



**UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA DE GESTIÓN MINERA**

**Implementación de criterios de corte y relleno en una relavera antigua para su reaprovechamiento en una mina superficial del centro del Perú**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Para optar el título profesional de Ingeniero de Gestión Minera

**AUTOR(ES)**

Rojas Avila, Anyela Melina	0000-0002-5156-6309
Castillo Cecilio, Karina Maura	0009-0004-6151-0562

**ASESOR(ES)**

Vasquez Olivera, Yaneth Charito	0000-0002-2962-0284
---------------------------------	---------------------

**Lima, 10 de noviembre de 2023**

## DEDICATORIA

*En principio a Dios, por cuidarme en momentos difíciles, a mis padres Antolina y Jonas, quienes siempre tenían las palabras correctas para motivarme y continuar con mis metas y a hermanos Yeny, Clara, Anibal y Yashin quienes con su esfuerzo y apoyo han contribuido en que logre culminar con éxito mi carrera profesional. También, dedico este Trabajo a mis profesores de la UPC, en especial a mi asesora Yaneth, quien ha compartido su sabiduría y conocimientos en mi etapa universitaria.*

*Karina Castillo*

*A Dios y a mis padres Elia y Pedro, que con su esfuerzo y dedicación han sabido guiarme hasta lograr mis metas académicas propuestas. Han sido ellos quienes me han brindado la fortaleza necesaria para seguir con mi carrera que se desarrolla lejos de casa.*

*Anyela Rojas*

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro agradecimiento, en primera instancia, a Dios por guiarnos y darnos la sabiduría para continuar y persistir. Luego, a nuestros padres, quienes han contribuido en nuestra enseñanza y principios para conseguir nuestras metas.

Agradecemos a nuestros docentes de la Universidad, los cuales nos han compartido sus conocimientos durante los años de formación académica y a nuestra asesora que nos acompañó en el proceso de desarrollo de nuestro trabajo de suficiencia profesional.

## RESUMEN

Los relaves mineros tienen un potencial económico que puede ser reaprovechado por aquellas empresas mineras que están próximas a su cierre. Esta investigación busca plantear criterios de corte y relleno para el minado de los relaves antiguos de una mina superficial del centro del Perú. Por lo que, se analizó los estudios geotécnicos y geomecánicos, como primera instancia, para calcular la capacidad portante y espesor necesario de relleno del piso y así darle estabilidad al tránsito de equipos de línea amarilla. Además, se realizó el análisis de los métodos tales como: Corte y relleno, capacidad portante, técnicas de dren francés y secado de material. En la investigación, se implementa la secuencia de extracción aplicando los criterios de corte y relleno, en el proceso operativo para el reaprovechamiento de un componente minero. Por consiguiente, el presente trabajo de suficiencia profesional nos sirve para obtener un método idóneo para extraer mineral de una relavera antigua mediante la adaptación de los criterios de corte y relleno.

**Palabras clave:** Extracción de relave antiguo; reaprovechamiento; capacidad portante; dren francés.

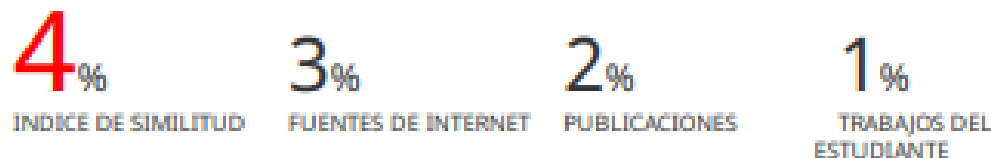
## **ABSTRACT**

Mine tailings have an economic potential that can be reused by mining companies that are close to closure. This research seeks to propose cutting and backfilling criteria for the mining of old tailings from a surface mine in central Peru. Therefore, geotechnical and geomechanical studies were analyzed, as a first step, to calculate the bearing capacity and necessary thickness of the floor backfill and thus give stability to the transit of yellow line equipment. In addition, the analysis of methods such as: cut and fill, bearing capacity, French drainage techniques and material drying was carried out. In the research, the extraction sequence is implemented by applying the cut and fill criteria, in the operative process for the reuse of a mining component. Therefore, the present work of professional competence serves us to obtain a suitable method to extract ore from an old tailings dam by adapting the cut and fill criteria.

**Keywords:** Old tailings extraction; reutilization; bearing capacity; French drain.

# Implementación de criterios de corte y relleno en una relavera antigua para su reaprovechamiento en una mina superficial del centro del Perú\_U201421184\_ CASTILLO CECILIO, KARINA MAURA

## INFORME DE ORIGINALIDAD



## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>repositorio.unasam.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>2</b>	<b>qdoc.tips</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>3</b>	<b>1library.co</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>4</b>	<b>Submitted to Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>
<b>5</b>	<b>vdocumento.com</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>6</b>	<b>CONSULCONT SAC. "Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera María Teresa-IGA0003633", R.D. N° 388-2009-MEM-AAM, 2020</b> Publicación	<b>&lt;1%</b>

## ÍNDICE

1	CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO .....	1
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN .....	2
1.2.1.	Ubicación. ....	2
1.2.2.	Acceso .....	3
1.2.3.	Geología regional .....	4
1.2.4.	Geología local .....	5
1.2.5.	Clima .....	6
1.2.6.	Área de desarrollo del trabajo .....	6
1.2.7.	Operaciones mineras .....	7
1.3.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	7
1.3.1.	Identificación y formulación del problema .....	7
1.3.2.	Justificación teórica, justificación Metodológica y justificación práctica ...	11
1.3.2.1.	Justificación teórica .....	11
1.3.2.2.	Justificación metodológica .....	11
1.3.2.3.	Justificación práctica .....	11
1.4	OBJETIVOS.....	12
1.4.1	Objetivo general .....	12
1.4.2	Objetivo específico.....	12
1.5	INDICADORES DE ÉXITO .....	12
1.6	PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	13
2	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	15
2.1	MARCO CONCEPTUAL.....	15
2.1.1.	Minería Superficial.....	15
2.1.2.	Relave.....	15
2.1.3.	Relaves antiguos.....	16
2.1.4.	Reprocesamiento de relaves .....	16
2.1.5.	Depósito de relaves .....	17
2.1.6.	Tipos de depósito de relaves .....	17
2.1.7.	Método de corte y relleno.....	18
2.1.8.	Equipos Línea Amarilla .....	18

2.1.9.	Plataforma de secado.....	19
2.1.10.	Rumas de mineral.....	20
2.1.11.	Carga portante .....	20
2.1.12.	Dren francés .....	20
2.2	ESTÁNDARES, FRAMEWORK Y BUENAS PRÁCTICAS.....	21
2.3	BASES LEGALES Y MARCO NORMATIVO.....	24
3	CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO.....	25
3.1	Diseño de la solución .....	25
3.2	Desarrollo de la Solución .....	29
3.3	Validación del Proyecto .....	35
3.4	Interpretación de los resultados.....	45
3.5	Impacto economico .....	47
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
4.1	CONCLUSIONES .....	50
4.2	RECOMENDACIONES .....	50
5	REFERENCIAS .....	51



## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación geográfica de la Unidad Minera Superficial.....	3
<b>Figura 2.</b> Mapa geológico del cuadrángulo de Ondores.....	4
<b>Figura 3.</b> Área de estudio.....	7
<b>Figura 4.</b> Estructura de propuesta de mejora alineado a causas y consecuencias .....	10
<b>Figura 5.</b> Pasos para planificación del proyecto.....	14
<b>Figura 6.</b> Mina superficial del centro del Perú .....	15
<b>Figura 7.</b> Relavera antigua en proceso de minado.....	16
<b>Figura 8.</b> Esquema de método de corte y relleno .....	18
<b>Figura 9.</b> Equipos de línea amarilla en superficie .....	19
<b>Figura 10.</b> Plataformas de secado de material .....	19
<b>Figura 11.</b> Rumas de mineral .....	20
<b>Figura 12.</b> Mapa de procesos de la empresa minera.....	22
<b>Figura 13.</b> Diagrama de flujo de criterios de corte y relleno.....	25
<b>Figura 14.</b> Pasos para calcular la capacidad portante .....	26
<b>Figura 15.</b> Esquema de carga.....	27
<b>Figura 16.</b> Grafica de Dren francés .....	28
<b>Figura 17.</b> Flujograma del desarrollo de la propuesta .....	30
<b>Figura 18.</b> Etapas de construcción de la relavera antigua .....	33
<b>Figura 19.</b> Evidencia de la realización de SPT en la relavera antigua .....	34
<b>Figura 20.</b> Diseño de Poza 02 (bomba de extracción).....	39
<b>Figura 21.</b> Ubicación y nomenclatura de las pozas de bombeo .....	39
<b>Figura 22.</b> Diseño del dren francés.....	41
<b>Figura 23.</b> Secuencia de extracción .....	43
<b>Figura 24.</b> Secuencia de minado en Relavera Antigua.....	44
<b>Figura 25.</b> Nomenclatura de plataformas de secado.....	45
<b>Figura 26.</b> Contribución mensual por Extracción total .....	47
<b>Figura 27.</b> Contribución por Tajo - Centro.....	48
<b>Figura 28.</b> Contribución Stockpile .....	48
<b>Figura 29.</b> Contribución Tajo centro - BM.....	49
<b>Figura 30.</b> Contribución Relavera antigua .....	49

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Accesos a la unidad minera .....	3
<b>Tabla 2.</b> Indicadores de éxito.....	12
<b>Tabla 3.</b> Propiedades geotécnicas de los tres ensayos de penetración.....	37
<b>Tabla 4.</b> Cimentación flexible .....	38
<b>Tabla 5.</b> Control topográfico de pozas de relavera .....	42

# 1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

## 1.1 ANTECEDENTES

El Perú es un país minero y por ende a lo largo de los años ha generado la presencia de residuos y relaves mineros, históricamente estos eran significados de contaminación ambiental mientras que, en la actualidad, con la tecnología algunos proyectos mineros se enfocan en reiniciar la extracción de minerales a partir de relaves antiguos. Este tipo de actividad tiene como objetivo reactivar operaciones mineras mediante el uso de métodos de reprocesamiento más eficientes, lo que hace que la reextracción de metales de un depósito de relaves antiguo sea económicamente viable y mejorar el aspecto socio-ambiental. (Environmental Law Alliance Worldwide, 2010)

Según Edraki et al. (2014), el acelerado ritmo de la extracción y el procesamiento de minerales en la última década ha generado preocupación a nivel global sobre cómo se manejan los desechos mineros y las consecuencias perdurables de contaminación. En la actualidad, es importante mencionar que con la tecnología necesaria los relaves antiguos que contienen metales valiosos pueden pasar por un proceso reprocesamiento y de esta forma desarrollar una minería secundaria. Esto brinda la oportunidad de generar nuevos recursos y recuperar terrenos de las diferentes comunidades del Perú.

Sarker et al. (2022), menciona que la obtención de estos elementos valiosos desde fuentes poco convencionales, como los depósitos de desechos mineros en desuso o abandonados, ha adquirido mayor relevancia a nivel global en tiempos recientes. Este interés ha surgido debido a que la cantidad de estos elementos que potencialmente se pueden recuperar de relaveras antiguas a menudo supera las concentraciones presentes en algunos minerales primarios.

Alcalde et al. (2018), los relaves de minería polimetálica contienen metales valiosos, especialmente en las minas antiguas. Debido al subdesarrollo tecnológico de esa época, la recuperación de concentrados en el procesamiento metalúrgico era notablemente inferior en comparación con las tecnologías actuales. Por otro lado, Falagan et al. (2017) mencionan que después de revisar la data histórica disponible de su investigación, llegaron a la deducción de que la principal razón de las leyes altas de cobre en los estudios de relaves se debe principalmente a las leyes altas de los minerales. Esto se debe a que los avances de los circuitos de flotación se centraron en mejorar la selectividad de sus concentrados debido a los cambios en la mineralogía, más que a los resultados de una flotación ineficiente con tecnología antigua.

El proceso de recuperación de relaves aborda como criterios el análisis de suelos, la presencia de agua y consideraciones operativas.

En el estudio de Ran (2019), en el proceso minero adapto criterios del método de corte y relleno para abordar el desafío del hundimiento en operaciones mineras subterráneas. Sin embargo, estas estrategias enfrentan ciertas restricciones, como la disminución de la cantidad de mineral recuperado, las limitaciones relacionadas con los equipos, la disponibilidad de operaciones a distancia y la consideración de la productividad. Por otro lado, Gwak et al. (2018) indican que las técnicas existentes para mejorar la eficiencia en la manipulación de terrenos se dividen en dos categorías: la planificación de flotas de equipos y la planificación de asignación de tierras. La primera, se encarga de determinar el tipo óptimo de maquinaria a usar, calcular la cantidad ideal de equipos necesarios, prever la productividad asociada con la excavación de terrenos. Por otro lado, la segunda metodología, se enfoca en identificar las combinaciones más eficientes de excavación y relleno, junto con la secuencia adecuada para minimizar los costos generales de la manipulación de terrenos.

En los relaves antiguos se debe determinar la capacidad portante del estrato de arena limosa que se basa a valores de ensayos de penetración SPT, en relación con esto Terzaghi y Peck (1967) proponen una relación para asentamiento y distorsión máxima que sirve para determinar la estabilidad y el relleno a utilizar para el tránsito de vehículos. Así mismo, Chwala (2019) en su artículo presenta una perspectiva innovadora para la evaluación tridimensional de la capacidad de carga en suelos con variabilidad espacial, emplea mecanismos tridimensionales de falla para realizar estimaciones aleatorias de la capacidad de carga. La creación de este nuevo método representó un desafío considerable y requirió un trabajo minucioso en la derivación de fórmulas matemáticas para nuevas varianzas y covarianzas.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN**

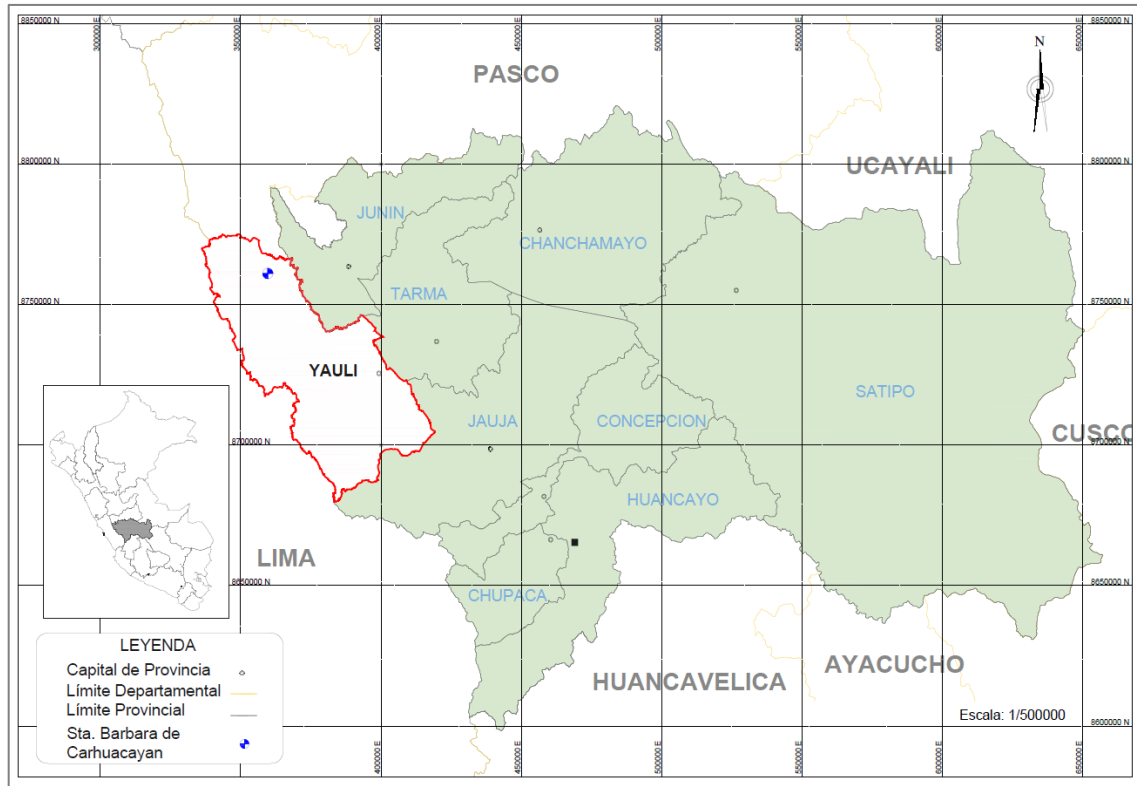
### **Área de estudio**

#### **1.2.1. Ubicación.**

La unidad minera superficial está ubicada en la meseta de las provincias de Pasco y Junín, direccionada al este de la cordillera Occidental. En la figura 1, se muestra la provincia de Santa Barbara de Carhuacayan, distrito de Yauli y departamento de Junín.

