado del ensayo geofísico de sondaje eléctrico vertical

Nota: Los colores indican las siguientes resistividades: Color azul: resistividad baja, presencia de agua. / Color celeste: suelo compuesto de grava y arena saturada. / Color verde: suelo compuesto de grava y arena húmeda. / Color rojo: estrato de roca blanda a dura mezclado de gravas. Color naranja: brechas volcánicas. / Color magenta: roca volcánica alterada.

En el Anexo IV se muestran los registros de recolección de datos en campo de los ensayos geofísicos de refracción sísmica y de sondaje eléctrico vertical, los cuales se han interpretado y procesado (p. 59).

3.2.3.2 Vista de planta y secciones geométricas de la pila de lixiviación en proceso de cierre

Para el ejemplo de generación de vistas de planta y secciones geométricas, se parte de la evaluación y revisión de la información recolectada en la etapa 1, que comprende los documentos administrativos que contienen los expedientes de construcción de la pila de lixiviación en condiciones de cierre y que son procesados en el programa de diseño AutoCAD Civil 3D. Se realizan planos geométricos con vistas de planta y

secciones que son importadas en el programa de modelamiento geotécnico para realizar el análisis de la estabilidad física. En la Tabla 9, se muestra la relación de *softwares* necesarios para procesar la data de campo.

Tabla 9: Softwares computacionales para el ejemplo de análisis de estabilidad física

Ítem	Descripción	Cantidad	Uso
1	Software AutoCAD Civil 3D	1	Diseño de planos en planta y secciones
2	Slide-Rocsience	1	Modelamiento geotécnico
3	Microsoft Office	1	Para redactar textos

Nota: AutoCAD Civil 3D: Programa computacional que permite la elaboración de planos y diseños en tres dimensiones para el ejemplo./ Slide-Rocsience: Programa computacional que permite elaborar una vista de perfil en dos dimensiones y realizar el análisis de estabilidad física. /Microsoft Office: Programa computacional útil para redactar textos, informes, presentación de tablas y cuadros para el ejemplo.

Representación geométrica de una pila de lixiviación en el software AutoCAD. Para el ejemplo del análisis de estabilidad física, se realizan cortes (secciones) sobre la superficie geométrica en tres dimensiones de la pila de lixiviación. La geometría representa los taludes de banco inclinados con un ángulo de 34 grados (°), aproximadamente. El perfil inicia desde la superficie hasta llegar al último talud de banco. El proceso de representación empieza con un corte horizontal sobre la superficie en tres dimensiones utilizando el programa de diseño AutoCAD Civil. En la Figura 7, se muestra un ejemplo de vista de planta y corte de secciones A-A y B-B.

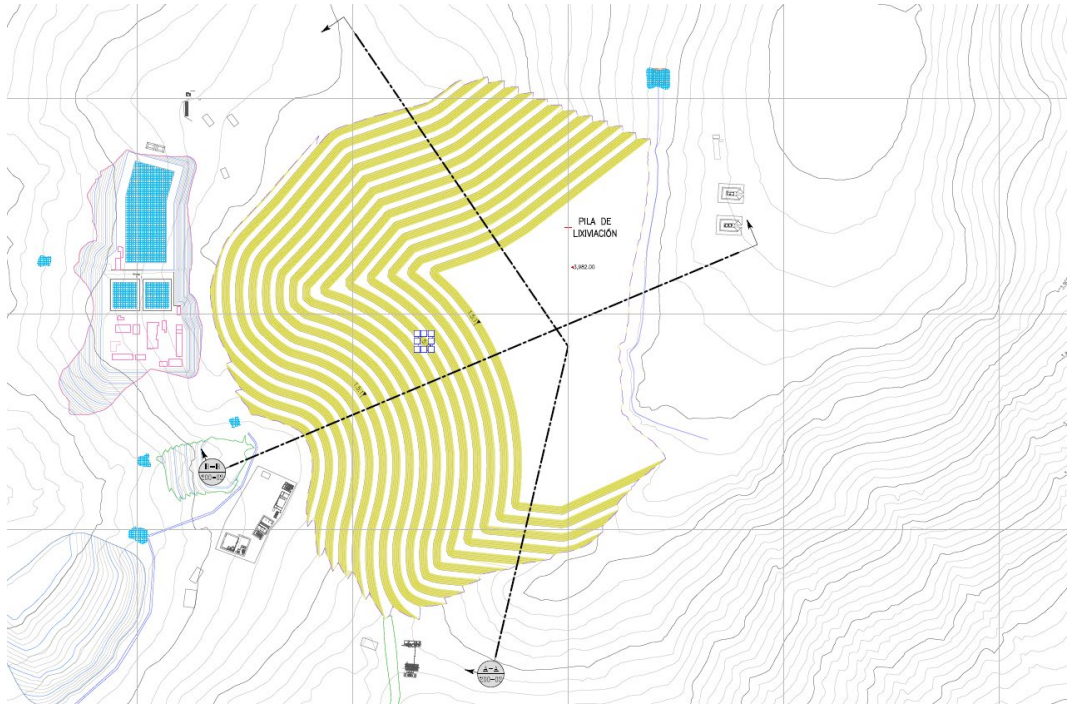


Figura 7: Ejemplo de vista de planta de corte de perfil A-A y B-B de una pila de lixiviación

A continuación, en la Figura 8 se muestran las secciones A-A y B-B, que son de utilidad para el modelamiento geotécnico.

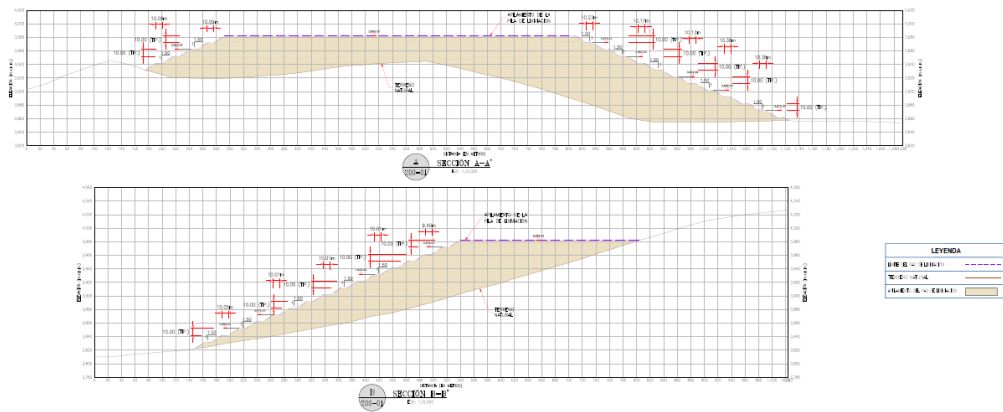







Figura 8: Ejemplo de secciones A-A y B-B de una pila de lixiviación

3.2.4 Etapa 4: Resultados, conclusiones y recomendaciones

3.2.4.1 Modelamiento geotécnico y obtención de resultados de análisis de estabilidad física de un pila de lixiviación en proceso de cierre

Teniendo las secciones A-A y B-B realizadas en el programa AutoCAD y propuestas para el ejemplo, se importa al programa de modelamiento SLIDE Versión libre 6.0. Las secciones se trabajan teniendo en cuenta los estratos mostrados en las investigaciones geofísicas e información recolectada y revisada en la etapa 1. En el modelamiento se diferencian los estratos por colores que corresponden a suelos y los estratos de rocas. Cada estrato del subsuelo estudiado tiene el valor de las propiedades físicas y mecánicas que se obtuvo en los ensayos de laboratorio (16).

En la Figura 9 se muestra el modelamiento geotécnico de la sección A-A de la pila de lixiviación realizado en el programa Slide Versión 6.0.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	a
MINERAL		16	0	36				
SUELO COLUVIAL-DELUVIAL		16	52.8	30.3				
RELLENO ESTRUCTURAL		19	0	34				
BASAMENTO ROCOSO		20			33000	1.67677	0.00386592	0.505734
INTERFACE		15						

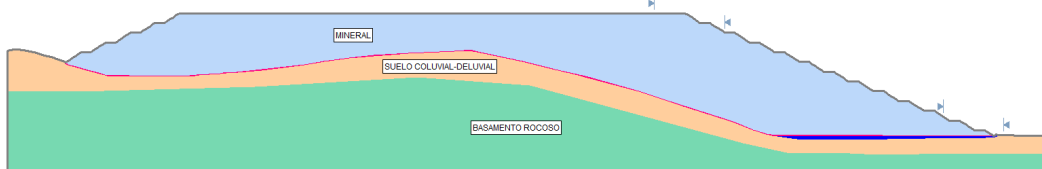


Figura 9: Ejemplo del modelamiento geotécnico de la sección A-A de una pila de lixiviación

Nota: Cada color indica un estrato y sus propiedades físicas mecánicas puestas en valor. En este modelo geotécnico se han identificado cinco estratos. Los valores mostrados son representativos y asumidos para este modelo guía.

3.2.4.2 Ejemplo de análisis de estabilidad física en las secciones A-A y B-B

La *Guía ambiental para proyectos de lixiviación en pilas* muestra en ejemplos que el análisis de estabilidad física se realiza en los modelos geotécnicos realizados en el programa Slide Versión 6.0. Las condiciones de análisis son estáticas (sin movimiento, completamente firme) y en condiciones pseudoestáticas (dinámicas con un valor de sismicidad de acuerdo con el estudio de peligro sísmico con el método probabilístico) (26). En cada sección de análisis se considera el nivel freático y las condiciones de saturación en las que se encuentran. En la pila de lixiviación que está

en proceso de cierre, el mineral se encuentra saturado en la parte más baja, sobre la cimentación.

Para el presente estudio, se ha realizado el análisis en dos secciones A-A y B-B de la pila de lixiviación que se encuentra en proceso de cierre.

