



**UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA DE GESTIÓN MINERA**

Aplicación de la metodología aguas abajo en la construcción de la segunda etapa de una presa de relaves para prolongar la vida útil en una mina en el Norte del Perú

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Para optar el título profesional de Ingeniero de Gestión Minera

**AUTOR(ES)**

Gonzales Mejia, Gian Pier	0009-0006-4983-5262
Gavidia Bocanegra, Juvenal Renato	0000-0001-5387-6012

**ASESOR(ES)**

Hinostroza Rios, Williams Elio	0009-0009-9666-607X
--------------------------------	---------------------

**Lima, 23 de noviembre de 2023**

## DEDICATORIA

*A Dios, por brindarme la confianza y la fortaleza necesaria para enfrentar este desafiante reto. A mis padres, por su constante respaldo a lo largo de mi trayectoria universitaria.*

*Gian Gonzales*

*A mis padres por brindarme el apoyo, soporte y confianza para lograr este paso en mi camino académico quienes con su sacrificio y dedicación concretamos este logro académico. A mis hermanos por su constante aliento, ánimo y apoyo que me han dado fuerzas en los momentos de más necesidad*

*Juvenal Gavidia*

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por permitirnos formar parte de su comunidad educativa y por proporcionarnos todos sus servicios de instrucción. Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a nuestros profesores que compartieron con nosotros su saber y apoyo, contribuyendo a forjarnos como futuros profesionales íntegros.

Queremos expresar un agradecimiento especial al Ing. Williams Elio Hinostroza Ríos, nuestro asesor, por brindarnos la oportunidad de beneficiarnos de su vasto conocimiento y experiencia científica. Su guía constante a lo largo de este proceso ha sido invaluable para nuestro crecimiento académico y desarrollo personal.

## RESUMEN

Los relaves mineros se almacenan de diversas maneras, adaptándose a sus características mecánicas y químicas, así como el relieve, las condiciones ambientales y el entorno socioeconómico. Sin embargo, el objetivo fundamental de cualquier depósito de relaves es garantizar un almacenamiento seguro, estable y rentable, al mismo tiempo que se minimizan al máximo los impactos negativos en la salud y el medio ambiente, tanto durante su vida útil como en el período posterior a su cierre. Por lo tanto, si no se llevaba a cabo la ampliación de la presa de relaves, se enfrentaría el riesgo de saturación y, como resultado, la posibilidad de desbordamiento. En respuesta a esta preocupación, se propuso la segunda fase de la ampliación del depósito de relaves bajo la metodología aguas abajo en una mina en el norte del Perú, con el propósito de aumentar su capacidad de almacenamiento, lo que representaría así una valiosa contribución a la preservación del entorno y la seguridad. El principal desafío que enfrentamos en nuestro trabajo de suficiencia profesional es el agotamiento de la vida útil de la primera presa. Por lo tanto, se llevó a cabo un estudio detallado que consideró diversos factores que pueden influir en el diseño y los cálculos, tales como la climatología, hidrología, topografía y geotecnia. Ello con el objetivo de aumentar la vida útil de la unidad minera por medio de una construcción de una segunda presa. También se buscó preservar el entorno circundante y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones, evitando impactos ambientales negativos y respaldando la responsabilidad social de la comunidad local. Al concluir el estudio, se amplió la segunda presa de relaves, aumentando su capacidad a 258,835.46 m<sup>3</sup>. Esta ampliación permitirá satisfacer los requerimientos y actividades de la mina durante un período de 12.9 meses. El dique alcanza una altura de 15 metros, llegando a la cota de 4,200 msnm, con una longitud de corona de 115 metros y un borde libre de 2.0 metros. Esta mejora significativa en la capacidad de almacenamiento y las condiciones de seguridad no solo constituye un logro fundamental para la preservación del entorno y la comunidad local, sino que también asegura la continuidad de las operaciones mineras de manera sostenible y responsable.

Palabras claves: Ampliación, Presa de relaves, Aguas abajo, Tiempos de vida, Capacidad.

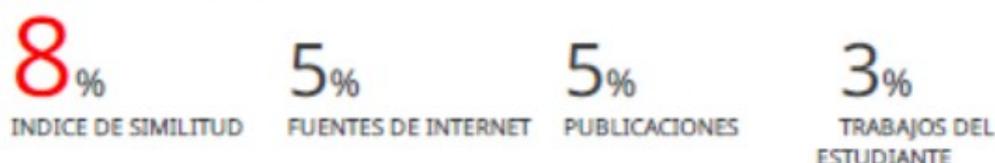
## ABSTRACT

Mine tailings are stored in various ways, adapting to their mechanical and chemical characteristics, as well as the relief, environmental conditions and socioeconomic environment. However, the fundamental objective of any tailing's facility is to ensure safe, stable and profitable storage, while minimizing as much as possible negative impacts on health and the environment, both during its useful life and in the period afterwards at its closing. Therefore, if the expansion of the tailings dam was not carried out, the risk of saturation and, as a result, the possibility of overflow would be faced. In response to this concern, the second phase of the expansion of the tailings dam with the downstream method in a mine in northern Peru was proposed, with the purpose of increasing its storage capacity, which would thus represent a valuable contribution to the preservation of the environment and security. The main challenge we face in our professional sufficiency work is the limitation in the storage capacity of the first tailings dam. Therefore, a detailed study was carried out that considered various factors that can influence the design and calculations, such as climatology, hydrology and lithology, with the aim of increasing the storage capacity of the second tailings dam and guarantee its safety, minimizing risks of collapse or leakage. It also sought to preserve the surrounding environment and ensure the long-term sustainability of operations, avoiding negative environmental impacts and supporting the social responsibility of the local community. At the conclusion of the study, the second tailings dam was expanded, increasing its capacity to 258,835.46 m<sup>3</sup>. This expansion will allow the mine's requirements and activities to be met for a period of 12 months. The dam reaches a height of 15 meters, reaching a level of 4,200 meters above sea level, with a crown length of 115 meters and a free edge of 2.0 meters. This significant improvement in storage capacity and safety conditions not only constitutes a fundamental achievement for the preservation of the environment and the local community, but also ensures the continuity of mining operations in a sustainable and responsible manner.

Keywords: Expansion, Tailings dam, Downstream, Lifetime, Capacity.

u201413858\_Gavidia Bocanegra, Juvenal Renato\_Aplicación de la metodología aguas abajo en la construcción de la segunda etapa de una presa de relaves para prolongar la vida útil en una mina en el Norte

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas Trabajo del estudiante	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	KNIGHT PIESOLD CONSULTORES S.A.. "MEIA del Proyecto Desarrollo Tajo Cerro Negro-IGA0003154", R.D. N° 034-2008-MEM/AAM, 2020 Publicación	1%
5	CESEL S A. "Primera MEIA de la Unidad Minera Casapalca-IGA0000614", R.D. N° 188 -2019-SENACE-PE/DEAR, 2020 Publicación	<1%

## TABLA DE CONTENIDOS

1. CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO.....	14
1.1. ANTECEDENTES.....	14
1.2. DESCRIPCION DE LA ORGANIZACIÓN.....	19
1.2.1. Ubicación.....	19
1.2.2. Acceso.....	19
1.2.3. Geología regional.....	19
1.2.4. Geología local.....	20
1.2.5. Clima y relieve.....	21
1.2.6. Área de desarrollo del trabajo.....	21
1.2.7. Operaciones mineras.....	21
1.3. DEFINICION DEL PROBLEMA.....	23
1.4. OBJETIVOS.....	26
1.4.1. Objetivo General.....	26
1.4.2. Objetivos Específicos.....	26
1.5. INDICADORES DE ÉXITO.....	26
1.6. PLANIFICACION DEL PROYECTO.....	27
2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	28
2.1. MARCO CONCEPTUAL.....	28
2.1.1. Generalidades.....	28
2.1.1.1. Relave minero.....	28
2.1.1.2. Depósito de relaves.....	28
2.1.1.3. Ciclo de vida.....	28
2.1.1.4. Geomembrana.....	28
2.1.1.5. Geotextiles no tejidos.....	29
2.1.1.6. Geomalla.....	29
2.1.1.7. Espinas de pescado.....	29
2.1.1.8. QA/QC.....	29
2.1.1.9. Hidrotubos.....	29
2.1.1.10. Límite máximo de almacenamiento la presa relaves.....	29
2.1.2. Tipos de depósitos de relaves.....	30
2.1.2.1. Presa de relaves.....	30

2.1.2.2.	Embalse de relaves.....	30
2.1.2.3.	Relave espesado.....	30
2.1.2.4.	Relave Filtrado.....	30
2.1.2.5.	Relave en Pasta.....	30
2.1.2.6.	Otros tipos.....	31
2.1.3.	Métodos de construcción de depósitos de relaves.....	31
2.1.3.1.	Aguas Abajo.....	31
2.1.3.2.	Aguas Arriba.....	31
2.1.3.3.	Eje Central.....	31
2.1.4.	Partes del depósito de relaves.....	32
2.1.4.1.	Dique o Muro.....	32
2.1.4.2.	Cubeta	32
2.1.4.3.	Laguna de Aguas Claras.....	33
2.1.4.4.	Sistema de Drenaje.....	33
2.1.4.5.	Revancha.....	33
2.1.4.6.	Coronamiento.....	33
2.1.4.7.	Canal de contorno.....	33
2.1.4.8.	Playa Activa.....	33
2.2.	ESTÁNDARES, FRAMEWORKS Y BUENAS PRÁCTICAS.....	34
2.3.	BASES LEGALES Y MARCO NORMATIVO.....	36
3.	CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO.....	37
3.1	DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.....	37
3.1.1	Diseño de objetivo específico 1.....	37
3.1.2	Diseño de objetivo específico 2.....	38
3.1.3	Diseño del objetivo específico 3.....	39
3.1.4	Diseño de objetivo específico 4.....	40
3.2	DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN.....	43
3.2.1.	Población.....	43
3.2.2.	Muestra.....	43
3.2.3.	Instrumentos de investigación.....	43
3.2.4.	Procedimiento Metodológico.....	44
3.2.4.1.	Desarrollo de objetivo específico 1.....	44
3.2.4.2.	Desarrollo de objetivo específico 2.....	48
3.2.4.3.	Desarrollo de objetivo específico 3.....	49

3.2.4.4. Desarrollo de objetivo específico 4.....	51
3.3 VALIDACIÓN DEL PROYECTO.....	52
3.3.1 Resultado del Objetivo Específico 1.....	52
3.3.1.1. Factor de seguridad.....	52
3.3.1.2. Evaluación de asentamiento del dique.....	54
3.3.2 Resultado del Objetivo Específico 2.....	54
3.3.2.1. Evaluación de deformaciones.....	54
3.3.3 Resultado del Objetivo Específico 3.....	55
3.3.3.1. Porcentaje de pendiente de tuberías diseñadas que permitan velocidades mayores a 0.60 m/s.....	55
3.3.3.2. Inspección visual de líneas y pendientes.....	56
3.3.4 Resultado del Objetivo Específico 4.....	56
3.3.4.1. Conformidad de soldadura de geomembrana.....	56
3.3.4.2. Anclaje y fijación mediante inspección visual.....	58
3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	59
3.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
4.1. CONCLUSIONES.....	64
4.2. RECOMENDACIONES.....	65
3.4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Indicadores De Éxito</i> .....	26
Tabla 2 <i>Unidades Geotécnicas</i> .....	44
Tabla 3 <i>Tipo de Rocas</i> .....	45
Tabla 4 <i>Temperatura</i> .....	45
Tabla 5 <i>Caudales máximos</i> .....	46
Tabla 6 <i>Criterios de Diseño Geotécnico</i> .....	46
Tabla 7 <i>Criterios de Diseño Hidráulico</i> .....	47
Tabla 8 <i>Criterios de Diseño</i> .....	49
Tabla 9: <i>Resumen de Resultados de Análisis de Estabilidad</i> .....	53
Tabla 10: <i>Deformaciones Inducidas por Sismos Permanentes</i> .....	54
Tabla 11: <i>Rendimiento Hídrico (m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup>)</i> .....	55
Tabla 12: <i>Caudal Máximo (m<sup>3</sup>/s)</i> .....	55
Tabla 13: <i>Capacidad de Almacenamiento de la Presa de Relaves</i> .....	62
Tabla 14: <i>Presupuesto de la Presa de Relaves</i> .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Árbol de Problemas</i> .....	24
Figura 2. <i>Planificación del Proyecto</i> .....	27
Figura 3. <i>Métodos Constructivos de Presas de Relaves</i> .....	32
Figura 4. <i>Partes de depósito de Relaves</i> .....	33
Figura 5. <i>Mapa de Proceso de Presa de Relave de una Mina al Norte del Perú</i> .....	35
Figura 6. <i>Diagrama de procesos para alcanzar el objetivo específico 1</i> .....	38
Figura 7. <i>Diagrama de procesos para alcanzar el objetivo específico 2</i> .....	38
Figura 8. <i>Diagrama de procesos para alcanzar el objetivo específico 3</i> .....	40
Figura 9. <i>Diagrama de procesos para alcanzar el objetivo específico 4</i> .....	41
Figura 10. <i>Diagrama de Procesos</i> .....	42
Figura 11. <i>Excavación de vaso de la presa de relaves</i> .....	48
Figura 12. <i>Perfil del Dique</i> .....	49
Figura 13. <i>Sistema de Drenaje de Aguas Subterráneas</i> .....	50
Figura 14. <i>Sistema de drenaje de aguas de infiltración</i> .....	51
Figura 15. <i>Revestimiento del Dique de Presa de Relaves</i> .....	52
Figura 16. <i>Análisis Bidimensional Estático y Pseudoestático del Dique Principal a corto plazo y largo plazo</i> .....	53
Figura 17. <i>Análisis de asentamiento</i> .....	54
Figura 18. <i>Anclaje y fijación de la geomembrana mediante la compactación del suelo y sacos de arena</i> .....	59
Figura 19. <i>Revestimiento total de la presa de relave</i> .....	59

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Resultados de control topográfico y asentamiento

Anexo 2: Ensayo de densidad de campo por reemplazo de volumen de agua

Anexo 3: Control de humedad resultados

Anexo 4: Deposito de relaves topografía desde planta

Anexo 5: Ejemplo de registro histórico del piezómetro abierto de tubo abierto

Anexo 6: Control topográfico en el relleno de prueba (tes fill)

Anexo 7: Ensayo de densidad de campo por el método de remplazo por volumen de agua  
ASTMD D5030

Anexo 8: Informe de Método de remplazo por volumen de agua ASTM -D2216

Anexo 9: Informe de Contenido de humedad norma ASTM -D2216

Anexo 10: Informe de Análisis granulométrico por tamizado ASTM -D6913

Anexo 11: Informe de Límite de consistencia ASTM -D6913

## **1. CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO**

### **1.1. ANTECEDENTES**

En este trabajo se presenta un proyecto para la construcción de la segunda presa de relaves en una unidad minera en el Norte del Perú. Este proyecto se origina a raíz de que la primera presa construida ha alcanzado su capacidad máxima de almacenamiento. La importancia de esta nueva construcción reside en su capacidad para gestionar y contener los desechos generados por el procesamiento de minerales, facilitando así la sedimentación de sólidos en el agua, permitiendo con ello la separación y recuperación del agua residual para su reutilización en las operaciones. Como señalaron De Paiva et al. (2020), es fundamental cuidar adecuadamente estas estructuras civiles, ya que la gestión inadecuada o el descuido pueden tener graves consecuencias económicas, sociales y ambientales.

Clarkson y Williams (2021) sostienen que, en el siglo XXI, el riesgo potencial de falla en las presas de relaves se ha multiplicado. Esto se debe a la necesidad de construir estas presas con mayor rapidez y durabilidad para hacer frente al aumento en la generación de desechos. Al comprender los posibles problemas que pueden surgir, los profesionales, proveedores, diseñadores y todas las partes involucradas comprenden la importancia de mantener un alto factor de seguridad, más allá de lo que puedan sugerir las cifras y los análisis. La comprensión de los modos de falla en las presas de relaves es fundamental para su gestión adecuada. Por lo tanto, este artículo se centra en los tipos de fallas, sus causas y comportamientos, así como en los factores que contribuyen a su ocurrencia, los mecanismos de falla y los indicadores que se pueden observar, medir o monitorear para prevenir estas fallas. El primer tipo de falla abordado es el fallo en la fundación o la base, que se refiere a un colapso, deterioro o fallo en los cimientos de la presa, con efectos potencialmente catastróficos en la instalación. El segundo abarca la erosión interna y tuberías, debido a las filtraciones estas no necesariamente son problemáticas siempre y cuando están controladas no contaminen y no hay migración de partículas. En el caso de las tuberías, estas sufren de erosión interna logrando hacer ver la estructura con filtraciones que funcionan como camino para el flujo de relaves. Luego, como tercero, tenemos el desbordamiento, el cual ocurre debido a entradas excesivas, mal funcionamiento, capacidad insuficiente, deslizamiento de macizos rocoso hacia el embalse, asentamiento de la presa u olas impulsadas con el viento haciendo que esta supere a la presa. Como cuarto, tenemos a las filtraciones, las cuales tienen un riesgo ambiental y ecológico alto, debido a los componentes de los relaves como sales, metales pesados y sustancias químicas

resultados de los procesos mineralógicos. En el caso del quinto, se tiene a la sismicidad, ya que la carga dinámica ocurre tanto en forma vertical como horizontal, movimiento potencialmente desestabilizador, propagador de grietas e inductor de presión en la presa. El sexto tipo se da por la inestabilidad de la pendiente en los terraplenes en su mayoría, los cuales son detectables con un correcto monitoreo. Estas narrativas tuvieron como propósito su análisis para recomendaciones finales de monitoreo, controles y prevenciones haciendo enfoque en las inspecciones visuales de rutina, la familiarización con el comportamiento y características de las presas. Así también, el establecer una base de riesgos asociados a cada lugar. Por ello, el compartir la información es importante porque no solo da cabida a entender lo que paso, sino que da precedentes para prevenir ocurrencias, mejorar las prácticas de diseño y en términos generales amenorar el riesgo asociado a las presas.

En este campo de gestión de residuos mineros e ingeniería de recursos hídricos los métodos de construcción de presas de relaves son fundamentales en la planificación, diseño y ejecución de las infraestructuras. Estas metodologías están en constante evolución para mantener el equilibrio entre el desarrollo minero y la preservación del entorno. En la propuesta de mejoras metodológicas, Qi et al. (2020) explican en su artículo una metodología por medio de machine learning para la predicción de floculación y deshidratación. El método que propone abarca los principales componentes de análisis (PCA) en la reducción de dimensiones, PSO-ANFIS para la predicción de machine learning (ML) y por último simulaciones de Monte Carlo para resultados convergentes. En base a esta metodología, se concluyó que para alcanzar resultados convergentes con los modelos de inteligencia artificial (IA) es de necesidad realizar simulaciones monte Carlo a causa de que los datos tienen una división aleatoria. A su vez, el uso de la técnica principales componente de análisis (PCA) fue de utilidad para aumentar el rendimiento del modelo machine learning (ML) usado, amenorando la dimensión del problema. Asimismo, el coeficiente de correlación primario del modelo fue de 0.85 para datos sin procesar, 0.88 para PCA95 y 0.89 para datos PCA99, en términos generales se obtiene una buena predicción y su uso puede ser empleado en mejoras en mina a nivel de costos y eficiencia. Este articulo nos brinda como aporte referencia para futuros modelos numéricos para analizar floculados, es decir, este da una sólida base de datos y resultados que podrían ser de utilidad en referencia, validación y calibración de modelos enfocados en la floculación. Por otra parte, Cox et al. (2022) abordan una métrica destinada al cálculo de los costos asociados a las presas de relaves y su influencia en la gestión de estos residuos mineros. En

su estudio, resaltan la importancia de tomar decisiones de manera temprana en lo que respecta a la disposición de los relaves, destacando su impacto económico y el nivel de riesgo involucrado. Asimismo, subrayan la preferencia por la gestión de relaves en forma de pulpa, lo cual ha impulsado la adopción de tecnologías relacionadas con relaves deshidratados. No obstante, el artículo propone la implementación de un modelo financiero y métrico de costos unificado que permita la comparación de diversas metodologías de disposición de relaves. Este modelo proporciona estimaciones de costos en USD por tonelada métrica seca. Cabe destacar que dicho modelo fue aplicado con éxito en una mina de cobre en Chile con el propósito de demostrar su utilidad. El objetivo central de este modelo es promover la transparencia financiera y contribuir a la toma de decisiones mejor fundamentadas en el sector minero.