**Figura 1.**

*Ubicación geográfica de la Unidad Minera Superficial*



*Nota:* Se muestra mapa de ubicación de la provincia Santa Bárbara de Carhuacayán, lugar donde figura la unidad minera superficial. Adaptado de “Perú: Principales Indicadores Departamentales 2008-2014”, por INEI, 2014 (<https://goo.su/ZTTxcco>).

**1.2.2. Acceso**

Geográficamente, el área del proyecto se encuentra ubicado en el flanco oriental de la vertiente del Pacífico, en el departamento de Junín. La unidad minera tiene una altitud promedio de 4600 m.s.n.m.

A continuación, en la tabla 1 se muestran las vías de acceso más usadas son las siguientes:

**Tabla 1.**

*Accesos a la unidad minera*

Vías de acceso	Vía	Distancia
Lima - Canta	Asfaltado	102 km
Canta - Unidad Minera	Afirmado	70 km

*Nota:* La tabla muestra las dos rutas de acceso a la unidad minera, asimismo características del terreno y la distancia.

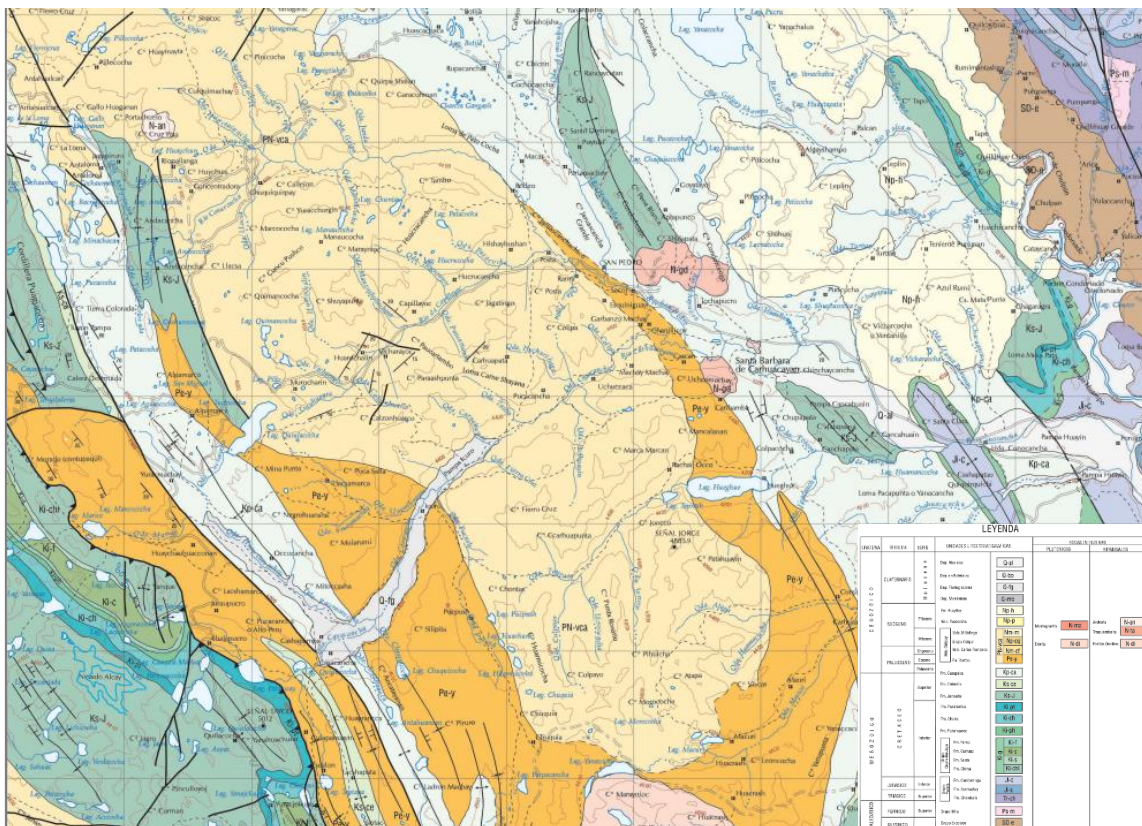
### 1.2.3. Geología regional

El boletín N° 77 de Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) según Cobbing et al. (1996), describe que el yacimiento se encuentra en la base de la formación yantac, los cuales están compuestas por lutitas, calcarenitas y porcentaje de piroclásticos andesíticos del paleolítico y en la formación casapalca, está comprendido areniscas calcáreas, calizas del cretáceo inferior y secuencias de margas rojizas. Así mismo, en la figura 2 se visualiza que en la superficie se presentan alteraciones que componen una oxidación prominente, silificación y sericitización. Los materiales del recubrimiento del cuaternario ocupan áreas significativas, presentándose como depósitos fluvio-glaciares, áreas pantanosas, depósitos coluvio/eluviales, etc.

Además, están representadas por intrusivos menores, que forman diques y apófisis de composición andesítica y son menos significativas.

**Figura 2.**

*Mapa geológico del cuadrángulo de Ondores.*



*Nota.* De. “Mapa geológico del cuadrángulo de Ondores”, por Cobbing et al., 1996 (<https://acortar.link/IXDZep>).

#### **1.2.4. Geología local**

El boletín N° 77 de INGEMMET, Cobbing et al. (1996), menciona que la estratigrafía de la unidad minera aflora una secuencia notable de calizas de tonalidad gris verdosa, que se extiende con dirección al norte hasta una mina antigua. Esta formación exhibe en su base capas de calizas arenosas masivas con un grano de medio a grueso, alternando con estratos de calizas silificadas de tono negro. En la parte media, se presenta un conjunto de calizas de tonalidad gris, que exhiben laminación y cizallamiento. Dentro de esta formación, también se encuentran capas de andesita, brecha volcánica y conglomerado. Este último está compuesto por fragmentos de cuarcita que se extienden a lo largo de las calizas laminadas. Esta formación tiene una edad del cretácico medio y, aunque no se ha medido directamente, se estima que su espesor sea aproximadamente de 250 metros. Además, se ha establecido una correlación con la formación machay, que aflora en la región central del Perú.

Las unidades litoestratigráficas directamente vinculadas con la ubicación del área de investigación consisten en las formaciones casapalca (Kp-ca), que pertenece al cretáceo superior y yantac (Pe-y), que pertenece al terciario superior. También se encuentran presentes los depósitos no consolidados del cuaternario, como zonas pantanosas, depósitos de coluvio, eluvio, fluvio-glaciares, entre otros.

##### Capas Rojas

En la parte inferior del valle, aflora una secuencia de estratos rojos compuesta por areniscas y lutitas calcáreas de textura que varía entre medio y fino. Estas capas se alternan con estratos laminados de tono gris. En términos generales, la formación muestra un matiz oscuro y algunas áreas de alteración verdosa en los sedimentos rojos que forman aureolas que están cruzadas por minerales como calcita, cuarzo y pirita. La potencia de la formación ha sido parcialmente medida por Ponzoni y se registra en 633 metros. La formación se sitúa en la era del cretácico terciario.

##### Rocas Ígnea

Hacia el sureste, aflora una formación de brecha intrusiva que rodea el margen occidental de un depósito dacítico. Esta roca está compuesta por fragmentos angulares de calizas, areniscas y andesitas, los cuales están unidos por una matriz tufácea de composición dacítica. La superficie de esta formación exhibe un tono verdoso amarillento y contiene minerales como

caolinita, albita, cuarzo, hematina, y ocasionalmente una abundante cantidad de glauconita y clorita.

Hacia el este de la brecha intrusiva y en contacto con la misma, aflora un depósito dacítico en forma de stock, que muestra una textura porfirítica y presenta un color amarillo intenso, evidenciando una marcada fracturación. El matiz de la roca se origina debido a la presencia dispersa de limonita y hematita en las fracturas. Además, se observan fenocristales de cuarzo en una matriz feldespática, los cuales han experimentado un proceso de caolinización, mientras que los minerales ferromagnesianos han experimentado la cloritización. La formación de la brecha intrusiva y el stock dacítico porfídico representan dos etapas de intrusión que están estrechamente vinculadas con el período de mineralización. Estas rocas están instruyendo a las calizas del cretácico, lo que se le sugiere una edad posterior al cretácico.

#### **1.2.5. Clima**

El clima se caracteriza por ser frío durante todo el año, se tiene una temperatura promedio de 12° y la precipitación media anual es 926 mm. Durante el año, solo 52 días no presenta lluvias, el índice ultravioleta es 3 y el porcentaje de humedad es de 77%. También, tiene el relieve accidentado y una topografía irregular. (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú 2023)

#### **1.2.6. Área de desarrollo del trabajo**

El área de desarrollo de la investigación se realiza en un relave que data de los años noventa productos de una mina subterránea, la misma que tiene una altitud promedio de 4577 m.s.n.m.

Esta relavera antigua tiene una altura para ser minada de 20 metros aproximadamente, está compuesta por suelos granulados determinados como arena limosa. Del mismo modo, el material tiene una capa de 10 metros de relave relativamente seco y las siguientes están con un porcentaje de humedad muy alto.

Cabe mencionar que este componente minero tiene componentes de recuperación tales como: zinc, plomo y plata. En la figura 2, se muestra el área de estudio como componente de la unidad minera.



### **Figura 3.**

#### *Área de estudio*



*Nota.* En la figura se muestra el área de estudio donde se visualiza el área de estudio.

#### **1.2.7. Operaciones mineras**

Las unidades mineras cercanas a esta relavera utilizan el método de minado a tajo abierto, cuenta con operaciones unitarias tales como la perforación, voladura, carguío y acarreo, con el fin de garantizar el logro de la extracción del mineral y los objetivos de la empresa. Del mismo modo, el dimensionamiento de equipos de línea amarilla y blanca es la adecuada a las condiciones del terreno, los parámetros geométricos de la geografía y topografía y asegurar la extracción necesaria del tonelaje. En referencia a los parámetros de diseño, se realizaron estudios de estabilidad de taludes, donde se analizó la elección de equipos, los accesos a operación teniendo en cuenta las dimensiones de los taludes, ángulos y bancos de la mina superficial.

#### **1.3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

##### **1.3.1. Identificación y formulación del problema**

En el entorno mundial, el rubro minero es considerado una industria importante, puesto que aporta a la economía de los países. Además, Latinoamérica cuenta con variedad y abundancia de minerales que brindan soporte económico a países como Chile, Colombia,

Bolivia, Argentina, Perú, etc. Este último país cuenta con características geológicas y demográficas que lo vuelven competitivo.

En el informe anual del servicio geológico Geológico de Estados Unidos, U. S. Geological Survey (USGS), en su encuesta Mineral Commodity Summaries (2020), el Perú permaneció como segundo lugar en producción mundial de cobre, plata y zinc. Como respaldo de lo mencionado, Marchese (2017), en una ponencia en el (IIMP) mencionó que, la minería en el Perú está presente en 18 regiones, brinda empleos directos a 174, 000 y más de 1 millón, indirectos; además, 60% en exportaciones y 14 % y manufactura.

El Perú al ser un país minero cuenta con una gran cantidad de depósitos de relaves que se pueden reaprovechar. La empresa SMRL Acumulación Los Rosales desde el 2019 ha emprendido un ambicioso plan para modernizar y reestructurar los procesos metalúrgicos y de minería subterránea en sus tres concesiones mineras: Mina Natividad, Mina Nivel Oficinas y Mina Candelaria. Esta última abastece a la operación y también se lleva a cabo con eficacia el reaprovechamiento de 1.5 millones de toneladas métricas de relaves antiguos de flotación con contenido de oro. Estos relaves son parte de los 10 pasivos ambientales mineros autorizados para su reaprovechamiento por el estado peruano (MINSUS, 2022).

La investigación tiene como prioridad estudiar la posibilidad de la extracción de mineral en una relavera antigua, ya que estos contienen metales valiosos y deben ser estudiados para encontrar una forma de desarrollar una minería secundaria. Esto implica evaluar la viabilidad económica y técnica de recuperar metales a partir de los relaves, considerando métodos de procesamiento más eficientes y sostenibles.

Sarker et al (2022), considera que la obtención de estos elementos valiosos desde fuentes poco convencionales, como los depósitos de relaves mineros abandonados, ha adquirido mayor relevancia a nivel global en tiempos recientes. Para desarrollar esta oportunidad se debe considerar previo a la implementación: La inestabilidad del suelo, puesto que el limitado acceso a la zona puede producir accidente de hundimiento de personas y equipos de la línea amarilla; otra, es la presencia de relave saturado, que a su vez implica la liberación de agua; la última, es la necesidad de implementar un método de extracción para reaprovechar los componentes antiguos.

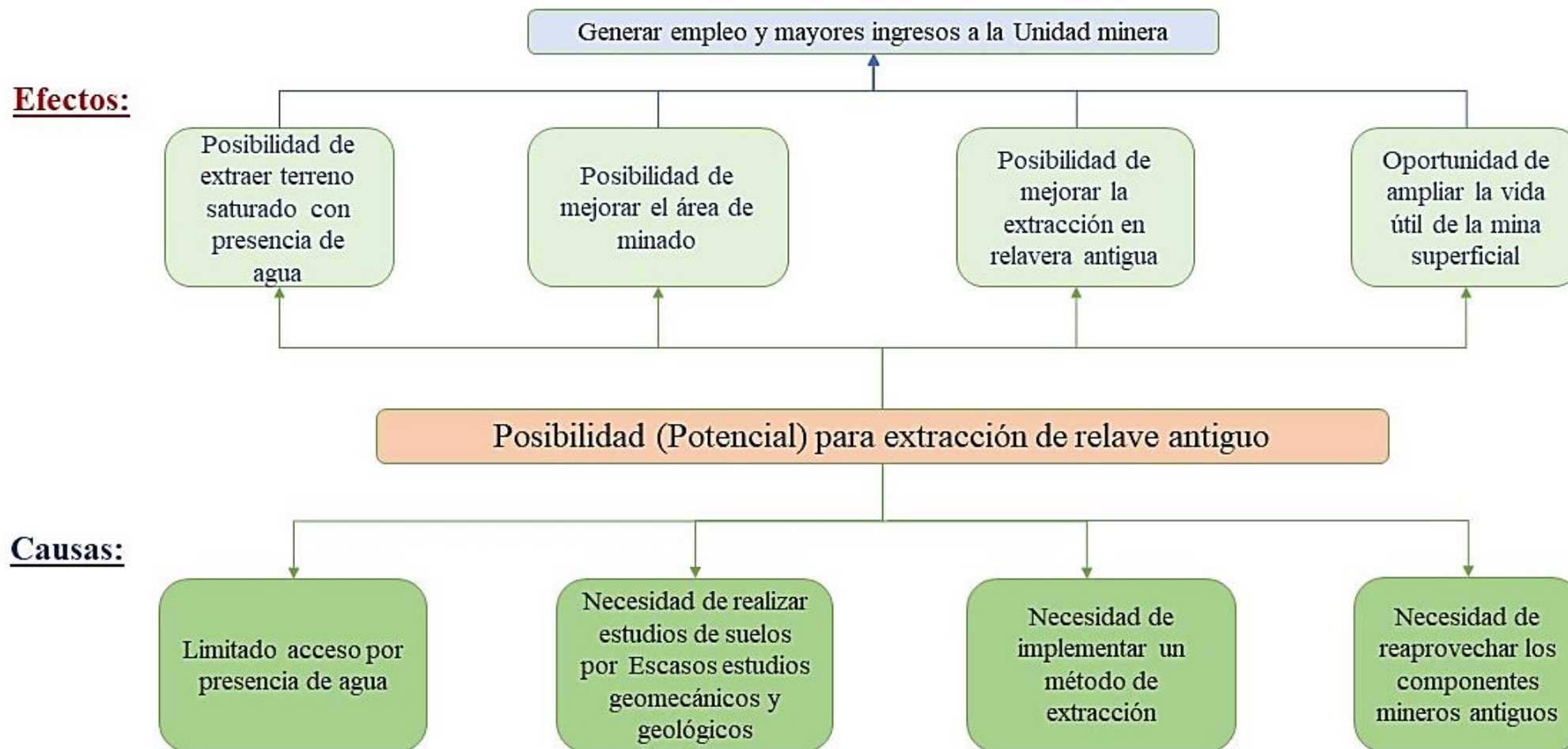
Con respecto a esta oportunidad se plantea la siguiente pregunta:

¿Cuáles son los criterios para implementar los criterios de corte y relleno en una relavera antigua para su reaprovechamiento en una mina superficial del centro del Perú?