Para establecer los valores de los parámetros geotécnicos en esta guía, se ha extraído información de estudios geotécnicos que se han realizado en estructuras similares que producen lixiviados (12).

El resultado del análisis de estabilidad física se denomina *factor de seguridad* (8).

Los tipos de fallas para análisis son circular (por esfuerzo de dovela) y tipo bloque (se analiza la parte central). A la falla se le denomina equilibrio límite y se realiza con el método de Spencer, que supone diferentes fuerzas inclinadas entre las dovelas.

A continuación, en las Figuras 10 a la 17 se muestran las corridas realizadas en el programa Slide Versión 6.0.

- **Análisis de la sección A-A en condiciones no drenadas en proceso de cierre**

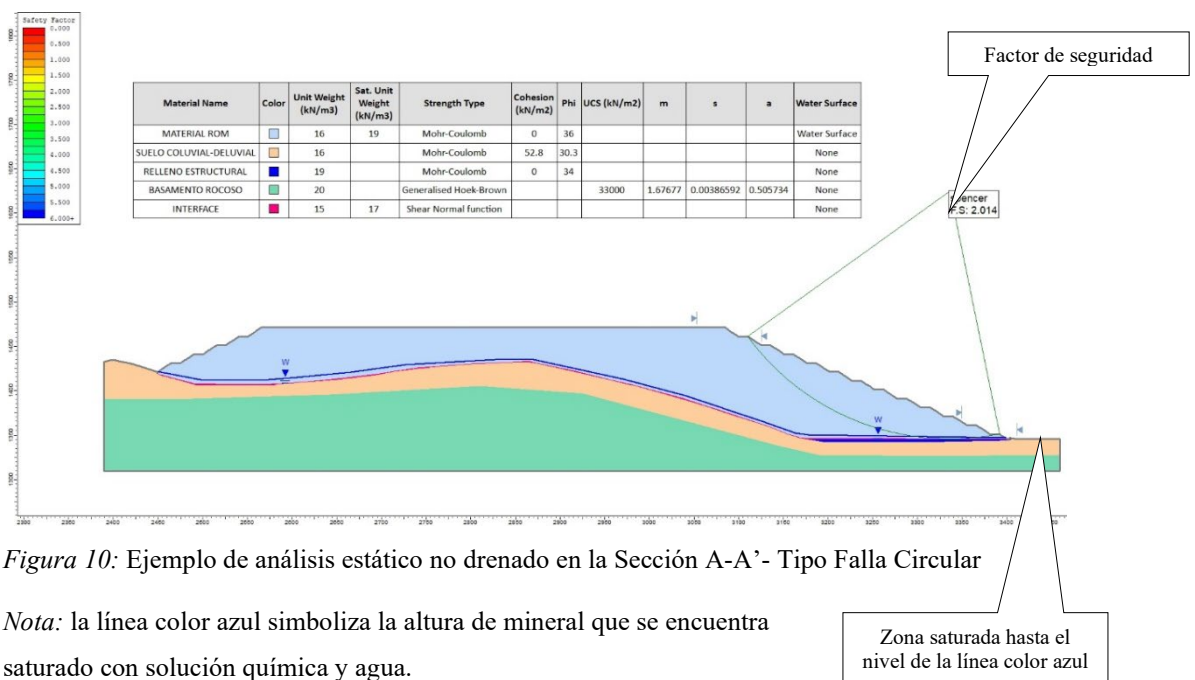


Figura 10: Ejemplo de análisis estático no drenado en la Sección A-A'- Tipo Falla Circular

Nota: la línea color azul simboliza la altura de mineral que se encuentra saturado con solución química y agua.

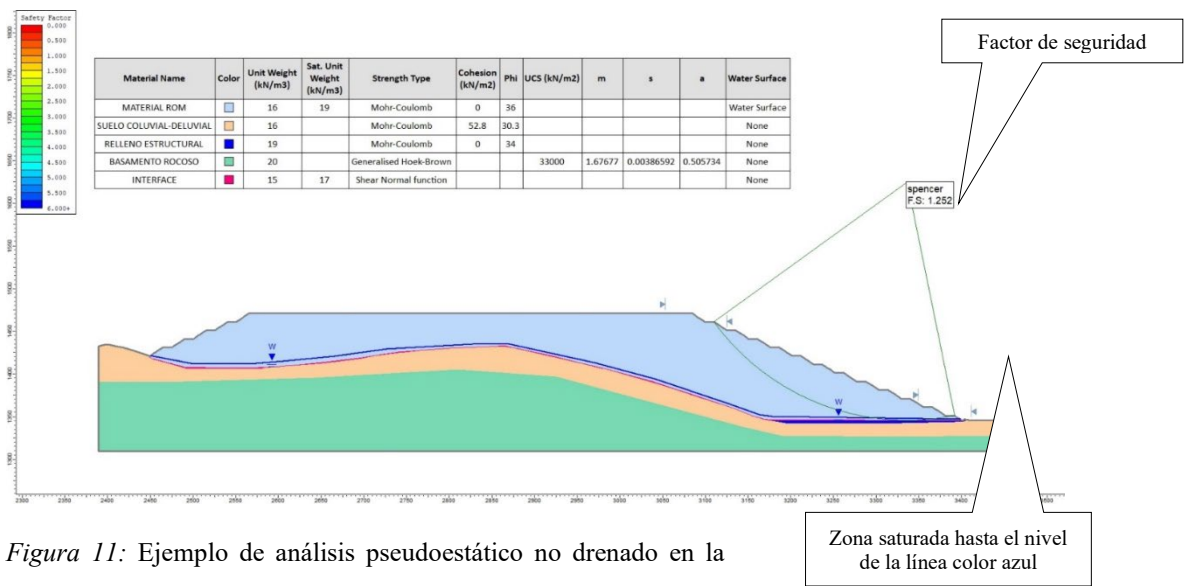


Figura 11: Ejemplo de análisis pseudoestático no drenado en la Sección A-A' - Tipo Falla circular

Nota: Análisis incluyendo un coeficiente sísmico de 0.20g. Este valor se obtiene del estudio de peligro sísmico.

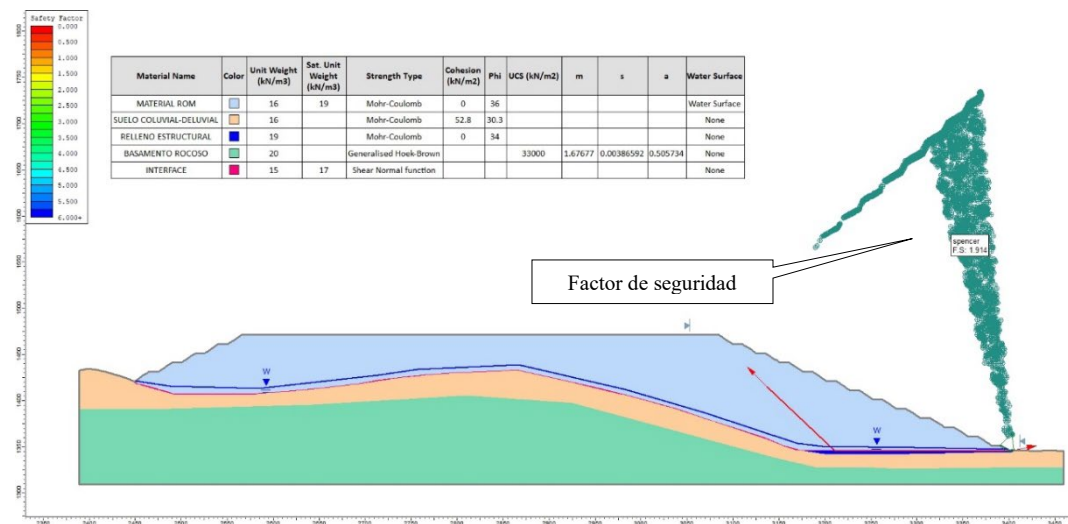


Figura 12: Ejemplo de análisis estático no drenado en la Sección A-A' - Tipo Falla Bloque

Nota: En el análisis tipo bloque se toma la misma distancia horizontal de la falla circular hacia afuera, donde está el inicio de los taludes.

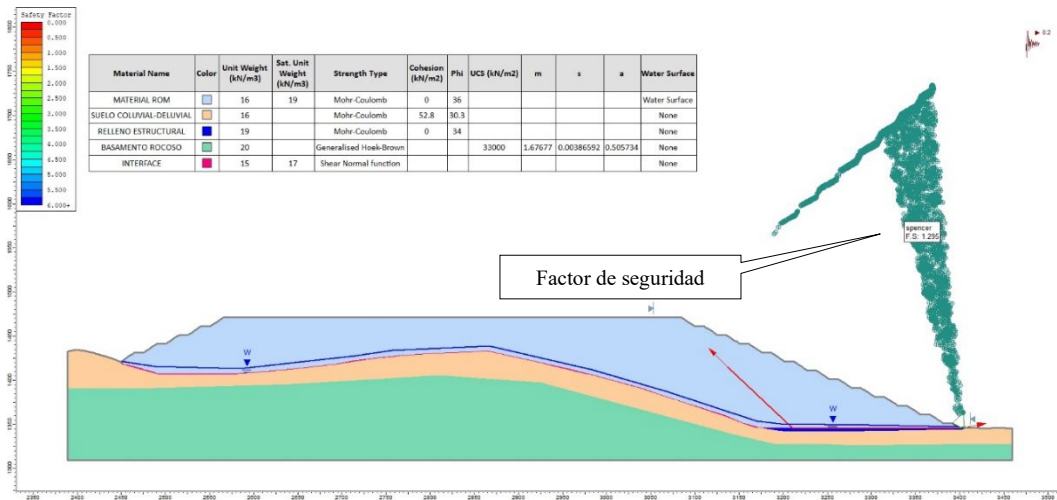


Figura 13: Ejemplo de análisis pseudoestático no drenado en la Sección A-A' - Tipo Falla Bloque
 Nota: Análisis incluyendo un coeficiente sísmico de 0.20g. Este valor se obtiene del estudio de peligro sísmico.