El artículo de Piciullo et al. (2022) se centra en el análisis de fallas en presas, con el propósito de mejorar la comprensión del comportamiento de estas fallas y proporcionar datos estadísticos relevantes para la evaluación de los riesgos asociados a dichos eventos. El estudio utiliza una base de datos actualizada que recopila información sobre fallas en presas, así como un catálogo actualizado de presas vigentes. Estos recursos se emplean para llevar a cabo un análisis estadístico y establecer correlaciones entre variables clave, como el volumen liberado, la altura de la presa y el modo de falla, así como el volumen almacenado. Los resultados de este análisis revelaron que las presas construidas bajo la metodología de aguas arriba son las más propensas a experimentar fallas. Además, se identificaron factores críticos en este análisis, incluyendo la relación entre el volumen almacenado, el volumen liberado y la altura de la presa. Es importante señalar que no se encontró una correlación directa entre el tamaño de la presa y el volumen liberado. En resumen, este artículo proporciona información valiosa que puede ser de gran utilidad en la evaluación de riesgos y el análisis de fallas en presas de relaves.

El artículo de Dong et al. (2020) se enfoca en la sostenibilidad ambiental y el control de desastres en presas de relaves utilizadas en la minería. Estas presas almacenan residuos mineros y plantean riesgos debido a su alta energía potencial y compleja. Con el aumento de la actividad minera y la reducción en la calidad del mineral, se incrementa la ampliación de estas presas. Sin embargo, existe un desequilibrio entre los costos de construcción y las exigencias de seguridad y sustentabilidad de la sociedad, lo que podría resultar en colapsos y contaminación. El estudio se centra en fortalecer la estabilidad de las presas, establecer sistemas de monitoreo y alerta temprana, y contribuir con nuevos conocimientos para una

gestión más efectiva. Por tal motivo, el objetivo fue proporcionar información valiosa para los investigadores, con el propósito de mejorar la sostenibilidad ambiental y el control de desastres a lo largo de la vida útil de las presas. Asimismo, el artículo resalta la importancia crítica de la estabilidad de las presas y su potencial impacto en la contaminación ambiental, basándose en incidentes anteriores. Las filtraciones, desbordamientos y la licuefacción sísmica son identificados como los principales desencadenantes de fallos en las presas de relaves. Por otro lado, se mencionan los métodos destacados por el autor. Entre ellos, se destacan el método fellenius, janbu, obispo y precio de morgenstern como métodos de equilibrio límite. Además, se mencionan enfoques de simulación numérica como el método de elementos finitos y elementos discretos, junto con el método de elemento límite y las diferencias finitas.

El artículo de Avellaneda et al. (2019) se enfoca en la evaluación de la estabilidad física de los depósitos de relaves ubicado en San Andrés, Perú. El objetivo principal fue garantizar la preservación de la altura y los ángulos de inclinación del dique principal, así como mantener un margen seguro entre el nivel del agua y el dique, con un espacio libre mínimo de dos metros entre la parte superior del dique y el agua. Se realizaron inspecciones en el terreno para verificar la composición de los materiales del dique y obtener información sobre su estado actual y posibles deterioros. Los resultados del análisis indicaron que el depósito integrado de relaves de San Andrés es estable físicamente para las condiciones actuales de la operación. Con una altitud de 3935.10 metros sobre el nivel medio del mar en el dique principal y la posibilidad de elevarlo en 4.90 metros, hasta 3940 metros, concluyendo que cumple con los requisitos de estabilidad. El artículo se eligió debido a su relevancia para prevenir riesgos asociados con la estabilidad física de los depósitos de relaves. Abordando factores como desbordamientos, erosión interna y deslizamientos que pueden comprometer la integridad de estas estructuras. Esto facilita la identificación de deformaciones, asentamientos, filtraciones anormales o grietas en el dique, crucial para prevenir situaciones críticas.

En el estudio de Wang et al. (2020) se empleó pruebas de suelo y experimentos en modelos físicos de laboratorio para simular la acumulación de relaves siguiendo el principio de similitud. Dentro de los procedimientos, se analizaron las propiedades de la deposición de relaves en la superficie durante el proceso de contención, así como los patrones de cambio en la línea de saturación de la presa. Los resultados indicaron que las

partículas de relaves se volvieron progresivamente más finas a lo largo de la superficie seca hasta el interior del embalse. Hubo un cambio en el tamaño de las partículas en la transición entre el material depositado y la superficie del agua, revelando un marcado fenómeno de engrosamiento. Además, el material depositado demostró una tendencia vertical de volverse más gruesa hacia arriba y más fina hacia abajo en su conjunto. En el modelo físico, la línea de saturación se elevó a medida que aumentaba la altura de la presa, y su variación se hizo evidente en el rango de 1.0 a 4.5 metros de la presa inicial. Durante inundaciones, la altura de la línea de saturación fue generalmente mayor que en condiciones normales, con una diferencia máxima de altura de 4 centímetros.

En el estudio de Yang et al. (2019) presenta un caso exitoso, en el que los tubos geotextiles se han utilizado para la construcción de un depósito relaves destinado a la eliminación de material fino desde 2008 hasta finales de 2016. Durante este periodo, la altura del depósito de relaves aumento hasta alcanzar los 9 metros de altura y la elevación total de la presa incluyendo el dique inicial llego a los 61 metros. El objetivo principal de este estudio fue garantizar la seguridad del depósito de relaves en su condición actual y para futuras etapas. Para ello, se lleva a cabo la [investigación geotécnica](#) integral y los análisis de estabilidad del depositó de relaves. Este análisis ha llegado a la conclusión que la aplicación de tubos geotextiles en la construcción de presas de relaves es una buena alternativa para la disposición de relaves finos.

## **1.2. DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN**

### **1.2.1. Ubicación.**

La unidad minera en estudio se localiza en la zona norte del País.

### **1.2.2. Acceso**

El acceso a la unidad minera es por medio de la vía panamericana norte.

### **1.2.3. Geología regional**

#### **a. Estratigrafía**

Está formada por rocas sedimentarias con edades que abarcan desde el Cretáceo Inferior (Valanginiano) al Cretáceo Superior (Coniaciano). Las cuales esta formadas con rocas ígneas intrusivas emplazadas en forma de stocks de la edad terciaria. Esta posee una secuencia de rocas sedimentarias de la siguiente forma:

- **Formación Celendín**

Se encuentra formada por estratos de calizas con colores grisáceos con un aspecto nodular, posee intercalaciones de horizontes delgados de lutitas margas y grises con 500 m de espesor, de las edades de Santoniano – Coniaciano.

- **Formación Jumasha**

Constituida por estrado de calizas en su parte superior en bancos de tonalidades grises claras con horizontes grises amarillentos de calizas limoníticas. En su parte inferior, está conformada por capas de calizas de tamaño mediano a gruesos con tonalidades grises oscuras intercaladas con horizontes de lutitas grises oscuras delgadas. Esta formación tiene un espesor de 800 m aproximadamente, la cual esta correlacionada al Huaraniano – Albiano Superior.

- **Formación Pariatambo**

Representada por calizas bituminosas con tonalidad gris oscura, con presencia de estratos de lutitas carbonosas delgadas, esta formación esta caracterizadas por el olor fétido producido al golpe de los martillos. Esta formación posee un espesor de 100 a 500 m y esta correlacionadas a la edad del Albiano Medio.

- **Formación Chulec**

Está formada por calizas dolomíticas de tonalidades grises intercalas con estratos delgados de areniscas y lutitas. Esta formación alcanza un espesor de 100 m correlacionado a la edad del Albiano Medio.

- Formación Pariahuanca

Está conformada por calizas margosas con estratos medios de tonalidad gris azulada, alcanzando un espesor de 100 a 400 m, con una edad del Cretáceo inferior.

- Grupo Goyllorisquizga

Está caracterizada por secuencias de areniscas con bancos delgados a medios intercalado con lutitas gris oscuro con manchas de oxidación y limonitas rojas, alcanzando un espesor de 500 m correlacionada a la edad Valanginiano – Coniaciano.

#### **1.2.4. Geología local**

##### **a. Litología**

La unidad minera posee una litología compuesta por margas y calizas correspondientes a las formaciones Jumasha y Celendín de la edad del Cretáceo superior. Asimismo, hay presencia de tonalitas y granodioritas del periodo Neógeno.

- Calizas y Margas (ks-j/ks-ce): Pertenecen a las formaciones Celendín (ks-ce) y Jumasha (ks-j) siendo rocas calcáreas gris oscuras y claras pertenecientes a la edad del cretáceo superior. Se encuentran principalmente en la zona centro y norte de la unidad minera.
- Granodiorita y tonalitas (N-gd/to): Son rocas del periodo Neógeno y otorgan a la unidad minera su mineralización cuando entran en contacto con las rocas calcáreas, las cuales se localizan en la zona noreste.
- Depósitos aluviales: Son el resultado de alteraciones fisicoquímicas que se dieron en el área para luego ser depositados en las laderas, variando sus tamaños dependiendo si son arenas o limos.
- Depósitos morrénicos (Q-mo): Se encuentran en las zonas de más elevación de unidad minera, constituidos por fragmentos de rocas andesíticas, calcáreas, cuarcitas y areniscas.
- Depósitos coluviales: Se componen por fragmentos rocosos acumulados en forma subangulosa a angulosa o a su vez se dan por la acumulación de sedimentos que no se encuentran consolidados.
- Depósitos coluvio – aluviales (Q-co-al): Se encuentran en los cortes de carretera y en quebradas, están compuestos por grava y guijarros en forma de bloques, matriz areno-limosa y clastos subangulosos.

- Bofedales (Q-bo): Son depósitos cuaternarios, que también reciben el nombre de hidromórficos, los cuales tienen su origen en el deshielo de glaciares, afloramiento de aguas subterráneas o agua acumulada de lluvias.

#### b. Mineralización

Sucede en forma de lentes de emplazamiento en brechas hidrotermales y calcosilicatos superficiales con dos tipos de mineralizaciones presentes. El primer tipo, se desenvuelve en los contactos Norte y Este, mientras que las brechas que se están mineralizadas pasan en el contacto Oeste y Sur. El segundo tipo, que es la mineralización en el skarn, se encuentra conformada por galena, calcopirita, esfalerita, pirita, cuarzo, marmatita, bismutinita, calcita, pirrotita y tetraedrita. Los mismos minerales que en los calcosilicatados pasan en las brechas con la diferencia que tiene presencia de galena argentífera y otros sulfosales los cuales son minerales de plata.

#### **1.2.5. Clima y relieve**

En el área se identifican dos tipos de climas. El primero, se caracteriza por ser lluvioso con humedad presente en todas sus estaciones, lo que equivale un clima frío. El segundo, se caracteriza por ser lluvioso en otoño y un invierno seco, es decir, un clima semi frío.

Asimismo, la temperatura media mensual mínima fluctúa entre 3.7 °C y 6.7 °C en promedio, llegando a temperaturas máximas promedio de 19.2 °C y 21,9 °C aproximadamente.

Por otro lado, las precipitaciones muestran valores más altos en los meses de enero a marzo con 97.9 mm, 102.44 y 121.7 mm respectivamente, mientras que los meses de julio y agosto registran los valores más bajos con 6.1 mm y 9.6 mm respectivamente.

En relación con la velocidad y dirección del viento, esta posee una velocidad promedio anual de 2.1 m/s en la estación Chavín de Huántar, con una velocidad media máxima en junio de 2.9 m/s y una velocidad media mínima de 2.7 m/s correspondiente a marzo, en esta época, los vientos provienen del Norte con dirección hacia el Sur.

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

La zona de trabajo para la ampliación de la presa de relaves se distingue por la presencia de pliegues geológicos y escurrimientos superficiales. Esta área abarca aproximadamente 4 hectáreas y cuenta con una cobertura vegetal compuesta principalmente por arbustos. Además, en sus inmediaciones se encuentran riachuelos, suelos húmedos y una notable presencia de rocas.

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

a. Limpieza y desbroce de terreno

Esta operación se realiza previamente a todas las actividades en las áreas designadas para recibir revestimiento, relleno o que se utilizarán como fuentes de préstamo. Por otro lado, se encuentra el desencapado, que consiste en extraer y apilar el suelo superficial según las indicaciones del Ingeniero de aseguramiento de calidad (CQA).

b. Movimiento de tierras

Dentro de esta categoría se contempla la tarea de cargar y transporte de los diversos materiales presentes en el proyecto. Por una parte, esta los elementos formados por tierra vegetal y similares, materiales sobrantes que son originados por excavaciones realizadas en el Proyecto, componentes provenientes de la demolición de estructuras, materiales surgidos del desmontaje, materiales derivados de canteras para el relleno del proyecto y, por último, cualquier otro tipo de material que demande traslado, sujeto a aprobación por parte del Supervisor.

c. Perfilado, nivelado y compactación del terreno

Esta operación minera abarca el perfilado, nivelación y compactación de secciones de acarreo, subdrenajes o superficies según el proyecto así lo requiera. Previo a la ejecución de estos procesos, se requiere que el supervisor apruebe la ejecución del replanteo topográfico. Asimismo, antes de iniciar los trabajos deben pasar por 5 controles para ser aceptados. Estos controles incluyen la verificación de permisos del contratista, verificación del funcionamiento y estado del equipo de la empresa contratista, geometría final de taludes y secciones, la medición de áreas de trabajo, la verificación del estado y funcionamiento de equipo utilizado por la contrata.

d. Ensayos de campo

Esta operación se lleva a cabo midiendo el contenido de humedad en suelos es un procedimiento fundamental en la evaluación de la calidad y aptitud de un suelo para diversas aplicaciones. Comienza con la recolección de una muestra representativa en el entorno natural utilizando una bolsa y una pala. Posteriormente, esta muestra se traslada al laboratorio, donde se lleva a cabo su pesaje en estado húmedo utilizando una balanza y un recipiente adecuado. Tras registrar el peso húmedo, la muestra se somete a un proceso de deshidratación en una estufa durante aproximadamente 45 minutos. Una vez concluida esta etapa, se procede al pesaje de la muestra en estado seco, registrando este valor como "ps" (peso seco). Luego, la determinación del contenido de humedad se realiza mediante una fórmula:

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{\text{Peso humedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

En donde, el resultado obtenido deberá estar dentro del rango objetivo del 8.7% al 9.5%. Si el valor se encuentra dentro de este rango, se considera que el suelo está en condiciones adecuadas y es apto para su uso previsto. Este proceso garantiza la obtención de datos precisos sobre la humedad del suelo, lo que resulta esencial para decisiones relacionadas con la construcción y otros proyectos que requieren suelos con características específicas.

### **1.3. DEFINICION DEL PROBLEMA**

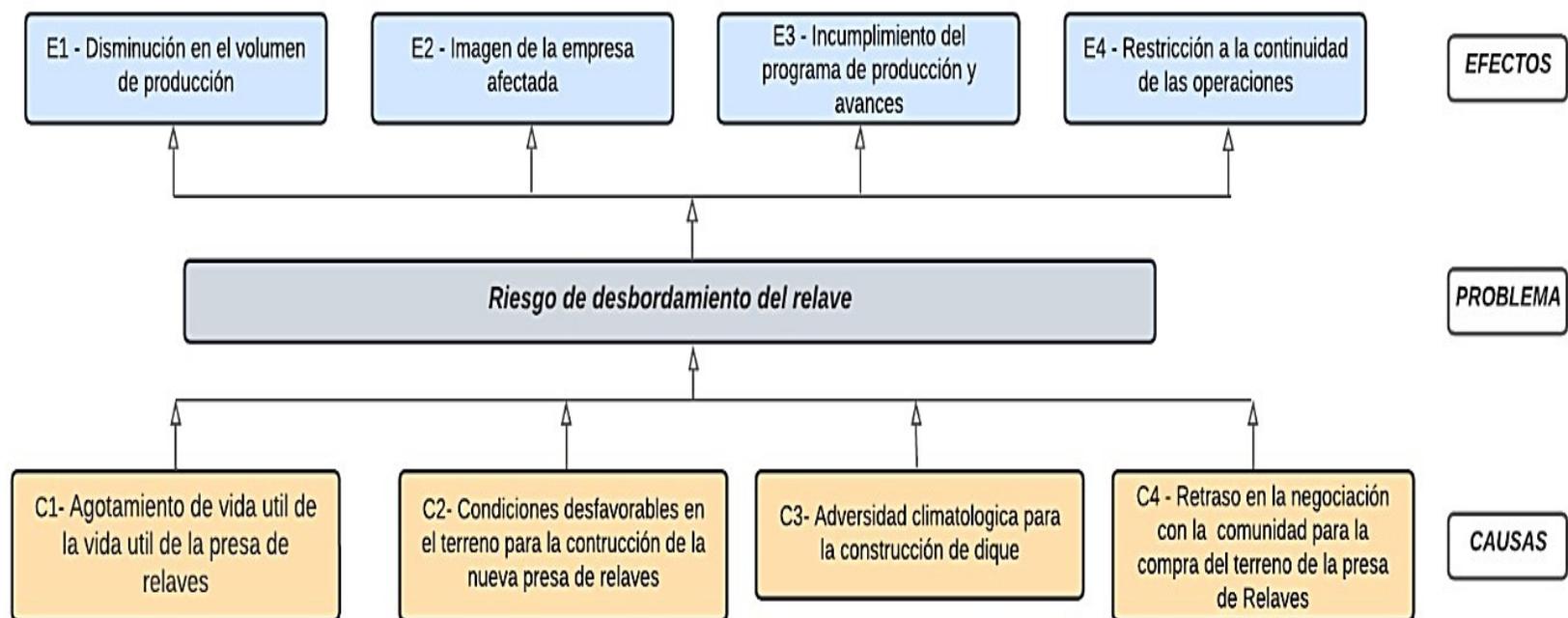
#### **a. Identificación y formulación del problema**

En el marco contextual, la unidad minera ubicada en el norte del Perú cuenta con un primer depósito de relaves con capacidad de 286726.90 m<sup>3</sup> con una altura de dique de 75 m. La cual a inicios del 2022 llegó a límite máximo de capacidad de uso. Por tal motivo, como una medida preventiva para evitar el colapso, la compañía minera realizó y adaptó estudios para evaluar la ampliación de la etapa II del depósito de relaves. Para luego, ser aprobado por el área de gerencia e iniciar operaciones. Sin embargo, el retraso en las negociaciones con la comunidad para la compra del predio, las condiciones desfavorables en el terreno y la adversidad climatológica retrasaron dicha ampliación originando el riesgo de desbordamiento de relaves. Como se mencionó previamente, se pudo identificar como principal causa la demora en el proceso de negociación con la comunidad local para adquirir el terreno destinado a la ampliación de la presa de relaves. Debido a que las inquietudes de la comunidad en torno a las consideraciones medioambientales y el riesgo de contaminación ejercen un impacto negativo, generando el rechazo social e impidiendo una negociación eficiente con la comunidad. En segundo lugar, se menciona las condiciones desfavorables del terreno, incluyendo la presencia de cuerpos de agua y la irregularidad de la formación rocosa, los cuales son obstáculos significativos en el proceso de ampliación. Asimismo, existe presencia de rocas que son difícil de excavar o perforar, lo que aumenta la complejidad y los costos de la construcción. Finalmente, las adversidades climatológicas, originaron dificultades significativas durante la construcción. Como producto de las lluvias, se identificaron terrenos húmedos que superan el rango establecido conforme a las directrices. Generando la disminución en el volumen de producción, incumplimiento del programa de producción y avance, restricciones a la continuidad de las operaciones y afectando la imagen de la empresa.



**Figura 1.**

*Árbol de Problemas: Aplicación de la metodología aguas abajo en la construcción de la segunda presa de relaves para prolongar la vida útil en una mina en el norte del Perú*



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

### **Justificación teórica:**

Respecto a la justificación teórica, el aporte de esta investigación propone un sustento teórico a la comunidad científica minera respecto al enfoque para la ampliación del depósito de relaves con la metodología aguas abajo. Este método posibilita la inclusión de sistemas de drenaje a medida que la presa crece, lo que controla el nivel del agua subterránea y mitiga el riesgo de aumento en la presión de los poros, reduciendo así la resistencia al deslizamiento y aumentando la estabilidad de la presa.

### **Justificación metodológica:**

En cuanto a la justificación metodológica, el aporte del presente estudio se enfoca en la metodología de construcción aguas abajo, que es muy utilizada en el Perú debido a las regulaciones vigentes que rigen en la edificación de la presa de relaves. Este método que se aplica en el depósito se caracteriza por su baja permeabilidad, que se logra mediante la implementación de sistemas de drenaje para mantener bajo control los niveles de agua subterránea. Esta metodología adquiere una relevancia significativa, dado su alto grado de estabilidad ante la actividad sísmica. Finalmente, esto se traduce directamente en un incremento del factor de seguridad. A diferencia de otros métodos como el enfoque de aguas arriba, muestran limitaciones en cuanto a su resistencia sísmica, alta permeabilidad y menor estabilidad. Por tal motivo, el método aguas abajo es la más recomendable para abordar las condiciones y desafíos específicos que presenta la ampliación de la presa de relave.

### **Justificación práctica:**

Finalmente, la justificación práctica se encuentra en la necesidad de ampliar la presa de relave de la mina ubicada en el norte del Perú. Esta construcción es importante debido a que existe la necesidad de aumentar la capacidad de almacenamiento, ya que la primera presa llegó a su límite máximo de almacenamiento. Asimismo, la ampliación del depósito permitirá incrementar el volumen de producción y cumplir con el programa de avances. Estas acciones aseguran la continuidad de las operaciones.

