



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“DISEÑO PARA LA AMPLIACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE LIXIVIACIÓN EN UNA MINA TAJO ABIERTO UBICADA EN LA REGIÓN CAJAMARCA, 2019.”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de minas

Autor:

Céspedes Alfaro, Roberto Antonio

Asesor:

Ing. Msc. Daniel Alejandro Alva Huamán

Cajamarca - Perú

2020

## DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y el que me dio la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres, por su apoyo incondicional y por el sacrificio que significó llegar a convertirme en lo que soy.

A mi hermano que, a pesar de ser un niño, me brinda todo el apoyo emocional y es el motivo de mis alegrías.

## **AGRADECIMIENTO**

De manera especial a mi tutor de tesis el Ing. Daniel Alva y al coordinador de la carrera de Ingeniería de Minas, el Ing. Alex Marinovic, por haberme guiado en la elaboración de este trabajo de titulación y brindarme el apoyo para desarrollarme profesionalmente.

A la Universidad Privada del Norte, por haberme brindado los conocimientos necesarios para llegar a ser un excelente profesional.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1. Realidad problemática .....	8
1.2. Formulación del problema.....	17
1.3. Objetivos .....	17
1.4. Hipótesis.....	17
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
2.1. Tipo de investigación .....	18
2.2. Población.....	18
2.3. Muestra.....	18
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos .....	18
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>	<b>22</b>
3.1. Ubicación.....	22
3.2. Vías de acceso .....	22
3.3. Investigación geotécnica .....	23
3.4. Caracterización Geológica.....	32
3.5. Caracterización geotécnica.....	35
3.6. Plan de carguío. ....	40
3.7. Sistema de revestimiento.....	44
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>57</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: .....	12
Tabla 2 .....	23
Tabla 3: .....	23
Tabla 4: .....	24
Tabla 5: .....	25
Tabla 6: .....	25
Tabla 7 .....	26
Tabla 8 .....	28
Tabla 9 .....	32
Tabla 10.....	41
Tabla 11.....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Ubicación del Proyecto de ampliación respecto a la ciudad de Cajamarca.....	22
---	----

## RESUMEN

Si bien hoy en día algunos estudios han realizado diseños de ampliación de plataformas de lixiviación, en ellos no toman en cuenta estudios geotécnicos para el diseño en base al plan de carguío de mineral lo cual aporta de manera significativa a este tipo de proyectos.

El objeto de estudio de la investigación es realizar el diseño de la ampliación de la plataforma de lixiviación de una mina a tajo abierto, para ello se utilizaron técnicas e instrumentos de recolección de datos como la observación y el análisis de contenido. Para el procedimiento se realizaron investigaciones de campo y ensayos de laboratorio en suelos.

Se caracterizaron 7 unidades geotécnicas: Mineral lixiviado/Depósito antropogénico, Material inadecuado I, Material estéril, Material inadecuado II, Revestimiento de suelo (soil liner, SL), Suelo residual/roca alta a extremadamente meteorizada y el Basamento rocoso. Para realizar el diseño de la ampliación de la plataforma de lixiviación se tomó en cuenta el plan de minado y el plan de carguío a mediano plazo del año anterior, lo cual permitió realizar una proyección del tiempo de carguío y transporte de mineral hacia la ampliación de 3 meses. Se logró determinar la configuración de la pila de mineral de la plataforma de lixiviación, para lo cual se consideró que los taludes tendrán una inclinación general de 2,5H: 1V y un retiro del pie del talud del mineral de 7,0 m, medidos desde la berma perimetral, esta configuración asegurara la estabilidad del talud final, para así cumplir con los requerimientos de seguridad. El sistema de revestimiento consistirá de una capa de suelo de baja permeabilidad de 300 mm de espesor (Soil Liner (SL)), sobre la cual se colocará una geomembrana de 1,5 mm de espesor, que a la vez será cubierta por una capa de 300 mm de espesor, denominada Protective Layer (PL), que consiste de un suelo de grano fino.

**Palabras clave: Ampliación, diseño de plataforma de lixiviación, geotécnico, sistema de revestimiento.**

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

Hoy en día, las empresas mineras comienzan sus operaciones con una capacidad estimada de producción acorde al mineral obtenido en las exploraciones, los cuales van aumentando progresivamente según los nuevos hallazgos. (Rumbominero, 2017). Dependiendo del tipo de proyecto que se quiera realizar, los pasos para llevar a cabo la primera fase de un estudio geotécnico son similares y lo que cambia son las escalas, cantidad y especificidad de ensayos requeridos, los que están relacionados con los riesgos que se quieran cubrir (Saavedra, 2018).

La Empresa minera ubicada en la región Cajamarca no cuenta con un diseño adecuado ni la planificación de la ampliación de su plataforma de lixiviación.

Según Briones (2016), en su tesis titulada “Método y planeamiento de la construcción de una Plataforma de lixiviación en un proyecto minero”, la compañía minera ha iniciado la construcción de la ampliación de una plataforma de lixiviación, en fases denominadas fase 3 (6.8 hectáreas) y fase 3A (13.8 hectáreas), el área aproximada de plataformas construidas en el proyecto Tantahuatay es de 14 hectáreas, la ampliación se realizó para alcanzar los objetivos de procesamiento de mineral para el periodo 2016 - 2017.

Según Smith (2015). En su tesis “Propuesta de Diseño para la construcción de Pad de Lixiviación Numero 3 De La Unidad Minera Tucari – Aruntani”. Menciona que el Pad 3 de la mina Tucari ha sido configurado en un área aproximada de 783,800 m<sup>2</sup>. El pad ha sido diseñado en base a la tecnología convencional de lixiviación en pilas. El diseño incluye un sistema de subdrenaje y monitoreo ambiental para aguas subterráneas, un sistema compuesto de revestimiento suelo/geomembrana, un sistema de sobreevntimiento o protección de la geomembrana y finalmente un sistema de colección de solución.

Según Mayhua (2015), en su tesis titulada “Diseño geotécnico del Pad de Lixiviación ampliación Sur - Fase 5 - La Libertad”, desarrolla el procedimiento de diseño geotécnico de un pad de lixiviación, el cual comprende la evaluación de las condiciones geológico geotécnicas del área de futuro emplazamiento del pad, la sismicidad asociada al área del proyecto y la ejecución de análisis de estabilidad de los taludes presentes en el pad de lixiviación, se procedió al diseño del pad de lixiviación Ampliación Sur - Fase 5 ubicado en el departamento de La Libertad Perú. Para ello, se proyectó la configuración geométrica del pad en mención en base a criterios de diseño usados en la práctica ingenieril y se evaluó la estabilidad física del mismo a través de métodos de análisis de estabilidad de taludes.

Según Soplín (2014), en su tesis “Ampliación de la Plataforma de Lixiviación Tantahuatay fase 2A”, plantea proyectar la Fase 2A (ampliación de la Fase 2), al proyectar esta ampliación se cumplió con los requerimientos del cliente tanto en plazo como en capacidad de apilamiento requerido. Esto evitó las posibles paradas en la producción que significarían para el cliente una pérdida económica invaluable por la cantidad de personal y maquinaria que se encuentra destacada en campo. Para ello se realizó la caracterización geotécnica de la cimentación, aplicación del diseño geotécnico y el diseño del Pad de Lixiviación. Se concluyó que la configuración del pad de lixiviación resulta estable.

Según Reyna (2014), en su tesis “Diseño de la ampliación de la plataforma de lixiviación Pierina fase 7A”, plantea que la plataforma de lixiviación ha sido configurada en un área aproximada de 17 Ha. Concluye que las secciones transversales típicas de diseño de la Fase 7A son similares a las fases anteriores de la plataforma de lixiviación (actualmente en operación), las investigaciones y ensayos también se utilizaron para determinar los niveles de cimentación adecuados, para un correcto funcionamiento de la plataforma de lixiviación. Se debió incluir un sistema de sub-drenaje para aguas subterráneas, un sistema compuesto de

revestimiento suelo/geomembrana o GCL/geomembrana y un sistema de tuberías de colección de solución. Se realizaron investigaciones geotécnicas de campo, así como ensayo de laboratorio de las muestras obtenidas, cuyos resultados fueron utilizados para la modelación del análisis de estabilidad de taludes.

Según Serranto (2006), en su tesis “Ampliación de la plataforma de lixiviación compañía minera aurífera Santa Rosa S.A.”, en la cual se realizaron estudios geotécnicos para la ejecución del diseño, se determinaron las especificaciones técnicas de la plataforma de lixiviación a través de planos e incluye la provisión de todo el personal de supervisión, la mano de obra. Concluye que los datos de ingeniería contenidos han sido obtenidos a partir de un número limitado de calicatas, perforaciones, ensayos de laboratorio y de la conceptualización original del proyecto lo cual hace posible que se presenten variaciones de las condiciones sub-superficiales, sobre todo durante la construcción de la obra.

En la presente tesis se realizó el diseño para la ampliación de una plataforma de lixiviación en una mina a tajo abierto ubicada en la región Cajamarca, 2019.

Un Estudio Geotécnico es un conjunto de actividades que comprenden el reconocimiento de campo, la investigación del subsuelo, los análisis y recomendaciones de ingeniería necesarios para el diseño y construcción de las obras en contacto con el suelo, de tal forma que se garantice un comportamiento adecuado de las estructuras (superestructura y subestructura), que preserve la vida humana, así como también evite la afectación o daño a construcciones vecinas (Flores, 2018).

Las calicatas o catas son una de las técnicas de prospección empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico, estudios edafológicos o pedológicos de un terreno. Son excavaciones de profundidad pequeña a media. Estas permiten la inspección directa del suelo

que se desea estudiar y, por lo tanto, es el método de exploración que normalmente entrega la información más confiable y completa (Reeve, 2018).