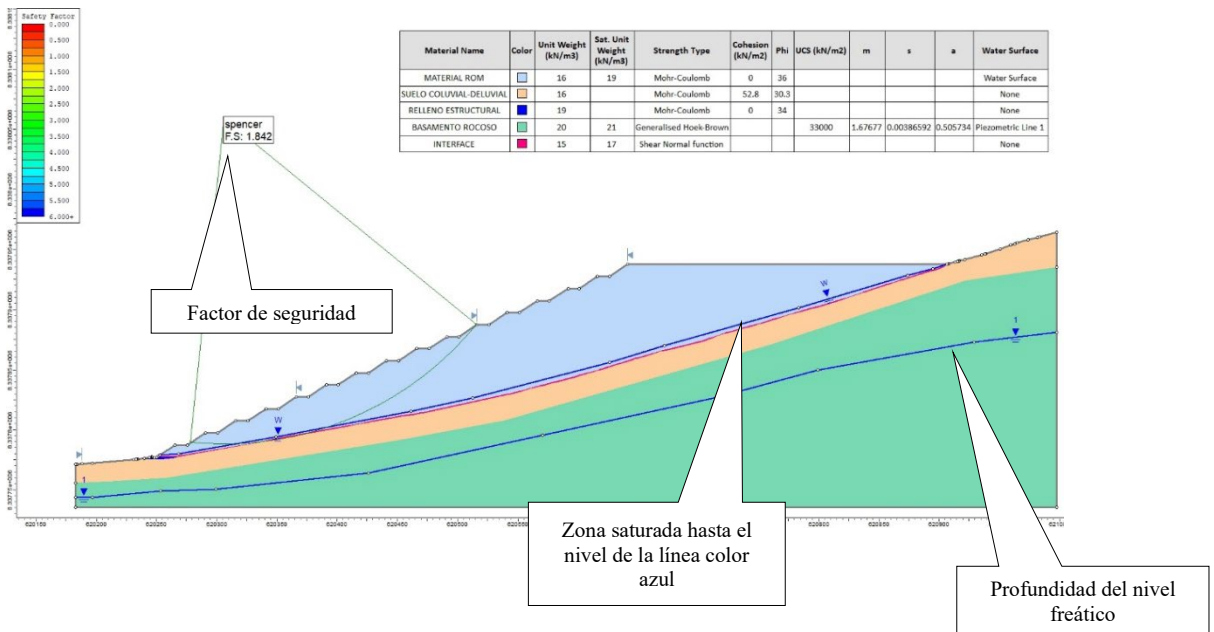


Figura 14: Ejemplo de análisis estático no drenado en la Sección B-B' - Falla tipo Circular

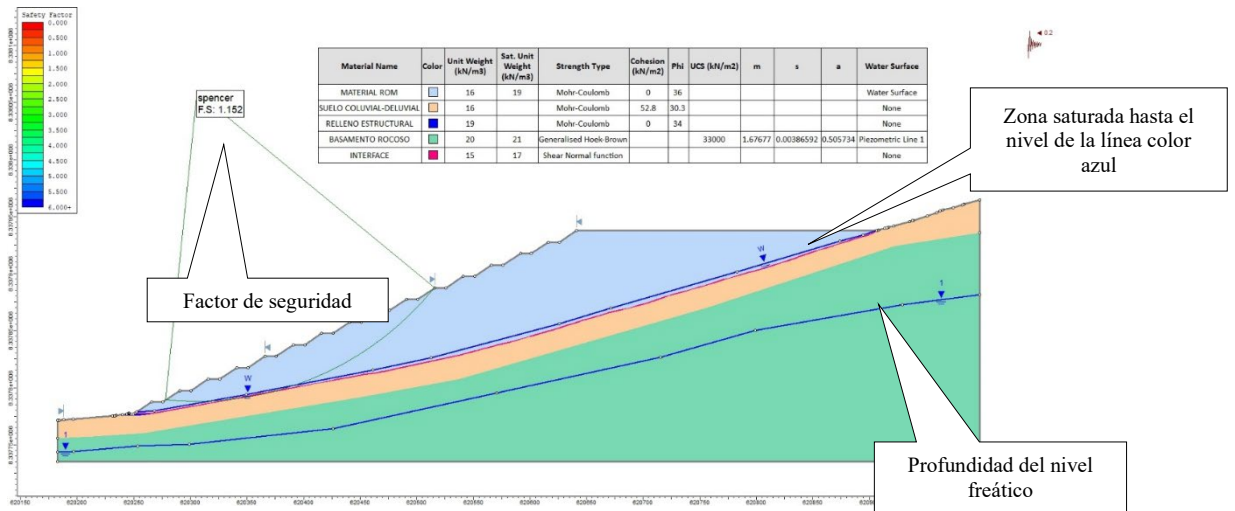


Figura 15: Ejemplo de análisis pseudoestático no drenado en la Sección B-B' - Falla tipo circular

Nota: Análisis incluyendo un coeficiente sísmico de 0.20 g. Este valor se obtiene del estudio de peligro sísmico.

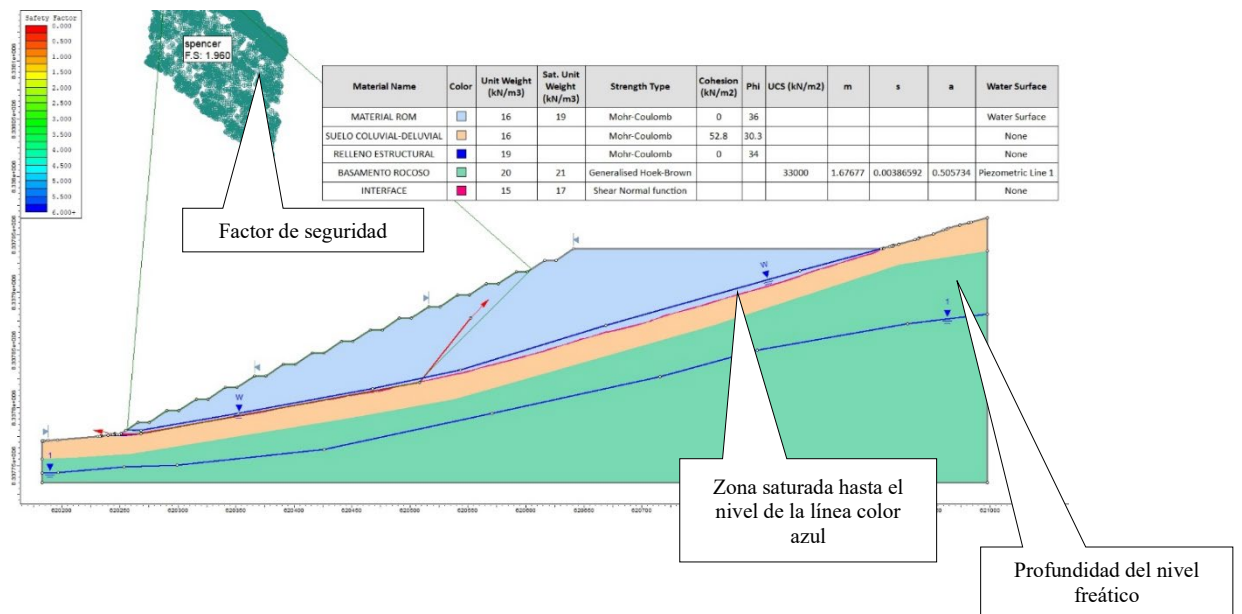


Figura 16: Ejemplo de análisis estático no drenado en la Sección B-B' - Falla tipo Bloque

Nota: En el análisis tipo bloque se toma la misma distancia horizontal de la falla circular hacia afuera, donde está el inicio de los taludes.

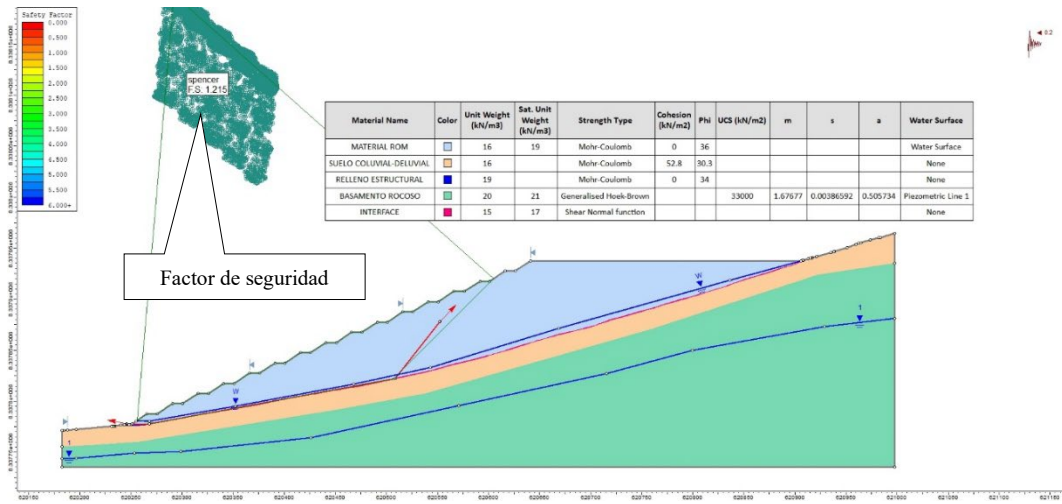


Figura 17: Ejemplo de análisis pseudoestático no drenado en la Sección B-B' - Falla tipo Bloque
 Nota: El análisis incluye un coeficiente sísmico de 0.20 g. Este valor se obtiene del estudio de peligro sísmico.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Presentación de resultados

4.1.1 Clasificación de los suelos

La información relevante para realizar el análisis de estabilidad física comienza con la información de las investigaciones de campo, que es debidamente procesada e interpretada.