## 1.4. OBJETIVOS

### 1.4.1. Objetivo General

Aplicar la metodología aguas abajo en la construcción de la segunda etapa de una presa de relaves para prolongar la vida útil en una mina en el Norte del Perú

### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar estudios preliminares y diseño de la presa de relaves.
- Ejecutar y supervisar la construcción del dique de la presa de relaves.
- Evaluar y analizar la instalación del sistema de drenaje
- Examinar el proceso de instalación del revestimiento de la presa.

## 1.5. INDICADORES DE ÉXITO

**Tabla 1**

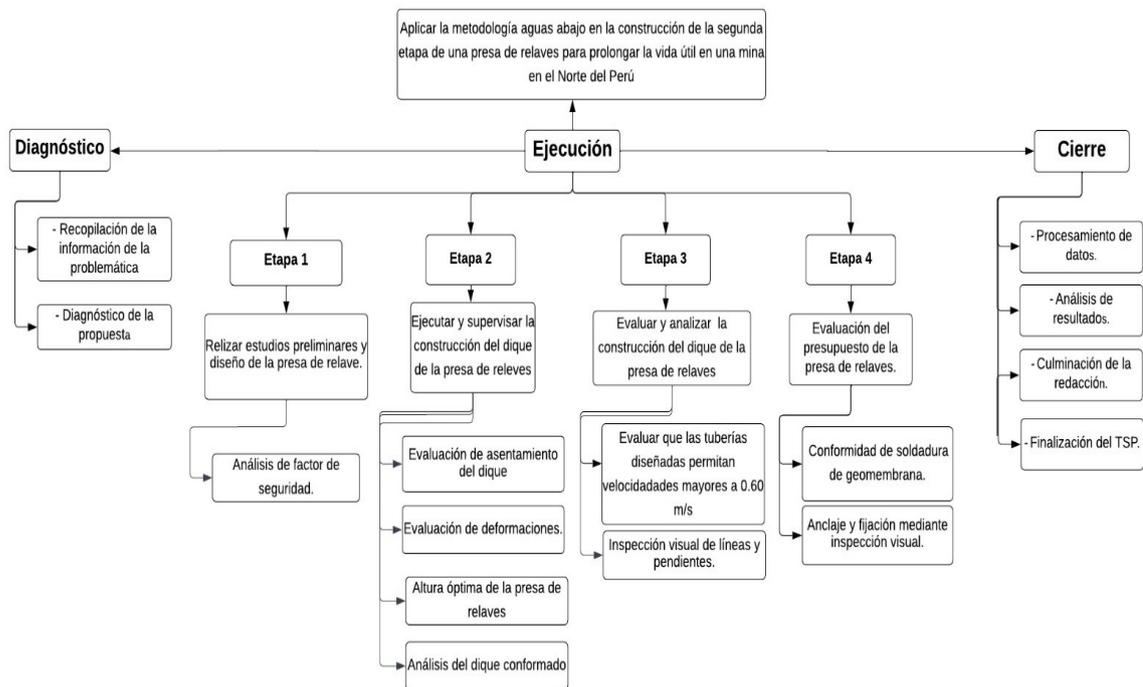
*Indicadores De Éxito*

OBJETIVO ESPECIFICO	INDICADOR DE LOGRO
Realizar estudios preliminares y diseño de la presa de relaves	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Análisis del factor de seguridad.</li></ul>
Ejecutar y supervisar la construcción del dique de la presa de relaves	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Evaluación de asentamiento del dique.</li><li>▪ Evaluación de deformaciones.</li><li>▪ Altura optima de la presa de relaves</li><li>▪ Análisis del dique conformado</li></ul>
Evaluar y analizar la instalación del sistema de drenaje	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Evaluar que las tuberías diseñadas permitan velocidades mayores a 0.60 m/s.</li><li>▪ Inspección visual de líneas y pendientes.</li></ul>
Examinar el proceso de instalación del revestimiento de la presa	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Conformidad de soldadura de geomembrana.</li><li>▪ Anclaje y fijación mediante inspección visual.</li></ul>

## 1.6. PLANIFICACION DEL PROYECTO

El presente trabajo de suficiencia profesional tiene como objetivo la ampliación de una presa de relaves ubicado en el norte del Perú, utilizando el método aguas abajo. Esta iniciativa se presenta como respuesta ante la urgente necesidad de prevenir el colapso de la primera presa de relaves. Como consecuencia, podría desencadenar una serie de problemas medioambientales y sociales, tales como la contaminación del agua, la degradación del ecosistema circundante y la posible generación de conflictos con las comunidades locales. Para llevar a cabo este proyecto, se ha dividido en tres etapas: diagnóstico, ejecución y cierre. La figura 2 muestra una descripción detallada de las actividades correspondientes a cada una de estas fases. Nota. En la figura se presenta el esquema de actividades del proyecto, en el cual durante la etapa de diagnóstico se lleva a cabo la investigación de información y la formulación de la propuesta, en la fase de

**Figura 2.**  
Planificación del Proyecto



ejecución se efectúa la parte práctica del proyecto, y en la fase de cierre se procede con el análisis de los resultados y la finalización del proyecto.

## **2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. MARCO CONCEPTUAL**

#### **2.1.1. Generalidades**

##### **2.1.1.1. Relave minero**

Es un desperdicio de las operaciones mineras, corresponde a un lodo liquito compuesto de agua y partículas finas de metales y minerales. Los cuales quedan como producto de la extracción de minerales sulfurados durante el proceso de flotación. También, este residuo se lo conoce como cola y su transporte se realiza por medio de tuberías o canaletas hasta lugares estructurados especialmente para ello, donde se recupera el agua o se evapora para luego quedar como un depósito de materiales estratificados finos (Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN], 2018).

##### **2.1.1.2. Depósito de relaves**

También conocidos como represas de residuos mineros o presa de colas, son estructuras construidas con el fin de almacenar los desechos obtenidos de la extracción y procesamiento de minerales. Estos pueden poseer diversos diseños y tecnologías a nivel de construcción, pero todas se alinean al objetivo principal de prevenir la liberación de sustancias contaminantes, garantizar la estabilidad y evitar deslizamientos o rupturas. Todo ello, en lineamiento a las exigencias legales nacionales (SERNAGEOMIN, 2018).

##### **2.1.1.3. Ciclo de vida**

La vida de una presa de relaves se divide en varias etapas, que van desde la planificación inicial y la construcción, hasta la operación y el eventual cierre (Ministerio de minas y energía [MME], 2020).

##### **2.1.1.4. Geomembrana**

Es una delgada lamina impermeable elaborada de polietileno de baja y alta densidad usado ampliamente como sistemas de barrera en instalaciones de contención de desechos (Bouazza & Chen, 2012).

#### 2.1.1.5. Geotextiles no tejidos

Se emplean principalmente en aplicaciones de filtración y drenaje gracias a su estructura tridimensional, lo que conduce a una elevada capacidad de absorción y permeabilidad con variados tamaños de poro (Prambauer et al., 2019).

#### 2.1.1.6. Geomalla

Principalmente se fabrica de poliéster, polietileno de alta densidad y polipropileno, según sus procesos de fabricación pueden ser extruidas, tejidas o soldadas. Por lo tanto, Estos geosintéticos son estructuras lineales alargadas interconectadas que poseen espacios que facilitan la interacción con el suelo y tienen como propósito fortalecer internamente a la estructura mejorando la calidad del suelo y estabilizando las capas inferiores de la zona (TDM, s.f.).

#### 2.1.1.7. Espinas de pescado

Son una serie de subdrenajes paralelos diseñados para cubrir una amplia extensión y optimizar la recolección de agua subterránea, y finalmente, todos se unen en un único canal central (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico [Ingemmet], 2020).

#### 2.1.1.8. QA/QC

El Aseguramiento de la Calidad (QA) son acciones preventivas para garantizar la calidad y la confiabilidad en el proceso de planificación, mientras que el Control de Calidad (QC) se refiere a actividades para supervisar, identificar errores y tomar medidas correctivas cuando ya ha ocurrido (Vélez, 2015).

#### 2.1.1.9. Hidrotubos

Son fundas tubulares de amplias dimensiones fabricadas con un tejido resistente de alta calidad llamado Hydrotex, y se llenan mediante métodos hidráulicos o mecánicos con una mezcla fluida compuesta por relaves deshidratado con el fin de conformar la estructura de recrecimiento aguas abajo del dique de la presa (Geomatrix, s.f.).

#### 2.1.1.10. Límite máximo de almacenamiento la presa relaves

Se hace referencia a la capacidad de almacenamiento de desechos mineros que pueda alcanzar una presa de relaves, antes de tener la necesidad de ampliar la infraestructura o tomar acciones de descarga controlada (Autoridad nacional del agua [ANA],2015).

## **2.1.2. Tipos de depósitos de relaves**

### **2.1.2.1. Presa de relaves**

Este tipo de depósito se construye utilizando la fracción más gruesa de los relaves, que se obtiene a través de un hidrociclón encargado de separar los sólidos de las partículas más finas. Mientras que la porción gruesa se emplea en la construcción del muro del depósito, la fracción fina se deposita en la cubeta del depósito (SERNAGEOMIN, 2018).

### **2.1.2.2. Embalse de relaves**

Este tipo de depósito se caracteriza por tener un muro de contención construido con rocas y tierra tomadas de la zona circundante. Además, se encuentra impermeabilizado en su talud interno y en la parte superior. Por otro lado, se suelen denominar embalses a los depósitos que se ubican en depresiones del terreno y no requieren la construcción de un muro de contención (SERNAGEOMIN, 2018).

### **2.1.2.3. Relave espesado**

Son depósitos en los cuales la superficie ha pasado en el espesador un proceso de sedimentación con el objetivo de eliminar una parte del agua que contiene, permitiendo así su reutilización en las operaciones mineras y reduciendo el uso de agua limpia. La construcción de este depósito de relaves espesados se lleva a cabo de manera que el relave solamente llegue hacia las zonas designadas y cuente con un sistema de recuperación del agua restante dirigido hacia pozas externas al depósito (SERNAGEOMIN, 2018).

### **2.1.2.4. Relave Filtrado**

Este es semejante al espesado. Sin embargo, es un depósito en que el material posee menos aguas debido al proceso de filtrado, asegurando así una humedad menor al 20% (SERNAGEOMIN, 2018).

### **2.1.2.5. Relave en Pasta**

Corresponde a la mezcla de agua con sólidos, conteniendo así baja cantidad de agua y abundantes partículas finas de tal forma que se consiga una consistencia semejante a una pulpa con alta densidad (SERNAGEOMIN, 2018).

#### 2.1.2.6. Otros tipos

Hay tipos diferentes de depósito de relaves menos comunes como los depósitos en rajos abandonados o minas subterráneas (SERNAGEOMIN, 2018).

### **2.1.3. Métodos de construcción de depósitos de relaves**

#### 2.1.3.1. Aguas Abajo

Este diseño comienza con una presa impermeable, los relaves son depositados dentro de la presa y en medida que va creciendo se construye un muro nuevo teniendo como base la pendiente de la sección anterior ubicada aguas abajo, de tal forma que en cada crecimiento la presa se mueve aguas abajo, es decir, crece al lado opuesto que se acumulan los relaves ya depositados, este método fue desarrollado para áreas que posean muchas precipitaciones, con captación de agua y con actividades sísmicas (SERNAGEOMIN, 2018).

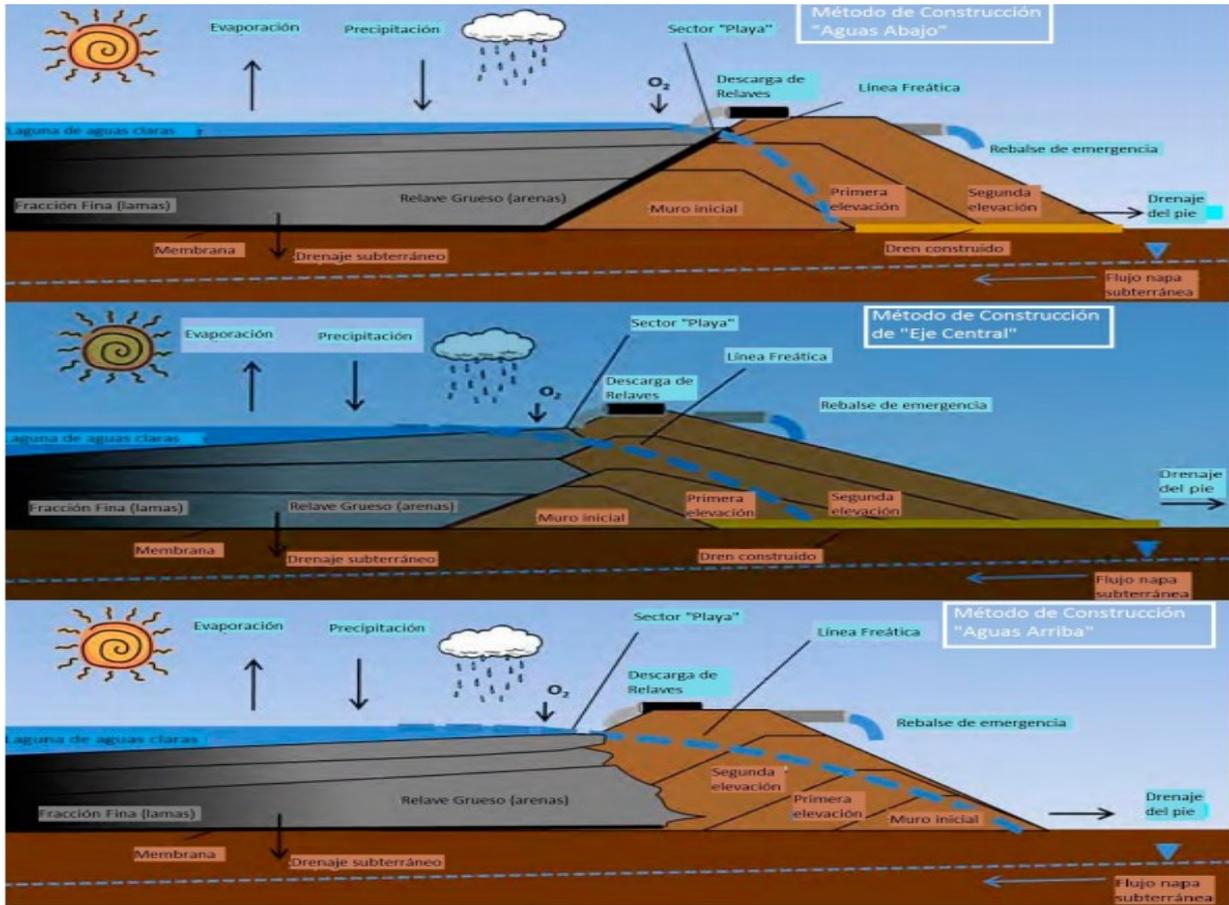
#### 2.1.3.2. Aguas Arriba

La construcción empieza con una presa inicial, se descargan los relaves en el depósito y forman una playa, estos relaves depositados pueden deshidratar y compactar con el fin de usarse como base para posteriores niveles del muro. De tal forma, la presa se mueve aguas arriba, es decir, crece hacia el lado donde se depositan los relaves (SERNAGEOMIN, 2018).

#### 2.1.3.3. Eje Central

Este método es una mezcla entre aguas abajo y aguas arriba. La construcción en este método se ejecuta verticalmente, a parte partir de la presa inicial. Por tal motivo, la cima de la presa se mantiene fijo en cuanto a crecimiento, es decir, no crece en direcciones como en el método aguas abajo y arriba (SERNAGEOMIN, 2018).

**Figura 3.**  
Métodos Constructivos de Presas de Relaves



*Nota.* El gráfico representa los tres métodos de construcción de diques en las presas de Relaves. De "¿Cómo se construyen los depósitos de relaves? ¿Existe algún tipo de construcción que esté prohibido?", por SERNAGEOMIN, 2018.

([www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/#d7a783a4374effd42](http://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/#d7a783a4374effd42)).

#### 2.1.4. Partes del depósito de relaves

##### 2.1.4.1. Dique o Muro

Es una estructura que permite contener a los residuos sólidos descargados. Es decir, delimita la cubeta (SERNAGEOMIN, 2018).

##### 2.1.4.2. Cubeta

Es el volumen físico que está disponible para depositar los relaves. En la cubeta, se puede localizar al agua en la laguna de aguas claras (SERNAGEOMIN, 2018).

##### 2.1.4.3. Laguna de Aguas Claras

A causa de la sedimentación de las capas inferiores en la presa de relaves se forma una laguna de aguas claras en la parte superior (SERNAGEOMIN, 2018).

#### 2.1.4.4. Sistema de Drenaje

Es el sistema utilizado a fin de deprimir el nivel freático al máximo en el interior del dique. Es decir, se usa para reducir el nivel del agua subterránea que se tiene en el dique a fin de dejar el grado de agua dentro del dique al nivel correcto (SERNAGEOMIN, 2018).

#### 2.1.4.5. Revancha

Es la diferencia entre el coronamiento del dique y la superficie inmediata conjunta de la superficie de agua o la parte lamosa, producidos en la presa (SERNAGEOMIN, 2018).

#### 2.1.4.6. Coronamiento

Parte superior del dique, muy próximo a la horizontal (SERNAGEOMIN, 2018).

#### 2.1.4.7. Canal de contorno

Es el canal que recoge y desvía aguas superficiales de la cuenca, logrando así evitar el ingreso en el área de almacenamiento de relaves (SERNAGEOMIN, 2018).

#### 2.1.4.8. Playa Activa

Área de descarga de los relaves en la cubeta, debido a que a menudo se encuentra seca en la superficie, lo que confiere una apariencia similar a una plata de arena fina. Esta área se localiza en las proximidades de la línea de vertido de los relaves

### Figura 4.

*Partes de depósito de Relaves*



*Nota.* El gráfico representa las partes que conforman un depósito de relaves. De “¿Cuáles son las partes de un depósito de relaves?”, por SERNAGEOMIN, 2018 ([www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/#d7a783a4374effd42](http://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/#d7a783a4374effd42)).

(SERNAGEOMIN, 2018).

## **2.2. ESTÁNDARES, FRAMEWORKS Y BUENAS PRÁCTICAS**

En los estándares de minería relacionado a las presas de relaves se encuentra el estándar global de gestión de relaves para la industria minera, publicado el 5 de agosto del 2020. Este estándar está diseñado con el objetivo de lograr ningún daño a las personas y al medioambiente, así como una tolerancia cero a las fatalidades humanas. Este estándar exige responsabilidad a los operadores en temas de seguridad durante todas las etapas de proyecto, así como la divulgación de información para la redición de cuentas públicas. Asimismo, este reconoce que hay cuestiones que son de responsabilidad de las autoridades reguladores y, por lo tanto, no pueden ser auditadas de forma directamente. Además, se enfoca en la flexibilidad que los operadores puedan tener para cumplir con los requisitos auditables, y enfatiza que la conformidad con este estándar no reemplaza las leyes y regulaciones gubernamentales. Por su parte, proporciona protocolos de implementación y establece equivalencia con otros estándares para evitar duplicidades. A pesar de esto, el estandar sigue una secuencia, aunque no necesariamente es cronológica.