A continuación, se identificaron las causas y efectos que se mencionan en la estructura de propuesta de mejora como se visualiza en la figura 4:

**Figura 4.**

*Estructura de propuesta de mejora alineado a causas y consecuencias*



*Nota.* La presente figura, muestra las causas y efectos de la oportunidad central del proyecto de investigación.

### **1.3.2. Justificación teórica, justificación Metodológica y justificación práctica**

#### **1.3.2.1. Justificación teórica**

Según Calderón (2019), la recuperación de relave antiguo como tal no es tan conocida, no obstante, existen investigaciones de la UNMSM en Perú, Cinvestav en México, Universidad Andrés Bello en Chile y otros, quienes han propuesto el rehúso del relave y la reprocesamiento de este, para obtener metales con valor económico.

Entre investigaciones teóricas recientes se tiene que los relaves mineros antiguos poseen diversos metales que sirven para usos comerciales y domésticos, cabe mencionar que las investigaciones continúan (Calderón, 2019).

El presente trabajo de suficiencia profesional es de gran relevancia para el conocimiento de los profesionales que buscan realizar un reaprovechamiento de relaves antiguos en las empresas mineras del Perú, pues esta oportunidad va tomando mucho protagonismo en la actualidad, en otros países se viene realizando el reaprovechamiento de este componente, ya que se tiene gran cantidad de metal de Zn y Cu a recuperar a través de una minería secundaria. (Sarker et al., 2022).

#### **1.3.2.2. Justificación metodológica**

El método utilizado en el trabajo de suficiencia profesional es innovador, puesto que existen minas que poseen relaves antiguos, mas no lo recuperan. La metodología usada en el TSP es una adaptación a diversos métodos usados en canteras no metálicas y otros conceptos base. Esta investigación ha incluido criterios del método de corte y relleno descendente, que sirve para conocer cómo se realiza el minado. Como segundo paso, se incorporó conceptos innovadores de capacidad portante, puesto que en conjunto con la metodología anterior sirvieron para darle la soporte al suelo, cabe mencionar que fue importante para las problemáticas de estabilidad (Chwala, 2019). El tercer paso, fue usar el método de Dren Frances que ayudó a la evacuación de la limitante del agua y relleno de relave saturado. Por lo tanto, es importante destacar que la implementación de esta combinación de criterios de la técnica genera aporte a la industria minera.

#### **1.3.2.3. Justificación práctica**

En países vecinos se han realizado prácticas de este caso de estudio, dando resultados positivos. Tal es el caso de una mina de Chile que aplicó las técnicas para el reaprovechamiento de los relaves antiguos obteniendo una buena recuperación en metales

como cobre, plomo y zinc, Falagan et al. (2017). Otro caso es el de la concesión Camponillas, Zamora Chinchipe, en Ecuador, que ha demostrado que el reaprovechamiento de relaves es viable incluso para otros usos como lo son la elaboración de productos ingenieriles, Enriquez et al. (2022).

Asimismo, en el 2021 el BGR y el Centro de Investigación de Aguas Subterráneas (DGFZ) apoyaron el proyecto piloto de minera “Los rosales” en Perú donde se demostró que el reaprovechamiento de relaves abandonados es viable, MINSUS (2022).

Por lo tanto, con respecto a la implementación practica será beneficioso para las minas que cuenten con componentes mineros como el relave antiguo en el país, pues la propuesta de solución podrá ayudar a reaprovechar los metales valioso, alargar la vida útil de la empresa, optimizar costos en perforación y voladura, recuperar los componentes mineros abandonados y otros (Alcalde et al., 2018; Falagan et al., 2017).

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo general

Implementar los criterios del método de corte y relleno en una relavera antigua para su reaprovechamiento en una mina del centro del Perú.

### 1.4.2 Objetivo específico

Los objetivos específicos son los que se mencionan a continuación:

- Estudiar la capacidad portante del suelo mejorado y espesor necesario de material de relleno.
- Determinar el diseño de un dren francés en el relave saturado.
- Seleccionar el método óptimo para la extracción de relave antiguo.

## 1.5 INDICADORES DE ÉXITO

**Tabla 2.**

*Indicadores de éxito*

OBJETIVO ESPECÍFICO	INDICADOR DE LOGRO
<p><b>1. Estudiar la capacidad portante del suelo mejorado y espesor necesario de material de relleno</b></p>	<p>Estudios geotécnicos de capacidad de carga de suelo mejorado (Ton/m<sup>2</sup>) y espesor de suelo mejorado (m)</p>

<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>	<b>INDICADOR DE LOGRO</b>
<b>2. Determinar el diseño de un dren francés en e l relave saturado.</b>	Plano de diseño de dren francés
<b>3. Seleccionar el método óptimo para la extracción de relave antiguo.</b>	Secuencia de minado mediante criterios de corte y relleno

*Nota:* En la tabla se muestran os objetivos especificos y como lograr cada uno de ellos.

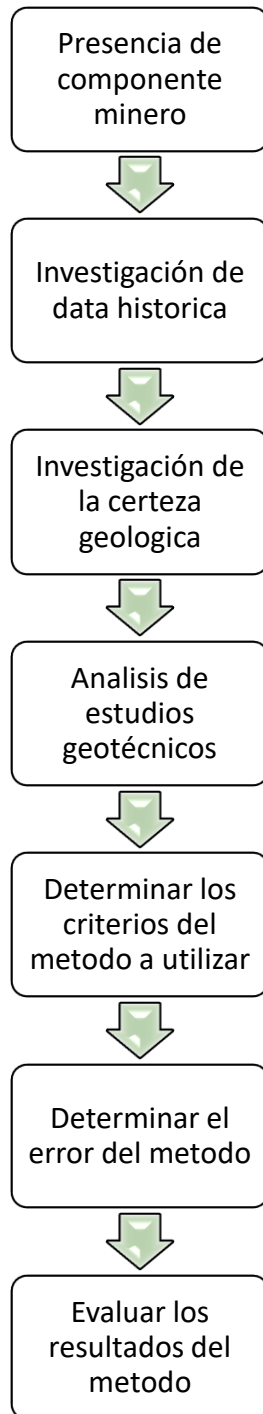
## **1.6 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO**

La planificación del proyecto de suficiencia profesional consiste en implementar criterios de corte y relleno, el cual será aplicado en una mina superficial del centro del Perú para el reaprovechamiento de una relavera antigua.

En principio, se identifica el área de estudio, que en este caso es una relavera antigua y se procede a realizar el análisis y la investigación de la data histórica que tiene el componente. Luego, se investiga la certeza tanto: Geológica, mediante sondajes SPT, y geomecánica, estudio de suelos para conocer el tipo de material de relave, suelo natural y el suelo mejorado, con el fin de poder extraer el material de manera segura. Una vez obtenida la data geomecánica y/o geotécnica se evalúa los resultados y se propone los criterios del método. Para el trabajo de suficiencia profesional se aplica una combinación de criterios, tales como: Corte y relleno, capacidad portante y Dren Frances. La implementación de los criterios se realizará con el objetivo de aprovechar los metales valiosos de la relavera antigua y darle oportunidad de expandir la vida útil de la unidad minera. En la figura 3, se muestra los pasos para la planificación del proyecto.

**Figura 5.**

*Pasos para planificación del proyecto*



*Nota.* Se muestra la planificación del proyecto, teniendo en cuenta las consideraciones generales para la implementación de los criterios de corte y relleno en la extracción de relavera antigua.



## 2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 MARCO CONCEPTUAL

#### 2.1.1. Minería Superficial

Según Ingeoexpert (2018), es un tipo de explotación minera en la que se extraen recursos valiosos de yacimientos que se encuentran cerca de la superficie de la tierra. En este proceso, se remueve la capa de tierra, roca u otros materiales que cubren los depósitos minerales, exponiéndolos para su extracción. Este tipo de minería se realiza en extensiones grandes de terreno e involucra el uso de maquinaria pesada y equipos especializados.

#### **Figura 6.**

*Mina superficial del centro del Perú*



*Nota.* En la figura se aprecia la unidad minera.

#### 2.1.2. Relave

Es el producto molido de forma fina que se tiene a partir de los procesos en las operaciones mineras. Un ejemplo, en minería polimetálica, sulfuros de cobre, se mina una gran cantidad de yacimientos, mas solo una pequeña parte corresponde al elemento rentable económicamente que se desea recuperar. Es importante mencionar, una vez que la roca ha

pasado por un proceso de chancado y flotación, se obtiene concentrado de alta ley de cobre que se puede comercializar o procesar hasta conseguir cobre metálico puro y lo demás se clasifica como material de bajo en cobre, es decir pobre y se lo denomina relave. (Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN], 2023).

### 2.1.3. Relaves antiguos

Se hace referencia a los relaves o desechos mineros de minas antiguas.

#### Figura 7.

*Relavera antigua en proceso de minado*



*Nota.* En la figura se muestra el reaprovechamiento de los relaves antiguos del proyecto piloto “Los Rosales”. Adaptado de “Convertir un legado minero en oportunidades. El proyecto piloto en la mina Los Rosales, Perú”, por MINSUS, 2022 (<https://acortar.link/OR5Xqx>)

### 2.1.4. Reprocesamiento de relaves

Según Calderón (2020) destacadas universidades como la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, la Universidad Andrés Bello, el Instituto Politécnico Nacional, etc. han sugerido diversas alternativas para la reutilización y reciclaje de relaves. Sin embargo, solo algunas opciones se aplican de manera generalizada en las operaciones mineras.

En la minería de pequeña escala, debido a la falta de investigación, capacitación y recursos, a menudo se utilizan métodos de recuperación de metales basados en la experiencia práctica. Esto conduce a procesos poco eficientes que resulta que los relaves contienen

concentraciones de metales con valor comercial. Estos relaves, se convierten en pasivos ambientales mineros. Por esta razón, una de las iniciativas de la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamérica es reexaminar o reutilizar estos relaves antiguos.

La viabilidad del reaprovechamiento dependerá no solo de la posibilidad técnica de obtener un producto de alta demanda y comercializable, sino también de la viabilidad económica de llevar a cabo la operación de reutilización. El análisis de este aspecto económico debe tener en cuenta tanto los precios de mercado de los productos obtenibles como los costos relacionados con el tratamiento de los residuos, el transporte y la comercialización de los productos recuperados.

#### **2.1.5. Depósito de relaves**

Obra ingenieril que se diseña para cumplir con los requisitos legales del país, con el fin de aislar los relaves depositados del ecosistema circundante. Antes de ser depositados, los relaves se someten a un proceso de sedimentación mediante el uso de espesadores y se logra eliminar una parte del agua.

#### **2.1.6. Tipos de depósito de relaves**

Según Sernageomin (2023) los tipos de depósitos de relaves varían de acuerdo con la densidad del relave y según la forma de contención.

**Tanque de relave:** Está hecho por el material más grueso del relave, proviene de un hidrociclón, que es compactado para poder formar el muro, la fracción más fina conocida como lama, se coloca en la parte inferior del dispositivo.

**Embalse de relave:** Está construido a base de material como tierra y rocas para poder formar el muro de contención. Se impermeabiliza en la parte superior y en el talud interno del depósito. También se conoce como embalse de relaves a los depósitos que se encuentran en alguna depresión natural del terreno y no es necesario construir un muro de contención.

**Relave espesado:** Estos depósitos son sometidos de manera previa a un proceso de sedimentación con el uso de un espesador. El principal objetivo del espesador es retirar la mayor cantidad de agua del relave y como resultado se obtiene un producto más denso y con menor contenido de agua.

**Relave filtrado:** Esta técnica es similar al de espesado, pero en este caso se trata de un depósito en el cual el material tiene una menor cantidad de agua debido al proceso de filtrado. Este proceso se realiza para garantizar que la humedad del material sea inferior al 20%. El proceso de filtración utilizado es parecido al que se emplea en el tratamiento de aguas para hacerla potable.

**Relave en pasta:** Hace referencia a una mezcla de agua y sólidos que incluye una gran cantidad de partículas finas y un escaso contenido de agua, lo que la hace tener una consistencia espesa muy parecida a una pulpa de densidad alta.

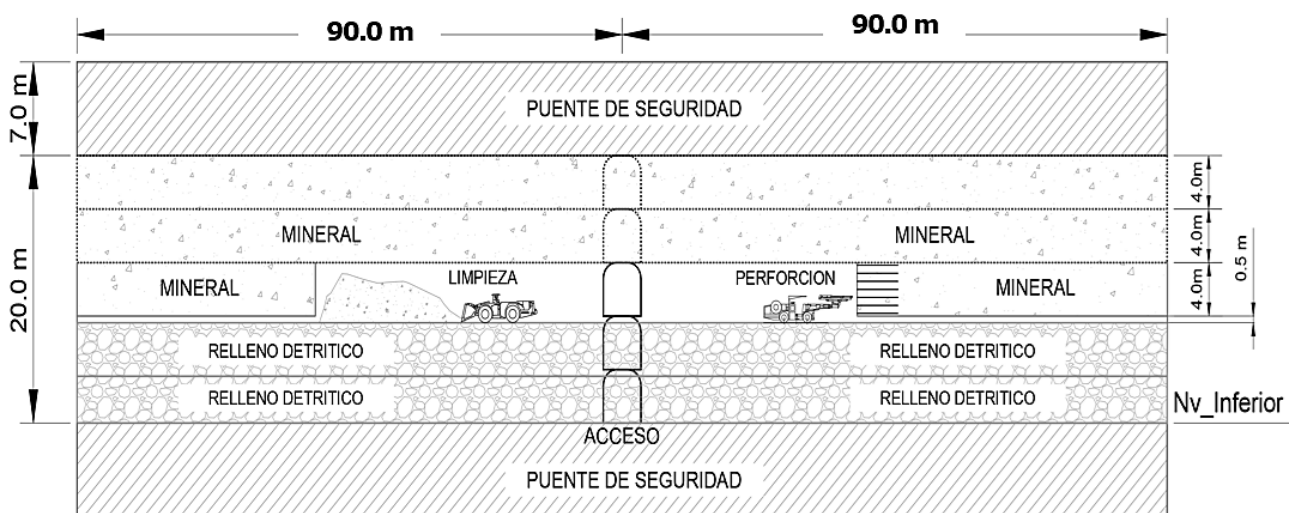
### 2.1.7. Método de corte y relleno

El método consiste en extraer el mineral por tajadas horizontales y/o verticales en una secuencia ascendente o descendente. Se inicia extrayendo franjas de mineral desde la parte inferior de un tajo y se avanza de manera vertical. Una vez que se ha extraído la franja en su totalidad, se rellena con material sin valor económico o estéril, que sirve como piso de trabajo, soporte de las paredes y en algunos casos como techo.

Este método se usa en yacimientos con características específicas, como propiedades físico-mecánicas del mineral, alto buzamiento y roca de caja poco favorable, potencia moderada y yacimiento con límites regulares. Tiene una recuperación alta, es selectivo y seguro, y puede ser mecanizado. Por otro lado, tiene algunas desventajas, como los altos costos de operación, baja productividad debido a la interrupción de la producción durante el relleno y un alto consumo de materiales de refuerzo o sostenimiento (Aguise, 2015).

**Figura 8.**

*Esquema de método de corte y relleno*



*Nota.* Se muestra la secuencia de minado de mineral mediante el método de corte y relleno.

### 2.1.8. Equipos Línea Amarilla

En el sector minero se denomina equipos de línea amarilla a una categoría de maquinaria pesada que se utiliza para diversas operaciones como la extracción de minerales, construcción de infraestructuras, etc. Algunos ejemplos comunes de equipos de línea

amarilla son los volquetes 20 m<sup>3</sup>, volquete Shacman 4201, excavadora CAT 320, excavadora Cat 320, cargador frontal, etc.

**Figura 9.**

*Equipos de línea amarilla en superficie*



*Nota.* Se muestra el trabajo que realiza los equipos de línea amarilla en el acarreo de material.

**2.1.9. Plataforma de secado**

Es una técnica que se usa para depositar los relaves mineros que han sido desaguados previo proceso de espesado o filtrado. El propósito principal es optimizar la recuperación del agua del proceso y reducir al mínimo el consumo de agua limpia. Estas plataformas van creciendo a medida que se le añade más

**Figura 10.**

*Plataformas de secado de material*



### **2.1.10. Rumas de mineral**

rumas varían según la actividad minera y el recurso mineral que se ha explotado. Por ejemplo, minerales metálicos, se usan para obtener metales puros a través de procesos de fundición o refinación. Minerales no metálicos, son de uso industrial, agrícola o de construcción. Y minerales arcillosos, que se usan para fabricar cerámicas, pinturas, cosméticos o medicamentos.

### **Figura 11.**

*Rumas de mineral*



Nota. Se muestra las rumas donde se acumulan material en forma de cono.

### **2.1.11. Carga portante**

Según Braja (2014) se define como la capacidad del suelo para resistir las cargas verticales sin sufrir asentamientos ni fallas. Se mide en Kilo pascales o libras por pulgada cuadrada. Se determina mediante ensayos geotécnicos como el ensayo de penetración de cono o penetración del penetrómetro estándar.

