

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Evaluación de las propiedades geotécnicas del macizo rocoso para el diseño de la presa

Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay – 2025

Asesor:

Mg. Sc. Maldonado Mendivil, Ángel

Autor:

Carbajal Espinoza, Yanit

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2026

Acta de Sustentación



Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 010

En la ciudad de Abancay, a los diecisiete días del mes de abril del 2026, siendo las 09:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0132-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de fecha 09 de abril del 2026, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

| | |
|----------------|-----------------------------|
| Presidente : | Mag. Américo ROLDAN JUÁREZ |
| Dictaminante : | Dra. Rosa Marina VERA TEVES |
| Replicante : | Mag. Danilo SAAVEDRA ORE |

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Evaluación de las propiedades geotécnicas del macizo rocoso para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay-2025.

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: CARBAJAL ESPINOZA, Yanit

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

| Bachiller (Apellidos y Nombres) | Calificación (**) |
|---------------------------------|-------------------|
| CARBAJAL ESPINOZA, Yanit | Aprobado |

Siendo las 12:18 pm horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Américo ROLDAN JUÁREZ

(.....)

Dictaminante: Dra. Rosa Marina VERA TEVES

(.....)

Replicante: Mag. Danilo SAAVEDRA ORE

(.....)

Abancay 23 de abril del 2026

Se expide la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 006

(*) Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art. 18 RGGAT.
(**) 0 a 10; Desaprobado, 11 a 15; Aprobado, 16 a 18; Aprobado Notable, 19 y 20. Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565
Filial Andahuaylas, Av. Juan Antonio Trelles N° 513 Teléfono (083) 421752
www.utea.edu.pe

Reporte de Similitud






8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Metadatos

| Datos de autor | |
|--|---|
| Apellidos y Nombres | : Carbajal Espinoza Yanit |
| Tipo de Documento de Identidad | : DNI |
| Numero de Documento de Identidad | : 74085878 |
| URL O ORCID | : https://orcid.org/0009-0003-9919-5484 |
| Datos del asesor | |
| Apellidos y Nombres | : Mg. Sc. Maldonado Mendivil Ángel |
| Tipo de documento de identidad | : DNI |
| Numero de documento de identidad | : 06788424 |
| URL O ORCID | : https://orcid.org/0000-0001-9002-1910 |
| Datos de la investigación | |
| Facultad | : Ingeniería |
| Escuela Profesional | : Ingeniería Civil |
| Línea de investigación | : Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible |
| Rango de años en que se realizó la investigación | : 2024 |
| Fuente de financiamiento | : Autofinanciado |
| Porcentaje de originalidad | : 8% |
| URL de OCDE | : https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01 |

Dedicatoria

Dedico este trabajo a las personas que me han apoyado en este camino, especialmente a aquellos que me han enseñado que la perseverancia y la determinación pueden superar cualquier obstáculo.

Agradecimiento

En este significativo camino académico, quiero expresar mi más profunda gratitud a mis amados padres y hermanos, pilares fundamentales de mi vida. Su presencia incondicional, sus palabras de aliento en los momentos más desafiantes y su inquebrantable apoyo han sido mi mayor fortaleza. Ellos son mi fuente de inspiración y motivación constante, y me llena de alegría poder compartir este logro con quienes han sido testigos de mi esfuerzo y perseverancia. Este triunfo no es solo mío, sino de toda mi familia, y augura el inicio de muchos más éxitos por venir.