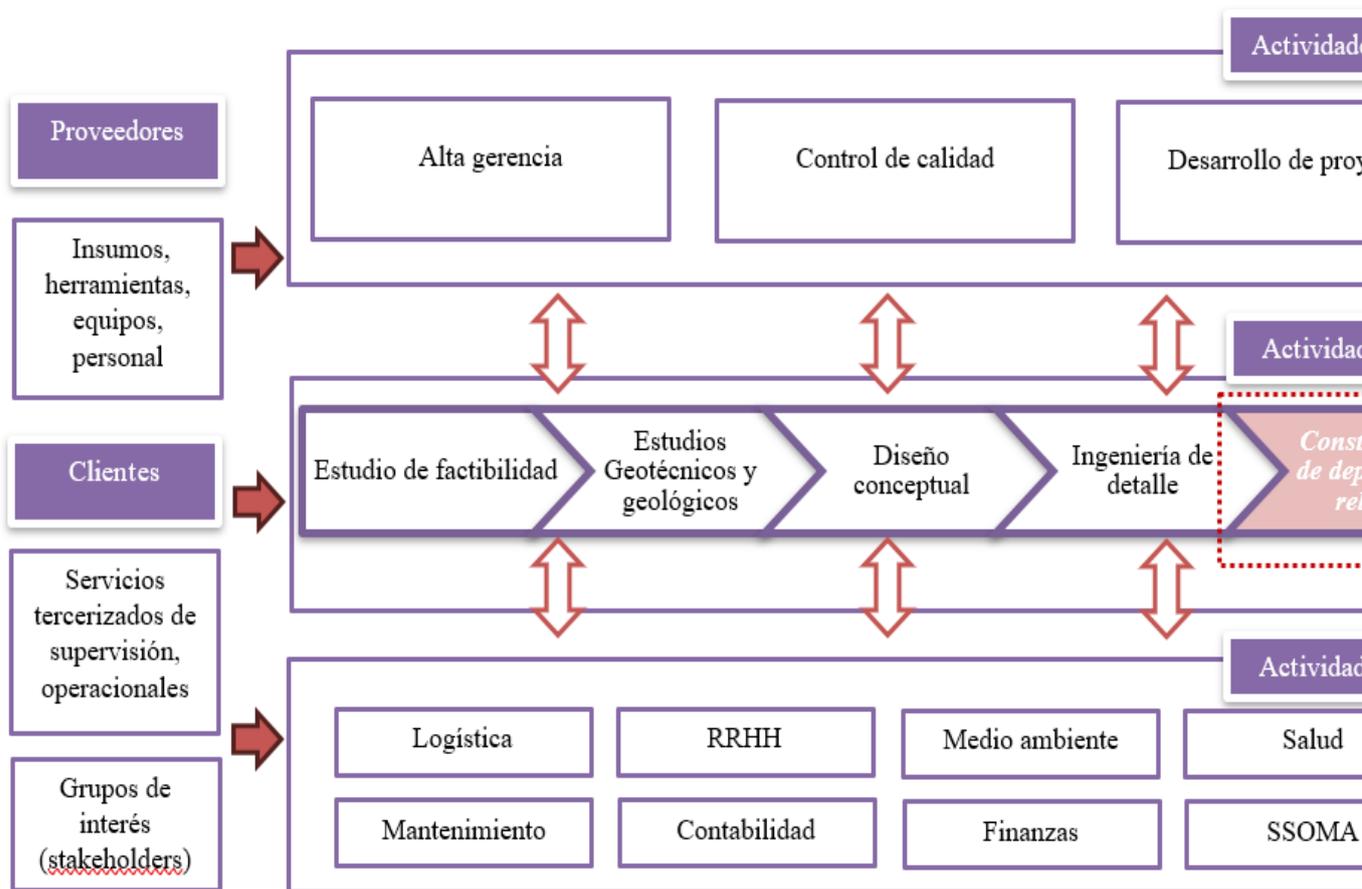
A su vez, también se tiene el Project Management Body of knowledge (PMBOK) creado por el Project Managment Institute (PMI), el cual posee procesos, practicas, terminologías, recomendaciones y directrices para una gestión de proyectos correcta.

En relación a las normativas internacionales aplicables, se encuentran las normas ISO 14001 e ISO 45001, establecidas para la gestión ambiental y salud ocupacional de forma adecuada, con el fin de mitigar los riesgos asociados. Un ejemplo de buenas prácticas en la mina al norte del Perú es la aplicación de normativas internacionales para la edificación de la presa de relaves, las cuales se aplicaron además de cumplir con el reglamento nacional de edificaciones. Entre las normativas aplicadas como buenas prácticas se encuentran las de la American Concrete Institute, U.S. Bureau of Reclamation, American Society for Testing Materials, American Association of State Highway and Transportation Officials y GRI con sus normas GM. Estas normas se reflejan en buenas prácticas de la empresa, como en el muestreo realizado durante la construcción del dique. Este proceso tiene como objetivo avanzar con las capas de la estructura para obtener un rango de humedades optimo conforme a los estándares internacionales, logrando así una estabilidad del dique superior a lo requerido legalmente. Para lógralo, en ocasiones fue necesario adquirir material de otras partes de la operación que sean más adecuado para la ejecución de la estructura.

**Figura 5.**

*Mapa de Proceso de Presa de Relave de una Mina al Norte del Perú*

### 2.3.



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

El marco legal y normativo relacionado con las presas de relaves en Perú abarca regulaciones y normas nacionales e internacionales que se centran en la seguridad, la protección ambiental y la calidad en la construcción y operación de estas estructuras. Estas regulaciones garantizan que las presas de relaves se diseñen y construyan de manera segura sostenible.

La Dirección General de Asuntos Ambientales (DGAA) establece regulaciones para la gestión ambiental en proyectos, como presas de relaves, definiendo requisitos y procedimientos para la evaluación de impacto ambiental y mitigación. La Dirección General de Minería (DGM) ofrece orientación específica sobre aspectos mineros y la gestión de relaves, incluyendo el diseño y operación de presas. La Ley General del Ambiente (Ley N° 28611) establece principios y normas para la protección ambiental en todas las actividades económicas, fundamental para garantizar la responsabilidad ambiental en la construcción y operación de presas. Además, el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM aprueba estándares de calidad ambiental para el agua, cruciales para mantener la calidad del agua en proyectos de presas de relaves y su impacto en los cuerpos de agua cercanos.

Normativa Nacional: En Perú, las Normas de Seguridad para las Presas emitidas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) se enfocan en asegurar la seguridad de las presas, incluyendo las de relaves, mediante el establecimiento de requisitos para su diseño y operación segura. Además, las normas técnicas E.030, E.050 y E.060, junto con los Boletines de ASOCEM, desempeñan un papel esencial en la seguridad y eficiencia de la construcción de presas de relaves. La E.030 se centra en la estabilidad sísmica, la E.050 en las cimentaciones, y la E.060 en el concreto armado, proporcionando pautas cruciales para el diseño y construcción de componentes de las presas de relaves, contribuyendo así a su integridad y robustez, y asegurando la calidad y seguridad en su construcción.

Las normas internacionales de ASTM, ACI y ASME son importantes en la industria minera para garantizar calidad, seguridad y protección ambiental. Estas normas abarcan aspectos como seguridad laboral, análisis mineral, diseño de infraestructuras y durabilidad de estructuras de concreto utilizadas en minería, además de proporcionar estándares para equipos y sistemas mecánicos, asegurando la seguridad y eficiencia en la maquinaria minera, contribuyendo así a operaciones mineras seguras y eficientes.

### **3. CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO**

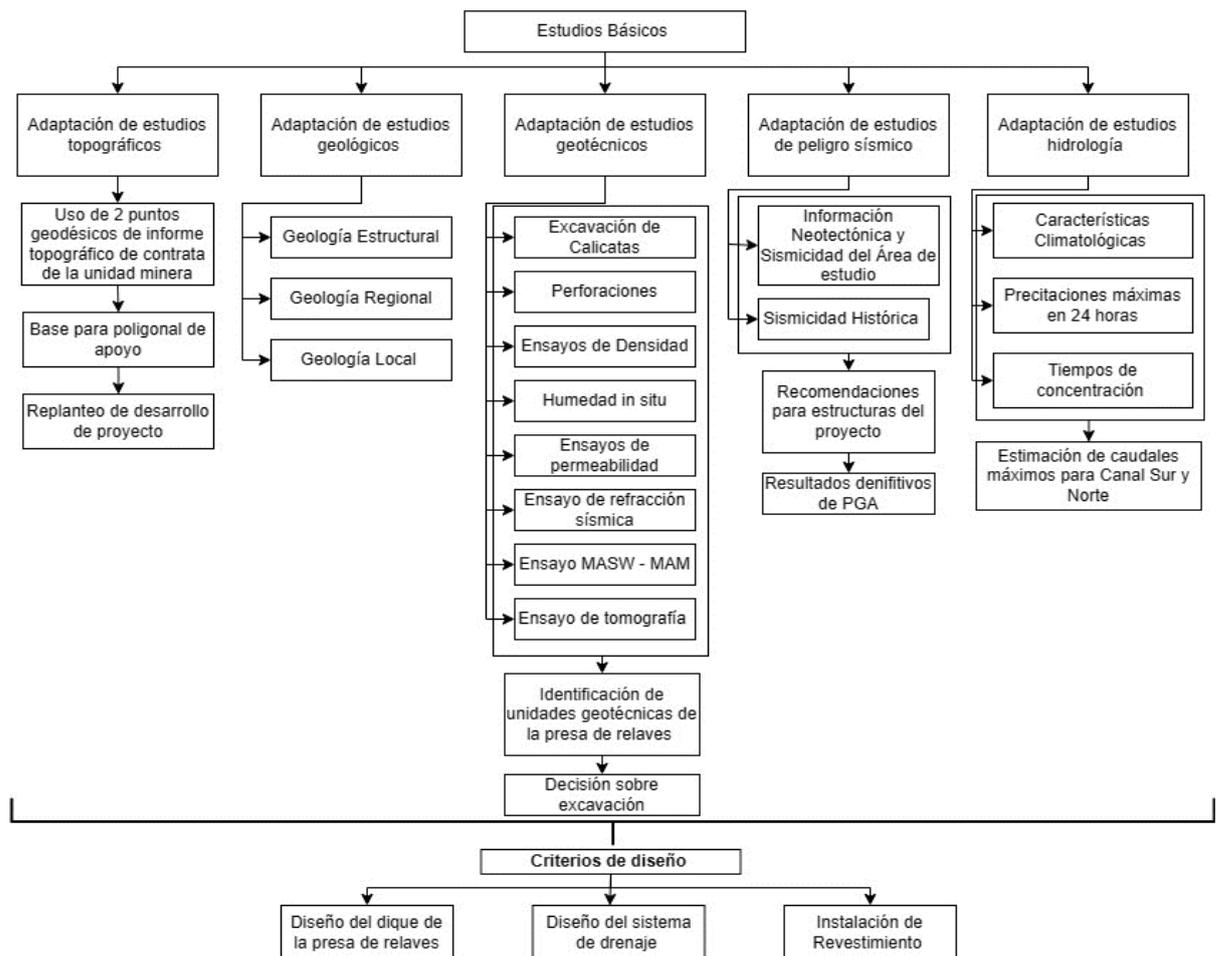
#### **3.1 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN**

##### **3.1.1 Diseño de objetivo específico 1**

Este proyecto de investigación se inicio con la elaboración de un proyecto de prefactibilidad con el fin de proporcionar información preliminar que permita a alta gerencia evaluar si el proyecto debería avanzar a posteriores etapas de desarrollo donde se vera si este cumple con los objetivos estrategicos de la empresa, economicos, sociales y si es tecnicamente viable. Posterior a la aprobación de este, se realizo una reunión con la alta gerencia de la empresa, donde se presento el proyecto de ampliación de la presa de relaves en su etapa II debido al riesgo de desborde del primer deposito de relaves. Donde se discutio los objetivos, beneficios y riesgos del proyecto. Una vez aprobado, se inició el estudio de factibilidad, que abarco un análisis detallado de aspectos técnicos, económicos y medioambientales. Cabe mencionar que, el desarrollo de los aspectos legales se fue gestionando desde el inicio del proyecto y llevados a cabo por el área de legal de la empresa. Después, se procede a desarrollar el informe de ingeniería de detalle donde se vio los aspectos técnicos y diseño del proyecto. Asu vez, el equipo de logística se encargó del abastecimiento de recursos, incluyendo materiales y personal. Por último, se adquieren y ponen a disposición maquinaria y equipos especializados para la construcción, asegurando una coordinación eficiente de recursos.

Antes de estructurar el diseño de la presa y sus componentes, es necesario identificar los criterios de diseño en base a estudios básicos para conocer el terreno donde se trabajará. Para ello, se adaptaron y utilizaron estudios previamente estructurados por la empresa, los cuales abordan aspectos de topografía, geología, geotecnia, peligro sísmico e hidrología. Posteriormente, con la información obtenida, se procedió a ejecutar el diseño de la presa de relaves siguiendo la metodología aguas abajo.

**Figura 6.**  
*Diagrama de procesos para alcanzar el objetivo específico 1*

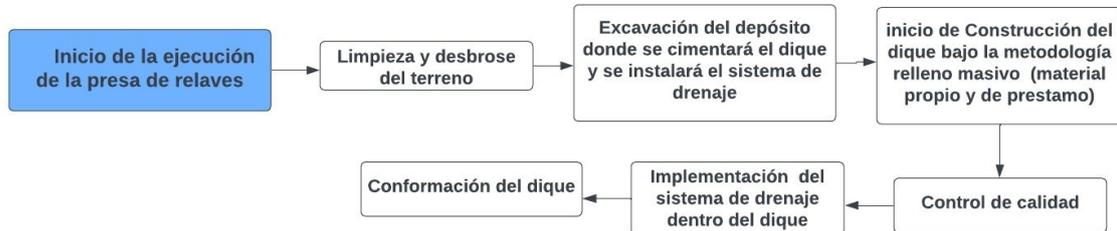


### 3.1.2 Diseño de objetivo específico 2

Esta operación de construcción de la presa de relaves se iniciará por la limpieza y desbroce de terreno. Luego, en el inicio de proyecciones para la construcción de la presa de relaves, se tiene que ejecutar una excavación del depósito donde se cimentara el dique principal y donde se instalaran los sistemas de drenajes. El dique se construirá con material proveniente de la excavación y material de préstamo bajo la metodología de relleno masivo. En donde, conforme se avance en su construcción, se hará un control de calidad por cada 3 capas conformada llamado ensayo por reemplazo de volumen de agua, así también, antes de cada capa conformada se ejecutará un ensayo de humedad para validar si se encuentra dentro del rango de humedad establecido por los criterios que es de 8.7% hasta 9.5%. Asu vez, en el medio del desarrollo de la conformación el dique se implementará la instalación de sistemas de drenaje.

**Figura 7.**

*Diagrama de procesos para alcanzar el objetivo específico 2*

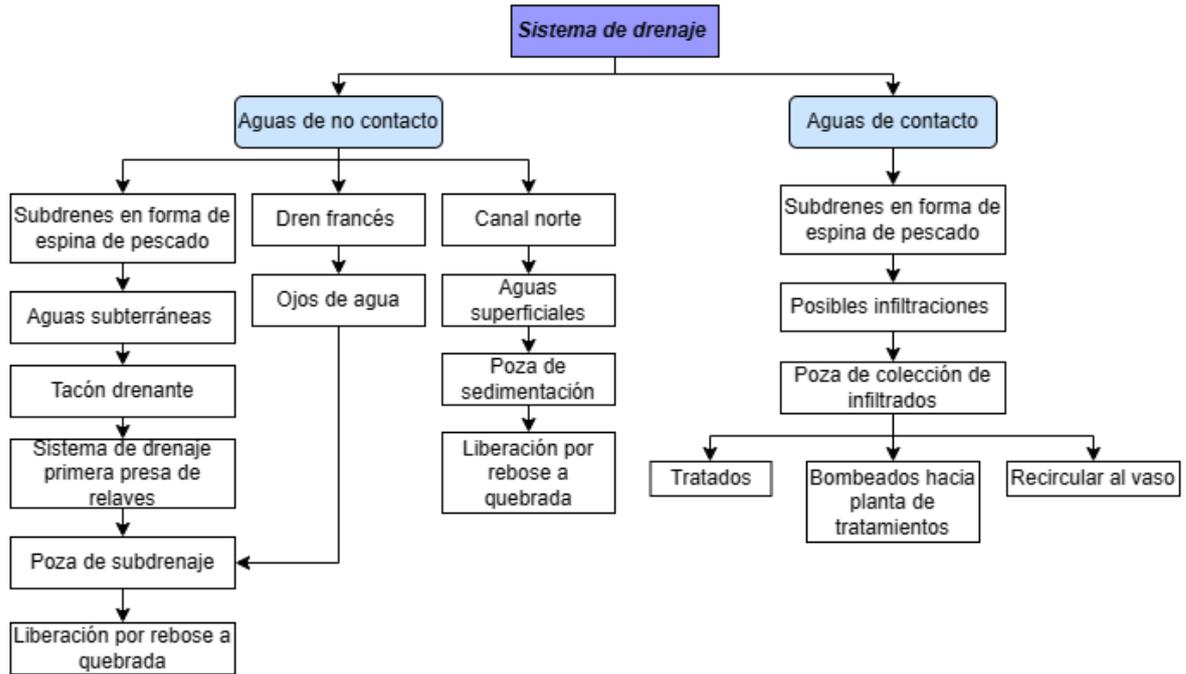


### 3.1.3 Diseño del objetivo específico 3

El sistema de drenaje de la presa de relaves se ejecutará en 2 partes. La primera abarcará las que son para aguas de no contacto conformado por subdrenes en forma espina de pescado el cual está instalado de forma subterráneo bajo el vaso de la presa de relaves. Así también, este está conectado al sistema de drenaje existente de la primera presa mediante un tación de drenaje para luego conectarse hacia la poza de subdrenaje la cual capta las aguas y por rebose va liberando hacia la quebrada. Además, en este grupo incluye el dren francés captará agua de ojos de agua, el cual también se conectará al sistema de drenaje antes mencionado. En este mismo grupo, se tiene al canal norte el cual captara aguas de no contacto superficiales en la sección norte de la presa, este sistema estará conformado por una sección trapezoidal y rectangular donde se iniciaría con una sección con tuberías para luego pasar a un canal abierto con secciones conformados por pantallas deflectoras en zonas de pendientes elevadas que tendrán como objetivo reducir velocidades del flujo para finalmente llegar a una poza de sedimentación donde por rebose se entregara las aguas a la quebrada. En segundo, se tiene a las aguas de contacto las cuales abarcan un subdren en forma de espina de pescado que se encargara de captar las posibles infiltraciones con el objetivo de controlar las presiones que pueden impactar negativamente en la estabilidad de la presa. Esta se instala encima al revestimiento de vaso de la presa. Las aguas de contacto captadas por este sistema se van hacia la poza de colección de infiltrados donde podrá ser tratada, bombeada a la planta para tratarla o recircularla al vaso.

**Figura 8.**

*Diagrama de procesos para alcanzar el objetivo específico 3*



### 3.1.4 Diseño de objetivo específico 4

Después de concluir la ampliación de la segunda presa de relaves, la parte final consiste en impermeabilizar el depósito, siguiendo una serie de pasos. En primer lugar, la

**Figura 9.**

*Diagrama de procesos para alcanzar el objetivo específico 4*

geomalla uniaxial se desenrolla y se colocan sobre la superficie del suelo mejorado,

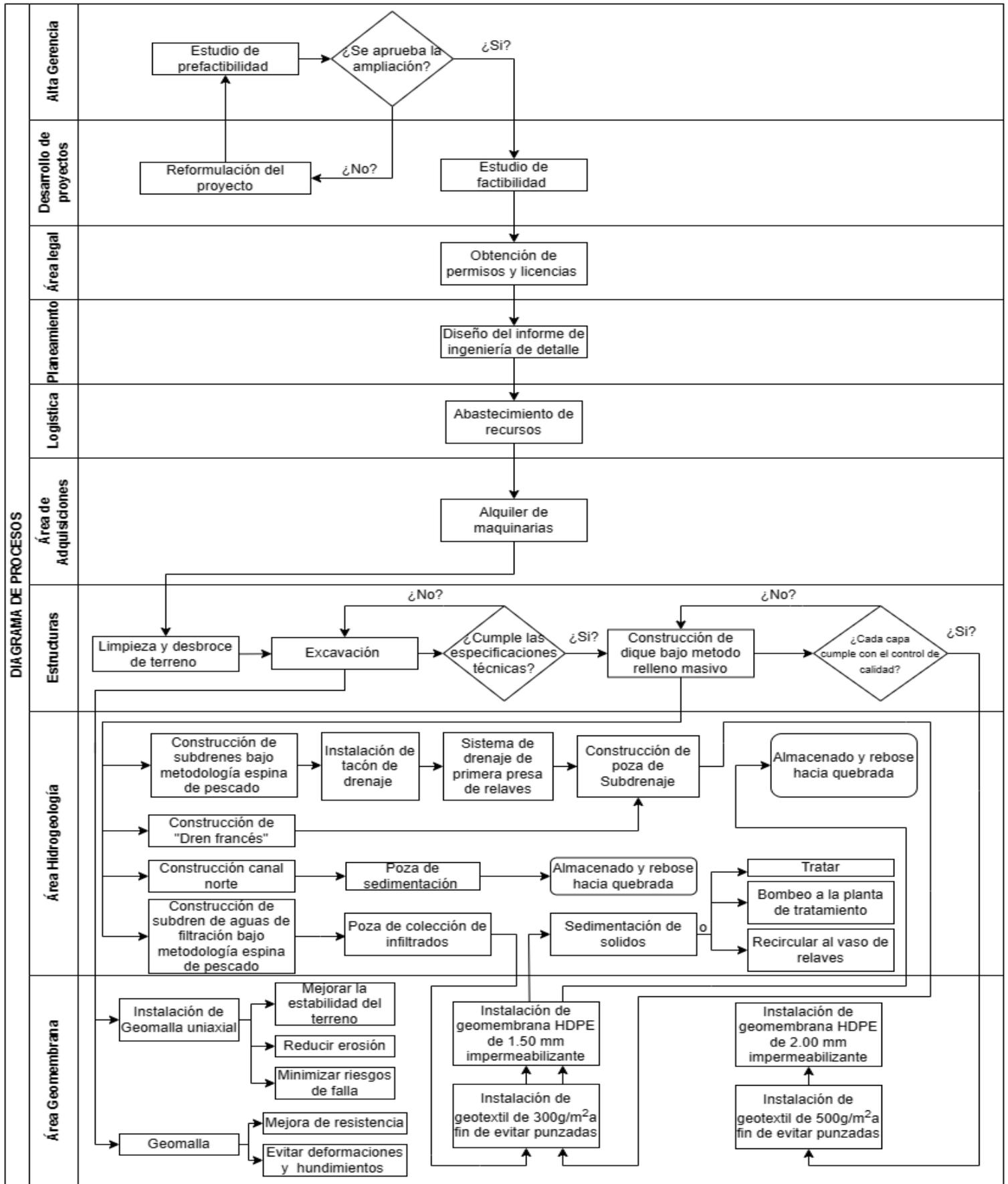


teniendo como objetivo mejorar la estabilidad, reducir la erosión y minimizar los riesgos de falla en diferentes partes de la estructura de la presa de relaves. En segundo lugar, la geomalla se deberá colocar sin arrugas sobre la superficie a tratar, se deberá fijar con puntillas de acero y arandelas para eliminar arrugas y pliegues. Su función principal es mejorar la resistencia y la capacidad de carga de la superficie, distribuyendo las tensiones de manera uniforme y evitando deformaciones, hundimientos y agrietamientos.