Una de las técnicas más sencillas (en cuanto a costos y trabajo) para hallar el coeficiente de permeabilidad en un suelo es el conocido Ensayo De Lefranc. El ensayo de Lefranc se utiliza en suelos permeables o semipermeables, de tipo granular, situados por debajo del nivel freático, y en rocas muy fracturadas. El método para realizar el ensayo de Lefranc es el de Nivel Constante; para este procedimiento se debe saturar primero el suelo hasta que el aire de los vacíos sea expulsado y con esto lograr que haya una infiltración más uniforme en el suelo, todo esto para que se pueda introducir un caudal conocido de manera que se mantenga un nivel constante dentro de la perforación. Cuando se estabiliza este proceso, con la medida conocida del caudal introducido, la longitud y el diámetro de la perforación, es posible calcular la permeabilidad de dicho suelo. El caudal de admisión debe medirse cada 5 minutos, siempre logrando mantener el nivel constante dentro del sondeo durante aproximadamente 45 minutos. (Montoya, 2019)

El ensayo Lugeon es un tipo de investigación geotécnica realizado en el interior de un sondeo (ensayo in situ), que define el valor de la permeabilidad (K) en rocas (macizos rocosos) variablemente fracturados, donde se introduce agua a presión constante en tramos aislados y semi aislados. Este tipo de ensayo se puede usar para cualquier tipo de roca. Normalmente se realiza en tramos de 5 metros aislados por obturadores neumáticos, en cinco intervalos de 10 minutos con una presión de agua constante en cada intervalo, el ensayo se realiza a presión creciente y decreciente entre cero y presión máxima. Este ensayo se define como la absorción de agua de 1 litro por metro de sondeo y por minuto, realizando el ensayo a 10 atmósferas de presión durante 10 minutos y una unidad Lugeon equivale a un coeficiente de permeabilidad de  $10^{-5}$  cm/s (U.L. =  $1 \text{ l/m} \times \text{min} = 10^{-5} \text{ cm/s}$ ). (Ensayo Lugeon, 2019)

El sistema de clasificación SUCS está basado en la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad. Este sistema de clasificación también se basa en la gráfica de plasticidad, que fue obtenida por medio de investigaciones realizadas en laboratorio por A. Casagrande (1932). Este sistema de clasificación presenta las siguientes características:

Los suelos granulares o finos, según se distribuye el material que pasa el tamiz de 3’’ = 75 mm; el suelo es denominado “fino” cuando más del 50% pasa el Tamiz número 200 (T200). Si no ocurre, el material es “granular” y será grava o arena. (Santa Cruz, 2018)

*Tabla 1:*

*Nombres típicos de los Materiales*

GRUPO NOMBRES TÍPICOS DEL MATERIAL	
GW	Grava bien gradada, mezclas gravosas, poco o ningún fino.
GP	Grava mal gradada, mezclas grava – arena, poco o ningún fino.
GM	Grava limosa, mezclas grava, arena, limo.
GC	Grava arcillosa, mezclas gravo – arenas arcillosas.
SW	Arena bien gradada.
SP	Arena mal gradada, arenas gravosas, poco o ningún fino.
SM	Arenas limosas, mezclas arena – limo.
SC	Arenas arcillosas, mezclas arena – arcilla.
ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, limo arcilloso, poco plástico, arenas finas limosas, arenas finas arcillosas.
CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras (pulpa)
OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos (ambiente marino, naturaleza orgánica silíceo), suelos elásticos.
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas gruesas.
OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos.
Pt	Turba (carbón en formación) y otros suelos altamente orgánicos.

Fuente: Santa Cruz, D.

El análisis granulométrico es un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas de un suelo en sus diferentes tamaños, denominado a la fracción menor como limo, Arcilla. Se lleva a cabo utilizando tamices en orden decreciente. La cantidad de suelo retenido indica el tamaño de la muestra, esto solo separa una porción de suelo entre dos tamaños. El análisis granulométrico por tamizado se realiza a las partículas con diámetros superiores a 0,075 mm. (Malla 200), este ensayo se hace con una serie de mallas normalizadas (a cada número de malla le corresponde una abertura estándar), dispuestos en orden decreciente. (Guzman, 2012)

Los límites de Atterberg pueden definirse como los límites de los contenidos de humedad que caracterizan los cuatro estados de consistencia de un suelo de grano fino: estado sólido, estado semisólido, estado plástico y estado semilíquido o viscoso. El límite entre los estados sólido y semisólido se denomina límite de retracción, el límite entre los estados semisólido y plástico se llama límite plástico y el límite entre los estados plástico y semilíquido, límite líquido. Así de este modo, un suelo de grano fino puede pasar de un estado de consistencia a otro en función del contenido en humedad. (Límites de Atterberg, 2019)

Contenido de agua (humedad de un material) se define como la razón, expresada como porcentaje, de la masa del agua contenida en los poros, o agua libre, en una masa dada de material con respecto a la masa del material sólido. Se usa una temperatura estándar de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  para determinar estas masas. Un espécimen (suelo) de prueba es secado en un horno a temperatura de  $(110 \pm 5^\circ\text{C})$  hasta peso constante. La pérdida de peso durante el secado se considera como agua. El contenido de agua es calculado usando el peso de agua y el peso del espécimen seco. El contenido de humedad en un material es usado para expresar la relación de vacíos de aire, agua y sólidos presentes en un volumen dado de material. (Chinchilla, 2017)

La gravedad específica de cualquier suelo se define como el peso unitario del material en cuestión dividido por el peso unitario del agua destilada a 4°C. Así, si se consideran solamente los granos del suelo. (UNSA, 2017)

La caracterización geológica es la primera forma de caracterización, en base a esta es posible obtener mucha información muy importante para las técnicas de caracterización posteriores. El objetivo principal de la caracterización geológica es determinar las características principales de la naturaleza de los ambientes de sedimentación, estratificación y configuración estructural de los yacimientos. Esta información es la base para realizar modelos estructurales, cálculos de volumen de roca, delimitación del yacimiento, etc. (Trejo, 2019)

Un estudio geotécnico es el conjunto de actividades que permiten obtener la información geológica y geotécnica del terreno, necesaria para la redacción de un proyecto de construcción. Nos permiten definir las dimensiones y la tipología del proyecto de tal forma que las cargas soportadas por estructuras de contención o generadas por las cimentaciones y excavaciones no pongan en peligro la obra estructural o generen situaciones de inestabilidad de las propias estructuras o del terreno. Por otra parte, un estudio geotécnico de calidad permite anticipar posibles problemas de construcción relacionados o no con el agua (profundidad del nivel freático, filtraciones, erosiones internas, entre otros), determinar el volumen y la maquinaria adecuada para la obra, el tipo de materiales que han de ser excavados etc. (Estudios Geotécnicos y Control de Obras, s.f.)

La fundación es aquella parte de la estructura que tiene como función transmitir en forma adecuada las cargas de la estructura al suelo y brindar a la misma un sistema de apoyo estable. La fundación estará bien diseñada si cumple adecuadamente con su doble función, estabilidad y resistencia, controlando dos estados límites a saber, las condiciones de servicio y

las condiciones de falla por resistencia. A estas dos condiciones de falla se les llama estados límites, porque ambas determinan si una fundación sirve o no. (El constructor civil, 2011)

La planificación a mediano plazo es comúnmente aquella actividad de planificación cuyo horizonte abarca de uno a tres años, dependiendo del tamaño de la operación y/o las políticas de la empresa. Esta actividad se inserta en la planificación de largo plazo, en el contexto de lograr cumplir con la estrategia allí delineada, siendo la base de la estimación y evaluación económica de la empresa, puesto que las decisiones que se adopten para este horizonte tendrán una flexibilidad a los cambios limitada. Los objetivos de un plan de minado son: Entregar un plan que genere una alimentación al pad de lixiviación, proveer de una carga regular y balanceada a los equipos de trabajo, generar geometrías adecuadas de los sectores en producción para maximizar la eficiencia de los equipos, mantener accesos adecuados y rutas de trabajo eficientes, generar sistemas de control de producción apropiado y oportuno. (Colquehuanca, 2016)

Dentro del sistema de revestimiento encontramos la colocación de la capa impermeable (SL), en ella el terreno acondicionado es cubierto con una capa de material de baja permeabilidad llamado "Soil Liner" (SL) y se compacta para lograr esta permeabilidad. Esta capa tiene la función de ser aislante, para evitar la percolación de la solución rica, en caso de una posible rotura de la geomembrana. (Estela, 2013)

Una geomembrana es una barrera sintética que, como ya mencionamos, está diseñada especialmente para impedir el paso de sustancias y materiales, particularmente de líquidos y vapores, fuera de la barrera que crea. En la fabricación de las geomembranas se emplean polímeros termoplásticos o termoestables; los que tienen la particularidad de presentar un alto nivel de impermeabilidad ofreciendo un excelente nivel de contención; si se les compara con otros materiales. Los diferentes tipos de geomembranas que existen se pueden clasificar por su

estructura (homogéneo o reforzado); su acabado (liso o texturizado) o por su componente principal. (GEOSAI - Soluciones Ambientales, 2016)

Para la colocación de la capa de protección (PL), la geomembrana es protegida con una capa de arena gravosa limosa bien gradada. La capa de protección tiene la función de proteger la geomembrana, de los impactos del mineral que se apilará sobre ella; sirve como amortiguación a las tuberías colectoras y matrices, que son instalados sobre esta. (Estela, 2013)

Al talud lo denominamos a la superficie inclinada, con respecto a la horizontal, que adoptan permanente o provisionalmente las estructuras de tierra. Los proyectos de ingeniería (fundamentalmente obras lineales) requieren el diseño de taludes tanto en corte de terreno como en terraplén, bajo las condiciones de seguridad adecuadas. En el estudio de la estabilidad de los taludes se abordan fenómenos de estado último o de rotura de masas de suelo. El agente externo responsable de la inestabilidad es una fuerza de masa, el peso y, eventualmente, los efectos de filtración, a los cuales hay que añadir otros factores como las sobrecargas (estáticas/dinámicas). (Valiente, Sobrecargas, 2015)

El diseño de la ampliación del pad de lixiviación permitirá a la empresa continuar con su actividad minera, garantizando la estabilidad geotécnica de la pila de lixiviación, el correcto funcionamiento de las estructuras en base al diseño del Pad en base al plan de carguío de mineral, determinando el sistema de revestimiento y la configuración de la pila de mineral. La ampliación del pad evitará las posibles paradas en la producción debido a la limitada capacidad de almacenamiento del pad de lixiviación existente, estas paradas significarían considerables pérdidas para la empresa.

Esta tesis busca ser un aporte en la ingeniería, esto para poder así incrementar el tiempo de vida de una Plataforma de Lixiviación, de tal manera que este pueda permitir la continuidad de operación de la unidad minera.

## **1.2. Formulación del problema**

¿Cuál es el diseño para la ampliación de la plataforma de lixiviación en una mina tajo abierto ubicada en la región Cajamarca, 2019?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Realizar el diseño para la ampliación de una plataforma de lixiviación en una mina a tajo abierto ubicada en la región Cajamarca, 2019.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar las características Geotécnicas de una mina a tajo abierto ubicada en la región Cajamarca, 2019.
- Realizar el plan de carguío de mineral en una mina a tajo abierto ubicada en la región Cajamarca, 2019.
- Determinar el sistema de revestimiento de la plataforma de lixiviación en una mina a tajo abierto ubicada en la región Cajamarca, 2019.
- Determinar la configuración de la pila de mineral de la plataforma de lixiviación en una mina a tajo abierto ubicada en la región Cajamarca, 2019.