### **2.1.12. Dren francés**

Es un sistema de drenaje utilizado para eliminar el exceso de agua y prevenir la acumulación de líquidos. Consiste en colocar tuberías con perforaciones en una zanja excavada a lo largo del perímetro donde se requiere un adecuado drenaje. Esta tubería se cubre con material de drenaje, como grava, y se protege mediante una membrana permeable para evitar el ingreso de sedimentos en la tubería. De esta manera, el sistema permite la captación de agua

subterránea a través de la tubería y su posterior redirección lejos de la estructura, esto previene problemas de acumulación de agua que podrían dañar la construcción. (Hume Ingeniería, 2022)

## **2.2 ESTÁNDARES, FRAMEWORK Y BUENAS PRÁCTICAS**

Al momento de realizar la explotación de una relavera antigua es importante aplicar estándares, procedimientos y herramientas de gestión como:

Estándar de estabilidad que menciona de forma general las características técnicas del depósito de relaves y cuenta con procedimientos de monitoreo de suelos y agua para vigilar la estabilidad de la relavera en tiempo real.

Estándar de gestión de aguas para prevenir inundaciones y deslizamientos en la relavera. Además, se cuenta con procedimientos de drenaje y control de aguas pluviales. Procedimiento para el control de polvo y emisiones, se aplican medidas de control como el regado de vías para controlar el polvo y las emisiones de partículas finas provenientes de los relaves.

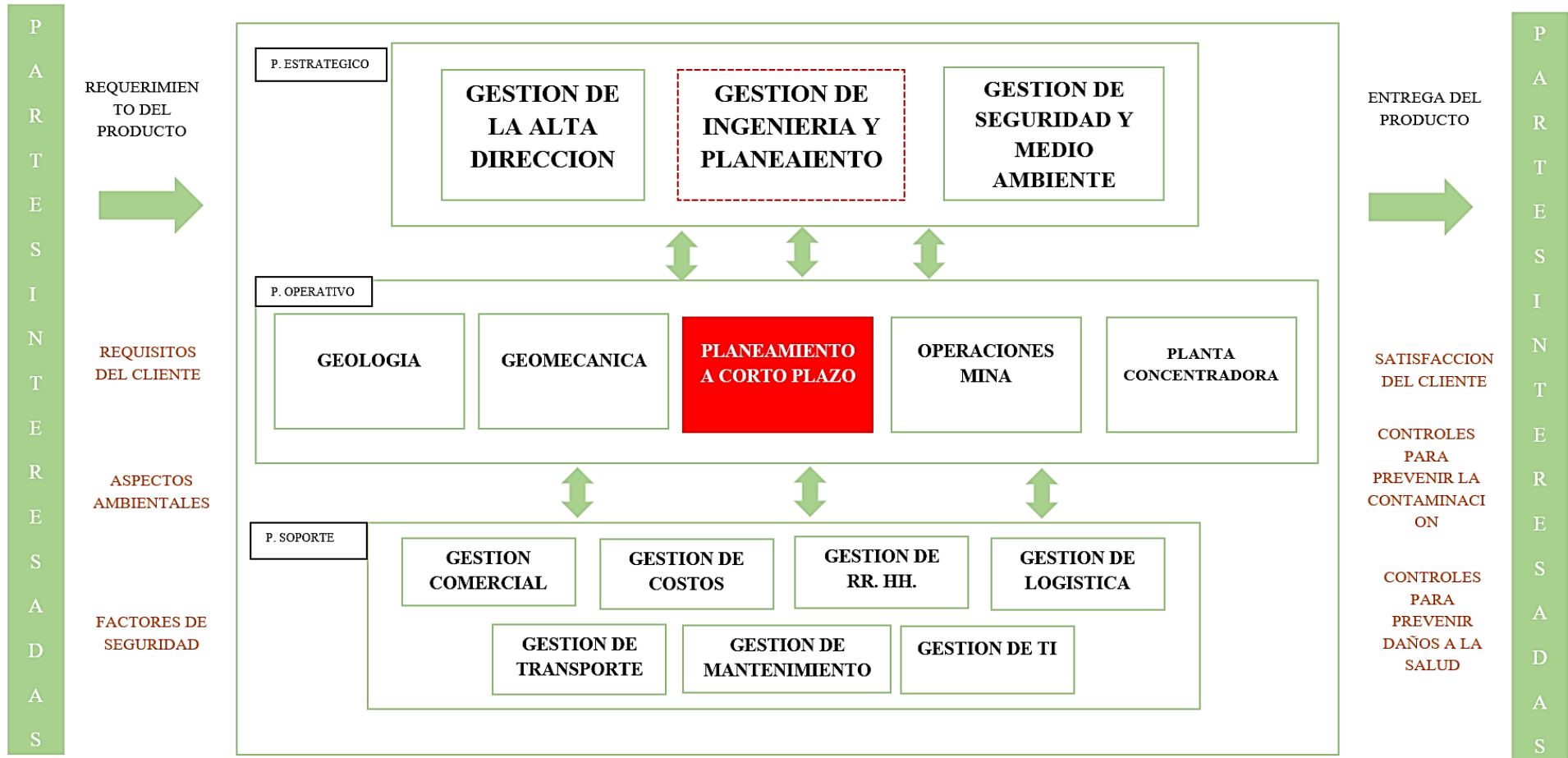
Estándar de control de acceso, donde especifica que solo puede ingresar personal al área de trabajo si cuenta con la autorización de radio.

Estándares de seguridad donde especifica que se debe hacer uso de las herramientas de gestión. El IPERC para poder identificar los riesgos existentes en la actividad e implementar controles para minimizar o eliminar el peligro. Seguir los procedimientos operativos donde explica paso a paso las tareas de la actividad. Hacer uso de permisos de trabajo de alto riesgo en caso lo requiera la actividad y en todo momento tener un comportamiento seguro.

El presente trabajo de suficiencia profesional describe los procesos que se presentan para poder reaprovechar los minerales de una relavera antigua de una mina superficial del centro del Perú. La figura 5 muestra los procesos estratégicos, estos están direccionados a cumplir con los objetivos y metas de la organización, incluyen a la gestión de la alta dirección, la gestión de seguridad y medio ambiente y la gestión de ingeniería y planeamiento, esta última está relacionado con el trabajo de suficiencia profesional. Luego, se encuentran los procesos operativos estos incluyen las áreas de geología, geomecánica, operaciones mina, planta concentradora y planeamiento a corto plazo. En este último, se enfoca el trabajo de suficiencia profesional. Por último, están los procesos de soporte quienes brindan los recursos indispensables para que los procesos operativos cumplan con las metas establecidas por la empresa.

**Figura 12.**

*Mapa de procesos de la empresa minera*



*Nota:* Se muestran los procesos de soporte, operativos y estratégicos. El TSP se centra en el proceso operativo de planeamiento a corto plazo.



En la actualidad, se ha implementado un primer proyecto piloto de buenas prácticas en reaprovechamiento de relaves antiguos en el Perú.

Según MINSUS (2023) El Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) y el Centro de Investigación de Aguas Subterráneas (DGFZ) han establecido una colaboración con Minera los Rosales S.A. con el propósito de lograr una afectiva transferencia de tecnología e innovación en la gestión de pasivos ambientales mineros y la reutilización de residuos mineros.

Minera los Rosales realiza minería secundaria, está encargada del procesamiento de relaves históricos otorgados por el estado peruano y se ha comprometido a llevar a cabo el cierre de estos pasivos de acuerdo con las normas técnicas vigentes, con el fin de prevenir la contaminación ambiental. La minera cuenta con 1.5 millones de toneladas métricas de relaves de flotación antiguos y una producción diaria de 340 toneladas métricas por procesos mixtos de lixiviación y flotación para así obtener barras doré que finalmente serán exportadas al mercado internacional.

Un segundo proyecto piloto de MINSUS es La Ciénaga ubicada en Pataz, este proyecto aún se encuentra en investigaciones que incluyen análisis detallado de tamaño de partículas, composición mineralógica y química para poder caracterizar los relaves encontrados en la zona. Además, se está desarrollando pruebas especializadas para evaluar la viabilidad técnica de recuperar los metales de esas relaveras antiguas.

Hudbay Peru ha sido elogiada por su destacada implementación de buenas prácticas en la gestión de relaves. El programa de sostenibilidad Towards Sustainable Mining (TSM) es de renombre a nivel mundial y ha conferido a Hudbuy Minerals una calificación AA por su alto cumplimiento de estándares en relación con el sistema de gestión de la presa de relaves.

Se ha llevado a cabo implementaciones de tecnología, que tiene como objetivo adquirir información continua sobre el desempeño, los instrumentos instalados en la estructura tienen la capacidad de transformar incluso las variaciones más pequeñas en la topografía en datos e información útil para tomar decisiones en tiempo real. (ProActivo, 2021)

### **2.3 BASES LEGALES Y MARCO NORMATIVO**

En el Perú, el manejo de relaves está regulado por una serie de leyes y normas que buscan garantizar la seguridad ambiental y la protección de las comunidades que se encuentran en zonas aledañas a las operaciones mineras. Las leyes y regulaciones clave para el manejo de relaves incluyen:

Los principios generales y las normas específicas para actividad minera en el país, incluye disposiciones relacionadas con la gestión de relaves y la responsabilidad de las empresas mineras en la prevención de daños ambientales (Congreso de la República del Perú, 1992, Ley 18880, Título preliminar).

La gestión integral de residuos sólidos incluye disposiciones relacionadas con los residuos generados por la minera, establece requisitos técnicos y ambientales para la gestión de relaves mineros (Congreso de la República del Perú, 2016, Ley 27314, Artículo 4).

Además, existe una guía ambiental para el manejo de relaves mineros. Esta guía fue elaborada en colaboración del banco mundial y el programa de asistencia técnica al Ministerio de Energía y Minas del Perú. Este documento ofrece una visión general de las fases de planificación, diseño, operación, mantenimiento y clausura de los depósitos de residuos mineros. El propósito de esta guía es servir como referencia y recurso técnico para facilitar la preparación de Estudios de Impacto Ambiental, conforme a las regulaciones destinadas a la protección ambiental en la industria minera y metalúrgica. (Ministerio de energía y minas, 2023)

La ley de cierre de minas establece normativas sobre las responsabilidades y procesos que los responsables de la actividad minera deben seguir al elaborar, presentar e implementar el plan de cierre de minas. En esta ley se detalla cómo se van a manejar los relaves y otros aspectos relacionados con el cierre de la operación minera. En un plazo máximo de un año después de haber sido aprobado el estudio de impacto ambiental se debe presentar el plan de cierre de minas (Congreso de la República del Perú, 2003, Ley 28090, Artículo 1).

Finalmente, el Ministerio de Energía y Minas tiene la responsabilidad de supervisar y fiscalizar que las empresas mineras cumplan con las normativas y regulaciones vinculadas a la gestión de relaves. Para ello, en la sección de asuntos ambientales de su página web, se encuentran publicadas las normas técnicas para el diseño ambiental (Ministerio de energía y minas, 2023).

### 3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO

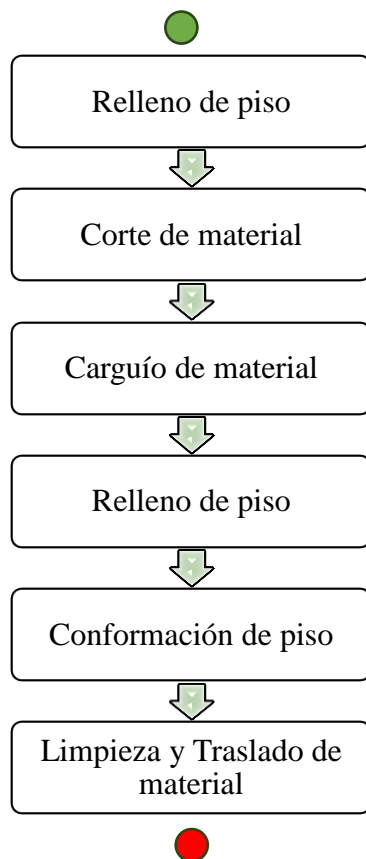
#### 3.1 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

Para nuestro caso de estudio se realizó una investigación de tipo descriptiva – deductiva, este tipo incluye estudios teóricos, modelos teóricos, abstracción y explicación. Por lo que, es necesario resaltar, que el proyecto comprende un diseño que parte de una oportunidad general con el fin de obtener criterios específicos.

En representación a lo anterior, se tiene el método de corte y relleno como un modelo teórico. Este se adapta a los criterios, como se visualiza en la figura 6, de cortar el relave antiguo mediante un diseño que tiene parámetros de minado de anchos y alturas de bancos de 5 m, ángulos de 32° y 29° para frentes permanentes y operativos, respectivamente. Cabe mencionar que el corte se realizará con la excavadora CAT 336D. Seguidamente, se utiliza el criterio de relleno de material estéril para continuar con el minado en el piso mejorado. Finalmente, se carga el material minado en los volquetes para trasladarlos a planta de beneficio.

**Figura 13.**

*Diagrama de flujo de criterios de corte y relleno*

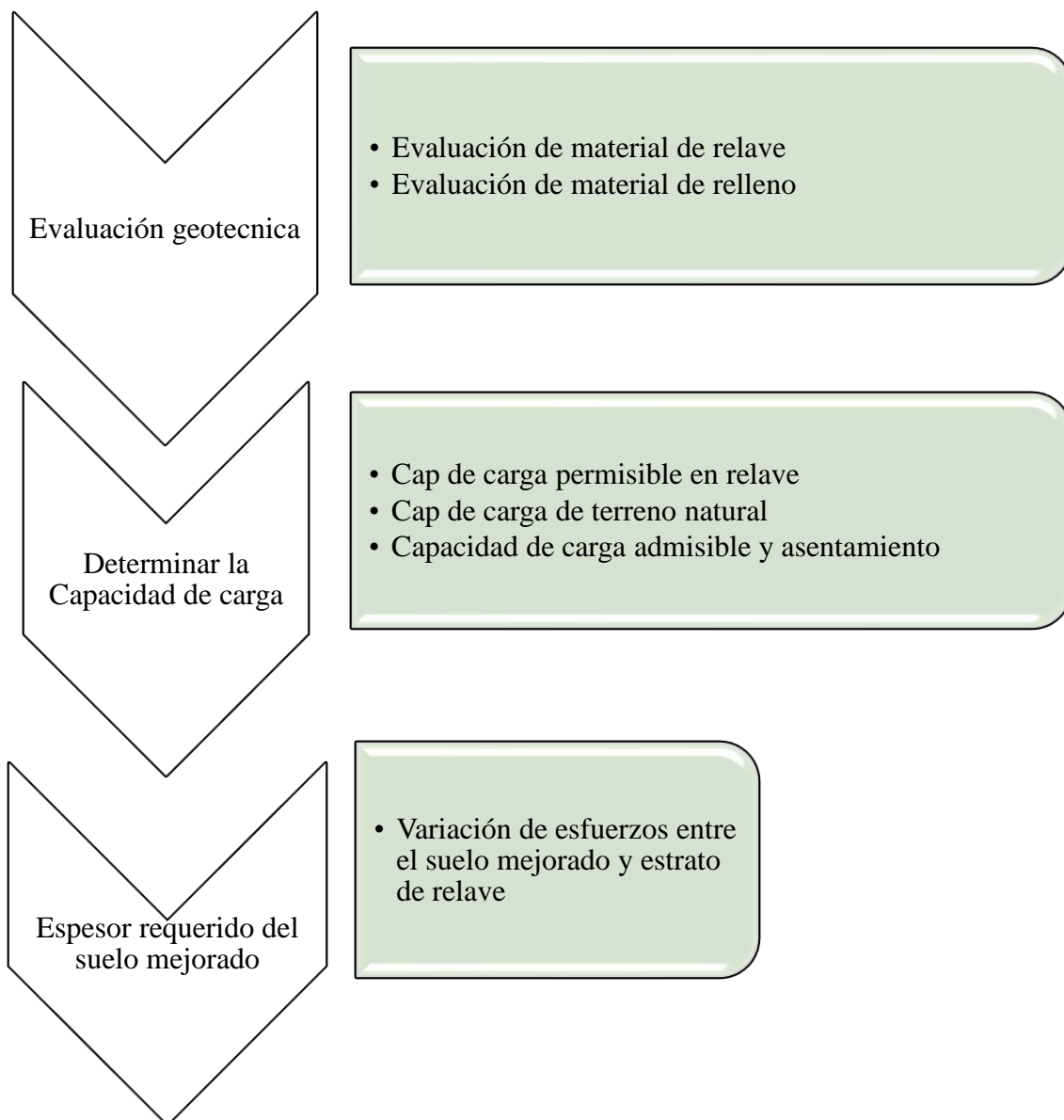


*Nota:* En el diagrama se muestra los pasos a seguir en el minado de una relavera antigua que son una recopilación de la metodología de corte y relleno.