La guía de *Fundamentos de ingeniería geotécnica* establece parámetros para las excavaciones de calicatas, que empiezan con el registro de su estratigrafía en las fichas de campo y se coloca la nomenclatura del suelo de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). La información de entrada para realizar el ejemplo del modelamiento geotécnico se visualiza en la Tabla 10.

Tabla 10: Ejemplo de resumen de calicatas y el tipo de suelo

Estructura	Calicata	Coordenadas UTM WGS 84			Tipo de suelo
		Este (m)	Norte (m)	Cota (m s.n.m.)	
Pila de lixiviación	CP-05	615632	8337667	3860	CL
	CP-06	615558	8337589	3863	CL
	CP-07	615514	8337420	3843	GC
	CP-08	615667	8337074	3895	SC
	CP-09	615691	8337311	3874	MH
	CP-10	615667	8337557	3854	CH
	CP-11	615690	8337767	3867	CL
	CP-12	615656	8337963	3846	CL
	CP-13	615916	8337955	3896	GC
	CP-14	615872	8337611	3908	GM
	CP-15	615899	8337250	3918	SM
	CP-17	616072	8337596	3971	GC
	CP-18	616088	8337892	3958	GC
	CP-9A	615676	8337264	3882	GC

Nota: La información del tipo de suelo se obtiene mediante el registro de las fichas en campo y los resultados de los ensayos de laboratorio.

La nomenclatura para cada tipo de suelo mostrado es de acuerdo con las Tablas 11 y 12.

Tabla 11: Clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Suelos finos	CL	Son arcillas de baja plasticidad, es decir, con límite líquido menor de 50 %, se caracterizan por tener de baja a media compresibilidad.
	CH	Son arcillas de alta plasticidad, con límite líquido mayor de 50 %, y se caracterizan por ser muy compresibles.
	MH	Son limos de alta plasticidad, con límite líquido mayor de 50 %, y se caracterizan por ser muy compresibles.

Nota: Adaptada de R. M. N.º 406-2018-VIVIENDA, 2018.

Tabla 12: Clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Suelos (SUCS)

Suelos gruesos	G	Son gravas limosas, es decir, están compuestas por mezclas de gravas, arena y limos.
	GC	Son gravas arcillosas, es decir, están compuestas por mezclas de gravas, arena y arcillas.
	SM	Son arenas limosas, es decir, están compuestas por mezclas de arena y limo.
	SC	Son arenas arcillosas, es decir, están compuestas por mezclas de arena y arcilla.

Nota: Adaptada de R. M. N.º 406-2018-VIVIENDA, 2018.

Resumiendo, el tipo de estrato de suelo utilizado para el ejemplo de modelamiento geotécnico es coluvial-deluvial (ver Figura 27). Los suelos coluviales son depósitos pequeños en forma de conos y abanicos con poco espesor, y los suelos diluviales son depósitos originados por el desprendimiento de materiales de las laderas por consecuencia del agua; se acumulan al pie de una ladera.

4.1.2 Interpretación geofísica

Mediante los ensayos geofísicos de sondaje eléctrico vertical (SEV) y refracción sísmica (RS), se determinó el tipo de estrato de suelo y roca existente en el subsuelo. En el ejemplo de uso del ensayo de SEV, se relaciona con el tipo de estrato de suelo y roca y con la resistividad medida con ohmetro (Ohmio) por el espesor del estrato ensayado.

Cuando la resistividad es mayor, el estrato presenta mayor dureza y consistencia; esto refiere a las capas que están conformadas por gravas, aglomerados y rocas alteradas (ver Tabla 13: Ejemplo de resultados del ensayo SEV-1).

Cuando la resistividad es menor, el estrato presenta menor consistencia y mayor contenido de humedad hasta saturarse. Esta descripción refiere a las capas conformadas

por material coluvial saturado con presencia de agua (ver Tabla 13). A continuación, en la Tabla 13, se muestra la interpretación del ensayo SEV.

Tabla 13: Ejemplo de resultados del ensayo SEV-1

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	0.520	450.000	Capa de resistividad elevada conformada de material coluvial (gravas y aglomerados) cubierto de material cuaternario.
2	1.200	59.000	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturado.
3	4.700	17.000	Capa de resistividad elevada conformada de material coluvial (gravas y aglomerados) y/o roca alterada.
4	8.200	353.000	Capa de resistividad media conformada de material coluvial con presencia de humedad.
5	55.380	22.000	

Nota: Espesor: Indica la distancia vertical entre el nivel de cota de inicio hacia una profundidad estimada para el ejemplo. Resistividad (Ω m): Indica la capacidad resistiva del suelo y roca en un estrato determinado para el ejemplo. Adaptada de Omar, s.f.

En el ejemplo de uso del ensayo de refracción sísmica utilizada, relaciona el tipo de estrato de suelo y roca con la onda de corte de compresión primaria (V_p) o secundaria (V_s). La velocidad de corte se transmite por un espesor de estrato de suelo y roca donde muestra una velocidad por metros/segundos (m/s). Durante su recorrido identifica los diferentes tipos de capas y su consistencia; esto refiere a las capas que se encuentran conformadas de gravas, arenas, rocas alteradas y fracturadas (ver Tabla 14: Ejemplo de resultados del ensayo RS).

Tabla 14: Ejemplo de resultados del ensayo RS

Estrato	Velocidad V_p (m/s)	Espesor (m)	Descripción
1	400-1000	0 a 10	Capa conformada de material coluvial (grava, arena en matriz limo arcillosa) cubierto de material cuaternario de blando a duro.
2	1000-2000	10 a 20	Capa conformada de material coluvial de blando a duro y roca alterada y/o fracturada.
3	>2000	>20	Capa compuesta de roca fracturada.

Nota: >2000: Cuando la velocidad primaria es mayor que 2,000, la roca se consolida como intacta en el ejemplo. Color azul, verde y amarillo: indican el grado de velocidad que atraviesa para cada estrato en el ejemplo. Adaptada de Omar, s.f.

4.1.3 Interpretación del análisis de estabilidad física y el factor de seguridad

En el ejemplo para el análisis de estabilidad física, los resultados obtenidos llamados *factor de seguridad* indican el grado de estabilidad del componente. En la Tabla 15, se muestran los resultados.

Tabla 15: Ejemplo de resultados de análisis de estabilidad física en una pila de lixiviación - Factor de seguridad (F.S.)

Sección / Talud	Tipo de análisis	Tipo de falla	Factor de seguridad (F.S.)	Condición	Figura N.º
A-A'	Estático	Circular	2.014	Estable	11
		Bloque	1.914	Estable	12
	Pseudoestático (a = 0.20)	Circular	1.252	Estable	13
		Bloque	1.295	Estable	14
B-B'	Estático	Circular	1.842	Estable	15
		Bloque	1.96	Estable	16
	Pseudoestático (a = 0.20)	Circular	1.152	Estable	17
		Bloque	1.215	Estable	18

Nota: Tipo de falla: indica el tipo de análisis realizado en la superficie 2D del perfil de la pila analizada para el ejemplo. Factor de seguridad: es el valor obtenido del análisis de estabilidad realizada a la pila en el ejemplo.

El resultado del análisis de estabilidad física, que es el factor de seguridad, se mide con la probabilidad máxima de falla (ver Tabla 15) que pueda ocurrir en el ejemplo de la pila de lixiviación. En la Tabla 16, se muestran los valores de medida expresados en porcentajes (%).

Tabla 16: Factor de seguridad mínimo

Escala	Consecuencia de falla	Factor mínimo estático	Factor mínimo pseudoestático	Probabilidad máxima de falla $P(F < 1)$
Banco	Bajo - Alto	1.10	-	20 -50 %
	Bajo	1.15 – 1.20	1.00	25%
Inter-rampa	Moderado	1.20	1.00	20%
	Alto	1.20 – 1.30	1.10	10%
	Bajo	1.20 – 1.30	1.00	15 – 20 %
Overall	Moderado	1.30	1.05	10%
	Alto	1.30 – 1.50	1.10	5%

Nota: Adaptada de DGAAM, 2006. 1.10: Valor referencial de un factor de seguridad que se obtiene al realizar el análisis de estabilidad física para el ejemplo. %: Probabilidad máxima de falla de acuerdo con el factor de seguridad obtenido para la estructura analizada para el ejemplo. Factor mínimo estático: Valor que se obtiene en una estructura estática para el ejemplo. Factor mínimo pseudoestático: Valor que se obtiene en una estructura con un nivel de sismicidad para el ejemplo.

El análisis según el valor obtenido en el ejemplo mostrado en la Tabla 15 es el siguiente:

- Factor de seguridad 2.014: La probabilidad máxima de falla es menor que 5%; este % estimado es 1% a 0.5%. La sección A-A de la pila analizada es muy estable.

- Factor de seguridad 1.914, 1.960 y 1.842: La probabilidad máxima de falla es menor de 5 %; este % estimado es 1%. La sección A-A y B-B de la pila analizada es muy estable.
- Factor de seguridad 1.252, 1.295 y 1.215: La probabilidad máxima de falla es el 20 %. La sección A-A y B-B de la pila analizada se encuentra estable y la probabilidad de falla es menor.
- Factor de seguridad 1.152: La probabilidad máxima de falla es el 25 %. La sección A-A y B-B de la pila analizada se encuentra estable y la probabilidad de falla se puede controlar.