## **1.4. Hipótesis**

### **1.4.1. Hipótesis general**

Realizando el correcto diseño de una plataforma de lixiviación se podrá asegurar la ampliación de la misma en una mina ubicada en Cajamarca.

## **CAPÍTULO II. METODOLOGÍA**

### **2.1. Tipo de investigación**

Una investigación no experimental es una investigación sistemática en la que el investigador no tiene control sobre las variables independientes porque ya ocurrieron los hechos o porque son intrínsecamente manipulables (Ávila, 2006). Los diseños de investigación transeccional o transversal recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables, y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado (Pérez, 2010). En base a las definiciones la presente investigación es del tipo no experimental – transversal.

### **2.2. Población.**

Plataforma de lixiviación de la unidad minera.

### **2.3. Muestra**

Área de terreno para el diseño de ampliación de la plataforma de lixiviación.

### **2.4. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos**

#### **2.4.1. Técnicas de recolección de datos.**

Para el desarrollo de la investigación se tomaron en cuenta las técnicas de:

- Observación directa e indirecta.
- Investigación bibliográfica.
- Análisis de contenido.
- Internet.

#### **2.4.2. Técnicas de análisis de datos.**

Las técnicas de análisis de datos utilizadas fueron el uso de:

- Excel
- AutoCAD

- Tablas
- Gráficos.

## **2.5. Procedimiento**

### **2.5.1. Investigación de Campo**

La investigación geotécnica efectuada en el área de ampliación de la plataforma de lixiviación en pilas consistió en:

#### **a. Perforaciones Geotécnicas**

Se efectuó una perforación geotécnica vertical de 35,50 m de profundidad, ubicada en el pie de la plataforma de lixiviación proyectada y sobre depósitos de humedales.

#### **b. Calicatas**

Se efectuaron 15 calicatas con excavadoras CAT 320D.

#### **c. Ensayos de campo:**

##### **i. Ensayos de permeabilidad en perforaciones**

En la perforación se realizaron tres ensayos de permeabilidad (K). A través de los métodos de Lefranc y Lugeon.

##### **ii. Ensayos de Auscultación con penetrómetro dinámico ligero (DPL)**

Estos ensayos se realizaron de acuerdo con los procedimientos de la Norma Peruana NPT 339,159 y DIN 4094. El ensayo consiste en la penetración de una punta de acero cónica de 60° de ángulo en el terreno, debido al golpe de un martillo de 10,125 kg que es dejado caer desde una altura libre constante de 50 cm a un ritmo de 15 a 30 golpes por minuto. La resistencia a la penetración se expresa por el registro de número de golpes “N10”, necesario para que la punta penetre 10 cm. Este ensayo se realiza en forma continua hasta alcanzar rechazo en el suelo ( $N_{10} > 30$ ) en dos tramos sucesivos y se limita a materiales granulares como arena y materiales finos como limo y arcilla.

### 2.5.2. Ensayos de Laboratorio en suelos

A partir de las muestras extraídas se efectuaron los siguientes ensayos de laboratorio en suelos:

- a. Clasificación SUCS (ASTM D2487).
- b. Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422).
- c. Límites de Atterberg (ASTM D4318).
- d. Contenido de humedad (ASTM D2216).
- e. Gravedad específica (ASTM D854).
- f. Densidad y contenido de humedad (ASTM D4531-86).

### 2.5.3. Instrumentación geotécnica

#### Piezómetros

La instrumentación geotécnica con piezómetros es requerida para determinar las condiciones de flujo en la pila de mineral, debido a que es necesario monitorear constantemente las presiones de poros dentro del cuerpo de la pila. Los piezómetros han sido proyectados para detectar y/o monitorear la superficie piezométrica en el cuerpo del mineral y la capa de drenaje ubicada en la base. La instrumentación alertará sobre la ocurrencia de eventuales anomalías en el comportamiento de la pila durante su operación.

Para seleccionar la ubicación de los piezómetros fueron considerados los siguientes criterios:

- Identificar las secciones probables de falla más críticas.
- Identificar las zonas en el cuerpo de la pila donde se generan mayores presiones de poros. Se consideró la presencia de mineral con un significativo contenido de finos, el cual ha sido considerado con criterio conservador en algunas zonas de la plataforma de lixiviación.
- Monitorear el nivel de agua dentro del depósito de material estéril para controlar que se cumplan las condiciones establecidas.

Sobre la base de la información anterior, se procedió a ubicar en planta los piezómetros de cuerda vibrante, los cuales serán instalados sobre la capa de protección (PL) o en la elevación correspondiente a la primera capa de mineral de la Ampliación.

La frecuencia de monitoreo del nivel de agua en los piezómetros deberá ser semanal durante la construcción y operación. Luego, la frecuencia podrá ser quincenal y, necesariamente, se deberán registrar los niveles de agua después de la ocurrencia de eventos extremos de precipitación.

Todos estos piezómetros consisten de tuberías de PVC de 2” de diámetro, con ranuras debajo del nivel de agua y sólidas en la zona no saturada. Para su instalación y monitoreo se colocaron los respectivos materiales de filtro, sello y dados de protección.

### **Sensores de asentamiento**

Con la finalidad de monitorear los posibles asentamientos que puedan ocurrir en el depósito de material estéril debido a la carga de la Ampliación de la plataforma de lixiviación, se ubicarán dos sensores de asentamiento en los puntos donde se ha estimado mayores valores de asentamientos.

## CAPÍTULO III. RESULTADOS

### 3.1. Ubicación

El área del proyecto comprende las zonas altas del distrito de Pulán, a una altitud que varía entre los 2 800 y 3 800 metros sobre el nivel del mar (msnm) y en los límites con los distritos de Catache de la misma provincia de Santa Cruz, Tongod y Calquis de la provincia de San Miguel de Pallaques. Ver Ilustración 1.



Ilustración 1 Ubicación del Proyecto de ampliación respecto a la ciudad de Cajamarca

### 3.2. Vías de acceso

El acceso al área del proyecto se realiza por dos rutas, una a través de la carretera pavimentada Cajamarca – El Empalme y afirmada El Empalme – Proyecto, en total de aproximadamente 105 kilómetros (km) de longitud; la segunda ruta es a través de una trocha desde la costa, pasando por Chilate y luego por San Miguel para llegar finalmente al Proyecto.

Tabla 2

*Vías de Acceso.*

TRAMO	DISTANCIA (Km)	TIEMPO (Horas/min)	TIPO DE VÍA
Cajamarca – El Empalme	86 km	2 horas	Carretera pavimentada
El Empalme - Proyecto	19 km	1 hora	Carretera afirmada
Chilete – San Miguel – Proyecto.			Carretera asfaltada y trocha

### 3.3. Investigación geotécnica

#### 3.3.1. Ensayos de campo

##### Perforación

Se efectuó una perforación geotécnica vertical de 35,50 m de profundidad, ubicada en el pie de la plataforma de lixiviación proyectada y sobre depósitos de humedales. (Ver anexo A)

Tabla 3:

*Resumen de perforación geotécnica.*

Perforación	Coordenadas		Elevación (msnm)	Profundidad total (m)	Suelo (m)	Roca (m)	Nivel de agua estimado (m)	Profundidad del piezómetro de 2” (m)
	Norte (m)	Este (m)						
1	9 244 965,88	732 637,70	3 545,31	35,50	0,50	35,00	4,00	34,00

##### Calicatas

Las profundidades alcanzadas variaron entre 1,10 m y 4,80 m. Las calicatas atravesaron depósitos cuaternarios de poco espesor y el techo de la roca fue encontrado a profundidades variables entre 0,30 y 2,60 m. (Ver anexo B)

Tabla 4:

*Resumen de calicatas*

<b>Calicata N°</b>	<b>Norte (m)</b>	<b>Este (m)</b>	<b>Nivel de agua (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
1	9 245 025,11	732 714,41	1,30	3,50
2	9 244 997,73	732 656,84	N.E.	4,70
3	9 244 986,06	732 700,53	N.E.	2,55
4	9 244 962,98.	732 739,68	N.E	2,60
5	9 244 946,99	732 673,31	N.E.	4,80
6	9 244 910,64	732 636,81	1,00	1,10
7	9 244 900,22	732 789,71	N.E.	2,10
8	9 244 824,69	732 844,77	N.E.	1,10
9	9 244 734,16	732 793,53	N.E.	4,50
10	9 244 743,23	732 924,52	N.E.	4,00
11	9 244 690,62	732 843,26	N.E.	3,50
12	9 244 693,02	733 018,47	N.E.	2,90
13	9 244 642,92	732 891,71	N.E.	4,50
14	9 244 583,94	733 220,90	1,00	2,80
15	9 244 961,91	732 647,35	N.E.	1,30
			Mínimo	1,10
			Máximo	4,80
			Promedio	3.06

**Ensayos de permeabilidad en perforaciones**

El primero se realizó en toba extremadamente meteorizada a nivel de suelo residual, cuyo valor de K fue de  $2,54 \times 10^{-4}$  cm/s, correspondiente a una permeabilidad baja, y el segundo ensayo se realizó en toba muy fracturada, cuyo valor de K resultó de  $3,09 \times 10^{-3}$  cm/s, correspondiente a permeabilidad media a baja. El tercer ensayo de permeabilidad se realizó en toba silíceas y el valor de K fue de  $9,08 \times 10^{-6}$  cm/s, correspondiente a una permeabilidad muy baja y de flujo laminar - dilatación. (Ver anexo C)

Tabla 5:

*Resumen de ensayos de permeabilidad en perforaciones*

Perforación	Profundidad total (m)	Profundidad Vertical (m)	Tipo de Ensayo	Material	Permeabilidad K (cm/s)
1	35,50	1,00 a 1,70	Lefranc	Roca extremadamente meteorizada a nivel de suelo residual	$2,54 \times 10^{-4}$
		2,60 a 5,00	Lefranc	Toba muy fracturada	$3,09 \times 10^{-3}$
		31,00 a 35,50	Lugeon	Toba Silíceea	$9,08 \times 10^{-6}$

**Ensayos de Auscultación con penetrómetro dinámico ligero (DPL)**

La profundidad ejecutada de este ensayo, que permitió estimar la profundidad de basamento rocoso, fue de 0,5 m. Es decir fue un ensayo con rechazo, por la presencia de bolones o bloques. (Ver anexo D)

Tabla 6:

*Resumen de ensayo de auscultación con penetrómetro dinámico ligero (DPL)*

DPL	Coordenadas		Nº de golpes en el último tramo de ensayo	
	Norte (m)	Este (m)	Prof. (m)	Nº golpes
I	9 244 744	732 726	0,05	30

**3.3.2. Ensayos de laboratorio en suelos**

**Clasificación de suelos**

La clasificación de suelos con el sistema SUCS indica que, de las muestras ensayadas, la mayoría son suelos gruesos que corresponden a depósitos antropogénicos y suelos residuales.