De igual manera, el método de cálculo de capacidad portante admisible en la relavera antigua consistió en evaluar la capacidad de carga que soporta el terreno de relave y determinar el espesor necesario de relleno para que la flota, que abarcó de cuatro volquetes de 20 m<sup>3</sup> y una excavadora CAT puedan realizar los trabajos de minado en la relavera. En la figura 7 se visualiza el proceso de la metodología.

**Figura 14.**

*Pasos para calcular la capacidad portante*



Asimismo, como se muestra en la figura 7, se tiene en cuenta la evaluación geotécnica, tanto del material de relave y material de relleno o conformación de piso, también, se determina mediante cálculos del método Terzaghi y Peck (1967), que consiste en tener ensayos de penetración estándar SPT con múltiples valores. Terzaghi y Peck (1967) proponen la siguiente relación para un asentamiento máximo de  $\Delta q_a$ : =1 pulgada y una distorsión máxima de  $P_a=0.75$  pulgadas. Como se muestra en la formula siguiente.

$$P_a = \frac{3\Delta q_a(tsf)}{N} \left( \frac{2B}{1+B} \right)^2$$

Donde:

$\Delta q_a$ : Capacidad de carga admisible (tsf).

p: Asentamiento (pulgadas).

N: Valor de N promedio de SPT a lo largo de  $z=B$  (Z. profundidad).

B: Ancho de la zapata (pie).

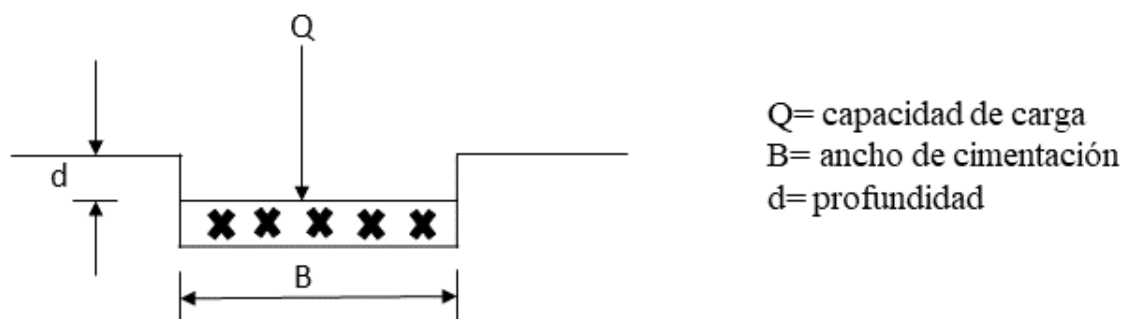
De la ecuación anterior la capacidad de carga admisible  $\Delta q_a$  se determina mediante la siguiente relación:

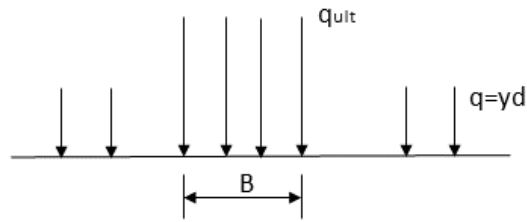
$$\Delta q_a = \frac{p_a N}{3} \left( \frac{1+B}{2B} \right)^2$$

Finalmente, se obtiene con esta metodología de cálculo de capacidad portante admisible el espesor de suelo mejorado requerido para conformación de piso del relave antiguo de 1 a 1.5 m. A continuación, la figura 8 muestra el esquema de esfuerzos de carga al suelo.

### Figura 15.

*Esquema de carga*





$q_{ult}$  = capacidad última de cimiento  
 $B$  = ancho de cimentación  
 $\gamma$  = peso unitario del suelo bajo el cimiento  
 $d$  = profundidad  
 $C$  = cohesión efectiva  
 $\Phi$  = ángulo de fricción interna del suelo portante  
 $\gamma$  = peso unitario del suelo bajo el cimiento

$C, \Phi, \gamma$  suelo

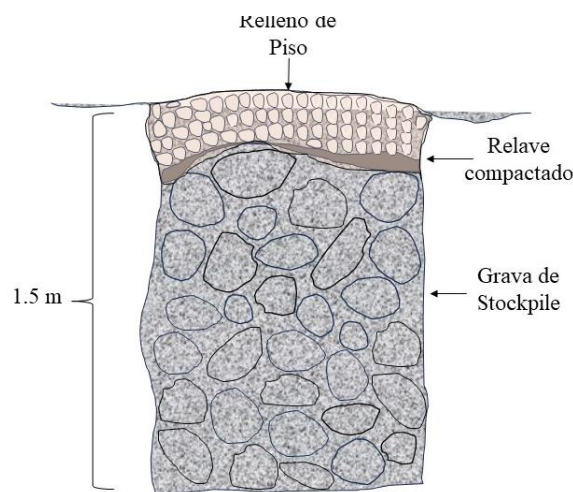
*Nota.* Se muestra de forma gráfica los esfuerzos que influyen en el piso que realizarían los equipos de línea amarilla.

Continuando con las técnicas que se utilizaron para el diseño, se tiene a la del uso de dren francés. Esta constó de abrir pozas de acumulación de agua de dimensiones 2.5 x 2.5 m y profundidad de 1.5 m. Se tuvo 5 pozas en la relavera antigua, estas se conectaron a la poza principal que tenía un diseño de 30 x 18 m y 3 m de profundidad. Es importante mencionar que mediante las aberturas estratégicas en las zonas no minadas se acumulaba el agua y se podía drenar con una bomba de extracción.

Adicionalmente, las aberturas tenían pendiente de -2% en las conexiones de las pozas a la poza principal y se colocaba material de relleno de stocks con material grueso, luego se compactaba el material, el cual servía para la infiltración del agua que se encontraba en el relave.

### Figura 16.

*Grafica de Dren francés*



*Nota.* Se muestra la gráfica de la técnica de dren francés con sus componentes para que infiltre el líquido exterior.

Finalmente, otra técnica usada fue el uso de plataformas de secado esto consistió en usar algunos procedimientos. Primero, al identificar el material con porcentaje de humedad de 28% aproximadamente en niveles inferiores del minado, se realizó el traslado a plataformas habilitadas para la acumulación de material con un volquete. El secado de relave saturado demoraba en promedio de 5 a 6 días, dependiendo del tema climático, ya que en épocas de lluvias se demoraban entre 7 a 9 días. Siguiendo con el procedimiento, en los días 3 y 5 se realizaba el volteo de material saturado y la acumulación de material seco para su transporte a planta. Se tenían 3 plataformas de secado y se acumulaba por rumas.

En síntesis, con la indagación de los métodos mencionados se realizará un análisis de los criterios más convenientes, para el cual se tiene en cuenta los dimensionamientos, flota y limitantes y se pueda minar la relavera antigua y reaprovechar los elementos que posee.

### **3.2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN**

#### **Metodología**

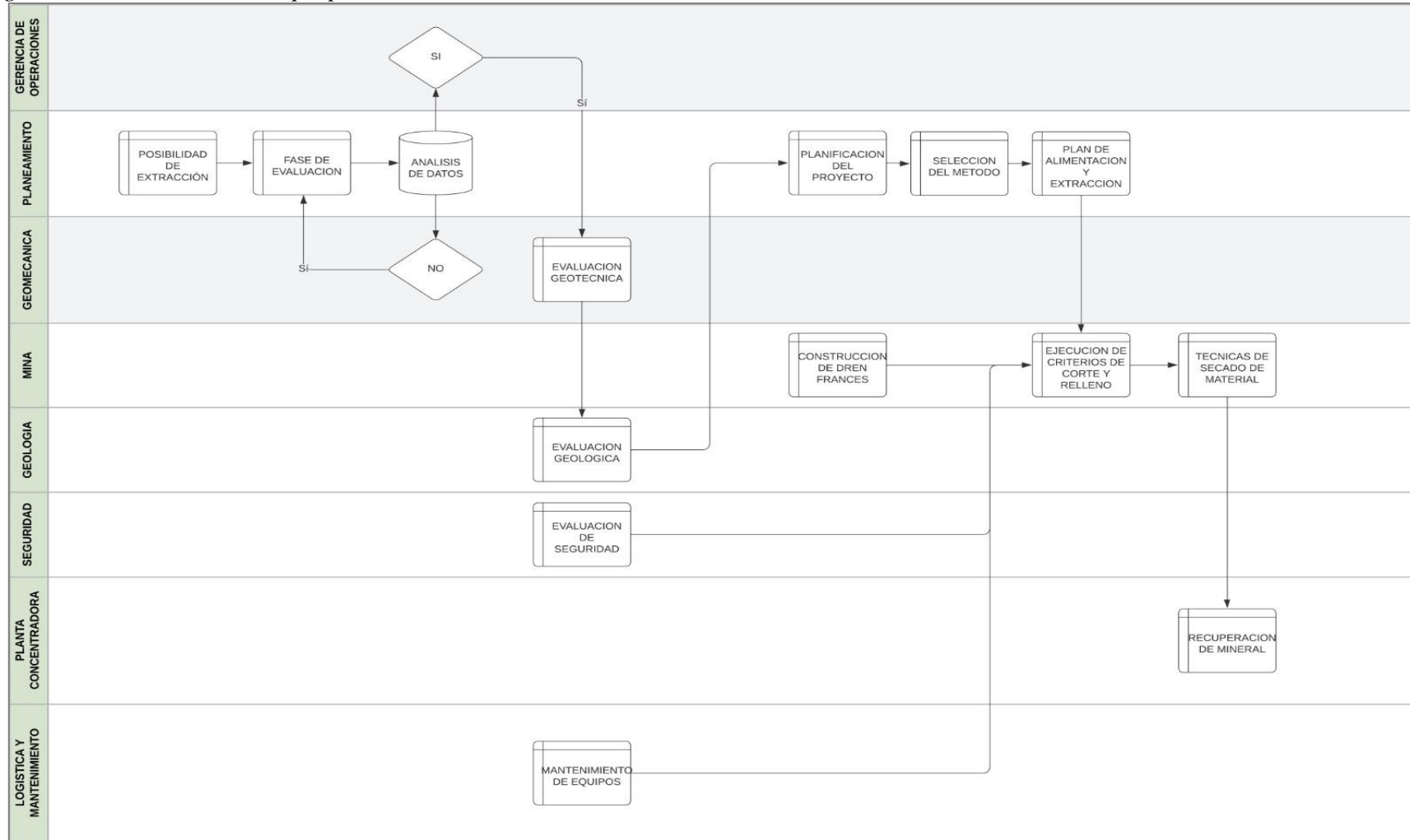
En el presente TSP se ha identificado los criterios más adecuados para realizar el diseño de la solución, el más importante fue adaptar el método de corte y relleno para minar la relavera antigua, los procedimientos tomados fueron el corte de relave acumulado y su relleno de piso con material estéril de los stocks. Asimismo, se utilizó los conceptos de capacidad portante con el objetivo de determinar la cantidad de relleno que se debe implementar para que los equipos de línea amarilla puedan trabajar de manera segura. Finalmente, las técnicas de uso de dren francés para el drenaje de agua y la técnica de secado en plataformas fueron fundamentales para plantear la secuencia de minado más adecuada.

En el mismo contexto, la propuesta de la solución es implementar los criterios mencionados anteriormente en una mina superficial del Perú, que posee componentes mineros como oportunidad de aprovechamiento, que es la relavera antigua. Esta será donde se realizará la ejecución aplicada y práctica de la investigación, cabe mencionar que se tomaron en cuenta bases teóricas y prácticas que implicó realizar el minado.

A continuación, se muestra un diagrama que compila el diseño de la solución de forma general.

**Figura 17.**

*Flujograma del desarrollo de la propuesta*



*Nota:* En el grafico se muestra el flujo de procesos que se plantea seguir para la implementación en la mina superficial.



El desarrollo de la propuesta de forma general inicia con la posibilidad de extracción de la una relavera antigua, pasando por la fase de evaluación y análisis de data histórica donde se evalúa si el proyecto es viable o no, esto lo realizan un equipo multidisciplinario liderado por el jefe de planeamiento y aprobado por la gerencia de operaciones. Después, si los resultados de la evaluación son positivos se realizan los estudios geomecánicos y geotécnicos para determinar la estabilidad física del área a minar, del mismo modo se realiza un estudio geológico que se basa en darle certeza a las leyes y clasificar las zonas con mayor mineral.

Seguidamente, se pasa al proceso de planificación del proyecto que involucra realizar un diseño teniendo las recomendaciones geomecánicas, geológicas y operativas mina, se elabora un plan de extracción y plan de alimentación, mientras tanto de forma paralela se va evaluando la construcción de pozas en la relavera por el equipo de operaciones. Una vez obtenido los requisitos del proceso de planificación se pasa a la etapa de ejecución, que conlleva a implementar la secuencia adecuada que para el caso es el corte y relleno.

Luego, para el transporte de mineral se toma en cuenta el proceso de técnicas de secado, puesto que el material saturado requiere este criterio, como proceso final del flujograma se tiene en cuenta el traslado hacia planta concentradora para su reaprovechamiento. Es importante mencionar que un blending adecuado fue de 70 % de tajos y stockpile y 30% de relavera antigua, puesto que ayudaba a la recuperación y que las leyes se mantengan como las planeadas.

Otro punto esencial para mencionar es que el estudio se basa en realizar la implementación de los criterios de corte y relleno en una relavera antigua que posee suelos granulados que está compuesta por arena limosa y grava arcillosa. Estos estratos se separan entre 2.93 a 6.56 m aproximadamente. Así mismo, el nivel más alto de la relavera fue de 4595 y el más bajo fue de 4580 en promedio, cabe resaltar que la topografía es irregular y en algunos puntos el nivel de contacto es de 4577.

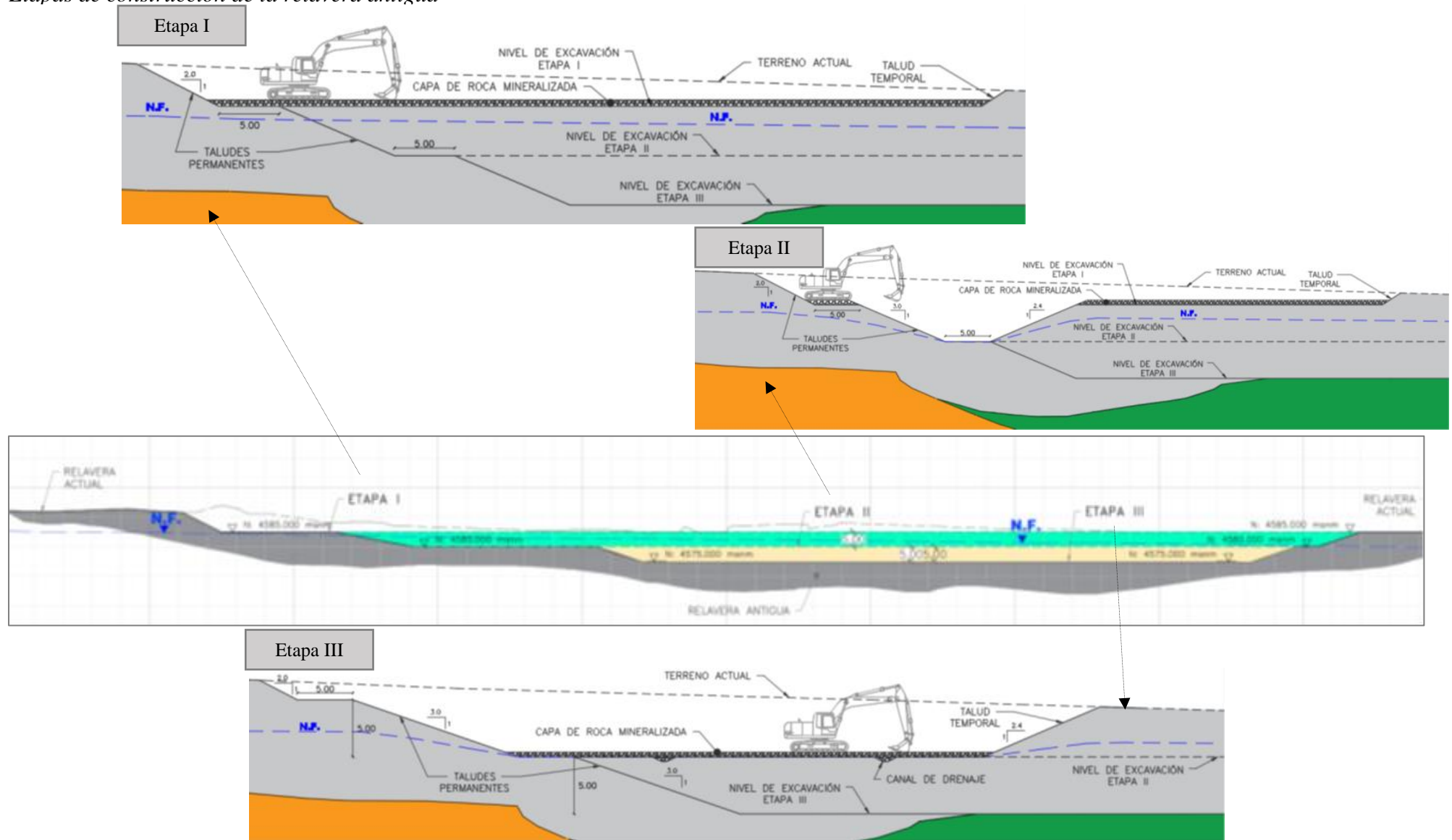
Para la extracción de relavera se tomó en cuenta tres etapas para el minado, en la figura 18 se visualiza la etapa de construcción. La primera, considera la extracción la extracción de la capa superficial de relave que se le denomina relave seco, esta extracción se realizaba con excavadoras y volquetes, cabe mencionar que se rellena el área minada con stockpiles de baja ley. La segunda etapa, consiste en la extracción de los relaves por debajo del nivel

freático y la remoción del sector del perímetro en una franja de hasta 20 m, con el fin de disminuir el agua y permita realizar el proceso de extracción. La tercera etapa, se realizó la remoción de la parte inferior con parámetros de banquetas a 5m, altura a 5 m y ancho 20 m y el control del flujo de agua de filtración ( $Q = 0.03 \text{ l/s} = 108 \text{ l/h} = 0.108 \text{ m}^3/\text{h} = 2.59 \text{ m}^3/\text{D}$  Drenes de captación conectadas hacia la poza 02)

La implementación de los criterios para recuperación de relave antigua comienza por un trabajo en gabinete, se realizó una investigación y estudio de data relacionada al caso de estudio, es decir se estudió la certeza geológica y la limitante geomecánica de la empresa minera superficial, si bien es cierto no se había realizado minado en el área de estudio, pero si se realizaron pruebas de laboratorio de corte directo y ensayos SPT que confirmaron la presencia de minerales como Zn, Pb, Ag y Cu.