En tercer lugar, el geotextil no tejido se utiliza como capas de revestimiento su función es

**Figura 10.**

Diagrama de procesos para proteger a la geomembrana, y son utilizadas en el vaso, taludes y canales de drenaje de



la presa de relaves. finalmente, después de colocar el geotextil no tejido como capa de protección se coloca la geomembrana, de las cuales se realiza el anclaje y fijación, pruebas de control de calidad y por último el monitoreo constante.

### **3.2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN**

**3.2.1. Población:** La población considerada en este estudio abarca a las dos presas de relaves de la instalación minera ubicada en la región norte de Perú.

**3.2.2. Muestra:** Se optó por tomar la muestra de manera inmediata en la Presa de Relaves fase 2 ubicada en la zona Norte, donde se llevó cabo la ampliación

#### **3.2.3. Instrumentos de investigación**

En este apartado se ha colocado todos los instrumentos de uso que nos facilitó esta investigación que no permite validar objetivos definidos. Las herramientas fueron las siguientes:

- Fuentes especializadas bibliográficas

Estas han aportado como información complementaria para la información recolectado en campo, informes y experiencia interna de colaboradores de la unidad minera. Las fuentes bibliográficas principales fueron Scopus, Springer, Google Scholar, Scielo, sciencedirect y repositorios académicos. Esta información de uso de estas fuentes provino de artículos académicos, revistas indexadas, informes técnicos, libros, tesis y web de organizaciones mineras u afines.

- Informes de técnicos

Los informes técnicos realizados en la ampliación de esta presa de relaves fueron importantes para garantizar, la operación efectiva y el cumplimiento de regulaciones en estas estructuras. Por tal motivo, los informes con las que más se trabajó fue control de calidad para realizar las pruebas y ensayos realizados en materiales de construcción, como suelos, rocas, materiales de revestimiento y sistemas de drenaje.

- Informe de ingeniería de detalle

Este documento presenta una descripción completa detallada del modelo construcción y operación de la presa de relaves. Este documento nos aporta información de importancia sobre las áreas involucradas en la presa abarcando así materiales, equipos, normas, estándares, marco legal, diseño, diseño geotécnico, implementación de EIA; y análisis y evaluación de riesgos.

### 3.2.4. Procedimiento Metodológico

#### 3.2.4.1. Desarrollo de objetivo específico 1

En un inicio se ejecutó la adaptación de los estudios básicos obtenidos de la unidad minera. Es decir, se ejecutó el ajuste estudios topográficos, geológicos, geotécnicos, de peligro sísmico e hidráulico a fin de usarlos para el desarrollo del diseño de la presa de relaves. La adecuación del estudio topográfico se ejecutó mediante la obtención de dos puntos geodésicos obtenidos de un informe ejecutado por una contrata para la unidad minera, los cuales serán importancia porque conectarán con nuevos puntos relevantes en el terreno y ayudara a garantizar la precisión del replanteo del proyecto. La data topográfica de necesidad para este replanteo será proporcionada por la unidad minera. Asimismo, se ejecutó la adecuación de los estudios geotécnicos ejecutados en el 2014 y 2018 lo cuales abarcaron la ejecución de perforaciones, ensayos de densidad, calicatas, humedad in situ, permeabilidad, refracción sísmica, de MASW – MAM y ensayos de tomográfica ejecutados en la zona de ampliación. Ello permitió, a partir de la información recolectada obtener la descripción de las unidades geotécnicas.

**Tabla 2**

*Unidades Geotécnicas*

<i>Unidad Geotécnica</i>	<i>Material</i>	<i>Peso Unitario</i>		<i>Cohesión c(kPa)</i>	<i>Ángulo de fricción <math>\phi</math> (°)</i>
		<i>Y(Kn/m3)</i>	<i>Ysat(Kn/m3)</i>		
1	Material de relleno no controlado	19	20	5	36
2	Material de cantera	20	21	10	40
3	Deposito Morrénico	20	21	10	34
4	Desmonte de mina	20	21	5	36
5	Deposito Coluvial	18	19	5	30
6	Suelo orgánico	17	18	0	20
7	Desmonte de mina Nv. 240	22	23	4	36
8	Basamento Rocoso	24	25	100	45
<i>Unidad Geotécnica</i>		<i>Tamaño Máximo</i>		<i>% de finos máximos</i>	
Unidad Geotécnica 09: Relleno con material propio		12"		5%	

*Nota:* La información fue extraída de una fuente privada, la misma que es consecuencia de la recopilación y análisis de la empresa en estudio. Adaptado de "Unidades geotécnicas", por unidad minera al norte del país área de Desarrollo de proyectos, 2023.

La interpretación de resultados de las investigaciones geofísicas ejecutado por una contrata en complemento y establecimiento de parámetros de deformación elástica. Dio como resultado parámetros para la caracterización geotécnica que se utilizaran en el análisis y diseño geotécnico. En base a la caracterización del terreno, se estableció que se deberá eliminar la cobertura orgánica por medio de la excavación hasta llegar a la cota 4203 m.s.n.m.

Asimismo, se ejecutó la adecuación de los informes de peligro sísmico donde en base a los resultados obtenidos se encuentra que el área se encuentra influenciada por un proceso de subducción y distribuidos en profundidad se tiene:

- Subducción de intraplaca y continental con actividad sísmica
- Concentración creciente hacia el noreste
- Subducción de interfase hacia el Suroeste importante con actividad sísmica
- Subducción subhorizontal bajo placa Sudamericana de la placa Nazca

De acuerdo con la sismicidad histórica la intensidad de estos varía entre III y VII grados en la escala de Mercali modificada. Luego, en base a los resultados obtenidos se recomendó para las estructuras del proyecto:

**Tabla 3**  
*Tipo de Rocas*

<i>Tipo de Roca</i>	<i>PGA (g)</i>	<i>Periodo de Retorno</i>	<i>Probabilidad de excedencia</i>	<i>Periodo de Exposición</i>
Tipo B	0.296	475 años	10%	50
Suelo muy denso o roca blanda (Tipo C)	0.395			

A pesar de ello, el ingeniero a cargo podrá variar el periodo de retorno en base a importancia y riesgos respetando las normativas y a partir de ello y con los resultados de este estudio adaptado establecer los valores de PGA definitivos para el proyecto.

Del mismo modo, se ejecutó la adecuación del estudio de hidrología “Plan de cierre de pasivos ambientales mineros e ingeniería de factibilidad de relavera de la unidad minera” del 2017. Donde a base de la estación más cercana a la unidad minera se estableció:

**Tabla 4**  
*Temperatura*

<i>Temperatura</i>	<i>Valores (°C)</i>
Máxima media anual	15.9
Media anual	13.9
Mínima media anual	-11.10

A base de la estación más cercana a la unidad minera y con recopilación de data de 2 estudios de 2016 y 2018 de precipitaciones máximas que poseen una información que abarca 30 años que va desde 1988 a 2017 la cual fue sometida a la prueba de datos dudosos donde se concluyó que no poseía valores atípicos. A partir de la información recolectada se ejecutó curvas IDF para tiempos de retorno de 2 a 500 años bajo la metodología de Dick Peschke, la cual tiene como objetivo darnos información para saber cuánta lluvia esperar en un periodo de tiempo y con qué frecuencia se espera que pase en función de un tiempo de retorno. Asu vez, se calculó también los tiempos de concentración bajo la metodología Hathaway, Ven Te Chow y Temez donde se obtuvo un valor promedio de estos métodos de 73.51 minutos. Es decir, ello nos ayuda a evaluar cómo se comporta el flujo de aguas durante las lluvias lo cual nos permitió diseñar el sistema de drenaje. En base a la información descrita se estimó los caudales máximos para el canal sur y norte, los cuales se describen en la tabla siguiente.

**Tabla 5**  
*Caudales máximos*

Áreas de aporte	Caudales Máximo (m <sup>3</sup> /s)				
	Área_k <sup>m</sup> 2	Tr = 100	Tr = 150	Tr = 200	Tr = 500
Zona Norte	0.03	1.62	1.77	1.89	2.27

*Nota:* La información fue extraída de una fuente privada, la misma que es consecuencia de la recopilación y análisis de la empresa en estudio. Adaptado de "Caudales máximos estimados", por unidad minera al norte del país área de Desarrollo de proyectos, 2023.

A partir de los estudios descritos se estructurará los criterios de diseño que servirán como base para el desarrollo constructivo y operativo de la presa de relaves. Los cuales están direccionado por los estándares internaciones de ingeniería civil, minera, geotécnica e hidráulica. Así también, conforme con la normativa vigente recomendada por el MEM

**TABLA 6**  
*Criterios de Diseño Geotécnico*

N°	Descripción	Valores de ingeniería	Metrados	Unidad
<b>1</b>	<b><i>Dique principal</i></b>			
1.1	Material de conformación	-	68250 m <sup>3</sup>	m.s.n.m.
1.2	Cota de corona	4203	-	Nivel máx. de corona
1.3	Ancho de corona	8	-	m
1.4	Longitud de corona	115	-	m
1.5	Altura de conformación	15	-	m
1.6	Borde libre	2	-	m
1.7	Talud mínimo de conformación aguas arriba	1.50: 1.00	-	H: V

*Nota:* La información fue extraída de una fuente privada, la misma que es consecuencia de la recopilación y análisis de la empresa en estudio. Adaptado de "Criterios de diseño", por unidad minera al norte del país área de Desarrollo de proyectos, 2023.

1.8	Talud máximo de conformación aguas abajo	2.10: 1:00	-	H: V
<b>2</b>	<b><i>Factor de seguridad - Análisis global</i></b>			
2.1	F.S. mínimo estático	1.5		
2.2	F.S. mínimo pseudoestático	1		
2.3	Periodo de retorno	475		años
2.4	Aceleración de diseño	0.15		
2.5	Coefficiente sísmico	0.15		
2.6	Aceleración pico	0.3		PGA

**TABLA 7**

*Criterios de Diseño Hidráulico*

<b>Nº</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valores de ingeniería</b>	<b>Metrados</b>	<b>Unidad</b>
<b>1</b>	<b><i>Vaso de almacenamiento</i></b>			
1.1	Sistema de impermeabilización del vaso	-	45000	-
1.2	Geotextil no tejido 500 gr/m2		45000	m2
1.3	Geomembrana HDPE e=2.00 mm		45000	m2
1.4	Separación entre drenes subterráneos	30		m
1.5	Separación entre drenes de infiltración	30		m
1.6	Sistema de drenaje de aguas subterráneas	-	-	-
1.7	Sistema de drenaje de aguas de infiltración	-	-	-
<b>2</b>	<b><i>Poza de colección de infiltrados</i></b>			
<b>2.1</b>	<b><i>Movimiento de tierras</i></b>			
2.1.1	Taludes de corte en terreno natural mínimos	01:01	-	H: V
2.1.2	Taludes de corte en roca máximos	0.5: 1	-	H: V
<b>2.2</b>	<b><i>Dimensiones</i></b>			
2.2.1	Capacidad de embalse	600	-	m3
2.2.2	Tiempo mínimo de operación	5	-	días
2.2.3	Caudal de ingreso	0.002	-	m3/s
2.2.4	Geomembrana HDPE e=1.5 mm sobre geotextil no tejido 300gr/m2		280	m2
2.2.5	Base menor	20 x 10	-	m
2.2.6	Altura	2	-	m
2.2.7	Borde libre	0.5		m
<b>3</b>	<b><i>Poza de subdrenaje</i></b>			
<b>3.1</b>	<b><i>Movimiento de tierra</i></b>			
3.1.1	Grado de compactación en rellenos	95	70 m3	%
3.1.2	Talud de corte de terreno natural mínimo	1: 1	-	H: V
3.1.3	Talud de corte en roca	0.5: 1	-	H: V
3.1.4	Talud de relleno de terreno natural mínimo	1.5: 1	-	H: V
<b>3.2</b>	<b><i>Dimensiones</i></b>			
3.2.1	Capacidad de embalse	140	-	m3
3.2.2	Tiempo de operación	1	-	día
3.2.3	Caudal	0.002	-	m3/s
3.2.4	Geomembrana HDPE e=1.5 mm sobre geotextil no tejido 300gr/m2	-	285	m2
3.2.5	Base menor	10 x 5	-	m

3.2.6	Altura	1.5	-	m
3.2.7	Borde libre	0.5	-	m
4	<b>Canal Norte</b>			
4.1	Grado de compactación en rellenos	95	-	%
4.2	Pendiente mínima en tramo de descarga	2	-	%
4.3	Caudal máximo	1.6	-	m <sup>3</sup> /s
4.4	Sección rectangular	85	-	m
4.5	Sección rectangular rápida	17	-	m
4.6	Línea de conducción	565	-	m

### 3.2.4.2. Desarrollo de objetivo específico 2

El desarrollo de este objetivo específico se ejecutó mediante dos pasos. Primero, se llevó a cabo la excavación la cual abarco la limpieza y desbroce del área donde se construyó la presa de relave para luego realizar las excavaciones necesarias para la construcción, que incluyeron el vaso, el dique principal, cunetas, zanjas de drenaje, alcantarillados y pozas de sedimentación. Para llevar a cabo estas excavaciones, se emplearon maquinarias pesadas como excavadoras, retroexcavadoras y volquetes para el movimiento de tierras. El propósito de estas excavaciones era eliminar cualquier vestigio de suelo inapropiado y garantizar la estabilidad del terreno. A continuación, se muestran figura 11 de referencia.

**Figura 11.**  
*Excavación de vaso de la presa de relaves*



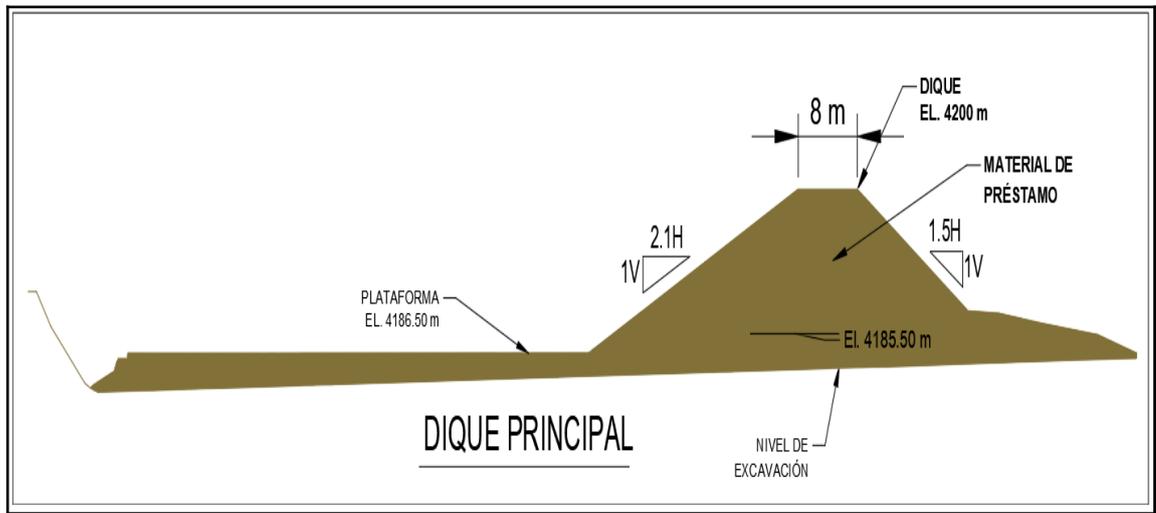
Posterior a la excavación del vaso se inició la construcción del dique de la nueva presa, la cual se ejecutó bajo la metodología de relleno masivo. Este dique se conformó por material de la excavación y por material de préstamo de otras áreas de la obra. Durante la conformación del dique también se fue estructurando los sistemas de drenaje encargados de gestionar el agua tanto dentro como fuera de la presa. La extensión de las capas, la humedad, la granulometría, las pasadas necesarias por rodillo vibratorios fueron

determinados por ensayos previos a su ejecución garantizando con ello la resistencia y compactación adecuada. Además, previo a conformar cada capa era necesario ejecutar un ensayo de humedad del terreno con el fin de verificar que este estuviera apto para la compactación. Luego, posterior a este proceso, por cada tres capas conformadas se ejecutaba un ensayo de control de calidad para verificar si las capas estaban dentro de los rangos establecidos por el diseño, este control de calidad se realizaba por medio del ensayo de densidad de campo por método de reemplazo de agua.

**Tabla 8**  
*Criterios de Diseño*

<i>Descripción</i>	<i>Valores</i>	<i>Unidades</i>
<i>Nivel máximo de corona</i>	4200.00	<i>m.s.n.m.</i>
<i>Volumen de conformación</i>	68,241.60	<i>m<sup>3</sup></i>
<i>Altura de conformación</i>	15.00	<i>m</i>
<i>Longitud de corona</i>	115.00	<i>m</i>
<i>Ancho de corona</i>	8.00	<i>m</i>
<i>Borde libre</i>	2.00	<i>m</i>

**Figura 12.**  
*Perfil del Dique*

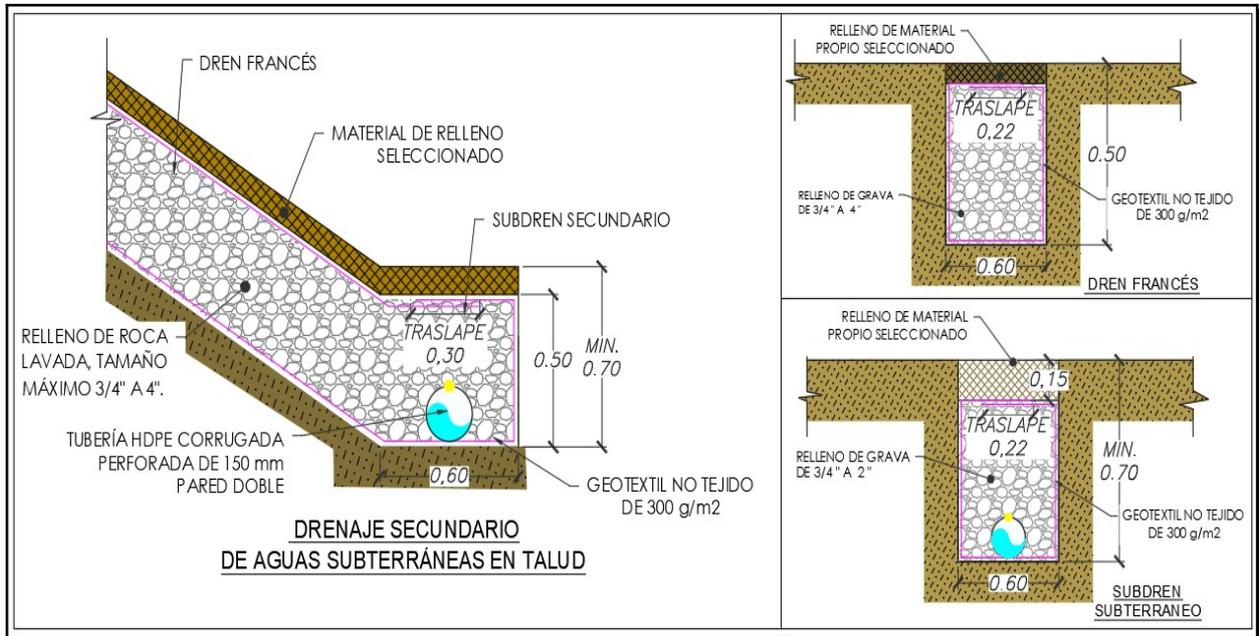


*Nota:* Adaptado de dique principal, por unidad minera al norte del Perú, 2023, Área de Desarrollo de proyectos.