4.2 Discusión de resultados

Este trabajo es una propuesta de un sistema de análisis de estabilidad física para fines de cierre de una pila de lixiviación que permitirá conocer teóricamente si la estructura minera se encuentra estable o inestable. Los resultados obtenidos en el ejemplo se denominan factor de seguridad; el valor mínimo es 1.152 y el máximo es 2.014, lo cual indica que es estable (12). De manera similar, estos resultados se relacionan con la investigación denominada *Análisis probabilístico de estabilidad de taludes en el relleno sanitario Parque Ecoindustrial Miramar*, donde se obtuvo un mínimo de 1.162 y un máximo de 2.970, que indica que el relleno sanitario es estable (9).

Las cuatro etapas básicas propuestas en este trabajo se han desarrollado sobre la base de la experiencia del tesista y las referencias técnicas extraídas en las referencias nacionales e internacionales. La normativa vigente no explica los procedimientos para realizar el cierre de la pila de lixiviación. De la misma manera, la Ley de cierre de minas (Ley 28507), en el Capítulo 4, establece que el titular minero deberá demostrar que ha realizado los procedimientos hasta obtener la estabilidad física del componente de manera implícita (3).

Las etapas básicas propuestas en este trabajo desarrollado con base en la experiencia del tesista son explicadas con ejemplos concretos que se utilizarán de la misma manera durante la ejecución de los trabajos de campo y procesamiento de la información en un cierre de una pila de lixiviación. Igualmente, en el artículo 137 del reglamento del SEIA de Chile se presentó un plan de cierre de una faena minera o plan de cierre de acuerdo con los términos de la Ley de cierre de minas (Ley 28507) en el Perú (7).

El aseguramiento de la pila de lixiviación se dio mediante el análisis de estabilidad física de los taludes. En los ejemplos de las corridas de análisis se han verificado los valores

mínimos y máximos obtenidos, garantizando que la estructura es estable. En la Tabla 3: *Factor de seguridad mínimo*) se establece un valor aceptable. Si los resultados están por debajo de 1.10 en condiciones estáticas, se considerará que la pila presenta inestabilidad y sus taludes se podrían derrumbar. En condiciones sísmicas o pseudoestáticas el valor mínimo es 1.0. Cuando los resultados son menores significa que se requiere verificar las condiciones de la cimentación y los taludes en general.

En el ejemplo de estabilidad realizado para este trabajo se obtuvo un valor mínimo de 1.842 en condiciones estáticas y un valor mínimo de 1.152 en condiciones pseudoestáticas, lo cual significa que los taludes son estables y no se requiere algún tipo de trabajo adicional para asegurar la estabilidad física. El *Manual de derrumbes* presenta una metodología de estabilización de taludes de tierra, donde muestra una serie de actividades por realizar con la finalidad de asegurar el talud y evitar el colapso. Después de efectuar el análisis y obtener el factor de seguridad, de ser necesario se utilizarán las recomendaciones mostradas en esta guía (10).

La pila es una estructura que funciona mediante el regado continuo de una solución química sobre el mineral de óxidos, sílice y sulfuros primarios. Cuando ingresa a la etapa de cierre definitivo se evalúa la estabilidad física de toda la estructura. En este trabajo se ha realizado una guía metodológica para el cierre definitivo de una pila de lixiviación, donde el producto final es el factor de seguridad que indica si la pila es estable o inestable. En la guía para el manejo de depósitos de relaves en etapa de cierre definitivo se propone realizar actividades de cierre para garantizar una continua estabilidad física. Este tipo de actividades se desarrollan para ambas estructuras que generan lixiviados; pueden ser pilas de lixiviación o un depósito de relaves (11).

Las cuatro etapas básicas propuestas en este trabajo para el cierre de la pila de lixiviación cumplen con la Ley 28507, donde el principal objetivo es garantizar la estabilidad física, debido a que un derrumbe ocasionaría un gran daño al medio ambiente. Este trabajo guarda estrecha relación con la guía para evaluar estudios de impacto ambiental semidetallados de proyectos mineros, donde cada actividad de campo propuesta no impacta al medio ambiente y el resultado del análisis es la garantía para cierre (5).

El resultado de análisis de estabilidad física se denomina factor de seguridad y con estos valores se determinó que la pila de lixiviación es segura de manera uniforme y garantiza el cierre definitivo. El análisis se efectúa constantemente en todas las estructuras en etapa de operación. En la *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de*

desechos sólidos de mina, se muestra una serie de técnicas que se llevan a cabo en los proyectos que se encuentran en etapa de operación y serie, y que tienen en común el factor de seguridad (12).

La propuesta de un sistema de análisis de estabilidad física para fines cierre de una pila de lixiviación se realizó para mediano y largo plazo aplicada para estructuras mineras en el Perú. De esta misma manera, la Ley de cierres de mina (Ley 28507) establece como propósito asegurar la estabilidad física para no generar riesgos, accidentes o alguna contingencia que afecte al medio ambiente después de la etapa de operación (3).

En la propuesta de análisis de estabilidad física se plantearon cuatro etapas básicas. Durante la segunda etapa, donde se hacen las investigaciones de campo, se verifica si existen condiciones de aguas subterráneas importantes que puedan generar inestabilidad durante la etapa de cierre. En la *Guía ambiental para proyectos de lixiviación en pilas* se establece como prioridad localizar estas condiciones denominadas hidrogeológicas, con la finalidad de realizar métodos de drenaje subterráneo y superficial (8).

Los resultados obtenidos en el ejemplo mostrado en la Tabla 15: *Ejemplo de resultados de análisis de estabilidad física en una pila de lixiviación - Factor de seguridad (F.S.)* garantizan que la pila de lixiviación se encuentra estable para esta propuesta. Las partes más importantes de la pila son los taludes de tierra. Igualmente, se verifica que en el plan de cierre de minas de la Unidad Minera Tucari se describen todas las actividades que contempla el Capítulo 5 y se enmarcan en la estabilidad física de los componentes principales y secundarios, como es la pila de lixiviación en los sectores n.º 1, n.º 2 y especial, tajo abierto y botaderos (13).

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

En la presente investigación se realizaron cuatro etapas básicas, empezando desde la revisión de documentos, investigaciones de campo, procesamiento de la información y obtención de resultados que se obtuvieron del ejemplo de análisis de estabilidad. Esta propuesta cumple con el objetivo general, porque se han determinado procedimientos con base en la experiencia del tesista y se adecuó a la normativa vigente, Ley 28507, que de manera implícita indica realizar análisis de estabilidad física en componentes mineros en cierre, pero no detalla los procedimientos.

Los estudios básicos de campo propuestos son investigaciones geotécnicas e investigaciones geofísicas, que son la segunda parte del presente trabajo, actividades esenciales de donde se obtienen los datos de entrada para realizar el procesamiento. Aunque la normativa vigente no especifica los estudios de manera explícita, durante la fiscalización y revisión de los planes de cierre de minas, los titulares mineros son auditados por las autoridades gubernamentales.

Se efectuó el correcto análisis de estabilidad física, cuyo resultado final fue lograr el factor de seguridad que indica la normativa vigente y garantiza el cierre de la pila de lixiviación. Del ejemplo propuesto para el sistema de análisis de estabilidad física para fines cierre de una pila de lixiviación, Huancayo 2021, se concluye lo siguiente:

- Etapa 1: La revisión de documentos administrativos y legales permitió obtener información del estado actual de la pila de lixiviación en proceso de cierre. De la revisión, se utilizaron el expediente técnico de la pila, el estudio geológico y el estudio de peligro sísmico.
- Etapa 2: Las investigaciones de campo, compuestas de excavación de calicatas y ensayos geofísicos propuestos para el ejemplo, ayudan a determinar las condiciones físicas y mecánicas de los suelos y rocas, que es la data de entrada para realizar el modelamiento geotécnico.
- Etapa 3: El procesamiento de información de campo de excavación de calicatas permitió conocer la composición del subsuelo donde está construida la pila de lixiviación en proceso de cierre y las condiciones de los materiales de suelo mediante la clasificación SUCS. Los ensayos geofísicos permitieron confirmar el espesor de cada estrato propuesto en el modelamiento geotécnico.
- Etapa 4: Los resultados del ejemplo se basaron en el modelo desarrollado, donde se describió la pila de lixiviación en una etapa final de su operación y entrando a proceso de cierre; se describieron las propiedades físicas y mecánicas del mineral ROM por tonelaje total, la densidad del mineral y el ángulo de fricción que reposa sobre un relleno estructural,

la interface que está compuesta por una geomembrana y material impermeable, el suelo de fundación compuesto de coluvial y deluvial, y el basamento rocoso. Estos estratos fueron claves para realizar el análisis de estabilidad física de la pila. Cada resultado de análisis se denomina *factor de seguridad*, y fue analizado de acuerdo con la Tabla 16: *Factor de seguridad mínimo*), donde se verificó el porcentaje de probabilidad de falla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GREYSTAR Resources LTD. *Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto Angostura Diciembre 2009 Greystar Resources Ltd.* [en línea]. Greystar Resources Ltd., 2009.
2. DIRECCIÓN General de Asuntos Ambientales Mineros. *Guía para la elaboración de planes de cierre de minas* [en línea]. Lima: Ministerio de Energía y Minas, 2006 [fecha de consulta: 24 de noviembre de 2021]. Disponible en:
http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guías/guía_cierre.pdf
3. Ley 28507. Ley que regula el cierre de minas [en línea]. *Diario Oficial El Peruano*, Lima, Perú, 5 de mayo de 2005 [fecha de consulta: 21 de noviembre de 2021]. Disponible en:
http://www.minem.gob.pe/_legislacionM.php?idSector=1&idLegislacion=4844
4. MINISTERIO de Energía y Minas. Reglamento para el cierre de minas [en línea]. Lima, 15 de agosto de 2005 [fecha de consulta: 17 de noviembre de 2021]. Disponible en:
http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/recursos/archivos/MedioAmbienteMinero/Regla_cierre_minas.pdf
5. ALIANZA Mundial de Derecho Ambiental (ELAW). *Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros* [en línea]. Oregón (Estados Unidos), ELAW, 2010 [fecha de consulta: 20 de noviembre de 2021]. Disponible en:
<https://www.elaw.org/es/content/guía-para-evaluar-eias-de-proyectos-mineros>
6. MANRIQUE, J. Manejo de pilas de lixiviación de oro en minera Yanacocha S.R.L. Tesis (Título de ingeniero). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, s.f., capítulo 3 [fecha de consulta: 23 de noviembre de 2021]. Disponible en:
https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/manrique_mj/cap3.pdf
7. SERVICIO de Evaluación Ambiental (SEA). *Aprobación del plan de cierre de una faena minera* [en línea]. Santiago de Chile, SEA, 2020 [fecha de consulta: 20 de noviembre de 2021]. Disponible en:
https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2020/03/13/guía_pas_137.pdf
8. MINISTERIO de Energía y Minas (MEM). *Guía ambiental para proyectos de lixiviación en pilas* [en línea]. Lima, MEM, s.f. [fecha de consulta: 23 de noviembre de 2021]. Disponible en:
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guías/lixiviación.pdf>
9. HERNÁNDEZ, L. *Análisis probabilístico de estabilidad de taludes en el relleno sanitario Parque Ecoindustrial Miramar*. Tesis (Título de Ingeniera Civil). San José:

- Universidad de Costa Rica, 2017. 267 pp. [fecha de consulta: 20 de noviembre de 2021]. Disponible en:
<http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/13431/1/41874.pdf>
10. HIGHLAND, L. y P. BOBROWSKY. *Manual de derrumbes: una guía para entender todo sobre derrumbes* [en línea]. Reston, Virginia: Servicio Geológico de los EE.UU., 2008 [fecha de consulta: 20 de noviembre de 2021]. Disponible en:
<http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2665/doc2665.htm>
 11. THE Mining Association of Canada (MAC). *Guía para el manejo de depósitos de relaves* [en línea]. Canadá: MAC, 2019 [fecha de consulta: 20 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://mining.ca/resources/guides-manuals/guia-para-el-manejo-de-depositos-de-relaves/>
 12. RENNAT, E. *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina* [en línea]. Lima: Ministerio de Energía y Minas, 1997 [fecha de consulta: 20 de noviembre de 2021]. Disponible en:
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guiaestabilidad.pdf>
 13. COMPAÑÍA Minera Aruntani. *Plan de cierre de la unidad minera Tucari* [en línea]. Moquegua: Dirección Regional de Energía y Minas, s.f. [fecha de consulta: 23 de noviembre de 2021]. Disponible en:
http://energiayminasmoquegua.gob.pe/web/phocadownload/Estudios_Ambientales/PC/PC_Tucari_Aruntani.pdf
 14. VARGAS, V. *Actividad minera en el Perú: definiciones* [en línea]. Lima: Ministerio de Energía y Minas, s.f. [fecha de consulta: 23 de noviembre de 2021]. Disponible en:
<http://www.ramosdavila.pe/media/Leer-documento-del-MINEM.pdf>
 15. RIVERA, D. Factibilidad para la construcción de un PAD dinámico sobre un botadero analizando la estabilidad, en la compañía minera Los Andes Perú Gold S.A.C. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Huamachuco: Universidad Nacional de Trujillo, 2019. 117 pp. [fecha de consulta: 23 de noviembre de 2021]. Disponible en:
<https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/12143>
 16. R. M. N.º 406-2018-VIVIENDA. Norma Técnica E 050 Suelos y Cimentaciones 2018 [en línea]. *Diario Oficial El Peruano*, Lima, Perú, 3 de diciembre de 2018 [fecha de consulta: 23 de noviembre de 2021]. Disponible en:
https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/300082/d231803_opt.pdf
 17. OMAR. Diferencia entre Geofísica y Geología [en línea]. *Geoqualia* [fecha de consulta: 24 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://geoqualia.com/diferencia-entre-geofisica-y-geologia/>
 18. SERVICIO Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). *Guía metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes* [en línea].

Santiago de Chile: Sernageomin, 2018. Disponible en:
<https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2019/06/GUIA-METODOLOGICA.pdf>

19. ORGANISMO Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergrmin). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas* [en línea]. Lima: Osinergrmin, 2017 [fecha de consulta: 12 de diciembre de 2021]. Disponible en:
https://www.osinergrmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf
20. FOSTER, S., GARDUÑO, H., TUINHOF, A., NANNI, Kemper, K. y NANNI, M. *Recarga del agua subterránea con aguas residuales urbanas: evaluación y manejo de los riesgos y beneficios. 2002-2006* [en línea]. Washington D.C.: Banco Mundial, s.f. [fecha de consulta: 28 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://bit.ly/3fRMuMi>
21. CARRANZA-TORRES, C. y E. HORMAZÁBAL. Herramientas computacionales para la determinación del factor de seguridad y posición de la superficie de falla crítica circular para taludes en terreno seco Mohr-Coulomb [en línea]. *SRK Consulting* [fecha de consulta: 24 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://bit.ly/3fTqxfY>
22. D.S. N° 016-93-EM. Reglamento para la Protección Ambiental en la Actividad Minero Metalúrgica. [en línea]. *Diario Oficial El Peruano*, Lima, Perú, 28 de abril de 1993 [fecha de consulta: 24 de noviembre de 2021]. Disponible en:
http://www.minem.gob.pe/_legislacionM.php?idSector=1&idLegislacion=4755
23. SERVICIO Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (Senace). *¿Qué es el Estudio de Impacto Ambiental detallado (EIA-d)?* [infografía en línea]. Lima: Senace, s.f. [fecha de consulta: 12 de diciembre de 2021]. Disponible en:
https://www.senace.gob.pe/wp-content/uploads/2016/10/info_que_es_eia.pdf
24. HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. y BAPTISTA, P. *Metodología de la investigación*. McGraw Hill, 2014. ISBN 9781456223960.
25. R. M. N° 043-2019-VIVIENDA. Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente [en línea]. Lima, Perú, 11 de febrero del 2019 [fecha de consulta: 24 de noviembre de 2021]. Disponible en:
https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/299950/d289856_opt.pdf
26. DAS, B. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* [en línea]. 4ª ed. México D.F.: Cengage Learning Editores, 2015 [fecha de consulta: 23 de noviembre de 2021]. Disponible en:
https://issuu.com/cengagelatam/docs/fundamentos_de_ingenieria_low_1_iss

ANEXOS

ANEXO I. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	VARIABLES	Dimensiones	Indicadores	Metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	VARIABLES			General
¿Cuáles son los procedimientos adecuados de acuerdo con la normativa vigente para el correcto análisis de estabilidad física en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021?	Determinar los procedimientos adecuados de acuerdo con la normativa vigente para el correcto análisis de estabilidad física en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021.					
Problemas específicos	Objetivos específicos			Estudios básicos de campo.	Investigaciones geotécnicas, estudios geofísicos, estudios geológicos y estudio de peligro sísmico.	
¿Cuáles son los estudios básicos de campo adecuados de acuerdo con la normativa vigente en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021?	Determinar los estudios básicos de campo de acuerdo con la normativa vigente en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021.	Existen procedimientos adecuados para el correcto análisis de estabilidad física de la pila de lixiviación en proceso de cierre que cumplen con la normativa vigente, Huancayo 2021.	Sistema de análisis de estabilidad física de acuerdo con la normativa vigente para el cierre adecuado de la pila de lixiviación.	Sistema de análisis de estabilidad física.	Modelamiento geotécnico y análisis computacional.	Inductivo/ deductivo
¿Cuál es el correcto análisis de estabilidad física de acuerdo con la normativa vigente en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021?	Determinar el correcto análisis de estabilidad física de acuerdo con la normativa vigente en una pila de lixiviación en proceso de cierre, Huancayo 2021.					

ANEXO II. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variables	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida
Sistema de análisis de estabilidad física de acuerdo con la normativa vigente para el cierre adecuado de la pila de lixiviación.	La pila de lixiviación es considerada una instalación minera (8). Tiene la función de acumular millones de toneladas métricas de minerales que vienen diseminados en los suelos y rocas que se extraen del tajo de minerales denominado Open Pit (5).	Estudios básicos de campo. Sistema de análisis de estabilidad física.	Investigaciones geotécnicas, estudios geofísicos, estudios geológicos y estudio de peligro sísmico. Modelamiento geotécnico y análisis con herramienta computacional.	Factor de seguridad.