**Figura 18.**

*Etapas de construcción de la relavera antigua*



Se recalca en el tema de que la unidad minera realizó estudios geotécnicos, geomecánicos y geológicos como se visualiza en la figura 19. Luego, se realizó un trabajo en campo, que consistió en hacer pruebas de tránsito de un volquete para verificar que el suelo mejorado, que se planteó según el estudio geomecánico, funcione de manera segura. Después se pasó a incrementar volquetes dando como resultado eficiente el rellenado de piso para ingresar a minar en la relavera antigua.

**Figura 19.**

*Evidencia de la realización de SPT en la relavera antigua*



*Nota.* Se evidencia el proceso de ejecución de SPT de la contrata encargada de realizar los estudios geomecánicos y geotécnicos.

Por último, se realizó la planificación del proyecto donde se involucraron áreas operativas, como operaciones mina, geomecánica, geología y planeamiento a corto plazo. En este último, se realizó algunos escenarios de plan de extracción que involucraron la elección del método óptimo para minar. En principio, se corta el relave seco y se apila para su carga, luego un volquete lleva material estéril de stock para realizar el relleno de piso a 1 metro, el mismo camión realiza el traslado de material seco a planta de beneficio. Después, otro volquete, que se queda fijo en el área de estudio, realiza trabajos de traslado de relave saturado a las plataformas de secado. En síntesis, estos procedimientos dan la secuencia que involucra los criterios del método adaptado de corte y relleno y las otras técnicas.

### 3.3 VALIDACIÓN DEL PROYECTO

#### a. Resultado del Objetivo específico 1: Estudiar la capacidad portante del terreno de relave y espesor necesario de material de relleno

Para el estudio de la capacidad portante se revisó la información geotécnica y se desarrollaron tres ensayos de penetración estándar (SPT) de laboratorio desde los 2 hasta los 13 metros de profundidad y se llegó a la conclusión que el relave está conformado por arena limosa y cuenta con un valor promedio de 10 golpes/pie. El nivel freático se encuentra variable entre 2.93 y 6,56 metros de profundidad.

El material de relleno tiene las siguientes propiedades geotécnicas:

- Angulo de fricción interna  $\phi = 35^\circ$
- Cohesión =0
- Peso unitario = 1.85 ton/m<sup>3</sup>

Primero se calcula la capacidad de carga del depósito de relave conformado por arena limosa, con los valores del ensayo de penetración estándar SPT. La capacidad de carga admisible se determina mediante el método de Terzaghi y Peck, ellos proponen la siguiente relación para un asentamiento máximo de  $\rho = 1$  pulgada y una distorsión máxima de  $\delta = 0.75$  pulgadas.

$$P_a = \frac{3\Delta q_a(tsf)}{N} \left( \frac{2B}{1+B} \right)^2$$

El ancho de la cimentación es de  $B=3.0$ pie

$$\Delta q_a = \frac{p_a N}{3} \left( \frac{1+3}{2 \times 3} \right)^2$$

$$\Delta q_a = 1.48(tsf)$$

$$\Delta q_a = 1.61kg/cm^2$$

$$\Delta q_a = 16.1ton/m^2$$

El método de Terzaghi & Peck considera el nivel freático alto, en condiciones críticas consideramos que el nivel freático se encuentra en la superficie del estrato de relave  $d_w=0$ , el valor de asentamiento será de 2 pulgadas y  $\Delta q_a$  se reduce 50%. Luego se obtiene:

$$\Delta q_a = 16.1 \times 0.5 \text{ (Ton/m}^2\text{)}$$

$$\Delta q_a = 8.0 \text{ (Ton/m}^2\text{)}$$

Luego de realizar los cálculos se llega a la conclusión de que la carga admisible del estrato de relave es  $\sigma_{adm} = \Delta q_a = 0.80kg/cm^2$  (8.0ton/m<sup>2</sup>).

Segundo, se calcula la capacidad del terreno natural para ello se ha realizado un estudio de penetración estándar SPT-1 hasta una profundidad de 10.45m que compete el terreno natural. Se aplica el mismo método y se obtiene es  $\sigma_{adm} = \Delta q_a = 2.0kg/cm^2$  (20.0ton/m<sup>2</sup>).

Tercero, se realiza un ensayo de suelo mejorado para el tránsito de equipos pesados con un material que tiene las siguientes propiedades geotécnicas:

- Angulo de fricción interna  $\phi = 35^\circ$
- Cohesión =0
- Peso unitario = 1.85 ton/m<sup>3</sup>

La capacidad de carga admisible se calcula mediante la fórmula de Terzaghi y los factores de forma Vesic con la siguiente relación:

$$q_u = S_c C N_c + S_\gamma \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma + S_q (\gamma D_f) N_q$$

Los factores de carga  $N_c$ ,  $N_\gamma$  y  $N_q$  se determina mediante la siguiente relación:

$$N_c = \cotg\phi(N_q - 1)$$

$$N_q = e^{ntg\phi} tg^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$N_\gamma = 2tg\phi(N_q + 1)$$

Para 1.5m de profundidad, 1m de ancho de cimentación la capacidad de carga admisible es igual a  $\sigma_{adm} = 4.49kg/cm^2$  (44.9ton/m<sup>2</sup>).

**Tabla 3.***Propiedades geotécnicas de los tres ensayos de penetración*

Parámetros	Spt-1 relave - arena limosa	Spt-2 s. natural – grava arcillosa	Spt-3 s. mejorado – grava granular
Peso Unitario	17KN/m <sup>3</sup>	19KN/m <sup>3</sup>	18.5KN/m <sup>3</sup>
Angulo de fricción interna	33°	35°	35°
Cohesión	nula	20kpa	nula
N promedio de SPT	10golpes/pie	25golpes/pie	25golpes/pie
Nivel freático	Superficial	Superficial	Superficial

Es importante calcular el asentamiento del estrato del suelo mejorado por la carga de los vehículos pesados, se realizará el cálculo mediante el método elástico con la siguiente ecuación:

$$S_i = \frac{qB(1 - \mu^2)}{E_s} I_f$$

Donde:

$S_i$ =Asentamiento probable(cm)

$\mu$ =Relación de Poisson (adimensional)

$E_s$ =Modulo de elasticidad (Ton/m<sup>2</sup>)

$I_f$ =Factor de forma (cm/m)

$q$ =Presión de trabajo (Ton/m<sup>2</sup>)

$B$ =Ancho de la cimentación (m)

Datos del tipo de material a usar:

- Grava arenosa 15000Ton/m<sup>2</sup>
- Grava arenosa con bloques de roca  $\mu=0.15$
- Factor de forma

**Tabla 4.***Cimentación flexible*

Forma de la zapata	Valores de $I_f$ (cm/m)			
	Cimentación flexible			Rígida
Ubicación	Centro	Esquina	Medio	
Rectangular L/B=2	153	77	130	120
Rectangular L/B=5	210	105	183	170
Rectangular L/B=10	254	127	225	210
Cuadrada	112	56	95	82
Circular	100	64	85	88

En base al análisis de carga y asentamiento, la capacidad de carga admisible es igual a  $\sigma_{adm} = 4.49 \text{ kg/cm}^2$  ( $44.9 \text{ ton/m}^2$ ).

Por último, se realiza un ensayo de espesor requerido de suelo mejorado que está conformado por gravas y arenas sobre el relave en un espesor de 1.5 metros. Las propiedades geotécnicas del material son:

- Angulo de fricción interna  $\phi = 35^\circ$
- Cohesión = 0
- Peso unitario =  $1.85 \text{ ton/m}^3$

Se obtiene que la carga transmitida al estrato débil por el suelo mejorado de espesor 1.5m y la sobrecarga del equipo pesado será igual a  $q = 2.775 + 0.72 = 3.495 \text{ ton/m}^2$ , el cual es menor que la carga admisible del estrato de suelo tipo arena limosa  $q_{ad} = 8.0 \text{ ton/m}^2$ .

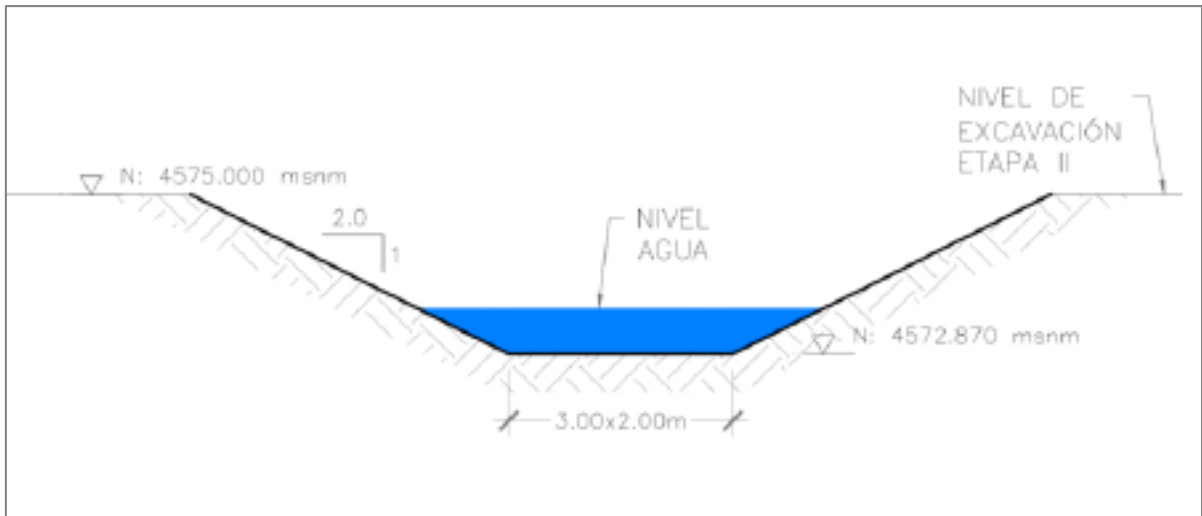
**b. Resultado del Objetivo específico 2: Determinar el diseño de un dren francés en el relave saturado.**

Los resultados para el control del relave saturado se hicieron con el diseño del Dren Francés en el nivel 4585m.s.n.m., este diseño tuvo consideración de crear una poza principal en la zona operativa y el nivel era el más bajo 4575 como se visualiza en la figura 20, esta se denominada poza 02.



**Figura 20.**

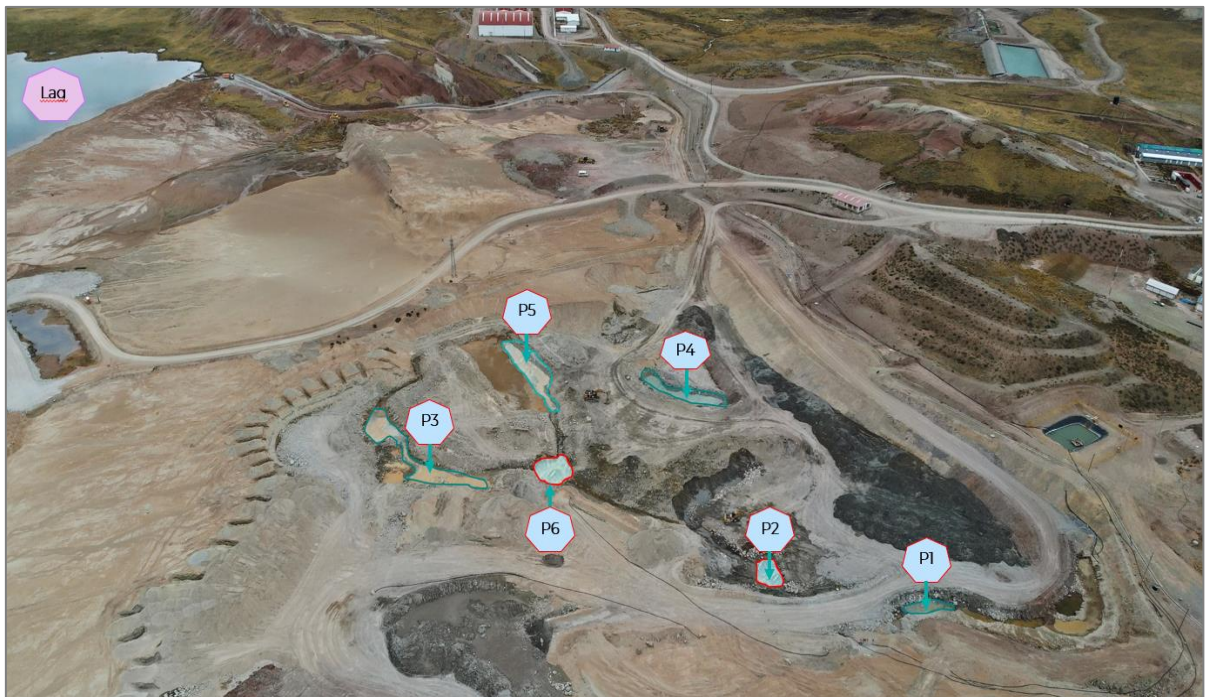
*Diseño de Poza 02 (bomba de extracción)*



Adicionalmente, se hicieron 5 pozas secundarias con ubicación estratégica, donde el nivel con el contacto del subsuelo en las zonas este, oeste, norte y sur eran bajos, en total se hicieron 6 pozas para el control topográfico, en la figura 12 se muestra la ubicación y nomenclatura de las pozas.