**3.2.4.3. Desarrollo de objetivo específico 3**

El desarrollo de este objetivo está enfocado en la construcción del sistema de drenaje el

**Figura 13.**  
*Sistema de Drenaje de Aguas Subterráneas*



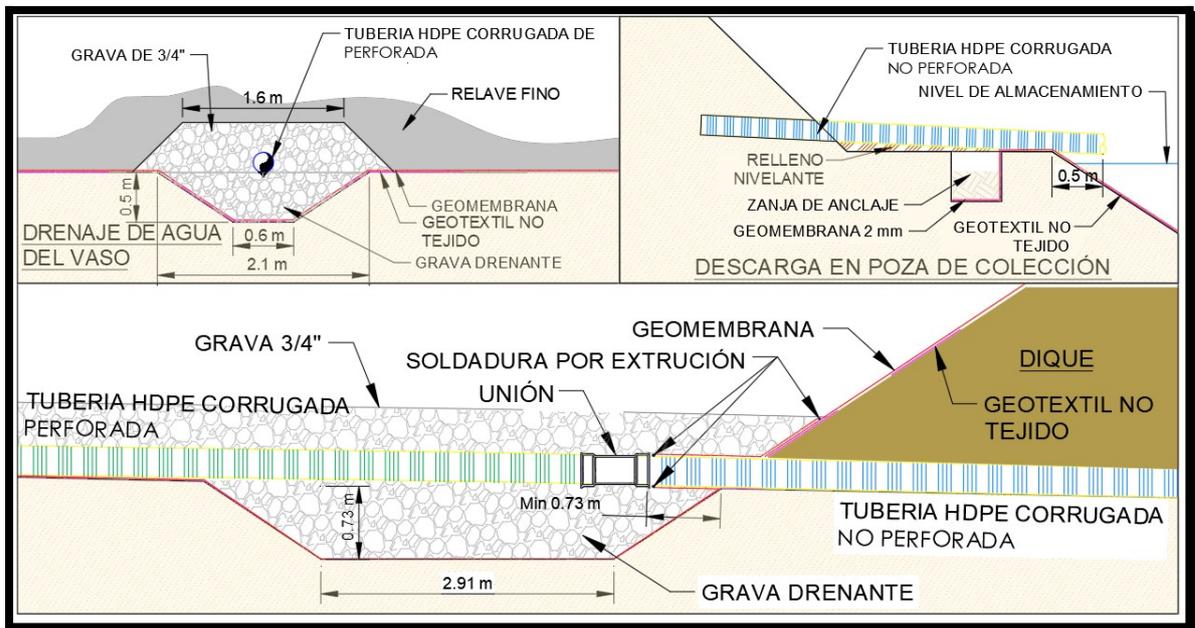
cual se desarrolló en 3 estructuras. La primera, abarca el sistema de drenaje de aguas subterráneas el cual inicio al realizar la excavación de las zanjas en forma de espina de pescado donde se instaló tuberías de HDPE corrugada pared doble. Estas tuberías se apoyaron sobre una capa de material propio seleccionado y se rodearon con relleno de grava para permitir el paso del agua. Posteriormente, se cubrieron con un geotextil. Adicionalmente, dentro de las zanjas excavadas se tenían también a las que conformarían a las del sistema del dren francés. Estas zanjas se llenaron con rocas lavadas de hasta 4 pulgadas de tamaño máximo, y se cubrieron con un geotextil no tejido. En la parte superior de las zanjas, se aplicó material propio seleccionado, mientras que en las partes laterales se utilizó material de mejoramiento conformado por bloques y bolonería. Este dren francés construido conecta al sistema de subdrenaje de aguas subterráneas el cual desemboca sus aguas en la poza de subdrenaje.

*Nota:* La información fue extraída de una fuente privada, la misma que es consecuencia de la recopilación y análisis de la empresa en estudio. Adaptado de "Sistema de drenaje", por unidad minera al norte del país área de Desarrollo de proyectos, 2023.

El segundo abarca el sistema de Subdrenaje de aguas de infiltración y poza de colección de infiltrados. Por un lado, el sistema de drenaje de aguas filtradas que está se construyó colocando una tubería HDPE sobre el recubrimiento del geotextil y geomembrana puesta en el vaso. Luego, esta sección se llenó con grava de ¾ de pulgada, y el geotextil no tejido se colocó con el fin de cubrir y proteger el material de filtración contra la migración de partículas finas del suelo natural.

Este subdrenaje instalado tiene una conexión hacia la poza de infiltrados, la cual está estructurada de acuerdo con las dimensiones predefinidas en la propuesta del proyecto. Esta poza, que se instaló, consta de 2 cámaras de almacenamiento impermeabilizadas por la geomembrana y geotextil. A partir de esta poza, se podrá hacer un monitoreo de la calidad del agua colectada y se bombeará hasta una tubería proveniente de la primera presa de relaves para ser utilizada en operaciones mineras o recircularlo hacia la presa. Además, se implementó un sistema automático de bombeo al alcanzar un 90% de capacidad máxima proyectada.

**Figura 14.**  
*Sistema de drenaje de aguas de infiltración*



*Nota:* La información fue extraída de una fuente privada, la misma que es consecuencia de la recopilación y análisis de la empresa en estudio. Adaptado de "Sistema de drenaje", por unidad minera al norte del país área de Desarrollo de proyectos, 2023.

Por otro lado, el tercero abarca, el sistema para el manejo de aguas superficiales, que se realizará a través de un canal norte conformado por dos secciones. La primera está conformada por una sección trapezoidal, que se basa en una tubería HDPE de doble pared,

y una segunda sección rectangular basada en un canal abierto. Estos canales tienen el objetivo de captar el agua producto de escorrentías de las lluvias en la parte alta de la estructura. En la parte final del canal con una zona de rápidos, que está conforma por una zona rectangular estructurada con pantallas deflectoras, diseñadas para reducir la velocidad del flujo, ya que la pendiente es muy elevada en algunos tramos. En la parte final, esta zona de rápidos se conecta a una estructura de entrega el cual se conforma por una zona de transición trapezoidal, luego una poza de sedimentación de sección rectangular, donde las aguas que no están contacto se liberan hacia la quebrada.

#### **3.2.4.4. Desarrollo de objetivo específico 4**

El desarrollo de este objetivo específico se realizó la instalación del revestimiento en la presa de relaves. En las estructuras instaladas tanto en el vaso de la presa como en el sistema de drenaje se inició con el desenrollo del geotextil sobre el terreno que ya estaba previamente preparado, luego a fin de evitar su movimiento se sujetó con gravas clavos o sacos llenos de tierras. Luego, se desenrolla la geomembrana sobre el geotextil para dejarle un tiempo que se adapten logrando así que las arrugas y pliegues se desaparezcan. Posterior a ello se superpuso dos piezas de geomembrana, es decir, que una parte de geomembrana cubra a la otra a fin unidas por medio de termofusión o geosellantes apropiados a fin de crear una sección segura y herméticas evitando filtraciones de líquido por medio de la unión. Las partes de esquinas y bordes se aseguran con grapas o sellantes a fin de evitar filtraciones de agua.

**Figura 15.**  
*Revestimiento del Dique de Presa de Relaves*



### 3.3 VALIDACIÓN DEL PROYECTO

#### 3.3.1 Resultado del Objetivo Especifico 1

##### 3.3.1.1. Factor de seguridad

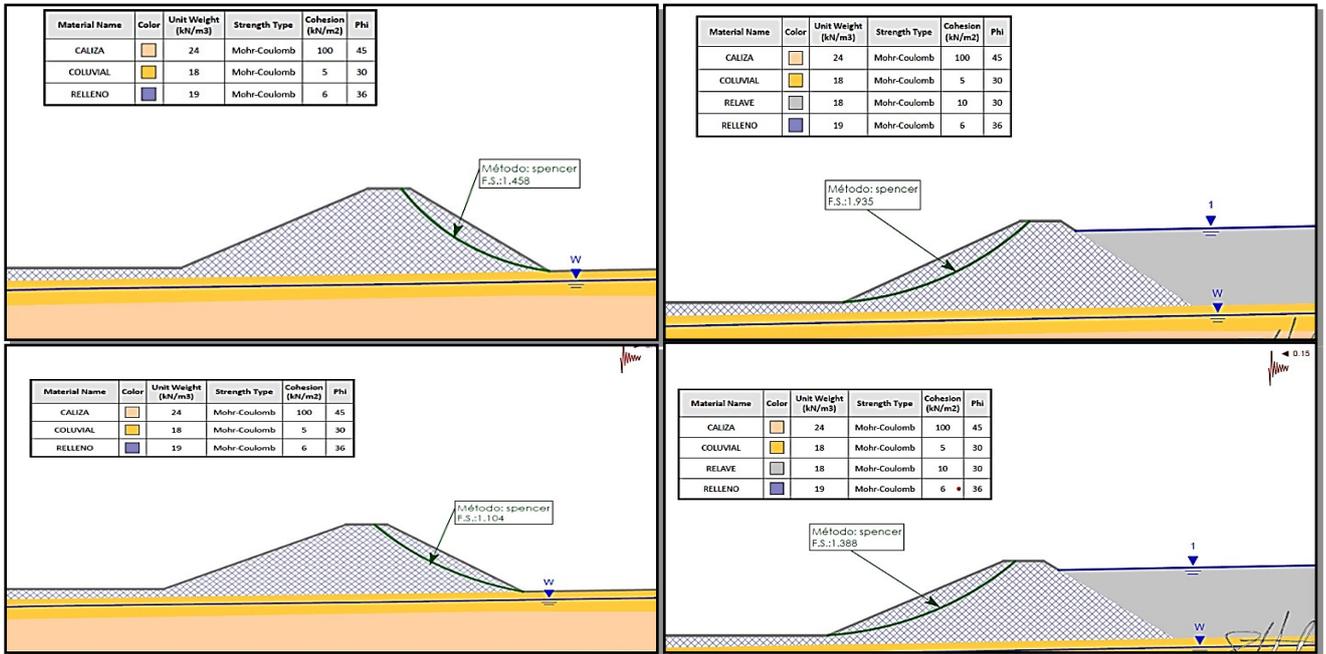
El informe sísmico proporciona información sobre el análisis de peligro sísmico y la estabilidad de un dique de depósito de relaves. Se han utilizado coeficientes sísmicos tanto para situaciones tanto para corto y largo plazo. A corto plazo, se ha empleado un coeficiente sísmico de 0.15, correspondiente al 50% de la Aceleración Pico del Suelo (PGA) para un sismo con un período de retorno de 150 años y una probabilidad de retorno del 10%. A largo plazo, el coeficiente fue de 0.21, representando un 40% del PGA, con un período de retorno de 475 años.

El estudio de estabilidad de taludes del dique reveló que tanto el factor de seguridad estático como pseudoestático superan los valores recomendados por ley. Los estudios realizados se

detallan en la figura 16, mientras el resumen se presenta en la Tabla 9.

**Figura 16.**

*Análisis Bidimensional Estático y Pseudoestático del Dique Principal a corto plazo y largo plazo*



*Nota:* La información fue extraída de una fuente privada, la misma que es consecuencia de la recopilación y análisis de la empresa en estudio. Adaptado de "Análisis bidimensional", por unidad minera al norte del país área de Desarrollo de proyectos, 2023.

**Tabla 9:**

*Resumen de Resultados de Análisis de Estabilidad*

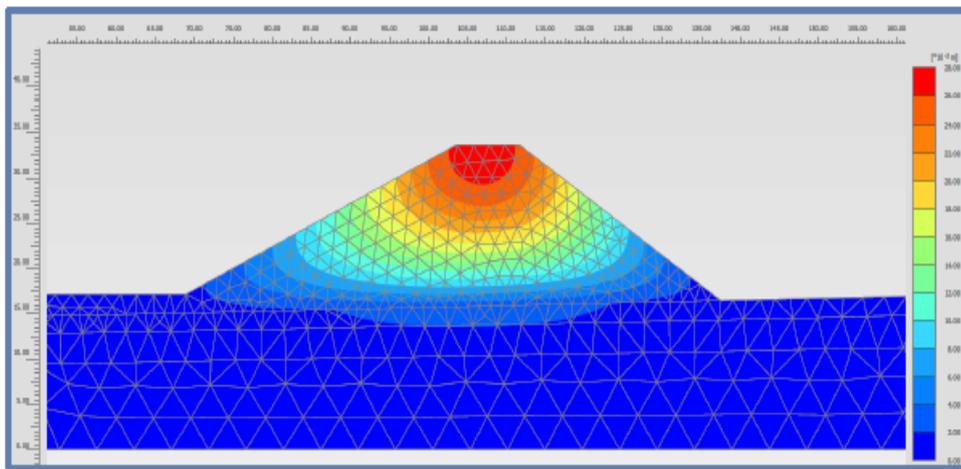
Análisis	Estático	Pseudoestático
Corto plazo	1.458	1.104
Largo plazo	1.935	1.388

En la Tabla 9, se visualiza que los resultados obtenidos cumplen con los criterios de análisis establecidos por el Ministerio de Energía y Minas, la Asociación Canadiense de Represas (CDA), las agencias de la Sociedad de Represas de los Estados Unidos (USSD) y la Oficina de Recuperación de los Estados Unidos (USBR). Esto se debe a que los factores de seguridad son mayores que los valores mínimos requeridos por estas entidades, que son 1.50 para el análisis estático y 1.00 para el análisis pseudoestático, en las condiciones de análisis físico. Es decir, se encuentra construida con una capacidad y resistencia superiores a las necesarias para contener los relaves y mantener la seguridad estructural.

### 3.3.1.2. Evaluación de asentamiento del dique

Utilizando el método de elementos finitos se hizo un análisis de asentamiento donde se obtuvo un valor máximo de 2.02 cm. De modo que para que el diseño sea el óptimo se espera que el nivel máximo operacional deje un borde libre de 2.00 m y como el relave fino es descargado entre las cotas 4186 y 4201 con su asentamiento máximo que no representa ni el 1% de la altura total del dique, se concluye que el dique posee un diseño óptimo.

**Figura 17.**  
*Análisis de asentamiento*



*Nota:* La información fue extraída de una fuente privada, la misma que es consecuencia de la recopilación y análisis de la empresa en estudio. Adaptado de "Análisis tenso-deformacional", por unidad minera al norte del país área de Desarrollo de proyectos, 2023.

### 3.3.2 Resultado del Objetivo Específico 2

#### 3.3.2.1. Evaluación de deformaciones

En este se evalúa las deformaciones inducidas por sismo por Bray y Macedo

**Tabla 10:**

*Deformaciones Inducidas por Sismos Permanentes*

Sección	Ky	Tr = 475 años	
		Dprom (cm)	Rango (cm)
Dique principal	0.33	0.87	(0.42 – 1.81) cm

*Nota:* La información fue extraída de una fuente privada, la misma que es consecuencia de la recopilación y análisis de la empresa en estudio. Adaptado de "Diseño geotécnico", por unidad minera al norte del país área de Desarrollo de proyectos, 2023.

En caso de un sismo de  $M_w = 7.9$  los desplazamientos serian menores a 0.87 cm para el dique principal lo cual no es suficientemente significativo para comprometer la integridad del dique principal.

### 3.3.3 Resultado del Objetivo Especifico 3

#### 3.3.3.1. Porcentaje de pendiente de tuberías diseñadas que permitan velocidades mayores a 0.60 m/s.

Para interpretar los datos proporcionados en cuadros y evaluar el porcentaje de pendiente de tuberías diseñadas que permiten velocidades mayores a 0.60 m/s, podemos realizar los siguientes cálculos:

En primer lugar, observamos la tabla 12, que muestra los rendimientos hídricos en la microcuenca para los mismos niveles de recurrencia (Tr):

**Tabla 11:**

*Rendimiento Hídrico (m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup>)*

Microcuenc a	Tr=5	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100	Tr=150	Tr=200	Tr=500
	0.48	0.65	0.89	1.08	1.2	1.42	1.51	1.82

Para calcular el caudal máximo proyectado para las zonas de influencia de los canales del Sur y del Norte (que cumplen con la velocidad mínima de 0.60 m/s), utilizamos la tabla 11:

**Tabla 12:**

*Caudal Máximo (m<sup>3</sup>/s)*

Áreas de aporte	Área km <sup>2</sup>	Tr=100	Tr = 150	Tr=200	Tr=500
Quebrada	3.70	4.78	5.25	5.59	6.71
Sector Sur	0.23	0.30	0.33	0.35	0.42
Sector norte	0.03	1.62	1.77	1.89	2.27

Para determinar el porcentaje de pendiente de tuberías diseñadas que permiten velocidades mayores a 0.60 m/s, primero calculamos el caudal máximo proyectado en cada área de aporte para el nivel de recurrencia Tr=100 y luego comparamos ese caudal con el rendimiento hídrico correspondiente para Tr=100 en la microcuenca. Esto nos permitirá identificar si se cumplen las condiciones necesarias para evitar estancamientos en el sistema de drenaje.

Por ejemplo, para la Quebrada:

- El caudal máximo proyectado para Tr=100 es 4.78 m<sup>3</sup>/s, Este valor se obtiene de la Tabla 14 y representa la estimación del caudal máximo que se espera en la Quebrada en un evento con un nivel de recurrencia de Tr=100.
- El rendimiento hídrico para Tr=100 en la microcuenca es 1.2 m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup>, Este valor se obtiene de la Tabla 13 y representa la cantidad de agua que se espera que fluya

por unidad de área en la microcuenca en un evento con un nivel de recurrencia de  $T_r=100$ .

- Área de la Quebrada (3.70 km<sup>2</sup>): Este valor es el área de la quebrada que estamos considerando para el cálculo.

La ecuación compara el caudal máximo proyectado (4.78 m<sup>3</sup>/s) con el producto del rendimiento hídrico y el área de la Quebrada:

$$4.78 \geq 1.2 * 3.70$$

$$4.78 > 4.4$$

Esto indica que la pendiente de tuberías diseñadas en la Quebrada cumple con la velocidad mínima requerida. por tal motivo, se realizó todo este cálculo para todas las áreas de aporte y niveles de recurrencia y se determinó que cumplen las condiciones en todos los casos.

### **3.3.3.2. Inspección visual de líneas y pendientes**

Normalmente bajo inspección visual basta para validar que se haya lograda una buena línea y pendiente. Es de importancia saber que dentro del primer mes luego de instalar las tuberías cualquier deflexión será notada pero la mayoría serán perceptibles dentro de los primeros dos días, aproximadamente 90% a 95 %. Esta inspección se ejecutará posterior a la colocación del tubo y relleno, pero puede ser antes de que el relleno fino se coloque. Lo que se buscara en la inspección es corte, rasgaduras, abolladuras, deformaciones, grietas, fracturas, corrosión, erosión y fugas de líquido. En de importancia tomar registro de los daños encontrados anotando ubicación y magnitud a fin de llevar de hacer seguimiento y planificar futuras acciones.

## **3.3.4 Resultado del Objetivo Específico 4**

### **3.3.4.1. Conformidad de soldadura de geomembrana**

Para ello se llevó a cabo controles de calidad el cual consistió tanto en pruebas constructivas como destructivas. Siendo las pruebas destructivas las que se prueban en todas las soldaduras.

- Prueba no destructiva

Dentro de las pruebas no destructivas tenemos a la de la Caja de Vacío la cual se aplicó en toda su longitud. Primero, previo a aplicar la caja de vacío se debe aplicar una solución jabonosa encima la soldadura a fin de examinar para luego colocar la caja de vacío encima de la soldadura lo cual generara un vacío de (35 a 55) kPa. Se observará

por 15 segundos se observa en toda la longitud la formación de alguna burbuja. Estas pruebas serán ejecutadas con un traslape no menor a 75 mm en relación con la sección pasada y sección que presente burbujas se identificara, reparara y se ejecutara nuevamente la prueba. En caso no poderse ejecutar la prueba de caja de vacío se procederá proteger la parte soldada con cinta de cobertura soldada con extrusión.

En caso se use una soldadura de doble cuña caliente la prueba a usarse será la de presión de aire en lugar de la caja vacía. Esta consiste en someter a cada longitud soldada a una presión de 30 psi y ejecutar un monitoreo por 5 minutos donde para ver que este todo bien la soldadura no debe perder más de 2 psi de presión y estabilizarse, as también, como validar que toda la longitud del canal se encuentre correctamente presurizada. En caso este tipo de soldadura no se puede someter a esta prueba de aire se optará por concluir que la costura soldada fallo. En tal caso, se procede a reparar y volver a intentar la soldadura.

En caso no se podría ejecutar ninguna de las pruebas anteriormente mencionadas se realizará la prueba de la chispa. Este proceso iniciara colocando un alambre o una cinta conductora de electricidad por abajo de la costura previo a ejecutar la soldadura. Asimismo, se deberá ejecutar un ensayo de calibración a fin de asegurar que el segmento no soldado se identifique bajo las condiciones y procedimiento del equipo que se va a utilizar. Una vez completada la soldadura se deberá encender el equipo para la prueba de chispa y ponerlo cerca de 25 mm por encima de la zona soldada y recorriendo toda la longitud. En caso no aparecer la chispe se considera que no hay fugas. En caso encontrar una fuga esta deberá ser reparada y volver a ejecutar la instalación de la geomembrana en la zona fallada.