ANEXO III. REGISTRO DE RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO CALICATAS

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN						
REGISTRO DE EXCAVACIÓN						
PROYECTO: INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN						
SOLICITANTE:						
UBICACIÓN: HUANCAYO, 2021						
Calicata	CP-05	Sistema de coordenadas: WGS 84	Cota (mnm)	3663.00	Fecha	2021
Prof. Total (m)	4.50	E = 615632	Realizado	TESISTA: EDGAR MONZÓN		
Prof. N. F. (m)	N. P.	N = 8337667	Revisado			
Prof. (m.)	Esp. Est.	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo		Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
Clasificación técnica: forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia. Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de boleros / cantos, etc.						
0.30	0.30	S/M	Cobertura vegetal		CO	
0.50	0.30	S/M	Gravas bien gradadas de formas angulosas con arcilla limosa de plasticidad media, de consistencia media, de baja humedad, color blanquesina G=50%, A=10%, F=40%		GM	
4.50	3.90	M-1	Arenas de grano medio con gravas bien gradada de formas angulosas con matriz de arcilla limosa, de plasticidad media, compacidad media, húmeda, color amarillento con presencia de bioceritas aisladas TM 5'-10" = 5% G=16% A= 31% F=63%		CL	
OBSERVACIONES:			FOTO:			

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN						
REGISTRO DE EXCAVACIÓN						
PROYECTO: INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN						
SOLICITANTE:						
UBICACIÓN: HUANCAYO, 2021						
Calicata	CP-06	Sistema de coordenadas: WGS 84	Cota (mnm)	3663.00	Fecha	2021
Prof. Total (m)	4.10	E = 615558	Realizado	TESISTA: EDGAR MONZÓN		
Prof. N. F. (m)	N. P.	N = 8337589	Revisado			
Prof. (m.)	Esp. Est.	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo		Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
Clasificación técnica: forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia. Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de boleros / cantos, etc.						
0.30	3.30	S/M	Cobertura vegetal		CO	
3.00	2.70	S/M	Gravas bien gradadas de formas angulosas con arcilla limosa de plasticidad media, de consistencia media, de baja humedad, color blanquesina G=50%, A=10%, F=40%		CL	
4.10	1.10	M-1	Arcilla limosa de plasticidad media, de consistencia media alta, con gravas de formas angulosas con presencia de bioceritas aisladas = 5" de TM =5%, húmeda color amarillenta G= 5, A=30, F= 65%		CL	
OBSERVACIONES:			FOTO:			

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN						
REGISTRO DE EXCAVACIÓN						
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTECNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN						
SOLICITANTE						
UBICACION HUANCAYO, 2021						
Calicata CP-07		Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha		2021
Prof. Total (m) 2.30		Cota (msnm) 3843.00		Realizado		TESISTA, EDGAR MONZÓN
Prof. N. F. (m) NP		Coordenadas E = 615514 N = 8337420		Revisado		
Prof. (m)	Esp. (m)	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica; forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, materia orgánica, porcentaje estimado de boleros / cantos, etc.	Clasif. SUCS	Simbología Gráfica	
0.20	0.20	S/M	Cobertura vegetal	CO		
		M-1	Arcilla limosa de plasticidad media-baja, con gravas angulosas de consistencia firme, dura, húmeda, color marrón claro con boquerones angulosos azucados TM <5%, G=35%, A=24%, F=41%	GC		
2.30	2.10					
OBSERVACIONES:			FOTO:			

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN						
REGISTRO DE EXCAVACIÓN						
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTECNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN						
SOLICITANTE						
UBICACION HUANCAYO, 2021						
Calicata CP-08		Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha		2021
Prof. Total (m) 3.00		Cota (msnm) 3895.00		Realizado		TESISTA, EDGAR MONZÓN
Prof. N. F. (m) NP		Coordenadas E = 615667 N = 8337274		Revisado		
Prof. (m)	Esp. (m)	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica; forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, materia orgánica, porcentaje estimado de boleros / cantos, etc.	Clasif. SUCS	Simbología Gráfica	
0.30	0.30	S/M	Cobertura vegetal	CO		
		M-1	Gravas bien gradadas de formas angulosas con arcilla limosa de plasticidad media, de consistencia media, de baja humedad, color blanquecina G=50%, A=10%, F=40%	SC		
3.00	2.70					
OBSERVACIONES:			FOTO:			

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
SOLICITANTE							
UBICACIÓN HUANCAYO, 2021							
Calicata		CP-09	Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha	2021	
			Cota (msnm)	3574.00			
Prof. Total (m)	3.50	Coordenadas		E = 615691	Realizado	TEGISTA: EDGAR MONZÓN	
Prof. N. F. (m)	N.P.			N = 5337311	Revisado		
Prof. (m)	Esp. Estr. (m)	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica; forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de boleos / cartos, etc.			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.30	0.30	S/M	Cobertura vegetal			CO	
		S/M	Gravas bien gradadas de formas angulosas con arcilla limosa de plasticidad media, de consistencia media, de baja humedad, color blanquesina G=50%, A=10%, F=40%			SP-SM	
1.50	1.50	M-1	Arcilla limosa de baja plasticidad, de consistencia firme y blanda, húmeda color amarillenta G=0%, A=31%, F=69%			MH	
3.00	1.20	M-2	Limo arcilloso de baja plasticidad de consistencia firme, blanda, húmeda, color beige claro con presencia de oxidaciones G=0%, A=36%, F=64%			MH	
3.50	0.50						
OBSERVACIONES:				FOTO:			

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
SOLICITANTE							
UBICACIÓN HUANCAYO, 2021							
Calicata		CP-09A	Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha	2021	
			Cota (msnm)	3582.00			
Prof. Total (m)	3.50	Coordenadas		E = 615676	Realizado	TEGISTA: EDGAR MONZÓN	
Prof. N. F. (m)	NP			N = 5337264	Revisado		
Prof. (m)	Esp. Estr. (m)	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica; forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de boleos / cartos, etc.			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.30	0.30	S/M	Cobertura vegetal			CO	
		M-1	Gravas bien gradadas de formas angulosas con arcilla limosa de plasticidad media, de consistencia media, de baja humedad, color blanquesina G=50%, A=10%, F=40%			GC	
2.50	2.20						
		SM	Clastros de roca alterada con matriz de arcilla limosa, húmeda color negro con presencia de oxidaciones			ROCA	
3.50	1.00						
OBSERVACIONES:				FOTO:			

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO		INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN					
SOLICITANTE							
UBICACIÓN		HUANCAYO, 2021					
Calicata		CP-10	Sistema de coordenadas: WGS 84 Cota (mnm)		3554.00	Fecha	2021
Prof. Total (m)		2.30	Coordenadas		E = 615657 N = 8337557	Realizado	TESISTA, EDGAR MONZÓN
Prof. N. F. (m)		NP				Revisado	
Prof. (m)	Esp. Estr.	Nº de Muest.	Descripción visual del Suelo			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.20	0.20	S/M	Cobertura vegetal, limo Orgánico con gravas angulosas, suelta.			CO	
0.60	0.40	S/M	Arena con Limos de baja plasticidad de compactad media, baja humedad, color beige con presencia de gravas angulosas y raizillas, G=10%, A=45%, F=35%			SM	
0.90	0.30	S/M	Gravas angulosas con limos arcillosos de baja plasticidad, compactad media, húmeda, color marrón, con presencia de bolonetas +5%, G=50 A=10% F=35			GM	
2.30	1.40	M-1	Arcilla de plasticidad media de consistencia firme, húmeda color plomizo con presencia de gravas de formas angulosas y sub ang. Alisadas G=0%, A=15%, F=65 %.			CH	
OBSERVACIONES:		FOTO:					

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO		INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN					
SOLICITANTE							
UBICACIÓN		HUANCAYO, 2021					
Calicata		CP-11	Sistema de coordenadas: WGS 84 Cota (mnm)		3667.00	Fecha	2021
Prof. Total (m)		2.50	Coordenadas		E = 615690 N = 8337787	Realizado	TESISTA, EDGAR MONZÓN
Prof. N. F. (m)		NP				Revisado	
Prof. (m)	Esp. Estr.	Nº de Muest.	Descripción visual del Suelo			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.20	0.20	S/M	Cobertura vegetal			CO	
0.90	0.70	S/M	Limos de baja plasticidad de consistencia firme a dura, baja humedad, color plomizo			ML	
1.30	0.40	M-1	Suelo orgánico, limo de plasticidad media con gravas de formas angulosas de consistencia media alta, húmeda color marrón con bolonetas TM 10"x12", G=19%, A=12%, F=66%			MH	
2.00	0.70	M-2	Arenas con gravas bien gradada con matriz de arcilla limosa de plasticidad media, compactad media, húmeda, color amarillento con presencia de bolonetas TM +5% G=0% A=22% F=78%			MH	
2.50	0.50	M-3	Arcilla de mediana plasticidad, de consistencia firme, bien húmeda de color plomizo G=6%, A=26%, F=68%			CL	
OBSERVACIONES:		FOTO:					

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTECNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
SOLICITANTE							
UBICACION HUANCAYO, 2021							
Calicata		CP-12	Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha 2021		
Prof. Total (m)		2.50	Cota (mnm)		Realizado TEGISTA: EDGAR MONZON		
Prof. N. F. (m)		2.50	Coordenadas		Revisado		
			E = 615656				
			N = 5337963				
Prof. (m)	Esp. Estr.	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica: forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de boleros / cantos, etc.			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.20	0.20	S/M	Cobertura vegetal			CO	
		S/M	Arcilla de baja media a alta de consistencia firme a dura, baja humedad, color marrón claro con presencia de raízillas			CL	
0.90	0.70						
		M-1	Arcilla de plasticidad media con presencia de gravas de formas angulosas aisladas, de consistencia firme, dura, bien húmeda de color beige amarillento con presencia de bloque de roca TM 11" x 19" G=10%, A=25%, F=65%			CH	
2.50	1.60						
OBSERVACIONES:			FOTO:				

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTECNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
SOLICITANTE							
UBICACION HUANCAYO, 2021							
Calicata		CP-13	Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha 2021		
Prof. Total (m)		2.50	Cota (mnm)		Realizado TEGISTA: EDGAR MONZON		
Prof. N. F. (m)		NP	Coordenadas		Revisado		
			E = 615916				
			N = 5337965				
Prof. (m)	Esp. Estr.	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica: forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de boleros / cantos, etc.			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.30	0.30	S/M	Cobertura vegetal, limo orgánico con arcillas y gravillas angulosas.			CO	
		S/M	Gravas bien gradadas de formas angulosas con arcilla limosa de plasticidad media, de consistencia media, de baja humedad, color blanquesina G=50%, A=10%, F=40%			SM	
0.90	0.60						
		S/M	Gravas con limos de baja plasticidad, compactación media, húmeda de color plomo con presencia de bolonetas aisladas G= 50% F=35%			GM	
1.30	0.40						
		M-1	Grava con limos arcillosos de baja plasticidad, compactación media, húmeda color marrón claro con bolonetas y bloques TM= 22" x 13" = 5% G=45%, A=26%, F=29% con presencia de raízillas			GC	
2.50	1.20						
OBSERVACIONES:			FOTO:				