Se presentan gravas mal gradadas con arcilla limosa y arena (GP-GC), grava arcillosa con arena (GC), grava limo arcillosa con arena (GC-GM), grava limosa con arena (GM) y arena limosa con grava (SM); además arcilla arenosa (CH). En el Anexo E se observa la tabla de clasificación SUCS.

### **Análisis granulométrico**

Se realizaron un total de doce análisis granulométricos, en el área de fundación de la plataforma de lixiviación y su distribución varía en la siguiente proporción: grava de 7,1% a 83,70%, arena de 11,2% a 49,1%, limo de 14,4% a 32,1%, arcilla de 0,1% a 4,3% y limo/arcilla de 5,1% a 74,7%.

En el caso del mineral, de acuerdo a los análisis granulométricos a gran escala, el porcentaje de finos varía entre 2,9 y 14,6%, la arena varía entre 10,8 y 19,4%; la grava entre 50.6 y 59,9% y el resto del material hasta 12” es variable entre 15,4 y 34,6%. Estos resultados califican al material de la pila de mineral como predominantemente grueso. (Ver anexo F)

Tabla 7

*Resumen de resultados de los análisis granulométrico.*

	<b>Grava</b>	<b>Arena</b>	<b>Limo</b>	<b>Arcilla</b>	<b>Limo/Arcilla</b>
En la fundación					
de la plataforma	7,1% a 83,70%	11,2% a 49,1%,	14,4% - 32,1%	0,1% - 4,3%	5,1% a 74,7%.
de lixiviación					
En el mineral.	50.6 a 59,9%	10,8 a 19,4%;		2,9 a 14,6%,	

### **Límites de Atterberg**

Con la finalidad de evaluar sus características de consistencia, se realizaron doce ensayos de límites de Atterberg en suelos finos. Los resultados de laboratorio indican que, las

muestras ensayadas presentan un límite líquido que se encuentra entre 16,0 y 63,0%, límite de plasticidad entre 11,0 y 30,0%, y un índice de plasticidad de 5,0 a 39,0%. (Ver anexo F)

### **Contenido de Humedad**

Se efectuaron diez ensayos de contenido de humedad, los resultados indican valores variables entre 5,2% y 53,6%. Para el caso del material de la pila de lixiviación el contenido de humedad varía entre 7,1 y 7,6%. (Ver anexo G)

### **Gravedad específica**

Se ejecutaron seis ensayos de gravedad específica.

Los valores de gravedad específica son variables entre 2,71 a 2,84. La gravedad específica para el material de relleno es 2,77, y para el material estéril es de 2,76 a 2,78. Para el caso del material de la pila de mineral lixiviado, la gravedad específica es de 2,81. (Ver anexo H)

### **Densidad y contenido de humedad**

Como parte de las investigaciones geotécnicas, se realizaron doce ensayos de densidad y contenido de humedad en bloques de muestras inalteradas, de acuerdo a ello se obtuvieron densidades con valores entre 1,67 y 2,29 g/cm<sup>3</sup> y humedades entre 7,82 a 28,7%. (Ver anexo D)

Tabla 8

Resumen de ensayos en laboratorio en suelos

N° Perforaciones N° Calicatas	Origen de Material	Profundidad de Muestra (m)	Clasificación SUCS <sup>(1)</sup>	Descripción del suelo	Análisis Granulométrico					Límites Atterberg			Contenido de Humedad Natural (%)	Gravedad Específica (agregado fino) (g/cm³)	Densidad natural y contenido de humedad			
					% > 3"	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/Arcilla (%)	LL (2)	LP (3)			IP (4)	Densidad natural (g/cm³)	Contenido de humedad (%)	Densidad Seca (g/cm³)
PERFORACION N	Toba argilizada	0,50 - 0,95	GC	Grava arcillosa con arena		43.90	32.60			23.50	32	16	16					
CALICATA 1	Material Estéril / Inadecuado	0,00 - 0,40	CH	Arcilla gravosa		16.60	14.50			68.90	61	26	35	18.70				
	Material Estéril / Inadecuado	0,40 - 4,40	GC	Grava arcillosa con arena		48.70	15.70			35.60	47	26	21	17.20				
CALICATA 2	Material Estéril / Inadecuado	0,00 - 4,30	GP-GC	Grava pobremente gradada con arcilla limosa		74.40	15.00			10.60	16	11	5	5.80				
CALICATA 3	Material Estéril / Inadecuado	0,90 - 2,10	GC	Grava arcillosa con arena		32.00	20.70			47.30	44	22	22	14.90	2.77	2.22	11.59	1.99
	Material Estéril / Inadecuado	2,10 - 5,20	CL	Arcilla gravosa con arena		30.90	16.20			52.90	49	24	25	22.00				
CALICATA 4	Material Estéril / Inadecuado	0,00 - 4,00	CL	Arcilla arenosa con grava										17.00				
CALICATA 5	Suelo Residual	0,50 - 3,50	CL-ML	Arcilla limosa con arena		7.10	19.60			73.30	27	20	7	45.20		2.05	19.72	1.72
	Suelo Residual	0,50 - 3,50	CL-ML	Arcilla limosa con arena												2.05	22.54	1.67
CALICATA 6	Suelo Residual	0,50-3,50	GC-GM	Grava limo arcillosa con arena		31.00	19.80			49.20	18	13	5	14.70				
	Suelo Residual					11.20	31.90			56.90	59	20	39	27.00	2.71			
	Suelo Residual	3,50-4,70	CH	Arcilla arenosa												2.22	11.48	1.99
	Suelo Residual															1.95	28.7	1.52
CALICATA 7	Suelo Residual	0,80 - 1,60	CH	Arcilla con grava		13.10	12.20			74.70	63	27	36	38.40				
	Suelo Residual	0,80 - 1,60	CH	Arcilla con grava										36.90				
CALICATA 8	Material de Relleno	0,15-2,60	GP-GC	Grava mal gradada con		83.70	11.20			5.10	17	11	6	5.20				

				arcilla limosa												
	Suelo Residual	0,50-4,80			12.20	39.10		48.70	52	26	26					
CALICATA 9	Suelo Residual	0,50-4,80	SC	Arena arcillosa								27.40	2.03	25.61	1.61	
	Suelo Residual	0,50-4,80										24.40	2.01	26.15	1.59	
CALICATA 10	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,70-1,10	GC	Grava arcillosa con arena	54.00	25.60		20.40	28	17	11					
	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,70-1,10										9.20	2.22	8.58	2.04	
CALICATA 11	Material de Relleno	0,00-0,50	GM	Grava limosa con arena	44.20	32.10		23.70	50	29	21	17.10	2.77			
	Material de Relleno	0,00-0,50											2.33	9.46	2.13	
CALICATA 12	-	2,10-2,60	SM	Arena limosa con grava	18.70	49.10	32.10	0.10		49	30	19	53.60	2.84		
	-	2,60-4,50	SC	Arena arcillosa con grava	16.90	35.20			47.90	50	20	30	24.80	2.71		
CALICATA 13	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,30-4,00	SM	Arena limosa con grava	34.50	46.80	14.40	4.30		52	29	23				
	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,30-4,00										20.30				
	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,30-4,00											2.74	1.91	25.44	1.52
	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,30-4,00											1.89	28.08	1.48	
CALICATA 14	Material Estéril	1,50-4,50	GP-GC	Grava mal gradada con arcilla limosa y arena	69.90	22.00		8.10	19	12	7		2.76			
	Material Estéril	1,50-4,50										6.70				
CALICATA 15	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,30-1,20	GP-GC	Grava mal gradada con arcilla y arena	73.40	17.90		8.70	31	18	13					
	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,30-1,20										12.10				
	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,30-1,20											2.29	8.05	2.12	
	Toba alta a moderadamente meteorizada, muy fracturada	0,30-1,20											2.29	7.82	2.13	

N° de Resultados	0	19	19	2	2	17	19	19	19	21	7	13	13	13
<b>Promedio</b>	0. 0	37.71	25.12	23.25	2.20	38.56	40.2 1	20.8 9	19.3 2	21.84	2.76	2.11	17.94	1.81
<b>Mínimo</b>	0. 0	7.10	11.20	14.40	0.10	5.10	16.0 0	11.0 0	5.00	5.20	2.71	1.89	7.82	1.48
<b>Máximo</b>	0. 0	83.70	49.10	32.10	4.30	74.70	63.0 0	30.0 0	39.0 0	53.60	2.84	2.33	28.70	2.13

### **3.3.3. Instrumentación geotécnica**

#### **Piezómetros**

La instrumentación geotécnica con piezómetros es requerida para determinar las condiciones de flujo en la pila de mineral, debido a que es necesario monitorear constantemente las presiones de poros dentro del cuerpo de la pila. Los piezómetros han sido proyectados para detectar y/o monitorear la superficie piezométrica en el cuerpo del mineral y la capa de drenaje ubicada en la base. La instrumentación alertará sobre la ocurrencia de eventuales anomalías en el comportamiento de la pila durante su operación.

Para seleccionar la ubicación de los piezómetros fueron considerados los siguientes criterios:

- Identificar las secciones probables de falla más críticas, obtenidas de los análisis de estabilidad de taludes.
- Identificar las zonas en el cuerpo de la pila donde se generan mayores presiones de poros. Se consideró la presencia de mineral con un significativo contenido de finos, el cual ha sido considerado con criterio conservador en algunas zonas de la plataforma de lixiviación.
- Monitorear el nivel de agua dentro del depósito de material estéril para controlar que se cumplan las condiciones establecidas en los análisis de estabilidad de taludes.

Sobre la base de la información anterior, se procedió a ubicar en planta los piezómetros de cuerda vibrante, los cuales serán instalados sobre la capa de protección (PL) o en la elevación correspondiente a la primera capa de mineral de la Ampliación.

La frecuencia de monitoreo del nivel de agua en los piezómetros deberá ser semanal durante la construcción y operación de la Ampliación de la plataforma de lixiviación. Luego, la frecuencia podrá ser quincenal y, necesariamente, se deberán registrar los niveles de agua después de la ocurrencia de eventos extremos de precipitación.

## Instalación de piezómetros.

De la información obtenida en el piezómetro, se deduce que, en el basamento rocoso el nivel de agua se encuentra en la elevación 3 541,42 msnm. En el Anexo J se muestra el esquema de la instalación de Piezómetros.