**Figura 21.**

*Ubicación y nomenclatura de las pozas de bombeo*

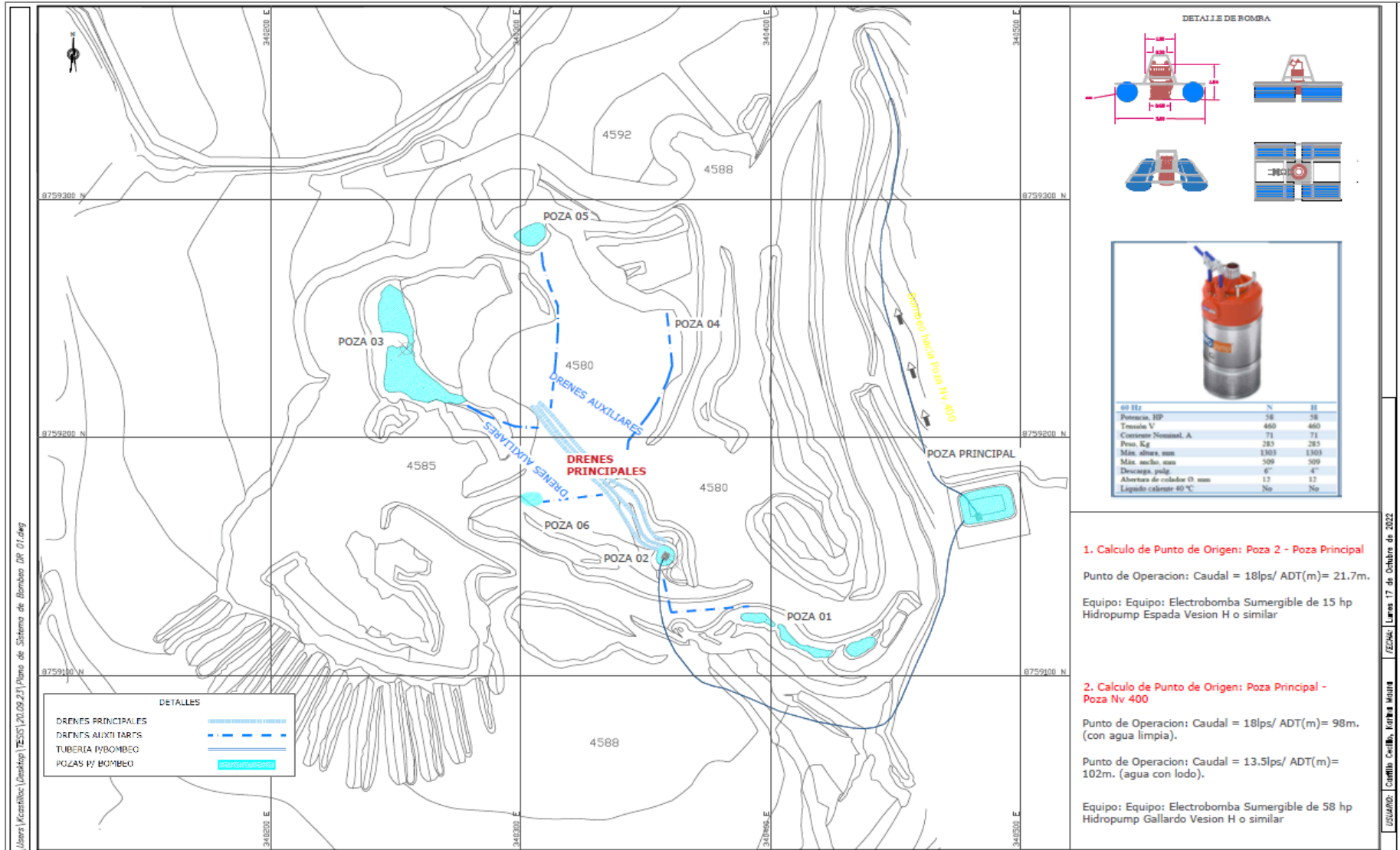


*Nota:* En la figura se muestra los puntos de controles de nivel de agua que lo realizaba el equipo de topografía, quienes verificaban si bajaba o subía el nivel de agua.

Con respecto al diseño, también se tomó en cuenta ejecutar las excavaciones tipo zanjas que sirvieron como drenes secundarios, que conectaban al dren principal, luego se rellenó con desmonte de granulometría gruesa que creaba vacíos y circulaba el agua hacia la poza 02, es importante mencionar que la gradiente fue de 1% en negativo con el fin de captar las aguas. En la figura 13 se muestra el diseño del Dren Francés con los parámetros ya mencionados.

**Figura 22.**

*Diseño del dren francés*



*Nota.* En el diseño se muestra el número de pozas y la circulación del dren francés

El control fundamental fue en la poza 02 donde también se ubicaba la bomba para la extracción de agua del relave saturado. Este se realizaba de manera diaria y se tomaba acción cuando se identificaba subidas en el nivel de agua. A continuación, como ejemplo se muestra la tabla de control de nivel de agua en la relavera antigua de un mes. Cabe resaltar que el monitoreo se realiza de manera diaria. A continuación, se muestra la tabla 4.

**Tabla 5.**

*Control topográfico de pozas de relavera*

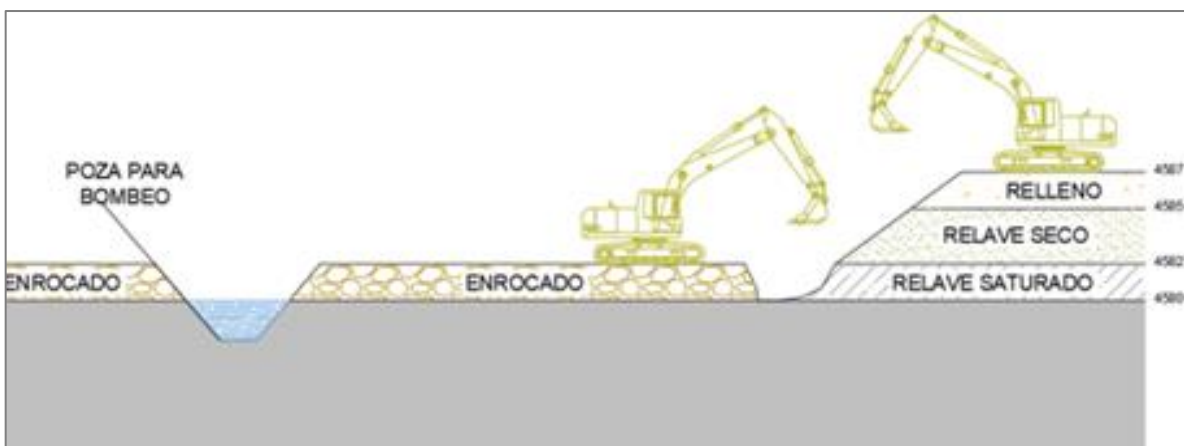
<i>Día</i>	<i>Poza 01</i>	<i>Poza 02 (bomba 1)</i>	<i>Poza 03</i>	<i>Poza 04</i>	<i>Poza 05</i>	<i>Promedio de Pozas</i>	<i>Laguna Aguascocha</i>	<i>Dif Altura (H)</i>	<i>Dif Altura (H)</i>
02-Set	4,581.115	4,579.545	4,584.431	4,584.205		4,582.324	4,585.544	3.22	0
03-Set	4,581.119	4,577.486	4,584.216	4,584.418		4,581.810	4,585.554	3.74	0.010
04-Set	4,581.072	4,577.725	4,584.221	4,584.405		4,581.856	4,585.530	3.67	-0.024
05-Set	4,581.131	4,582.569	4,582.569	4,582.740		4,582.252	4,585.524	3.27	-0.006
06-Set	4,581.081	4,580.216	4,583.863	4,584.423		4,582.396	4,585.547	3.15	0.023
07-Set	4,581.096	4,578.974	4,583.855	4,584.467	4,584.212	4,582.521	4,585.515	2.99	-0.032
08-Set	4,581.670	4,578.774	4,583.832	4,584.432	4,584.178	4,582.577	4,585.481	2.90	-0.034
09-Set	4,581.098	4,578.526	4,583.823	4,584.446	4,584.164	4,582.411	4,585.479	3.07	-0.002
10-Set	4,581.114	4,578.338	4,583.861	4,584.427	4,584.226	4,582.393	4,585.527	3.13	0.048
11-Set	4,581.124	4,578.664	4,583.814	4,584.356	4,584.000	4,582.392	4,585.538	3.15	0.011
12-Set	4,581.107	4,579.352	4,583.837	4,584.492	4,584.230	4,582.604	4,585.464	2.86	-0.074
13-Set	4,581.056	4,578.763	4,583.826	4,584.488	4,584.233	4,582.473	4,585.461	2.99	-0.003
14-Set	4,581.146	4,578.541	4,583.899	4,584.417	4,584.199	4,582.440	4,585.446	3.01	-0.015
15-Set	4,581.051	4,578.365	4,583.899	4,584.399	4,584.199	4,582.383	4,585.463	3.08	0.017
16-Set	4,581.087	4,579.092		4,584.380		4,582.018	4,585.496	3.48	0.033
17-Set	4,581.078	4,583.473		4,584.377		4,583.100	4,585.487	2.39	-0.009
18-Set	4,581.124	4,578.846		4,584.361		4,581.952	4,585.495	3.54	0.008
20-Set	4,581.086	4,579.651		4,584.306		4,581.933	4,585.507	3.57	0.012
21-Set	4,581.580	4,580.827				4,581.683	4,585.503	3.82	-0.004
22-Set	4,581.124	4,580.847				4,581.760	4,585.500	3.74	-0.003
23-Set	4,581.121	4,579.017	4,583.927	4,583.790	4,584.239	4,582.457	4,585.523	3.07	0.023
24-Set	4,581.194	4,579.873	4,583.898	4,583.774	4,582.859	4,582.410	4,585.503	3.09	-0.020
25-Set	4,581.254	4,580.438	4,583.926	4,583.786	4,584.209	4,582.682	4,585.502	2.82	-0.001
26-Set	4,581.123	4,580.417	4,585.479	4,583.802	4,584.209	4,583.006	4,585.479	2.47	-0.023
27-Set	4,581.055	4,578.846	4,585.508	4,583.767	4,584.188	4,582.673	4,585.508	2.84	0.029
28-Set	4,581.101	4,579.042	4,583.918	4,583.790	4,584.216	4,582.413	4,585.522	3.11	0.014
29-Set	4,581.139	4,579.092	4,583.924	4,583.451	4,584.248	4,582.371	4,585.483	3.11	-0.039

### c. Resultado del Objetivo específico 3: Seleccionar el método óptimo para la extracción de relave antiguo

Los resultados para la selección del método óptimo se realizó teniendo en cuenta el criterio de corte y relleno, pues para realizar el ingreso a la zona de extracción se utiliza el relleno de piso. Asimismo, se utilizó el criterio de capacidad portante para determinar el espesor de relleno de 1.5 m, el cual fue necesario usar en el proceso de relleno de piso y darles accesibilidad a los equipos a la relavera antigua para su reaprovechamiento. Después, se usó el corte directo del relave a una altura de 6.5 m, teniendo en cuenta los parámetros de minado 5 metros al altura y banco y un ángulo operativo de  $28^\circ$ , en la figura 14, se visualiza la secuencia de los criterios utilizados en el caso de estudio.

#### Figura 23.

*Secuencia de extracción*



*Nota:* En la figura se muestra la secuencia extracción y relleno.

Continuando con la secuencia, se conformó piso con material de stock pile de baja ley, este criterio fue implementado por dos razones, el primero no contaminar el mineral a recuperar de la relavera y el otro, al ser material de tajos tienen la granulometría para soportar como relleno de piso. Es importante mencionar que, en la zona de minado se clasificó dos tipos de material, uno el denominado relave seco y el otro relave saturado, este último se asentaba en la parte inferior, ya que contenía porcentaje de humedad mayor. Por ello, se utilizó el criterio de dren francés para facilitar la captación de agua.

**Figura 24.**

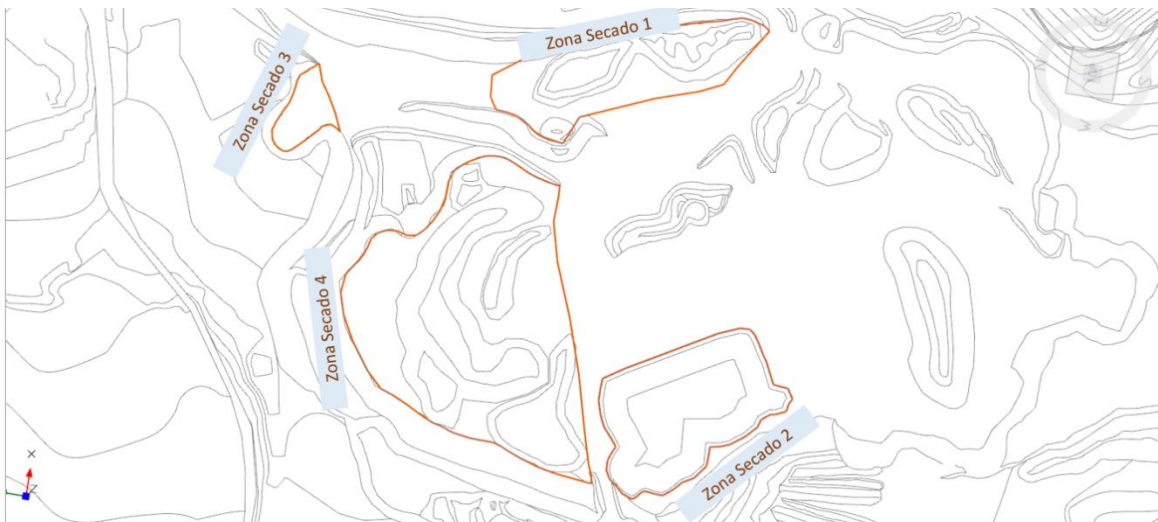
*Secuencia de minado en Relavera Antigua*



Del mismo modo, se implementó la técnica del secado de material como subproceso, puesto que a partir del nivel 4585 msnm se identificó relave saturado y mientras se iba profundizando se incrementaba el agua. Por consiguiente, se realizaba trabajos de movimientos internos, para lo cual se tenía un volquete y una excavadora trabajando en las dos guardias con el propósito de secar el material saturado y luego de los 7 días de secado, realizar el traslado a planta concentradora. A continuación, se muestra en la figura Y las plataformas de secado, que tenían una capacidad de 35 kt y se realizaban el volteo de material cada 2 días para su mejor secado y así continuar con la secuencia.

**Figura 25.**

*Nomenclatura de plataformas de secado*



Siguiendo con la secuencia, el siguiente paso es el carguío de relave seco en los volquetes, paso siguiente es el transporte de material en una ruta de 2.54 km hacia la planta concentradora. Los volquetes que retornaban a la relavera hacían paradas en los stocks piles y se cargaba gravas para la conformación de piso y enrocado en la zona a minar. Finalmente, se realizaba la limpieza y traslado de relave seco a planta de beneficio.

**3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

**Objetivo específico 1: Estudiar la capacidad portante del terreno de relave y espesor necesario de material de relleno.**

Después de realizar el estudio y análisis de carga de capacidad portante se identificó que los ensayos de penetración (SPT), que en este caso fueron tres, han sido fundamentales para darle control al desafío de hundimiento de equipos. En los estudios de SPT se identificó que la profundidad de la relavera antigua fue de 13 a 15 metros hasta llegar a la topografía natural donde se encontraron materiales compuestos de arena fina y arenas limosas (muy húmeda) proveniente de relave, también, se identificaron arcillas arenosas, arcillas arcillosas, arcilla limosa, arcilla proveniente de terreno natural. Además, después de realizar los primeros ensayos se determinó que la capacidad de carga fue de 8.0 ton/m<sup>2</sup> y la capacidad de carga fue de 20 ton/m<sup>2</sup> y en el tercer ensayo que se realizó en suelo mejorado se determinó que la capacidad de carga fue de 45 ton/m<sup>2</sup>. Por ello, según el análisis de variación de esfuerzos en el estrato de relave se evidencia que tiene un comportamiento adecuado y no se generan esfuerzos que supere la capacidad de carga admisible del estrato de relave. Después del análisis del estudio geomecánico se identificó que se recomienda rellenar el piso con material de stockpiles de baja ley a 1.5 m y así darle resistencia al piso y que los equipos ingresen a la zona del minado sin riesgos de hundimiento.

### **Objetivo específico 2: Determinar el diseño de un dren francés en el relave saturado**

Teniendo en cuenta los parámetros operativos se realizó el diseño del Dren francés. Después de implementar esta metodología en una relavera antigua se identificó que sirve para controlar el agua que contenía el relave saturado. Asimismo, luego de realizar el diseño se pasó a ejecutar en campo 06 pozas que acumulaban agua del relave saturado. También, se ejecutaron drenes secundarios que conectaban tanto a las pozas y al dren principal. Este último, captaba aguas a la poza denominada 02, donde se ubicaba una bomba de 15 Hp y siguiendo con la secuencia el agua circulaba hacia la poza principal, que tenía una bomba de 58 Hp. Es importante mencionar que los controles topográficos de niveles de agua se realizaron de manera diaria, los cuales ayudaron a monitorear las subidas del nivel del agua en las pozas de la relavera antigua para así poder realizar el control pertinente en gabinete y campo.

En síntesis, con la implementación del diseño de dren francés se puede afirmar que en la relavera antigua se ha podido evitar inundaciones en la zona de minado.