- Prueba destructiva

Para esta prueba se debe obtuvo como mínimo una muestra de costura por cada 150 m. Si alguna soldadura presentara apariencia de estar fallada se deberá reparar antes de ejecutar el muestreo destructivo. Esta prueba se hace a medida que avanza la instalación y no en la finalización del proyecto. Todas las muestras serán enumeradas. De estas muestras se llevarán registro de ubicación, fecha, hora, aparato, temperatura, criterio de aprobación y nombre del técnico encargado. Los huecos ocasionados por la muestra destructiva se repararán inmediatamente. Estas muestras deben medir 1000 mm de largo por 300 mm de ancho como mínimo con una centrada costura. Las muestras serán cortadas en tres partes, dos de 300 mm por 300 mm y una de 300 mm

por 400 mm. Previo a la ejecución del tomado de muestra se cortan cupones de 25 mm de ancho por cada lado muestreado para luego ser probadas en campo con un tensiómetro. En caso de que estos cupones extraídos fallaran se deberá obtener más muestras y ejecutar las pruebas hasta lograr que cumplan los criterios de pelado y rotura. Una vez que estos cumplan los requisitos a nivel de resistencia se procederá a obtener ya la muestra destructiva y hacer la división como se mencionó con anterioridad, cabe mencionar, que las muestras destructivas no se podrán obtener de pruebas de cupones falladas. Además, se ejecutan pruebas de soldadura en campo donde si una muestra falla se procederá por tomar otra adicional y se reparará de tener la necesidad. Las pruebas de soldadura están sujetas al cumplimiento de criterio de rotura, pelado y resistencia. Los procesos descritos se ejecutaron a fin de garantizar la integridad de las soldaduras previo a instalar el sistema de drenaje.

Estos procesos de control de calidad se ejecutaron a la par de la colocación del revestimiento del vaso y del sistema de drenaje garantizando una instalación adecuada que evite algún tipo de filtraciones. Es de importancia recalcar que todas las soldaduras se someterán como mínimo a una prueba no destructiva.

#### **3.3.4.2. Anclaje y fijación mediante inspección visual**

Se llevó a cabo una inspección visual con el supervisor de campo. Como se puede observar en la figura 18, se evidenció una adecuada compactación del suelo, garantizando un sólido anclaje y fijación. Esto asegura que la geomembrana permanezca en su posición sin desplazarse, incluso ante la influencia de fuerzas como el viento, la presión del agua y otras condiciones ambientales.

#### **Figura 18.**

*Anclaje y fijación de la geomembrana mediante la compactación del suelo y sacos de*



#### **Figura 19.**

*Revestimiento total de la presa de relave*



### **3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

#### **a. Interpretación de los resultados objetivo específico 1**

En relación con la ejecución de los estudios básicos, refiriéndose a la topografía este nos otorgó a base de los puntos geodésicos tomados como base, una nueva poligonal la cual se usó para replantear el proyecto para la nueva presa de relaves. Por otro lado, para los eventos sísmicos se usaron los parámetros de la guía MEM, donde a partir de ello se decidió que se usará un periodo de retorno de 475 años. Es decir, se diseñará basado en la suposición de que un evento sísmico de gran magnitud ocurrirá en promedio una vez en cada 475 años. Asimismo, en el diseño de taludes y muros se usó un coeficiente sísmico de 0.15 y un PGA de 0.30. Indicando así, que la estructura está diseñada de forma más robusta, es decir para resistir un terremoto incluso más fuerte de los esperado. También, a nivel de factor de seguridad se usó superiores a lo que el reglamento nacional de estructuras el cual como mínimo exige 1.50 en condicionales estáticas y 1.25 en condiciones pseudo estáticas. Así también, superiores a los de la guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina con un factor de seguridad estático mínimo 1.5 y un factor de seguridad pseudo estático de 1.2. A partir de ello, se estableció un factor de seguridad mínimo en condiciones estáticas de 1.5 y en condiciones pseudo estáticas de 1. Estos valores fueron tomados de tal forma que pueda ayudar a reducir riesgos de fallas y garantizando mayor seguridad en la operación.

#### **b. Interpretación de los resultados del objetivo específico 2**

El seguimiento de la construcción del dique principal se llevó a cabo con un enfoque en la seguridad y la estabilidad de la estructura. Se establecieron parámetros de construcción antes de comenzar la obra y se implementaron controles de calidad durante la ejecución. Una vez que el dique estuvo completamente formado, se procedió a evaluar su estabilidad mediante la medición de deslizamientos, asentamientos y deformaciones. Esto se hizo con el objetivo de garantizar la seguridad y funcionalidad de la estructura, así como para prevenir impactos negativos en el medio ambiente y las comunidades circundantes. En la evaluación de la estabilidad del dique, se realizó un análisis bidimensional que reveló que tanto el factor de seguridad estático como el pseudoestático a corto y mediano plazo superaban los valores mínimos requeridos para asegurar una estabilidad física adecuada y evitar deslizamientos. Los valores a largo plazo también fueron satisfactorios, con un factor estático de 1.935 y un factor pseudoestático de 1.388, ambos por encima del mínimo

de 1.5 establecido como referencia. En cuanto a los asentamientos, se obtuvieron valores máximos de 2.02 cm, lo que representó menos del 1% de la altura total del dique, lo que no planteaba problemas significativos a corto y mediano plazo. En lo que respecta a las deformaciones inducidas por sismos, los desplazamientos fueron menores a 0.87 cm, lo que indicó que no representaban un impacto significativo ni afectaban la integridad del dique.

#### **c. Interpretación de los resultados objetivo específico 3**

Durante el seguimiento de la construcción del sistema de drenaje de la presa de relaves, se implementaron medidas interpretativas esenciales para garantizar su eficaz funcionamiento. En este proceso, se llevó a cabo una evaluación de los parámetros de construcción con el propósito de asegurar que el sistema cumpla con los estándares necesarios. En primer lugar, se llevó a cabo una verificación de la pendiente de las tuberías instaladas, con un enfoque en garantizar velocidades de flujo superiores a 0.60 metros por segundo. Para lograrlo, se evaluó el rendimiento hídrico en relación a los caudales máximos esperados. Estos rendimientos se calcularon en diferentes segmentos de longitud, desde 5 metros hasta 500 metros. Los valores obtenidos variaron entre 0.48 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> y 1.82 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Estas estimaciones confirmaron que las velocidades mínimas en las tuberías serían siempre superiores a 0.60 m/s, lo que es fundamental para asegurar un transporte eficaz y prevenir problemas como sedimentación, obstrucciones o erosión en el interior de las tuberías. Adicionalmente, se realizó una verificación visual de la pendiente y la alineación de las tuberías en los primeros días de su instalación, aprovechando este período crítico donde los problemas potenciales son más evidentes. Esta inspección visual permitió confirmar que no existían cortes, rasgaduras, abolladuras, deformaciones o grietas que pudieran interferir con el funcionamiento del sistema de drenaje. Estas acciones interpretativas resultaron de suma importancia, ya que no solo validaron la correcta instalación y operatividad del sistema de drenaje, sino que también generaron un registro documentado de cualquier posible problema que pudiera surgir en el futuro. Este registro se convierte en una herramienta valiosa para tomar medidas de mitigación de riesgos de manera oportuna y eficiente, asegurando así la integridad del sistema a lo largo del tiempo.

#### **d. Interpretación de los resultados específico 4**

La interpretación de este resultado detalla el control de calidad para las soldaduras de geomembrana en la impermeabilización de la presa de relave. Este proceso se divide en pruebas no destructivas y pruebas destructivas, y su objetivo principal es garantizar la

integridad de las soldaduras, evitando posibles filtraciones en el sistema. Las pruebas no destructivas, como la Caja de Vacío, la Presión de Aire y la Prueba de Chispa, se utiliza para detectar defectos potenciales en las soldaduras sin dañar el material. Estas pruebas se llevaron a cabo a lo largo de toda la longitud de las soldaduras, y cualquier defecto encontrado se corrigió antes de avanzar en el proceso. Las pruebas destructivas se realizan en muestras de costura obtenidas regularmente y se lleva un registro detallado de cada muestra, incluyendo ubicación, fecha, hora y otros datos relevantes. Si una muestra no cumple con los estándares de resistencia, se repitió el proceso hasta que se alcancen los criterios de calidad necesarios. Este enfoque garantiza que las soldaduras sean sólidas y confiables antes de la instalación del sistema de drenaje, lo que fue fundamental para prevenir posibles filtraciones que podrían comprometer la eficacia del proyecto de impermeabilización y su durabilidad a largo plazo. Además, se realizó una evolución mediante una inspección visual por un supervisor de campo. En la Figura 16, se pudo observar que el suelo había sido compactado de manera adecuada. Esto es importante porque garantiza un anclaje y fijación sólidos, lo que significa que la geomembrana se encuentra firmemente asegurada en su posición.

- Impacto Económico

En esta área se evaluó el impacto económico generado por la construcción de la ampliación de la presa de relaves. Por ello, en la tabla 13 se estructuró la evolución de la capacidad de almacenamiento de la presa de relaves mensualmente para los años 2014, 2022 y proyección 2024 medidos en ton/mes. La capacidad de almacenamiento proyectada para 2024 aumentará en 165% la capacidad mensual comparada con la actual que se tiene en uso. Esta ampliación de la presa se impactará positivamente a la unidad minera de la siguiente forma:

- Aminoramiento de costo de producción (\$/ton), debido a la reducción en costos de mano de obra, costos operativos, costo de transporte, costos financieros.
- Tiempo de vida útil de la mina aumentada lo cual permitirá a la unidad minera continuar extrayendo minerales y seguir generando ingresos durante más tiempo.
- Una mayor seguridad operativa garantizada por la presa la cual reducirá riesgos de derrames o fugas que podrían afectar el medio ambiente o comunidades aledañas.

**TABLA 13:***Capacidad de Almacenamiento de la Presa de Relaves*

<b>CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO</b>					
	<b>2014 - Primera presa de relave</b>	<b>2022 - Límite máximo de la primera presa de relave</b>	<b>2024 - Nueva Presa de Relave</b>		
	<b>Antes de la propuesta (Ton/mes)</b>	<b>Antes de la propuesta (Ton/mes)</b>	<b>Después de la propuesta (Ton/mes)</b>	<b>Incremento / Disminución</b>	<b>Variación %</b>
Enero	28,625	8,625	20,569	11,944	138%
Febrero	22,654	2,654	13,321	10,667	402%
Marzo	28,669	8,669	19,542	10,873	125%
Abril	27,582	7,582	21,569	13,987	184%
Mayo	30,932	10,932	23,842	12,910	118%
Junio	30,084	10,084	19,092	9,008	89%
Julio	33,289	13,289	27,658	14,369	108%
Agosto	32,574	12,574	22,896	10,322	82%
Septiembre	32,339	12,339	23,951	11,612	94%
Octubre	32,435	12,435	22,984	10,549	85%
Noviembre	25,997	5,997	16,658	10,661	178%
Diciembre	25,661	5,661	26,753	21,092	373%
<b>TOTAL</b>	<b>350,841</b>	<b>110,841</b>	<b>258,835.46</b>		

La Tabla 14 presenta el centro de costos en gastos generales, costos de supervisión y gastos

operativos para el proyecto de ampliación de la presa. Los gastos generales fijos están  
 Nota: Información al 19 de octubre de 2021. Adaptado de “INFORME N° 387-2021/MINEM-  
 DGAAM-DEAM-DGAM”, por Ministerio de energía y minas, 2023  
[https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2440910/RD\\_201\\_2021\\_MINEM\\_DGAAM.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2440910/RD_201_2021_MINEM_DGAAM.pdf)  
 pdf )

seguros. Los costos de supervisión están relacionados con las remuneraciones del personal profesional y técnico involucrado en el proyecto. Por último, los gastos operativos incluyen el alquiler de equipos, los gastos de combustible y el mantenimiento necesario para llevar a cabo la ampliación de la presa. En base a ello se estimó presupuesto total para construcción de la presa.

**Tabla 14:**  
Presupuesto de la Presa de Relaves

Centro de Costos			Presupuesto parcial	Presupuesto total
<b>Costo Directo</b>			5,503,064.23	5,503,064.23
<b>Gastos Generales</b>	Fijos	Liquidación de obra	295,836	954,578
		Impuestos	44,698	
		Logística	256,894	
	Variables	Remuneraciones del personal profesional y técnico	89,965	
		Pago de beneficios	35,661	
		Alimentación	75,264	
		Gastos financieros	60,140	
		Seguros	96,120	
<b>Supervisión</b>		Remuneraciones del personal profesional y técnico	150,000	150,000
<b>Gastos operativos</b>	Alquiler de equipos		704,128	1,426,452
	Combustible		406,697	
	Mantenimiento		315,627	
<b>TOTAL</b>			<b>8,034,094</b>	<b>8,034,094</b>

*Nota:* La información fue extraída de una fuente privada, la misma que es consecuencia de la recopilación y análisis de la empresa en estudio. Adaptado de "Informe técnico", por unidad minera al norte del país área de Desarrollo de proyectos, 2023.

### 3.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

- La ampliación del volumen de almacenamiento de la Presa de Relave abarco 258,835.46 m<sup>3</sup>, considerando una producción diaria de 1362.246 m<sup>3</sup>/día de relave, representa un avance significativo en la capacidad de manejo y gestión de los desechos mineros. Esta mejora permitirá una operación más sostenible y una vida útil prolongada para la presa.

- La construcción del dique, la capacidad de almacenamiento y la producción diaria de relaves ha tenido un impacto positivo en la vida útil de la Presa de Relaves, al extenderla en 12.9 meses. Esto significa que se podrá continuar operando sin problemas significativos. Estas mejoras son un logro importante en términos de la gestión de los relaves y la sostenibilidad de la operación.
- El volumen de almacenamiento de descarga del material fino abarca desde la cota 4186.00 y la 4201.00 msnm el cual dejara un borde libre de 2 m en la corona y relave almacenado.
- El volumen de material usado para la conformación del dique abarca 68000.00 m<sup>3</sup>.
- Los resultados nos permiten concluir que la estructura está diseñada para resistir sismos mucho más superiores a 7.9 en la escala de magnitud de momento gracias a la robusta estructura construida en base a criterios de diseño conservadores.
- Los análisis de estabilidad de la presa se llevaron a cabo mediante el método de Spencer utilizando el software SLIDE 2D. se obtuvo un factor de seguridad estático de largo plazo 1.935, superando el valor requerido de 1.5. Además, el factor de seguridad estático a corto plazo fue de 1,458, también cumpliendo con el requisito de un valor mayor que 1,3 lo que garantiza la estabilidad de este depósito.
- El laboratorio de mecánica de suelo realizo un control adecuado y permanente en el muestreo de material filtro que se utilizó en el sistema de drenaje de aguas subterráneas, se garantizó que este material cumpliera con las especificaciones granulométricas requeridas y presentara un contenido de finos inferior al 5%, conforme a la normativa 007.

#### **4.2. RECOMENDACIONES**

- Para aumentar la capacidad de almacenamiento de la Presa de Relaves, se sugiere mantener un nivel de agua mínimo en la presa de relaves. Un exceso de agua provoca la expansión del relave, lo que disminuye significativamente la capacidad de almacenamiento disponible.

- Antes de que la vida útil de la Presa de Relaves, que se ha extendido en 12.9 meses, llegue a su fin, es recomendable iniciar la planificación de un nuevo diseño de presa de relaves. Esto garantizará la sostenibilidad de las operaciones a largo plazo.
- Se recomienda llevar a cabo de forma rigurosa actividades de control del proyecto, a fin de prevenir fallas en el depósito y evitar eventos que afecten al ambiente y poblaciones aledañas.
- Para realizar el recrecimiento de la presa de relaves es necesario haber realizado buena compactación del terreno superficial y así también monitorear los piezómetros para asegurarse de no encontrar humedad en el dique.
- Es de necesidad que se implemente manuales operativos de los depósitos de relaves, base de la experiencia recolectada, a fin de regular procesos y establecer normativas de seguridad en su funcionamiento a base de las normativas legales.
- Es recomendable no extender el tiempo de vida de la presa debido a el aporte constante de relaves fino podría desequilibrar el talud de corte izquierdo, es decir comprometer la estabilidad física.

### **3.4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Autoridad nacional del agua (2015). *Informe: seguridad de presas.*

<https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/2624/ANA0001334.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Avellaneda-Puri, P.J.. & Avellaneda-Cristobal, C.J. (2020). Evaluación de la estabilidad física del depósito integrado de relaves San Andrés (Perú). *Minería y Geología,*

36(1), 33-49. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1993-80122020000100033&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122020000100033&lng=es&tlng=es)

- Bouazza, A & Chen, Y. (2012). Geomembranes in mining works. *International Geosynthetics Society*, 135 -141. [https://library.geosyntheticssociety.org/wp-content/uploads/resources/proceedings/122021/THEME\\_3.pdf](https://library.geosyntheticssociety.org/wp-content/uploads/resources/proceedings/122021/THEME_3.pdf).
- Clarkson, L. & Williams, D. (2021). An Overview of Conventional Tailings Dam Geotechnical Failure Mechanisms. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 38(3), 1305–1328. <https://doi.org/10.1007/S42461-021-00381-3/METRICS>
- Cox, B., Innis, S., Mortaza, A., Kunz, N. C., & Steen, J. (2022). A unified metric for costing tailings dams and the consequences for tailings management. *Resources Policy*, 78, 102862. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2022.102862>
- De Paiva, C., Da Fonseca, A. & Do Prado, J. (2020). Content analysis of dam break studies for tailings dams with high damage potential in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: technical weaknesses and proposals for improvements. *Natural Hazards*, 104(2), 1141–1156. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04254-8>
- Dong, L., & Deng, S. & Wang, F. (2020). Some developments and new insights for environmental sustainability and disaster control of tailings dam. *Journal of Cleaner Production*, 269(1), 122270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122270>
- Geomatrix (s.f.). *Hydrotube*. Recuperado el 7 de noviembre de 2023, de <https://geomatrix.co/hydrotube/>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2020). *Evaluación de peligros geológicos en la localidad de San Emilio*. Ingemmet. Recuperado el 1 de noviembre del 2023, de [https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2779/1/A7038-Evaluación\\_peligros\\_San\\_Emilio-Junín.pdf](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2779/1/A7038-Evaluación_peligros_San_Emilio-Junín.pdf)
- Ministerio de minas y energía (2020). *Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos relacionados con presas de relaves*. Minenergia. Recuperado el 1 de noviembre de 2023. [https://www.minenergia.gov.co/documents/9582/Cartilla\\_Lineamientos\\_Presas\\_Relaves.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/9582/Cartilla_Lineamientos_Presas_Relaves.pdf)

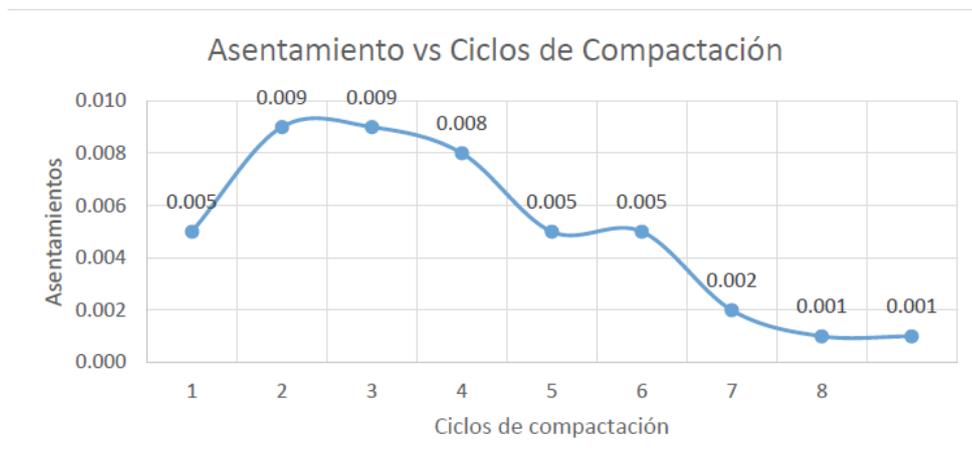
- Piciullo, L., Storrøsten, E., Liu, Z., Nadim, F. & Lacasse, S. (2022). A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*, 303, 1-14.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2022.106657>
- Prambauer, M. Wendeler, C., Weitzenböck, J., Burgstaller, C. (2019). *Geotextiles and Geomembranes*. 47(1), 48 – 59. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.09.006>
- Qi, C., Ly, H., Chen, Q., Le, & Pham, B. (2020). Flocculation-dewatering prediction of fine mineral tailings using a hybrid machine learning approach. *Chemosphere*, 244.  
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.125450>
- SERNAGEOMIN. (2018). *Preguntas frecuentes sobre relaves*. Recuperado el 2 de noviembre de 2023, de <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/#d7a783a4374effd42>
- TDM. (s.f.). *Geomallas*. Recuperado el 8 de noviembre de 2023, de <https://www.tdm.com.pe/products-geosinteticos-geomallas/#>
- Vélez, J. (2015). La importancia del aseguramiento y control de calidad (QA-QC) en la evaluación y estimación de recursos minerales, Tantahuatay, Cajamarca [Congreso]. 10 de mejores trabajos de investigación y tecnología minera. Trujillo, Perú. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Mine-21.pdf>
- Wang, G., Tian, S., Hu, B., Kong, X., & Chen, J. (2020). An experimental study on tailings deposition characteristics and variation of Tailings dam Saturation line. *Geomechanics and Engineering*, 23(1), 85-92.  
<https://doi.org/10.12989/gae.2020.23.1.085>
- Yang, Y., Wei, Z., Cao, G., Yang, Y., Wang, H., Zhuang, S., & Lu, T. (2019). A case study on utilizing geotextile tubes for tailings dams construction in China. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2), 187-192.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.12.007>