Tabla 9

### *Resumen de detalle de instalación de los piezómetros de tubo abierto*

Coordenadas		Elevación	Prof. de	Prof. de	Espesor	Longitud	Longitud	Profundidad	Profundidad	Sobrante	Nivel
		(msnm)	Perforación	Piezómetro	cama	de tubería	de	nivel	nivel	de	de
			(m)	(m)	de filtro	Ranurada	tubería	superior	superior	tubería de	agua
Norte (m)	Este (m)				(m)	(m)	sólida	de filtro (m)	de sello (m)	piezómetro	(m)
							(m)			(m)	
9 244 965,88	732 637,70	545,31	35,50	34,00	1,50	30,00	4,00	3,00	2,00	1,10	4,00
9 244 749,22	732 745,16	595,12	61,40	60,40	0,50	21,00	39,40	25,00	19,00	0,80	45,80
9 244 734,34	732 693,56	596,09	62,30	61,30	0,50	21,00	40,30	10,00	6,00	0,80	44,75
9 214 686,22	732 758,66	612,97	82,50	80,00	0,50	12,00	69,50	68,00	65,00	0,60	49,12

## Sensores de asentamiento

Con la finalidad de monitorear los posibles asentamientos que puedan ocurrir en el depósito de material estéril debido a la carga de la Ampliación de la plataforma de lixiviación, se ubicarán dos sensores de asentamiento en los puntos donde se ha estimado mayores valores de asentamientos.

### 3.4. Caracterización Geológica

#### 3.4.1. Geología local – estratigrafía

En el área de la Plataforma de Lixiviación en Pilas, afloran rocas volcánicas piroclásticas de la formación Llama del Terciario Inferior. En áreas adyacentes se encuentran rocas volcánicas de las formaciones Porculla del Terciario Medio y Huambo del Terciario Superior.

## **Volcánico Llama (Ti-VII)**

Esta formación de la edad Terciaria, consiste principalmente de una secuencia gruesa de tobas piroclásticas de naturaleza andesítica, con alteración hidrotermal de tipo argílico o silíceo. Por sus características geológicas-geotécnicas superficiales, es dividida en dos subunidades.

### **Toba argilizada**

Con esta denominación se diferencia a las tobas con alteración hidrotermal de tipo argílico; afloramientos dispersos se ubican hacia el sector noroeste, así como constituyen el basamento rocoso del área de la plataforma de lixiviación en pilas. La toba argilizada es de color gris claro, con manchas anaranjadas a amarillas, de extremadamente a ligeramente meteorizada, resistencia extremadamente baja a alta (0,25 - 60 MPa), muy fracturada a ligeramente fracturada, con pirita fina diseminada. Esta unidad, por la presencia de pirita, posiblemente sea generador de drenaje ácido, y superficialmente en algunos sectores, se presenta cubierto por topsoil con espesores determinados por la excavación de calicatas variables entre 0,15 a 0,8 m.

### **Toba silicificada**

Este tipo de toba con halos de silicificación, de acuerdo a la perforación realizada, se emplaza debajo de las tobas argilizadas. La toba silicificada es de grano grueso a medio; de color gris claro; moderada a ligeramente meteorizada, resistencia media alta (40-65 MPa), ligeramente fracturada.

### **Depósitos Antropogénicos**

Corresponde al material acumulado, resultado de la actividad productiva de la mina, y está representada por material de relleno (depósito de material estéril y plataforma de lixiviación) y áreas revegetadas

### **Material de relleno (Q-a1)**

Corresponde al material presente en el depósito de material estéril y plataforma de lixiviación, identificado en casi toda el área de la plataforma de lixiviación en pilas.

El depósito de material estéril está constituido principalmente de material grueso con sobretamaño. Consiste de grava y arena con finos, bolones y bloques, de plasticidad nula a alta, suelta a medianamente densa, seca a saturada, color variable marrón, rojo oscuro, anaranjado y gris. El material fino consiste de limos y arcillas de plasticidad baja a alta, firme a rígida, húmedo, de color marrón a anaranjado. Siendo posible encontrar encapsulados lentes de suelo orgánico y material inadecuado.

La plataforma de lixiviación, consiste, de un apilamiento de mineral en bancos conformado por materiales granulares gruesos (grava y arena con sobretamaño y finos), suelto a medianamente denso, muy permeable, plasticidad media, firme, húmeda, marrón.

### **Áreas revegetadas o remediadas (Q-a3)**

Superficies remediadas y aisladas se ubican hacia el sector noroeste de la plataforma de lixiviación en pilas. Consiste de grava pobremente gradada con limo y arcilla, plasticidad baja, medianamente densa, húmeda, colores marrón claro a anaranjado, cubierta de suelo orgánico.

### **Depósitos cuaternarios**

En el área de la plataforma de lixiviación en pilas, los depósitos Cuaternarios se distribuyen superficialmente en forma dispersa, con espesores variables entre 0,20 hasta más de 4,0 m, cubiertos por suelo orgánico con espesor variable entre 0,15 a 1,50 m. Los materiales encontrados corresponden a humedales, depósitos coluviodeluviales y suelos residuales. En las siguientes secciones se describen los depósitos cuaternarios encontrados.

Suelo orgánico (Topsoil o TS) Cubriendo a los depósitos cuaternarios se encuentra limo orgánico, de plasticidad baja, blanda a firme, húmedo, negro, con presencia de raíces.

### **Humedales (Q-hu)**

Este tipo de depósito se encuentra en las depresiones, y se ubica hacia el sector noroeste, fuera del área de la estructura proyectada. Consiste de vegetación y material orgánico con limo y/o arcilla, plasticidad baja a media, blanda, húmedo, color negro. En algunos sectores sobreyace a suelo residual.

### **Depósito coluviales-deluviales (Q-co/de)**

Este tipo de depósito se aprecia hacia el sector sureste, fuera del área de la estructura proyectada. Consiste de arcilla arenosa, limo arenoso con grava, limo elástico, arenas limosas con grava, gravas arcillosas, gravas limosas con arena; para el caso de materiales finos poseen plasticidad baja a alta y consistencia firme a blanda; para el caso de material granular la compacidad que presentan varía ente medianamente denso a suelta, húmeda, con alternancia de colores que varían entre marrón, beige y anaranjado.

### **Suelos residuales (Q-sr)**

Este tipo de material identificado en las calicatas y perforaciones, corresponde al basamento rocoso extremadamente meteorizado. Se ubican inmediatamente debajo de los depósitos anteriormente descritos y sobreyacen al basamento rocoso. Consisten en limo de plasticidad baja con arena, arena arcillosa, arcilla arenosa, grava arcillosa con arena y grava limo arcillosa con arena; para el caso de materiales finos poseen plasticidad baja a alta y consistencia firme a rígida; material granular cuya compacidad varía de medianamente densa a muy densa (en contacto con basamento rocoso), húmeda a saturada, de color marrón o gris.

### **3.5. Caracterización geotécnica**

En esta caracterización geotécnica se definieron 7 unidades geotécnicas, estas se encuentran dentro de la influencia de la zona en estudio, cuya descripción se detalla a continuación.

### **3.5.1. Unidad geotécnica I (UG-I)- Mineral lixiviado/Depósito antropogénico**

Esta unidad corresponde al mineral existente almacenado en la pila de lixiviación ya existente. Los materiales corresponden a grava pobremente gradada con limo, arcilla y arena (GP-GC), grava arcillosa limosa con arena (GC-GM), plasticidad baja a nula, suelta a medianamente densa, húmeda a muy húmeda, marrón y gris. Presenta gravas de  $T_{\text{máx}}= 3''$ , bolones de  $T_{\text{máx}}= 12''$  y Bloques de  $T_{\text{máx}}=30''$ .

### **3.5.2. Unidad geotécnica II (UG-II) – Material inadecuado I**

Esta unidad corresponde al material inadecuado depositado en los bancos superiores del depósito de material estéril entre las elevaciones de 3 570 a 3 620 msnm. La UG-II consiste de material granular que clasifica en el sistema SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) como grava limosa con arena (GM), grava arcillosa con arena (GC) y material fino, en menor proporción, que clasifica como arcilla gravosa con arena (CL) y limo gravoso con arena (ML), de plasticidad baja a media.

Estos materiales se presentan de compacidad suelta a densa en los materiales granulares y consistencia firme a rígida en el caso de los materiales finos. Según los ensayos de granulometría realizados en estos materiales, la distribución granulométrica indica la presencia de grava variable entre 16,6% y 74,4%, arena entre 14,5% y 35,0% y finos entre 10,60% y 68,9%. El material se presenta húmedo, y en algunos sectores se encuentra contaminado con material orgánico y raíces presentando un grado mayor de humedad; en su conjunto se presentan de color marrón claro y anaranjado.

En su conjunto predominan gravas de tamaño máximo 2'' a 3'', bolones de tamaño máximo de 8'' a 12'' entre 5% y 35%, y bloques de tamaño máximo de 14'' a 30'' entre 5% y 20%. El espesor de esta unidad varía entre 1 y 20 m.

### **3.5.3. Unidad geotécnica III (UG-III) – Material estéril**

La UG-III se ubica alrededor del material inadecuado y en algunas zonas en alternancia con dicho material. La UG-III según la clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), consiste de grava limosa (GM), grava limo arcillosa con arena (GM-GC), grava bien gradada con arena (GW), grava arcillosa (GC), arena arcillosa con grava (SC), arena limosa con grava (SM), de plasticidad nula a media, compacidad media a densa, húmeda, marrón claro y oscuro, gris. La distribución granulométrica consiste de gravas variable entre 58,3% y 71,9%, arenas entre 23,6% y 29,6% y finos entre 4,5% y 12,1%.

En su conjunto predominan gravas de tamaño máximo 2” a 3”, bolones de tamaño máximo de 3 ½” a 12” y bloques de tamaño máximo de 14”.

### **3.5.4. Unidad geotécnica IV (UG-IV) – Material inadecuado II**

Dentro del depósito de material estéril se encuentran encapsulados dos depósitos de material inadecuado: el depósito de material inadecuado oeste y el depósito de material inadecuado oeste N° 2. La UG-IV corresponde al material inadecuado que conforma dichos depósitos.

El depósito de material inadecuado oeste se encuentra encapsulado debajo de la UG-II en la zona noreste del depósito de material estéril y el depósito de material inadecuado oeste 2 se encuentra debajo de la UG-III en la zona suroeste del mismo.