### **Objetivo específico 3: Seleccionar el método óptimo para la extracción de relave antiguo**

Para la extracción de mineral se determinó el método más óptimo, que abarcó la combinación de criterios de corte y relleno, cálculo de capacidad portante, técnicas de dren francés y



secado de material. Estas metodologías fueron fundamentales para la ejecución de la relavera antigua, pues con la carga portante estudiada se obtuvo el 1.5 m de relleno para que los equipos puedan circular de maneja segura en la zona de minado, también, la extracción se realizó siguiendo la secuencia de corte de material, traslado de relave seco a planta concentradora y nuevamente el relleno de piso para continuar con el ciclo. Es importante mencionar que como trabajo paralelo se realizó el minado de relave saturado, trasladándose así a las plataformas para el secado y después de siete días en promedio se realizaba el remanejo a planta de beneficio para su recuperación.

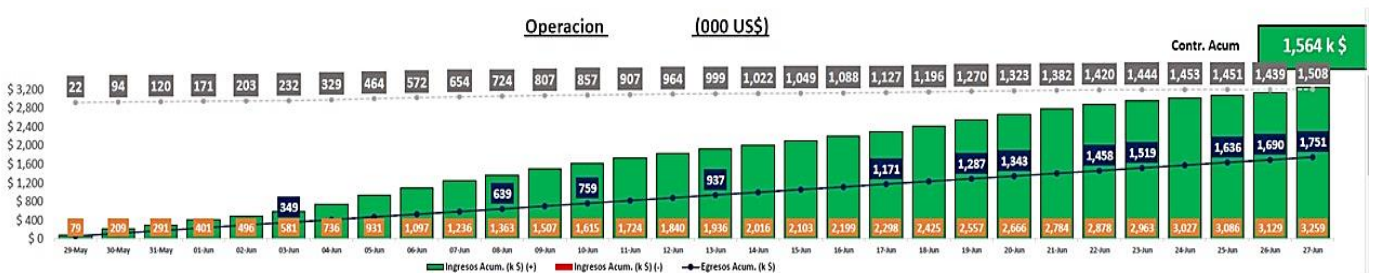
Igualmente, al analizar la secuencia de extracción en la relavera antigua se puede afirmar que dichos criterios implementados dieron resultados positivos, puesto que se obtuvo la recuperación de minerales como zinc, plomo y plata.

### 3.5 IMPACTO ECONOMICO

La investigación demuestra que hay un valor económico adicional al extraer la relavera antigua en una mina a tajo abierto. Para ello, se ha realizado un comparativo de contribución por zona de extracción tales como: Tajos, Relavera antigua y Stock piles. La data utilizada fue de un mes, donde se muestra el aporte de la relavera antigua en valor positivo. A continuación, se muestra la figura 26 de la contribución total, que da un total acumulado de 1,564 k \$ donde se visualiza el aporte por días, se importante mencionar que los ingresos acumulados superaron los egresos y se tuvo ganancias en ese periodo.

**Figura 26.**

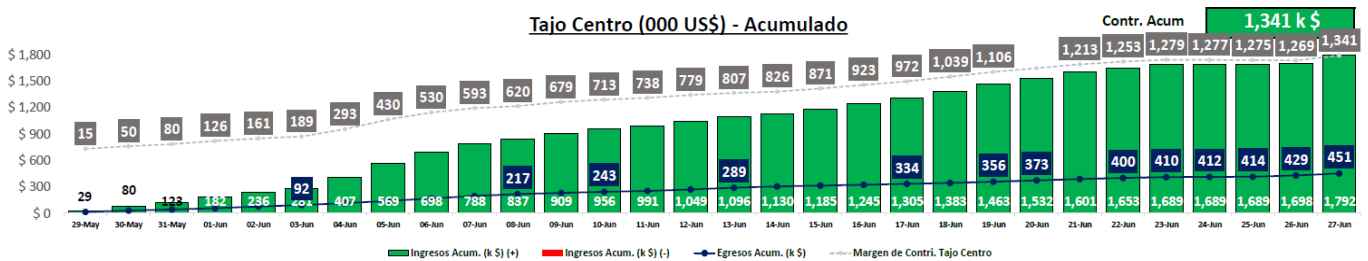
*Contribución mensual por Extracción total*



Asimismo, se muestran en la figura 27 la contribución por tajo centro donde indica la contribución acumulada en el mes con valor de 1,341 k \$, cabe mencionar que esta zona era la que mayor contribución aportaba en la mina superficial, también se aprecia en el gráfico los ingresos por esta zona de extracción.

**Figura 27.**

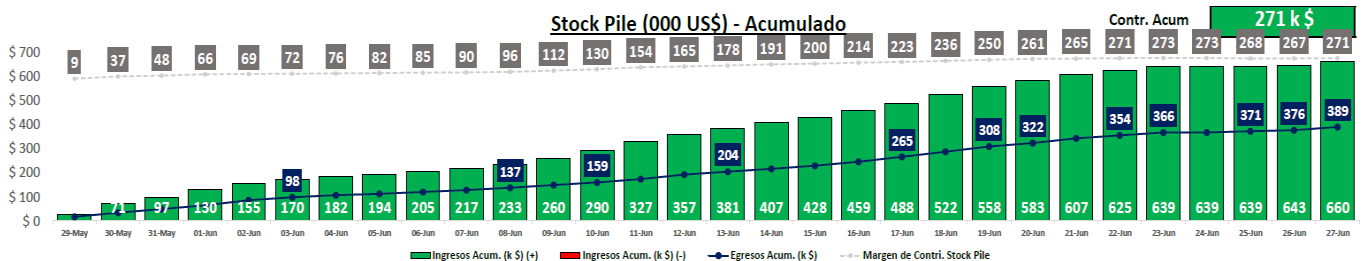
*Contribución por Tajo - Centro*



En la figura 28, se muestra la contribución de la zona de Stockpile denominada de alta ley, donde se visualiza la contribución de 271 k \$, es importante mencionar que esta zona extraída daba un aporte positivo en ingresos acumulados.

**Figura 28.**

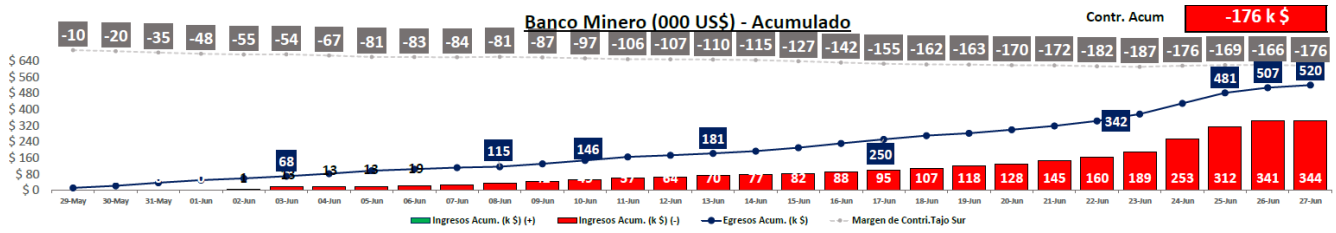
*Contribución Stockpile*



Seguidamente, en la figura 29 se visualiza la contribución de Tajo centro – Banco Minero que tuvo una contribución de -176 k \$ esta zona se encontraba en preparaciones para su minado, por lo que se extrajo más desmonte que mineral y el resultado fue una contribución acumulada en negativo, es decir hubo más egresos que ingresos en esta zona.

**Figura 29.**

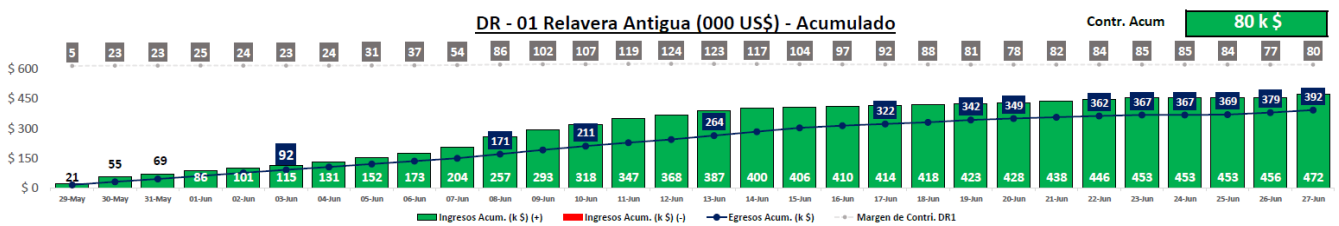
*Contribución Tajo centro- BM*



Finalmente, en la figura 30 se observa el aporte de la zona de extracción de la relavera antigua se tiene un valor de contribución acumulada de 80 k \$, que nos lleva al análisis de que los ingresos fueron mayores que los egresos al extraer la relavera antigua. Es importante mencionar que la relavera antigua aportó un 5% al total de la contribución de la mina superficial en ese mes de evaluación. Esto ha permitido ampliar la vida útil de la unidad minera superficial, generar ingresos económicos y crear oportunidades laborales.

**Figura 30.**

*Contribución Relavera antigua*



## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 CONCLUSIONES**

- Con respecto a lo estudiado en los ensayos de penetración estándar y la ecuación de Terzaghi & Peck se logró determinar la capacidad portante y el espesor del suelo mejorado. La capacidad de carga del estrato mejorado es de  $\sigma_{adm} = 45\text{ton/m}^2$  y el asentamiento es menor a 1 pulgada. También, el espesor del suelo mejorado fue de 1.5m para realizar el minado en una relavera antigua.
- Se concluye que mediante la implementación del dren francés se logra controlar la limitante de relave saturado, el agua que se tenía en el área de minado fue captado mediante 5 pozas ubicadas de manera estratégicas, estas se encontraban conectadas a la poza 02, poza de bombeo, que desembocan a la poza principal.
- Al analizar los criterios, métodos y técnicas, se concluyó que el método óptimo para la extracción de relave antiguo se da mediante la implementación de los criterios de corte y relleno. Este consiste en la conformación del piso para el tránsito de los equipos, realizar el corte, carguío de ruta interna (relave saturado – se envía a plataformas de secado), carguío de ruta larga (relave seco – planta concentradora), relleno con material mejorado, conformación de piso, limpieza y traslado de material de relave.

### **4.2 RECOMENDACIONES**

- Se recomienda verificar de manera continua el suelo mejorado puesto que debe ser granular con un porcentaje de finos menor que 5%. Además, se debe asegurar la conformación del piso con una motoniveladora.
- En referencia a la implementación del dren francés se debe realizar de manera continua los controles topográficos para medir los niveles de agua y tener controlado los horarios de bombeo de la poza 02 y la poza principal para tener una medición de subida niveles de agua exacta.
- Para la implementación del criterio de corte y relleno se sugiere que se realice en una mina superficial y cuente con stock pile de baja ley porque este va a servir para el relleno y conformación de suelo, así se evita contaminar el relave a extraer.

## 5. REFERENCIAS

- Alcalde J., Kelma U., Vergarac D. (2018). Historical assessment of metal recovery potential from old mine tailings: A study case for porphyry copper tailings, Chile. *Minerals Engineering* 124, 334-338. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.022>
- Aquise, R. (10 de septiembre de 2015). *Corte y relleno, cámaras y pilares: métodos de minería subterránea*. Recuperado el 27 de agosto de 2023. De <https://www.gestiopolis.com/corte-y-relleno-camaras-y-pilares-metodos-de-mineria-subterranea/>
- Braja, M. (2014). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (4ta ed.) Cengage.
- Calderón M. (2020). *Reaprovechamiento de Relaves*. Recuperado 27 de agosto de 2023. De <https://www.petroenergia.info/post/reaprovechamiento-de-relaves>
- Calderon M., (2020, 27 de Julio). *Reaprovechamiento de relaves* PETROENERGÍA. Recuperado el 18 de septiembre de 2023, de <https://www.petroenergia.info/post/reaprovechamiento-de-relaves>
- Chwala M. (2019). *Undrained bearing capacity of spatially random soil for rectangular footings*. *Soils and Foundations* 59(5), 1508-1521. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.005>
- Cobbing J., Quispesivana L., Paz M., (1996) *Geología de los cuadrángulos de Ambo, Cerro de Pasco y Ondores. Hojas: 21-k, 22-k, 23-k – [Boletín A 77]*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/200>
- Cobbing J., Quispesivana L., Paz M., (1996) *Mapa Geológico del cuadrángulo de Ondores*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico <https://acortar.link/IXDZep>
- Congreso de la República del Perú. (1992). *Ley 18880 de 1992. Por lo cual se expide Ley General de Minería*.
- Congreso de la República del Perú. (2003). *Ley 28090 de 2003. Por lo cual se expide Ley que Regula el Cierre de Minas*.
- Congreso de la República del Perú. (2016). *Ley 27314 de 2016. Por lo cual se expide Ley General de Residuos Sólidos*.
- Cooperación Regional para la gestión sustentable de los recursos mineros en los países andinos. [MINSUS]. (2022, 6 de febrero). *Convertir un legado minero en oportunidades. El proyecto piloto en la mina Los Rosales, Perú* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=pzVqGwgV-LA>

- Edraki M., Baumgartl T., Manlapig E., Bradshaw D., Franks D., Moran C., (2014). *Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches*. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>
- Enriquez A., Hermosa P., Collahuazo L., Acosta F., Feijoo C., Quezada M., Ibarra D., (2019). Estudio de caso para el aprovechamiento de relaves mineros procedentes de la concesión Campanillas, Zamora Chinchipe-Ecuador, como agregado para la elaboración de adoquines. *Geolatitud*, 5(1), 34-42. <https://geolatitud.geoenergia.gob.ec/ojs/ojs/index.php/GeoLatitud/article/view/114>
- Environmental Law Alliance Worldwide (2010). *Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs*. <https://www.elaw.org/mining-eia-guidebook>
- Falagán C., Grail B., Barrie D. (2017). New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering* 106, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.008>
- Gwak H., Seo J., Lee D. (2018). Optimal cut-fill pairing and sequencing method in earthwork operation. *Automation in Construction* 87, 60-73. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.010>
- Hume Ingeniería (14 de marzo de 2022). *Drenaje francés: diferencia con el drenaje común*. Recuperado 27 de agosto de 2023. De <https://humeingenieria.es/blog/drenaje-frances-diferencias-con-el-drenaje-comun/>
- Ingeoexpert (2018). Minería a cielo abierto: *¿Qué es, ¿cuáles son sus ventajas y qué tipos hay?* *INGEOEXPERT*. Recuperado el 27 de agosto de 2023, de <https://ingeoexpert.com/2018/01/19/mineria-cielo-abierto/>
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (2023). *Boletines Geológicos / Boletín Ingemmet. Serie A: Carta Geológica Nacional*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/200>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2014). *Perú: Principales Indicadores Departamentales 2008-2014*. <https://goo.su/ZTTxcco>
- Marchese L., (2017). *Oportunidades y desafíos actuales en proyectos mineros en el Perú*. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. Recuperado el 21 de agosto de 2023, de <https://iimp.org.pe/noticias/oportunidades-y-desafios-actuales-en-proyectos-mineros-en-el-peru>
- Mineral Commodity Summaries (2020, 12 de febrero). *U.S. Geological Survey*. Ministerio de Energía y Minas. Recuperado el 27 de agosto de 2023, de

- <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/81486-peru-entre-los-primeros-lugares-del-ranking-mundial-de-produccion-y-reservas-mineras>
- Ministerio de Energía y Minas (2023). *Asuntos ambientales mineros – Normas Técnicas Para Diseño Ambiental (Guías) – Fuente: DGAAM*.  
<https://www.minem.gob.pe/publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50>
- Ministerio de Energía y Minas (2023). *Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros*.  
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/relaveminero.pdf>
- MINSUS (2023). *Proyecto piloto: Reaprovechamiento de relaves abandonados de “Los Rosales” en Perú*. <https://minsus.net/proyecto-piloto-reaprovechamiento-de-relaves-abandonados-de-los-rosales-en-peru/>
- ProActivo (02 de noviembre de 2021). *Hudbay Perú obtiene reconocimiento por buenas prácticas en la gestión de relaves*. Recuperado el 10 de septiembre de 2023. De <https://proactivo.com.pe/hudbay-peru-obtiene-reconocimiento-por-buenas-practicas-en-la-gestion-de-relaves/>
- Ran J. (2019). Safe mining practices under wide spans in underground non-caving mines – Case studies. *International Journal of Mining Science and Technology* 29(4), 535-540. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.06.006>
- Rumbo Minero (2 de diciembre de 2019). *Camiones volquete: Fuerza y capacidad de carga que acompañan a la minería*.  
<https://www.rumbominero.com/revista/informes/camiones-volquete-fuerza-y-capacidad-de-carga-que-acompanan-la-mineria/>
- Sarker S., Haque N., Bhuiyan M., Bruckard W., Pramanik B (2022). Recovery of strategically important critical minerals from mine tailings. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10(3), 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107622>
- Servicio Nacional de Geología y Minería (2023). *Depósito de Relaves*.  
<https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2023). *Clima / Condiciones climáticas actuales*. <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=condiciones-climaticas>
- Terzaghi K., Peck R. (1967). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. El Ateneo S.A.