### 3.5. ANEXO

**Anexo 1:** Resultados de control topográfico y asentamiento  
Tabla de Asentamientos versus número de ciclos

N° CICLOS	ASENTAMIENTO (MM)
1	0.005
2	0.009
3	0.009
4	0.008
5	0.005
6	0.005
7	0.002
8	0.001
9	0.001

Gráfico de asentamiento vs ciclos de compactación

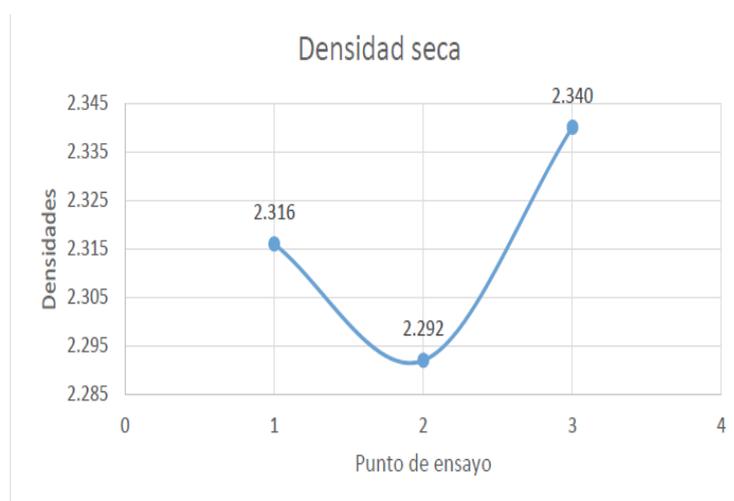


**Anexo 2:** Ensayo de densidad de campo por reemplazo de volumen de agua

Tabla de Densidad seca a los 9 ciclos de compactación

N° Puntos	Densidad seca
Punto N°01	2.316
Punto N°01	2.292
Punto N°01	2.340
<b>Promedio</b>	<b>2.316</b>

Gráfico de densidad seca vs punto de ensayo



densidad seca ensayo

### Anexo 3: Control de humedad resultados

Tabla de humedades por punto de ensayo

N° Puntos	Humedad
Punto N° 01	9.5
Punto N° 02	9.6
Punto N° 03	9.5
<b>Promedio</b>	<b>9.5</b>

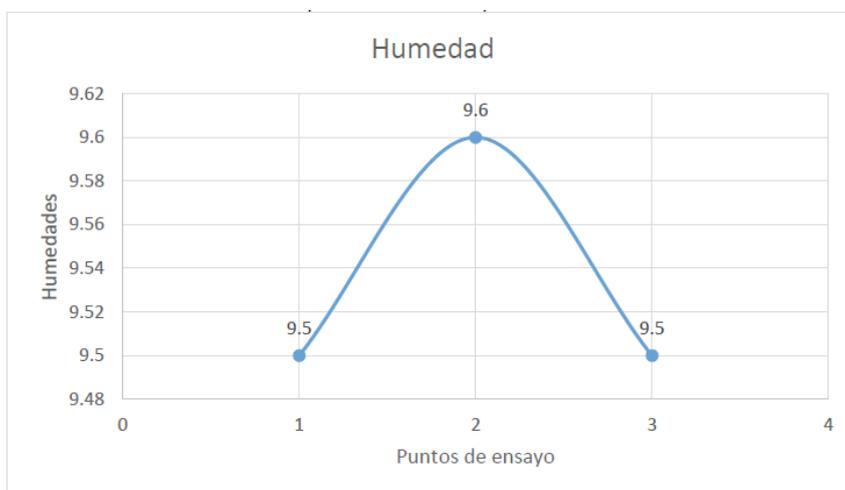
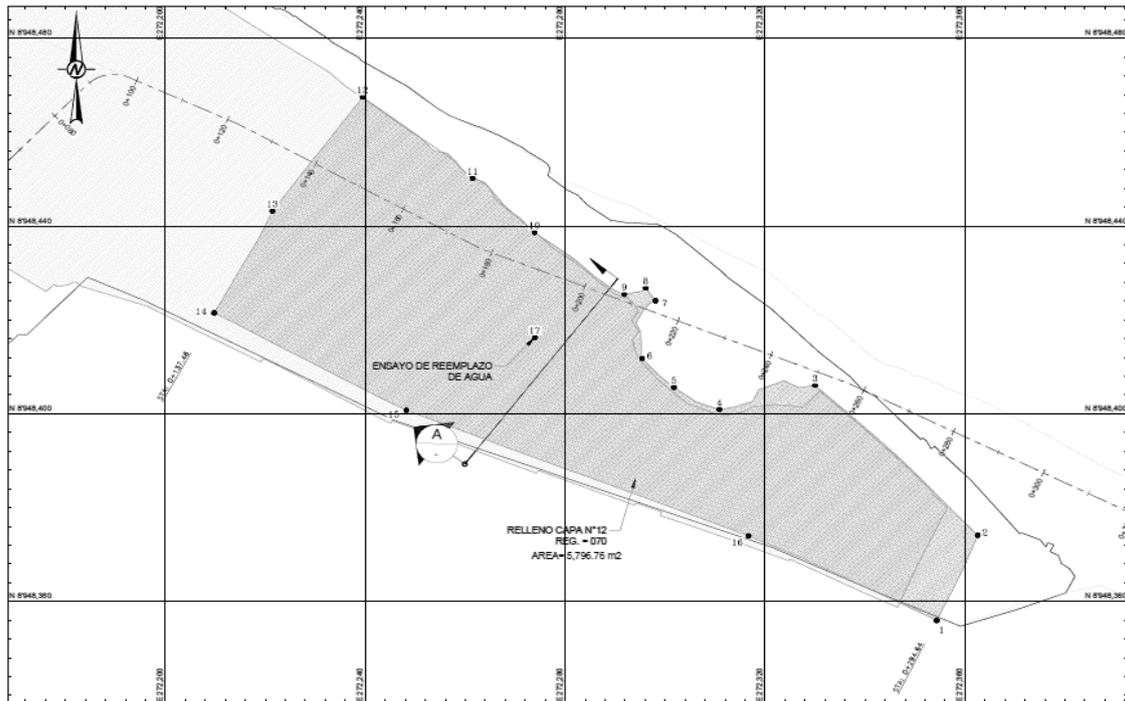


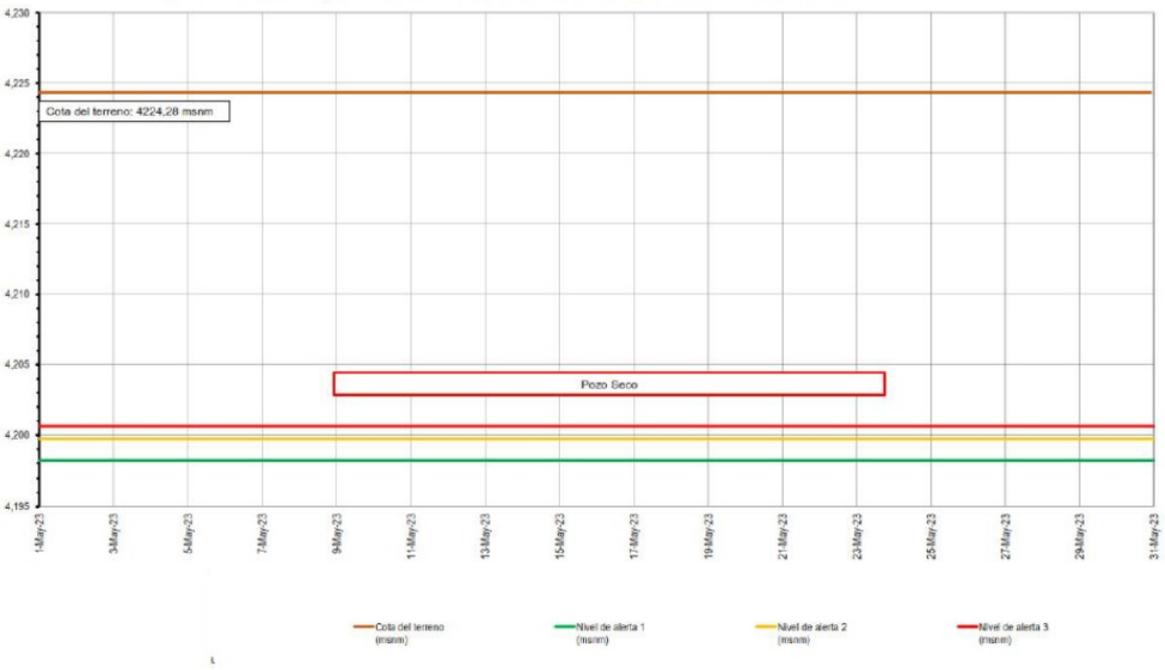
Gráfico de Humedades vs punto de ensayo

### Anexo 4: Deposito de relaves topografía desde planta



Anexo 5: Ejemplo de registro histórico del piezómetro abierto de tubo abierto

Registro histórico del piezómetro tubo abierto BHG-10-05 - (PZ-5) - periodo junio 2023



Anexo 6:  
Control topográfico en el relleno de prueba (tes fill)



**Anexo 7:** Ensayo de densidad de campo por el método de remplazo por volumen de agua  
ASTMD D5030



**Anexo 8:** Informe de Método de remplazo por volumen de agua ASTM -D2216

		SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD		Reg.: CCM-CQC-S-008 ✓		
		MÉTODO DE REEMPLAZO POR VOLUMEN DE AGUA- ASTM D 5030		Revisión: 02 ✓	Fecha: 28.10.22 ✓	
		LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS				Página 1 de 1
Proyecto:		"Ampliación del Depósito de Relaves"				1"
<p>La ..... 3 ✓</p> <p>Zona: Nivel Intermedio ✓</p> <p>Estructura: Dique principal del depósito de relaves ✓</p> <p>Material: Material propio ✓</p>						
DATOS DE LA MUESTRA						
Lugar de muestreo: Plataforma de dique principal de depósito de relaves				Fecha:		
Proctor Utilizado: ----				Prof.:		
Metodo: (X) A ✓ ( ) B				Material:		
DENSIDAD POR EL MÉTODO DE REEMPLAZO DE AGUA - ASTM D5030						
A	ENSAYO	Nº	02 ✓			
B	CAPA		----			
C	TRAMO	Km	----			
D	ESPESOR DE CAPA	m	0.50 ✓			
F	COORDENADAS	E	272196.98 ✓			
G	COORDENADAS	N	8948477.99 ✓			
H	COTA	m s. n. m.	4199.99 ✓			
1	Volumen de agua en el hoyo + el anillo	cm <sup>3</sup>	422440.0 ✓			
2	Volumen de agua en el anillo	cm <sup>3</sup>	28430.00 ✓			
3	Volumen de agua en el hoyo, (1)-(2)	cm <sup>3</sup>	394010.00 ✓			
4	Temperatura del agua	Cº	9.8 ✓			
5	Densidad del agua	g/cm <sup>3</sup>	1 ✓			
6	Masa de material + sobretamaño saturado m	g	989940.0 ✓			
7	Masa del material de sobretamaño saturado	g	0 ✓			
8	Peso específico de la grava	g/cm <sup>3</sup>	----			
9	Volumen del material de sobretamaño ,(7)-(8)	cm <sup>3</sup>	0.00 ✓			
10	Volumen del agua corregido,(3)-(5)-(9)	cm <sup>3</sup>	394010.00 ✓			
11	Peso de material,(6)-(7)	g	989940.00 ✓			
12	Densidad Húmeda ,(11)-(10)	g/cm <sup>3</sup>	2.512 ✓			
13	Nº de ciclos	Nº	9 ✓			
CONTENIDO DE HUMEDAD (ASTM D 2216)						
14	Código de Tara		XX ✓			
15	Masa de Tara	g	750.0 ✓			
16	Masa de Tara + suelo húmedo	g	8280.0 ✓			
17	Masa de Tara + suelo seco	g	7620.0 ✓			
18	Masa de agua, (16) - (17)	g	660.0 ✓			
19	Masa de suelo seco, (18)-(16)	g	6870.0 ✓			
20	Contenido de humedad (18/19)*100	%	9.6 ✓			
RESUMEN DE ENSAYO						
21	Óptimo contenido de humedad	%	9.5 ✓			
22	Densidad seca relativa	g/cm <sup>3</sup>	2.316 ✓			
23	Densidad seca (12)/(1+(20)/100)	g/cm <sup>3</sup>	2.292 ✓			
24	Grado de compactación (23)/(22)	%	99.0% ✓			
25	Porcentaje de Compactación requerida (E.E.T.T)	%	95.0% ✓			
26	Variación de Contenido de humedad requerida (E.E.T.T)	%	12.0% ✓			
27	Aprobado		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
28	Desaprobado		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Anexo 9: Informe de Contenido de humedad norma ASTM -D2216

SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD		Reg.: CCM-CQC-S-001 ✓		
CONTENIDO DE HUMEDAD		Rev.N° 02 ✓	FECHA 28.10.22 ✓	
		Página 1 de 3 ✓		
(NORMA, ASTM D 2216)				
Proyecto:	"Ampliación del Depósito de Relaves"			
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS				
Zona: Nivel Intermedio				
Sector de muestra: Dique principal del depósito de relaves				
DATOS DE LA MUESTRA				
Lugar de muestreo: Dique principal depósito de relaves		Fecha: 20/07/2023		
N° de Muestra: TF-404 ✓		Material: Material Propio		
Coordenadas: Este: 272206.29		Norte: 8948486.95		
		Cota: 4200.00		
Condiciones de secado: Estufa (X) ✓		Cocina ( )		
		Al aire ( )		
Método de Prueba: Método A (X)		Método B ( )		
		Profundidad: Superficial		
		Temperatura de Secado: ( ) 60 °C		
		110 °C (X) ✓		
CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL				
DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01			
	PASANTE 3 in			
Recipiente	N°	NZ-07		
Masa recipiente + suelo húmedo	g	7850.0 ✓		
Masa recipiente + suelo seco	g	7430.0 ✓		
Masa del recipiente	g	1310.0 ✓		
Masa de agua	g	420.0 ✓		
Masa del suelo seco	g	6120.0 ✓		
Contenido de Humedad	%	7 ✓		
OBSERVACIONES: Fecha de muestreo 19/07/2023 ✓				
Muestra proveniente de la plataforma de prueba (test fill), material propio. ✓				
7				

**Anexo 10:**  
Informe de  
Análisis  
granulométrico  
por tamizado  
ASTM -D6913

		SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD			Reg.: CCM-CQC-S-002 ✓	
		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO			Rev. N° 02 ✓	FECHA: 28.10.22 ✓
		(NORMA, ASTM D 6913)			Página 2 de 3	
Proyecto:		"Ampliación del Depósito de Relaves"			I)"	
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS						
Lugar de muestreo: Dique principal depósito de relaves						
Material: Material Propio						
N° Muestra: TF-004 ✓ N° Ensayo: CCM-CH-MP-TF-004						
Coordenadas: Este: 272206.29 Norte: 8948486.95 Cota: 4200.00						
Análisis Granulométrico por Tamizado - ASTM D6913						
Tamaño Tamié	Peso Reten.	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pasa	Específ.	
20 m	0.0	0	0	100		Peso suelo filtrado que pasa No. 4 (g)
30 m	0.0	0	0	100		Peso suelo seco que pasa No. 4 (g)
40 m	0.0	0	0	100		Peso suelo seco retenido No. 4 (g)
60 m	0.0	0	0	100		Peso suelo seco total (g)
8 m	0.0	0	0	100 ✓	100	100
6 m	5840.0	5	5	95 ✓	70	100
5 m	0.0	0	5	95 ✓		
4 m	8520.0	7	12	88 ✓		
3 m	5500.0	5	15	85 ✓	55	100
2 m	9680.0	8	23	77 ✓		
1.12 m	7550.0	7	30	70 ✓	45	90
1 m	6980.0	6	36	64 ✓		
3/4 m	4630.0	4	40	60 ✓	40	80
1/2 m	6850.0	6	46	54 ✓		
3/8 m	4400.0	4	50	50 ✓		
No. 4	8790.0	9	59	41 ✓	25	50
No. 8	112.3	6	65	35 ✓		
No. 16	0.0	0	65	35 ✓		
No. 30	96.0	5	70	30 ✓		
No. 60	35.2	2	72	28 ✓		
No. 100	38.3	2	74	26 ✓		
No. 200	26.5	3	77	23 ✓	15	40
No. 400	32.2	2	79	21 ✓		
No. 800	0.0	0	79	21 ✓		
No. 1500	85.3	5	84	16 ✓		
No. 3000	43.3	2	86	14 ✓		
No. 6000	29.6	2	88	12 ✓	5	70
Tramo	1.0					
		Con Bolsas		Sin Bolsas		Cu:
		OVER	15% ✓	GRAVA	44% ✓	Cu:
		GRAVA	44% ✓	ARENA	41% ✓	
		ARENA	29% ✓	FINOS	15% ✓	
		FINOS	12% ✓			
CLASIFICACIÓN SUCS (ASME D2487-17)						
		Símbolo de Grupo:		GC + 15% > 30 ✓		
		Nombre de Grupo:		Clayey gravel with sand		
		Nombre (NTP.339.134):		Grava arcillosa con arena ✓		
		Color:		Gris		

Anexo 11: Informe de Límite de consistencia ASTM -D6913

	SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD		Reg.: CMM-CQC-S-003 ✓
	LÍMITES DE CONSISTENCIA		Rev. N° 02    FECHA: 28.10.22
	(NORMA, ASTM D4318)		Página 3 de 3

Proyecto : "Ampliación del Depósito de Relaves T"

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

Zona: Nivel Intermedio  
 Sector de muestra: Dique principal del depósito de relaves  
 Material: Material Propio

DATOS DE LA MUESTRA

Lugar de muestreo: Dique principal depósito de relaves    Fecha: 22/07/2023 ✓  
 N° de Muestra: 17-004 ✓    Profundidad: Superficial  
 Coordenadas:    Este: 272206.29    Norte: 8948486.95    Cota: 4200.00

Tamaño máximo (Ø): 8.00    Método Límite Líquido:    (X) Método Casagrande    ( ) Método de Casagrande    Temperatura de secado: 115.000°C    ( ) 110.00°C  
 % Ret. en malla No.01: 77    Preparación del Aglutinante:    ( ) Humedo    ( ) Seco al aire    ( ) Seco en horno  
 Cont. De humedad (%): 7    Agua utilizada:    ( ) Presión    ( ) Directa    (X) Químico/Química

LÍMITES DE CONSISTENCIA							
DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO		OBSERVACIONES	
	L-62 ✓	L-91 ✓	L-96 ✓	L-99 ✓	L-85 ✓		
1 Tara							
2 Número de golpes	17 ✓	25 ✓	34 ✓				
3 Masa de la tara + suelo húmedo	100.83	100.81	103.20	79.52	82.13		
4 Masa de la tara + suelo seco	92.72	92.30	96.81	77.85	80.83		
5 Masa de la tara	70.12 ✓	67.64 ✓	72.31 ✓	67.06 ✓	72.79 ✓		
6 Masa del agua	7.31	7.71	7.19	1.67	1.30		
7 Masa del suelo seco	22.60 ✓	24.65 ✓	23.70 ✓	9.89 ✓	8.04 ✓		
8 Contenido de humedad	32.35 ✓	31.27 ✓	30.34 ✓	16.89 ✓	16.17 ✓		

GRÁFICO DE LÍMITE LÍQUIDO



CUMPLE     NO CUMPLE     NO APLICA

CONSTANTE FÍSICA DE MUESTRA	
LÍMITE LÍQUIDO	31 ✓
LÍMITE PLÁSTICO	17 ✓
ÍNDICE DE PLÁSTICIDAD	14 ✓

OBSERVACIONES : \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_