La UG-IV consiste en una mezcla de suelos de grano fino y grueso. Los materiales de grano grueso hallados son: grava arcillosa y grava limosa con arena (GC y GM), arena limosa y arena arcillosa con grava (SM y SC), de plasticidad nula a media, medianamente densa a densa, húmeda. Asimismo, los materiales de grano fino encontrados son limo con grava (ML) y arcilla con arena (CH y CL), de plasticidad baja a alta, firme a duro, húmedo. Según los ensayos de granulometría realizados en estos materiales, la distribución de tamaños de las partículas indica la presencia de gravas variable entre 9,6% y 53,5%, de arenas entre 14,4% y

42,9% y de finos entre 19,5% y 73,1%. Los suelos que conforman esta unidad se presentan de color marrón, marrón claro y oscuro, anaranjado. Además, presenta lentes de limo orgánico con arena, húmedo y negro. Se aprecia la presencia de gravas principalmente de tamaño máximo de 1” a 3” y bolones de tamaño máximo de 3 1/2” a 11”.

### **3.5.5. Unidad geotécnica VII (UG-VII) – Revestimiento de suelo (soil liner, SL)**

Esta unidad representa el revestimiento de suelo conformado en la zona oeste de la fundación del depósito de material estéril. El material que conforma la UG-VII clasifica como limo gravoso o arenoso (ML), limo elástico arenoso (MH) y arcilla arenosa (CH), plasticidad alta, muy rígido a duro, húmedo.

Según los ensayos de granulometría realizados en estos materiales, la distribución de tamaños de las partículas indica la presencia de gravas variables entre 0% y 30%, arenas entre 2,7% y 56,8% y finos entre 28,8% y 96,2%. El espesor de esta unidad es 0,3 m.

Esta unidad también representa el revestimiento de suelo que se encuentra en la base de ampliación de la plataforma lixiviación.

### **3.5.6. Unidad geotécnica VIII (UG-VIII) – Suelo residual/roca alta a extremadamente meteorizada.**

Esta unidad representa el suelo de fundación del depósito de material estéril. Consiste de toba y andesita extremadamente meteorizada, resistencia extremadamente baja (0,25 – 1 MPa), ligera a extremadamente fracturada, cuyos valores de RQD son muy malos y varían entre 0% y 26%, mientras que los valores de RMR varían entre 30 y 41. Debido al grado de meteorización y fracturamiento de la roca, esta se presenta a su vez como suelo residual.

Como suelo residual clasifica en el sistema SUCS como grava limosa con arena (GM), arena arcillosa con grava (SC), arcilla con arena (CL) y limo elástico con arena (MH), plasticidad nula a alta. Los suelos gruesos tienen compacidad medianamente densa a muy densa

y los suelos finos presentan consistencia dura, en su conjunto se encuentran húmedos. Según los ensayos de granulometría, la distribución de tamaños de las partículas consiste de gravas variables entre 0% y 34,7%, arenas entre 23,5% y 42,0% y finos variables entre 24,9% y 76,0%.

### **3.5.7. Unidad geotécnica IX (UG-IX)- Basamento rocoso**

La unidad geotécnica IX comprende al basamento rocoso que consiste de toba y andesita moderada a altamente meteorizada, resistencia media, moderadamente a muy fracturada. Los valores de RQD varían entre 0 y 93%, mientras que los valores de RMR varían entre 35 y 61.

En el plano N° 001 y 002 se muestran los ensayos realizados para la respectiva caracterización geotecnia en secciones A y B.

### **3.6. Plan de carguío.**

El diseño de la Ampliación ha sido desarrollado sobre la base del plan de minado mensual del año 2018 (ver la Tabla 9), a partir del cual fue elaborado el plan de carguío de la Ampliación de la plataforma de lixiviación, el cual es presentado en la Tabla 10.

Finalmente, la ampliación de la plataforma de lixiviación tendrá una Ampliación de 2,7 ha y tiene una capacidad total de 1,64 millones de toneladas (para una densidad de 1,82 t/m<sup>3</sup>). La altura máxima de la pila será de 108 m, si son consideradas todas las etapas.

El plan de carguío ha permitido estimar las fechas en que debe estar disponible la Ampliación a fin de cumplir con el ciclo de lixiviación del mineral. La finalización de la construcción de la Ampliación debe ocurrir en junio del año 2019. El plano 005 muestra el plan de carguío de mineral.

Para transportar el mineral desde el tajo hasta la plataforma de lixiviación, se utilizará el camino existente proveniente del tajo hacia la Etapa existente, el cual ingresará por la parte noroeste de la Ampliación a la elevación de 3 623,0 m. El camino tendrá una longitud aproximada de 233,0 m, La configuración del camino de acarreo al igual que las secciones típicas y detalles se muestra en los Planos 006 y 007.

Tabla 10

Plan de Minado mensual.

PERIODO	MINERAL	WASTE	TOTAL
ENE	709 191	40 809	750 000
FEB	770 687	76 367	847 054
MAR	796 648	219 352	1 016 000
ABR	740 000	168 000	908 000
MAY	796 648	219 352	1 016 000
JUN	740 000	168 000	908 000
JUL	797 612	218 388	1 016 000
AGO	771 988	208 012	980 000
SEP	784 147	231 853	1 016 000
OCT	742 124	172 784	914 908
NOV	602 147	90 322	692 469
DIC	602 147	90 322	692 469
TOTAL	8 853 340	1 903 559	10 756 899



Septiembre 2018	770 790			52,160	52,800	23,0	16	m m	23,0	16	m	0,0	16	m
24,9 días	639 756	25 693	C7/E2a	52,800	52,931	59,1	16		4,7	16	m	54,4	16	m
5,1 días	131 034	25 693	C8/E2a											
Octubre 2018	796 483													
31,0 días	796 483	25,693	C8/E2a	52.931	53.728	54.4	16	m	28.6	16	m	25.8	16	m
Noviembre 2018	719 404													
28,0 días	719 404	25,693	C8/E2a	53.728	54.447	25.8	16	m	25.8	16	m	0.0	16	m
Toneladas colocadas en el año 2018 (hasta noviembre):													8,555,769	
Tasa promedio de carga por día (tpd)													25,693	
Toneladas colocadas hasta noviembre del año 2018 en la Plataforma de Lixiviación - hasta la etapa previa a la ampliación:													54 447 121	
Toneladas colocadas en el año 2018 (de Noviembre a Diciembre) en otra etapa:													817,303	
Tasa promedio de carga por día (tpd)													24,767	
Toneladas colocadas en el año 2019 (de Enero a Junio) en otra etapa:													4,313,907	
Tasa promedio de carga por día (tpd)													25,183	
Toneladas colocadas hasta el 20 de junio del año 2019 en la Plataforma de Lixiviación - hasta la Etapa previa a la Ampliación:													59,578,332	
Ampliación de la Plataforma de Lixiviación en Pilas														
Junio 2019	239 267													
9,7	239 267	24,667	C1/Ext. PAD1A	59.578	59.818	11.3	16	m	8.2	16	m	3.1	16	m
Julio 2019	797 612	25 729	C1/Ext. PAD1A	59,818	59,908	3,1	16	m	3,1	16	m	0,0	16	m
3,5	90 053	25 729	C2/Ext. PAD1A	59,908	60,171	24,2	6	m	24,2	6	m	0,0	6	m
10,3	263 727	25 729	C3/Ext. PAD1A	60,171	60,588	22,9	10	m	22,9	10	m	0,0	10	m
16,2	416 817	25 729	C4/Ext. PAD1A	60,588	60,615	16,6	16	m	0,9	16	m	15,7	16	m
1,1	27 016													
Agosto 2019	598 876	24 903	C4/Ext. PAD1A	60,615	61,073	15,7	16	m m	15,7	16	m	0,0	16	m
18,4 días	458 212	24 903	C5/Ext. PAD1A	61,073	61,214	9,6	8		9,7	8	m	0,0	8	m
5,6 días	140 664													
Toneladas colocadas en el año Y (de Junio a Agosto) en la Ampliación de la Plataforma de Lixiviación en Pilas:													1,635,755	
Tasa promedio de carga por día (tpd)													25,263	
Toneladas colocadas hasta Agosto del año Y en la Plataforma de Lixiviación en Pilas - hasta la Ampliación:													61,214,086	

### **3.7. Sistema de revestimiento.**

El sistema de revestimiento de la plataforma de lixiviación consistirá de una capa de suelo de baja permeabilidad de 300 mm de espesor (después de compactado), denominada revestimiento de suelo o Soil Liner (SL), sobre la cual se colocará una geomembrana de 1,5 mm de espesor (60 mil, o milésimas de pulgada), que a la vez será cubierta por una capa de 300 mm de espesor (después de la compactación), denominada capa de protección o Protective Layer (PL), que consiste de un suelo de grano fino.

Se sugiere una capa de revestimiento de suelo con una permeabilidad máxima de  $1 \times 10^{-6}$  cm/s cubierta por una geomembrana con una permeabilidad máxima de  $1 \times 10^{-11}$  cm/s.

El Plano 008 muestra la distribución de la geomembrana para la Ampliación y los Planos 009 y 010 muestran las secciones y detalles típicos de la plataforma de lixiviación en pilas

#### **3.7.1. Superficie de fundación**

La superficie de fundación es aquella superficie competente sobre la cual se puede construir la plataforma de lixiviación, para ello se tendrá que eliminar la botonería y material inadecuado existente que pudiera encontrarse como parte del material del depósito de material estéril (DME). Esta superficie ha sido determinada en función a los datos de la investigación geotécnica y el mapeo superficial realizado, habiéndose identificado que la fundación es adecuada en toda el área destinada a la ampliación, compuesta por cortes realizados en el material estéril almacenado en el depósito (sector este). A partir de la superficie de fundación fue definida la configuración de la plataforma, es decir, fueron propuestas las áreas de corte y relleno para alcanzar los niveles de la base de la plataforma.

El cuerpo del depósito de Material Estéril contiene material granular que clasifica en el sistema SUCS como grava limosa con arena (GM), grava arcillosa con arena (GC) y material fino que clasifica como arcilla gravosa con arena (CL) y limo gravoso con arena

(ML), de plasticidad baja a media. Estos materiales presentan de compacidad suelta a densa en los materiales granulares y consistencia firme a rígida en el caso de los materiales finos. Según los ensayos de granulometría realizados en estos materiales, la distribución de tamaños de las partículas indica la presencia de gravas variable entre 16,6% y 74,4%, arenas entre 14,5% y 35,0% y finos entre 10,60% y 68,9%.