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
SOLICITANTE							
UBICACIÓN HUANCAYO, 2021							
Calicata		CP-14	Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha	2021	
Prof. Total (m)		2.00	Cota (msnm)	3906.00	Realizado	TESISTA, EDGAR MONZÓN	
Prof. N. F. (m)		NP	Coordenadas	E = 615872 N = 8337611	Revisado		
Prof. (mL)	Esp. Estr.	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica; forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de boleros / cantos, etc.			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.50	0.50	S/M	Cobertura vegetal, limo orgánico de baja plasticidad con gravas angulosas de consistencia mediana a suelta, color marrón oscuro			CO	
2.00	1.50	M-1	Arcilla limosa de baja plasticidad con gravas de formas angulosas de consistencia mediana húmeda, de coloración blanquecina con bolonetas y bloques TM = 5'-20" = G=39%; A=22 F= 39%			GM	
OBSERVACIONES:							
				FOTO:			

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
SOLICITANTE							
UBICACIÓN HUANCAYO, 2021							
Calicata		CP-15	Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha	2021	
Prof. Total (m)		2.50	Cota (msnm)	3918.00	Realizado	TESISTA, EDGAR MONZÓN	
Prof. N. F. (m)		NP	Coordenadas	E = 615899 N = 8337250	Revisado		
Prof. (mL)	Esp. Estr.	Nº de Muestr.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica; forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de boleros / cantos, etc.			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.40	0.40	S/M	Cobertura vegetal, limo orgánico de baja plasticidad con gravas angulosas de consistencia mediana a suelta, color marrón oscuro			CO	
0.80	0.40	S/M	Limo arcilloso de baja plasticidad, consistencia firme a dura, húmeda, color amarillento con presencia de razillas y gravitas aisladas			ML	
1.80	1.00	M-1	Arena limosa de baja plasticidad, compactación mediana a densa, húmeda, color marrón, con presencia de gravas angulosas, bolonetas TM = 5'-15" = G=42%, A=43%, F= 15%			SM	
2.50	0.70	M-2	Arena arcillosa de plasticidad mediana a baja, compactación mediana, con gravas angulosas y sub angulosas con bolonetas G= 25% y bloque de roca TM = 12"x10" (aislado) A=27%, F= 48%			SC	
OBSERVACIONES:							
				FOTO:			

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
SOLICITANTE							
UBICACIÓN HUANCAYO, 2021							
Calicata		CP-17	Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha	2021	
Prof. Total (m)		1.50	Cota (mnm)		3971.00		
Prof. N. F. (m)		N. P.	Coordenadas		E = 616072 N = 8337556	Realizado TEGISTA, EDGAR MONZON Revisado	
Prof. (mt.)	Esp. Estr.	N° de Muest.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica: forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de bolos / cantos, etc.			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.30	0.30	SIM	Cobertura vegetal, limo orgánico con gravas angulosas de consistencia suelta			CO	
1.50	1.20	M-1	Gravas bien gradadas de formas angulosas con arcilla limosa de plasticidad media, de consistencia media, de baja humedad, color blanquesina G=50%, A=10%, F=40%			GC	
OBSERVACIONES:							
			FOTO:				

SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA FINES CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
REGISTRO DE EXCAVACIÓN							
PROYECTO INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL EJEMPLO DE CIERRE DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN							
SOLICITANTE							
UBICACIÓN HUANCAYO, 2021							
Calicata		CP-18	Sistema de coordenadas: WGS 84		Fecha	2021	
Prof. Total (m)		1.70	Cota (mnm)		3966.00		
Prof. N. F. (m)		N. P.	Coordenadas		E = 616088 N = 8337892	Realizado TEGISTA, EDGAR MONZON Revisado	
Prof. (mt.)	Esp. Estr.	N° de Muest.	Descripción visual del Suelo Clasificación técnica: forma del material granular; color; contenido de humedad; índice de plasticidad / compresibilidad; grado de compactación / consistencia; Otros: Presencia de oxidaciones, material orgánico, porcentaje estimado de bolos / cantos, etc.			Clasif. SUCS	Simbología Gráfica
0.20	0.20	SIM	Cobertura vegetal, limo orgánico con gravillas de forma angulosas.			CO	
1.70	1.50	M-1	Gravas de formas angulosas con limo arcilloso de plasticidad media, compactación media a densa, húmeda color beige claro con bolonetas TM 5-7; bloques TM 50"x 62" (asidos), presencia de raíces. G=44%, A=22%, F=34%			GC	
OBSERVACIONES:							
			FOTO:				

ANEXO IV. REGISTRO DE RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO GEOFÍSICA

Refracción sísmica

PARAMETROS PSEUDO DINAMICOS RS-P-1

Estrato	Capa	Velocidad Vp	Velocidad Vs	Densidad Estimada(ρ)	Razón Poisson (μ)	Modulo Corte (G)		Modulo Young (E)		Modulo Bulk (K)	
		(m/s)	(m/s)	(kg/m ³)		(Nt/m2)	(MPa)	(Nt/m2)	(MPa)	(Nt/m2)	(MPa)
1	Capa - 01	400.00	160.00	1500.00	0.40	3.84E+07	38.40	1.08E+08	107.89	1.89E+08	188.80
2	Capa - 02	1300.00	546.00	2200.00	0.39	6.56E+08	655.86	1.83E+09	1827.09	2.84E+09	2843.53
3	Capa - 03	1800.00	810.00	2500.00	0.37	1.64E+09	1640.25	4.50E+09	4504.26	5.91E+09	5913.00

PARAMETROS PSEUDO DINAMICOS RS-P-2

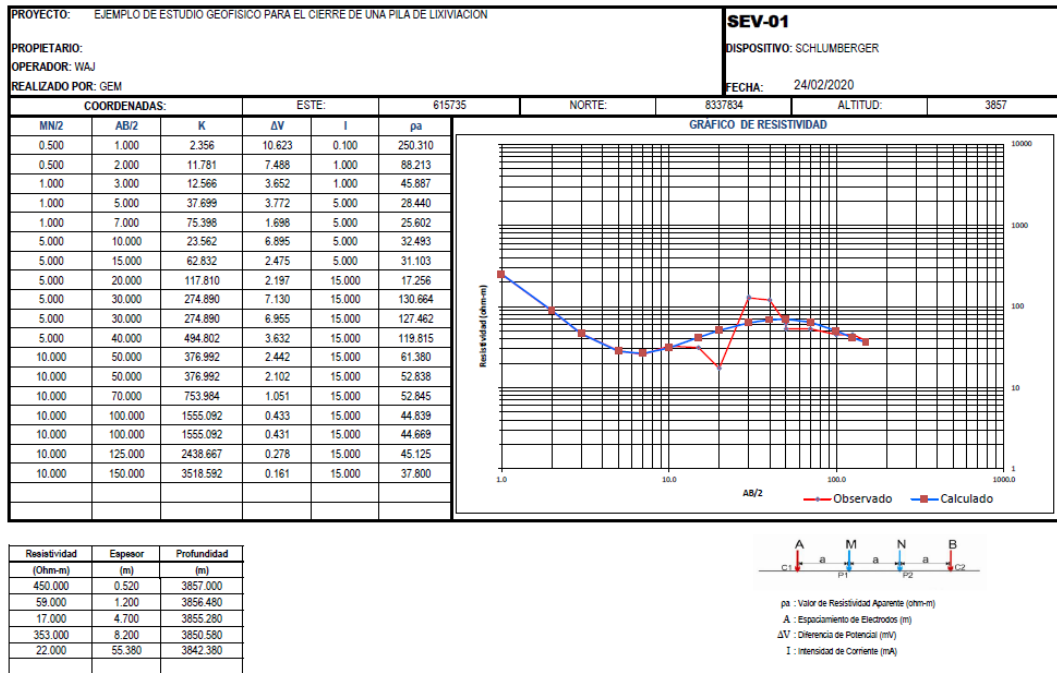
Estrato	Capa	Velocidad Vp	Velocidad Vs	Densidad Estimada(ρ)	Razón Poisson (μ)	Modulo Corte (G)		Modulo Young (E)		Modulo Bulk (K)	
		(m/s)	(m/s)	(kg/m ³)		(Nt/m2)	(MPa)	(Nt/m2)	(MPa)	(Nt/m2)	(MPa)
1	Capa - 01	400.00	168.00	1500.00	0.39	4.23E+07	42.34	1.18E+08	117.94	1.84E+08	183.55
2	Capa - 02	1400.00	630.00	2200.00	0.37	8.73E+08	873.18	2.40E+09	2397.82	3.15E+09	3147.76

PARAMETROS PSEUDO DINAMICOS RS-P-3

Estrato	Capa	Velocidad Vp	Velocidad Vs	Densidad Estimada(ρ)	Razón Poisson (μ)	Modulo Corte (G)		Modulo Young (E)		Modulo Bulk (K)	
		(m/s)	(m/s)	(kg/m ³)		(Nt/m2)	(MPa)	(Nt/m2)	(MPa)	(Nt/m2)	(MPa)
1	Capa - 01	600.00	252.00	1500.00	0.39	9.53E+07	95.26	2.65E+08	265.37	4.13E+08	412.99
2	Capa - 02	1600.00	720.00	2200.00	0.37	1.14E+09	1140.48	3.13E+09	3131.85	4.11E+09	4111.36
3	Capa - 03	2500.00	1200.00	2500.00	0.35	3.60E+09	3600.00	9.72E+09	9722.25	1.08E+10	10825.00

Sondaje eléctrico vertical

SONDAJE ELÉCTRICO VERTICAL - HOJA DE CAMPO



SONDAJE ELÉCTRICO VERTICAL - HOJA DE CAMPO