Asimismo, para mitigar los posibles asentamientos diferenciales en la plataforma de lixiviación, las zonas de corte del DME deberán ser compactadas a fin de que cumpla con las propiedades mínimas de una fundación competente. Adicionalmente en estas zonas se colocarán 3 capas de 30 cm de espesor de relleno común compactadas de acuerdo a las especificaciones técnicas con la finalidad de obtener una mejor distribución de los esfuerzos en toda el área de la plataforma.

### **3.7.2. Superficie nivelada (grading)**

La superficie nivelada es aquella sobre la cual se colocará el sistema de revestimiento de la plataforma de lixiviación, la cual es conformada mediante trabajos de corte y relleno a partir de la superficie de fundación. La superficie de nivelación ha sido diseñada para contar con una pendiente máxima de 3H:1V (a excepción de zonas puntuales especificadas en los planos con pendientes máximas de 2H:1V) y una pendiente mínima de aproximadamente 3% en las zonas más bajas; la pendiente mínima ha sido establecida en 3% para asegurar que la solución drenará por gravedad hacia la tubería principal de salida. La plataforma de lixiviación será nivelada tal como se indica en los planos y, en la medida de lo posible, de forma que se aproxime al terreno de fundación conformando rutas de drenaje donde se colocarán las tuberías principales de colección de solución.

La superficie nivelada ha sido configurada con el objetivo de favorecer la estabilidad de la pila de mineral y optimizar los volúmenes de movimiento de tierras, para ello se ha planteado la construcción de una berma de estabilidad colindante a la etapa existente, de

aproximadamente 5,0 m de altura y 115,0 m de longitud con taludes de 1,5H:1V. En general, durante los trabajos de construcción será posible realizar cambios en la superficie nivelada, con respecto a la propuesta en el diseño, lo cual sólo se realizará con la aprobación del ingeniero responsable del diseño, debido a que será necesario confirmar que los cambios no ponen en riesgo la estabilidad de la estructura. El Plano 003 muestra la superficie nivelada propuesta para la Ampliación y la berma de estabilidad.

Con la finalidad de identificar con facilidad las zonas de corte y relleno para la nivelación de la base de la ampliación de la plataforma de lixiviación, ha sido provisto el Plano 004, el cual presenta las áreas de corte y relleno para diferentes profundidades. Claramente puede identificarse que el mayor corte ocurrirá en la zona superior de la ampliación, mientras que los rellenos más profundos están en la zona inferior de la ampliación.

### **3.7.3. Revestimiento de suelo**

El revestimiento de suelo (también llamado Soil Liner o SL) representa el sistema de revestimiento secundario colocado debajo de la geomembrana. Este material estará compuesto por suelos de baja permeabilidad (grava, arena, limo y arcilla) y será colocado con un espesor mínimo de 300 mm (después de la compactación). Los requerimientos más importantes de este material son que presente una permeabilidad máxima de  $1 \times 10^{-6}$  cm/s y que su superficie no dañe a la geomembrana que será colocada sobre éste. Por otro lado, debe presentar cierta rugosidad para brindar resistencia ante el deslizamiento de la geomembrana.

El revestimiento de suelo será importado de la cantera, el cual será acondicionado a una humedad cercana a la óptima y compactado. Respecto de las características de fricción entre la geomembrana y el revestimiento de suelo, los análisis de ingeniería desarrollados

indican la necesidad de implementar una capa de arena para incrementar la fricción con la geomembrana, el Plano 003 muestra el área donde debe ser colocada la arena friccionante.

#### **3.7.4. Geomembrana**

La geomembrana es el sistema de revestimiento primario y deberá tener una permeabilidad máxima de  $1 \times 10^{-11}$  cm/s. El espesor será de 1,5 mm (60 mil) con lo cual es posible garantizar la integridad de la geomembrana para alturas de pila de mineral de hasta 120 m. Ha sido elegida una geomembrana de polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) ya que este material es más flexible y permite mayores deformaciones (elongación); la geomembrana será texturada por un solo lado (con la cara texturada adyacente al revestimiento de suelo) para mejorar la resistencia al corte en la interfase entre la geomembrana y el revestimiento de suelo.

La geomembrana LLDPE será utilizada en todas aquellas zonas que quedarán cubiertas por el mineral, por lo cual en el perímetro de la plataforma, donde la geomembrana quedará permanentemente expuesta, se utilizará una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1,5 mm (60 mil) debido a que este material puede resistir los rayos ultravioleta; esta geomembrana será texturada por un lado y será colocada con la cara texturada hacia arriba, para facilitar el tránsito de personal sobre ésta. La distribución en planta de las geomembranas es mostrada en el Plano 008.

#### **3.7.5. Capa de protección**

La capa de protección (también llamada Protective Layer o PL) será colocada sobre toda la superficie de la geomembrana para evitar el contacto directo del mineral con la geomembrana. Esta capa es esencial para la protección de la geomembrana durante la colocación de la capa de drenaje y durante el carguío de la primera capa de mineral sobre la plataforma de lixiviación.

La capa de protección tendrá un espesor mínimo de 300 mm, después de compactada, y el material consistirá de una arena gravosa limosa bien gradada que, en general, se obtendrá de operaciones de chancado y/o zarandeo. El material de esta capa tendrá un tamaño máximo de partícula de 37,5 mm y contendrá finos entre 10% y 50%. El material de la capa de protección se colocará de manera que se minimice el riesgo de daño a la geomembrana subyacente y deberá ser colocada en dirección pendiente arriba.

El material utilizado para capa de protección será importado del tajo, el cual será acondicionado a una humedad cercana a la óptima y compactado de acuerdo a los requerimientos de las Especificaciones Técnicas.

### **3.7.6. Sistema de colección de solución**

Sobre la capa de protección se colocará el sistema de colección de solución que permitirá captar y conducir la solución lixiviada hacia fuera de la plataforma para su procesamiento. El sistema consiste en una red de tuberías colectoras perforadas que facilitarán el drenaje de la solución lixiviada y la infiltración del agua de lluvias que percola a través de la pila de mineral. Estos colectores se conectan a tuberías principales de solución que derivan la solución hacia una tubería de salida, la que bordeará la pila de mineral existente y se conectará a la tubería de salida instalada anteriormente, el cual permite distribuir la solución ya sea hacia la poza de operaciones o a la poza intermedia.

Las tuberías del sistema de colección de solución son corrugadas (CPT) de polietileno, perforadas y de pared interior lisa, de 4” de diámetro espaciadas 10 m entre ellas; este espaciamiento ha sido seleccionado para minimizar la carga hidráulica en el sistema de revestimiento y ha sido diseñado sobre la base de los resultados de los análisis de espaciamientos de tuberías, considerando que la permeabilidad de la capa de drenaje es de aproximadamente  $0,5 \times 10^{-2}$  cm/s.

El sistema de colección de solución ha sido diseñado para minimizar la carga hidráulica sobre el sistema de revestimiento de la plataforma de lixiviación, facilitando la captura de la solución lixiviada y acelerando su transporte hacia las pozas. El sistema de tuberías de colección de solución de la Ampliación es mostrado en los planos de diseño.

### **3.7.7. Capa de drenaje**

Sobre las tuberías de solución se colocará una capa de drenaje (también llamada Drainage Layer o DL). Este material cumple tres funciones: facilitar el drenaje de la solución lixiviada hacia las tuberías de colección, proveer protección a las tuberías durante la descarga inicial del mineral y proveer soporte a la tubería para distribuir la presión debida a la pila de mineral. La capa de drenaje será colocada únicamente sobre las tuberías de colección de solución, con un recubrimiento mínimo sobre las tuberías de 300 mm.

### **3.7.8. Caminos de acceso perimetrales**

En el perímetro de la plataforma de lixiviación se contará con caminos de acceso para inspección y mantenimiento de las estructuras asociadas a la plataforma de lixiviación; adyacentes a los caminos estarán las canales de derivación.

El ancho de los accesos perimetrales de la plataforma es de 8 m y cuentan con una capa de rodadura de 150 mm de espesor, la cual tiene una ligera inclinación (de 3% a 5%) hacia fuera de la plataforma, con la finalidad de derivar el agua de lluvia hacia los canales adyacentes.

El Plano 012 muestra la planta, perfil y datos de control horizontal del acceso perimetral suroeste.

## **3.8. Configuración de la pila de mineral.**

Para la configuración de la pila se ha considerado que los taludes tendrán una inclinación general de 2,5H: 1V y un retiro del pie del talud del mineral de 7,0 m, medidos desde la berma perimetral. La pila de mineral será conformada en capas de 16 m de altura

cada una, con banquetas intermedias entre las sucesivas capas de 17,6 m de ancho, para lograr el talud general indicado, por lo cual se ha asumido que el mineral se apilará con su ángulo natural de reposo de 1,4H: 1V. Durante el carguío podrían requerirse ajustes si el ángulo de reposo no fuera el esperado o si las banquetas varían de ancho debido a deslizamientos en el talud del mineral. Adicionalmente, se debe considerar apilar las capas con una ligera pendiente de manera de proveer banquetas con pendiente longitudinal y facilitar la colocación de cunetas para minimizar trabajos durante la etapa de cierre y rehabilitación de la pila de lixiviación. El plano 013 siguiente presenta la configuración de la pila de mineral.

### **3.8.1. Colocación de la primera capa de mineral**

Una vez aprobada la instalación del sistema de colección de solución, se procederá con el carguío de la primera capa de mineral, la cual consistirá de una capa de mineral selecto de 2 m de altura sobre toda la superficie que será cubierta por mineral; esta capa de mineral selecto cumple dos funciones: evitar el deterioro de las tuberías del sistema de colección de solución y promover el drenaje de la solución lixiviada. Una vez cargada la capa de mineral selecto se procederá a completar la carga de la correspondiente capa, la cual deberá ser cuidadosamente monitoreada.

Es de suma importancia recordar que la descarga del mineral en la superficie de la plataforma de lixiviación deberá realizarse cuesta arriba, para lo cual se hará uso del camino de acarreo de mineral. Bajo ninguna circunstancia se realizará el carguío desde una elevación superior hacia una inferior.

Los equipos de carguío no deberán circular dentro de 5 m del borde de la primera capa de mineral, para minimizar el potencial de ocurrencia de deslizamientos sobre la superficie de la plataforma.

## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1. Discusión

A partir de los hallazgos encontrados, aceptamos la hipótesis alternativa general que establece que realizando el correcto diseño de una plataforma de lixiviación se podrá asegurar la ampliación de la misma en una mina ubicada en la región Cajamarca.

Los resultados guardan relación con lo que sostiene Briones (2016) con la construcción de una plataforma de lixiviación en el proyecto Tantahuatay, que tiene la finalidad de aplacar la necesidad de área de plataformas de lixiviación y no perjudicar al normal desarrollo de las operaciones en mina. Ello es acorde con lo que en este estudio se quiere llegar. Pero, en lo que no concuerda el estudio del presente autor, es que menciona que, en la primera etapa de diseño, la secuencia de trabajos comienza con las labores de excavaciones de topsoil y de material inadecuado en cada una de las tres áreas contempladas. En este estudio la pila de mineral proyectada no se fundará en terreno natural, sino que se apoyará directamente sobre dos estructuras existentes, lo cual cambiaría el diseño tal y como está planteado.

Los resultados obtenidos por Smith (2015), guardan relación con respecto al diseño del pad de lixiviación ya que incluye un sistema de subdrenaje y monitoreo ambiental para aguas subterráneas, un sistema compuesto de revestimiento suelo/geomembrana, un sistema de sobrerestimiento o protección de la geomembrana y finalmente un sistema de colección de solución. Pero en lo que no concuerda el estudio del autor es en la cantidad de calicatas y perforaciones realizadas (92 y 12 respectivamente), dando una mayor exactitud en los resultados geotécnicos.

Los resultados obtenidos por Mayhua, Romulo (2015) y Soplín (2014), guardan relación con el presente estudio ya que habiéndose realizado el diseño geotécnico del pad de

lixiviación, ambos presentan una configuración geométrica estable de las estructuras, lo cual hace viable el proyecto.

Soplin (2014), menciona que lo que es más importante es evitar las posibles paradas en la producción que significarían para el cliente una pérdida económica invaluable por la cantidad de personal y maquinaria que se encuentra destacada en campo, esto guarda relación a lo que se busca en este estudio. Pese a ello el trabajo hace un análisis económico, definiendo distintos costos, lo cual no se ha realizado en este estudio.

#### **4.2. Conclusiones**

- Realizar el correcto diseño de una plataforma de lixiviación permite asegurar su ampliación en una mina ubicada en Cajamarca. Es por ello que, se logra incrementar el tiempo de vida de la Plataforma de Lixiviación en tres meses lo que permite la continuidad de operación de la unidad minera.
- Se definieron 7 unidades geotécnicas, realizando distintos análisis tanto in situ como en laboratorio, para asegurar un diseño correcto y estable las cuales se encuentran dentro de la influencia de la zona en estudio:
  1. Mineral lixiviado/Depósito antropogénico
  2. Material inadecuado I,
  3. Material estéril,
  4. Material inadecuado II,
  5. Revestimiento de suelo (soil liner, SL),
  6. Suelo residual/roca alta a extremadamente meteorizada
  7. Basamento rocoso.
- Se tomó en cuenta el plan de minado y el plan de carguío a mediano plazo del año anterior, lo cual permitió realizar una proyección del tiempo de carguío y transporte de

mineral hacia la ampliación de 3 meses; esto con la información de mineral descargado, la tasa de carguío (tpd) de 25 263 ton, capacidad acumulada disponible de meses anteriores a la fecha de culminación de la construcción y el área total de la ampliación de la plataforma de lixiviación de 2.7 ha.

- Se logró determinar el sistema de revestimiento de la plataforma de lixiviación. El cual, consistirá de una capa de suelo de baja permeabilidad de 300 mm de espesor (después de compactado), denominada revestimiento de suelo o Soil Liner (SL), sobre la cual se colocará una geomembrana de 1,5 mm de espesor (60 mil, o milésimas de pulgada), que a la vez será cubierta por una capa de 300 mm de espesor (después de la compactación), denominada capa de protección o Protective Layer (PL), que consiste de un suelo de grano fino. Todo ello con la finalidad de conseguir la estandarización en todo el proyecto, y cumplir con los estándares medio ambientales y de seguridad.
- Se logró determinar la configuración de la pila de mineral de la plataforma de lixiviación, para lo cual se ha considerado que los taludes tendrán una inclinación general de 2,5H: 1V y un retiro del pie del talud del mineral de 7,0 m, medidos desde la berma perimetral. Esta configuración asegurara la estabilidad del talud final, para así cumplir con los requerimientos de seguridad.

## REFERENCIAS

1. Allen, E. (2013). *Determinación del rendimiento real de la producción de agregados utilizando zaranda vibratoria en la plataforma de lixiviación La Quinua SA-Cajamarca*. Universidad nacional de Cajamarca.
2. Argote (2010). *Diseño no experimental transversal*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/merlina10/diseo-no-experimental-transversal-252>
3. Ávila, H. (2006). *Introducción a la metodología de la investigación edición electrónica*. Texto completo en [www.eumed.net/libros/2006c/203/](http://www.eumed.net/libros/2006c/203/)
4. Badillo, J.(2017). *Ensayo gravedad específica*. Universidad nacional de san Agustín de Arequipa (UNSA)
5. Bernal, C. (2006). *Metodología de la investigación*. (2da. Edición). México: ed. Pearson
6. Briones, K. (2016). *Método y planeamiento de la construcción de una plataforma de lixiviación en un proyecto minero*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
7. Chinchilla, N. (2017). *Astmd-2216 contenido de humedad*. Kupdf.net. Recuperado de [https://kupdf.net/download/astmd-2216contenidodehumedad\\_598d1d53dc0d603642300d17\\_pdf](https://kupdf.net/download/astmd-2216contenidodehumedad_598d1d53dc0d603642300d17_pdf)
8. Colquehuanca, E. (2016). *Planeamiento de minado a largo plazo haciendo uso del software Whittle 4.4 Cia minera aurífera Santa Rosa Comarsa s.a.*. Universidad nacional de san Agustín de Arequipa.
9. Cursos U. (2019). *Exploración: métodos de perforación*. Encontrado en septiembre 2019, de [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2010/2/gl61f/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=310522](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2010/2/gl61f/1/material_docente/bajar?id_material=310522)
10. Ensayo Lugeon (2019). *Ingeniería geológica, ramas y aplicaciones*. Ingenieriageologica.xyz. Extraído de: <https://ingenieriageologica.xyz/ensayos-geotecnicos/ensayo-lugeon/>. En marzo del 2020.

11. Estudios geotécnicos y control de obras, (s,f.). *Estudios geotécnicos*. Recuperado de <https://www.geotecnia.org/estudios-geotecnicos> en marzo del 2020.
12. Flores, K. (2018). *Investigaciones para realizar una edificación*. Universidad Central del Ecuador.
13. Geosai. Soluciones ambientales (2016). *¿Qué son las geomembranas?* Recuperado de <https://www.geosai.com/que-son-las-geomembranas/> en marzo de 2020.
14. Guzmán, B. (2012). *Análisis granulométrico*. Universidad nacional Autónoma de México.
15. Límites de Atterberg (2019). *Definición e interpretación. Geotecnia fácil*. Extraído de <http://geotecniafacil.com/limites-de-atterberg/> en marzo 2020
16. Mayhua, R. (2015). *Diseño geotécnico del pad de lixiviación ampliación sur - fase 5 - La Libertad*. Universidad nacional de Ingeniería.
17. Montoya, M. (2019). Ensayo de permeabilidad en el suelo lefranc. Escuela de Ingeniería de Antioquia.
18. Reeve, I. (2018). *Informe calicata cumbe mayo*. Universidad católica andres bello.
19. S.n, (2019). *Competitividad del sector minero peruano y la articulación intersectorial*. Rumbo minero, (114).
20. Saavedra, A. (2018). *Geotecnia en minería: la importancia del estudio del terreno*. construcción minería y energía. Encontrado en: <http://www.construccionminera.cl/geotecnia-en-mineria-la-importancia-del-estudio-del-terreno/#.xdfoodnkjiu>
21. Santa cruz, D. (2018). *Zonificación de la capacidad portante del suelo de la localidad de Soritor del distrito de Soritor – provincia de Moyobamba – región san martín*. Universidad nacional de San Martín-Tarapoto.

22. Smith, C. (2015). *Propuesta de diseño para la construcción de pad de lixiviación número 3 de la unidad minera Tucari – Aruntani*. Universidad nacional de san Agustín de Arequipa.
23. Soplín, J. (2014). *Ampliación de la plataforma de lixiviación Tantahuatay fase 2a*. Universidad nacional de Ingeniería.
24. Trejo, A. (2019). *Caracterización geológica de yacimientos*. Universidad Nacional Autónoma de Mexico UNAM.
25. Valiente, R (2015). *Estabilidad de Taludes: conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo*. Revista civilizate. N° 7. Página 50.

## ANEXOS

### Fotografías



Fotografía 1: Fotografía Panorámica de la perforación 1, ubicada en área para ampliación de La Plataforma de Lixiviación



Fotografía 2: Fotografía Panorámica del área para ampliación de La Plataforma de Lixiviación



Fotografía 3: Perforación 1. De 0,00 m a 3,00 m



Fotografía 4: Perforación 1. De 9,40 m a 11,90 m



Fotografía 5: Perforación 1. De 17,60 m a 20,05 m



Fotografía 6: Perforación 1. De 33,65 m a 35,50 m



Fotografía 7: Calicata 2. De 0,00 m a 4,70 m



Fotografía 8: Calicata 4. De 0,00 m a 2,60 m



Fotografía 9: Calicata 7. De 0,00 m a 3,50 m



Fotografía 10: Calicata 8. De 0,00 m a 3,30 m



Fotografía 11: Perforación para instrumentación geotécnica.



Fotografía 12: Construcción de la Plataforma de Lixiviación. Instalación de Geo-sintéticos.



Fotografía 13: Transporte y descarga de mineral hacia la Plataforma de Lixiviación.

## ANEXO E: SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO	
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 □	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa retenida por la malla No. 4  PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60} / D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$  NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.  LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA “LÍNEA A” O I.P. MENOR QUE 4.  LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA “LÍNEA A” CON I.P. MAYOR QUE 7.  $Cu = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3.  No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW  LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA “LÍNEA A” O I.P. MENOR QUE 4.  LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA “LÍNEA A” CON I.P. MAYOR QUE 7.	
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		* GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo		
		d u			
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla		
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4  PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	SW		Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.
	SP		Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
	* SM		Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		
	d u				
	SC		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.		
	SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 □  Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No.200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.
		CL		Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
OL		Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50		MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.		
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.		
		OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.		

\*\* Clasificación de frontera- los suelos que posean las características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos; por ejemplo, gw-gc, mezcla de arena y grava bien graduadas con cementante arcilloso.

Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los u.s. standard.

\* la división de los grupos gm y sm en subdivisiones d y u son para caminos y aeropuertos únicamente, la sub-división está basada en los límites de atterberg el sufijo d se usa cuando el l.l. es de 28 o menos y el i.p. Es de 6 o menos. El sufijo u es usado cuando el l.l. es mayor que 28.