Resumen

El objetivo del estudio fue determinar las propiedades geotécnicas del macizo rocoso para el diseño de la presa Tacracocha. Para ello se aplicaron mapeo geológico de superficie, perforaciones diamantinas, ensayos de clasificación geomecánica (RMR), pruebas de permeabilidad Lefranc y Lugeon, y tomografía eléctrica bajo la norma NTP 339-157. Las muestras utilizadas incluyeron cinco (05) perforaciones diamantinas, de las cuales se obtuvieron registros para RMR y ensayos de permeabilidad, así como seis (06) líneas de tomografía eléctrica para evaluar la resistividad del subsuelo. Los resultados llegaron a demostrar una variabilidad importante en la calidad del macizo rocoso, con valores en la clasificación RMR entre 21 y 80, clasificando el terreno desde roca de muy mala calidad (clase VI) hasta roca de buena calidad (clase II–III). En términos de permeabilidad, los ensayos Lefranc en superficie arrojaron valores elevados ($1.12\text{E-}03$ cm/s a $9.76\text{E-}03$ cm/s), propios de materiales más sueltos como arenas y gravas, mientras que los ensayos Lugeon en profundidad indicaron una disminución significativa ($1.00\text{E-}04$ cm/s a $7.78\text{E-}04$ cm/s), reflejando un medio más compacto o fracturado parcialmente cementado. Por su parte, los ensayos geoelectricos identificaron tres horizontes (seco, húmedo y saturado), con resistividades entre 30 y $36,115 \Omega \cdot \text{m}$, lo que evidencia diferentes grados de humedad y consolidación. En conclusión, el estudio confirma la heterogeneidad del macizo, con sectores aptos para cimentación y otros que requieren refuerzo o impermeabilización para garantizar la estabilidad geotécnica e hidráulica de la presa.

Palabras clave: clasificación del macizo rocoso, permeabilidad Lugeon, permeabilidad Lefranc.

Abstract

The objective of the research was to determine the geotechnical properties of the rock mass for the design of the Taccracocha dam. For this purpose, surface geological mapping, diamond drilling, geomechanical classification tests (RMR), Lefranc and Lugeon permeability tests, and electrical tomography under the NTP 339-157 standard were applied. The samples used included five (05) diamond drill holes, from which logs were obtained for RMR and permeability tests, as well as six (06) lines of electrical tomography to evaluate the subsoil resistivity. The results showed significant variability in the quality of the rock mass, with RMR values between 21 and 80, classifying the terrain from very poor quality rock (class VI) to good quality rock (class II-III). In terms of permeability, the surface Lefranc tests yielded high values (1.12E-03 cm/s to 9.76E-03 cm/s), typical of looser materials such as sand and gravel, while the depth Lugeon tests indicated a significant decrease (1.00E-04 cm/s to 7.78E-04 cm/s), reflecting a more compact or partially cemented fractured medium. Geoelectrical tests identified three horizons (dry, wet, and saturated), with resistivities between 30 and 36,115 Ω m, indicating different degrees of moisture and consolidation. In conclusion, the study confirms the heterogeneity of the massif, with some sectors suitable for foundations and others requiring reinforcement or waterproofing to ensure the geotechnical and hydraulic stability of the dam.

Keywords: *rock mass classification, Lugeon permeability, Lefranc permeability.*

Índice

| | |
|--|-------------|
| Portada..... | i |
| Acta de Sustentación..... | ii |
| Reporte de Similitud..... | iii |
| Metadatos..... | iv |
| Dedicatoria..... | v |
| Agradecimiento..... | vi |
| Resumen..... | vii |
| Abstract..... | viii |
| Índice..... | ix |
| Índice de Tablas | xi |
| Índice de Figuras | xiv |
| Índice de Anexos | xv |
| I. Introducción..... | 1 |
| II. Planteamiento del problema..... | 2 |
| 2.1 Descripción y formulación del problema | 2 |
| 2.2 Objetivos..... | 5 |
| 2.2.1. Objetivo general..... | 5 |
| 2.2.2. Objetivos específicos..... | 5 |
| 2.3 Justificación e importancia | 5 |
| 2.4 Hipótesis | 6 |

| | |
|--|------------|
| 2.5 Variables | 7 |
| III. Marco Teórico | 9 |
| 3.1 Antecedentes | 9 |
| 3.2 Bases teóricas..... | 15 |
| 3.3 Definición de términos | 50 |
| IV. Metodología | 54 |
| 4.1 Tipo y nivel de investigación..... | 54 |
| 4.2 Ámbito temporal y espacial | 56 |
| 4.3 Población y muestra | 56 |
| 4.4 Instrumentos..... | 57 |
| 4.5 Procedimientos..... | 58 |
| 4.6 Análisis de datos | 59 |
| 4.7 Consideraciones éticas | 60 |
| V. Resultados y discusión | 62 |
| VI. Conclusiones | 128 |
| VII. Recomendaciones..... | 131 |
| VIII. Referencias..... | 133 |
| IX. Anexos..... | 145 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 Matriz de Operacionalización de Variables | 8 |
| Tabla 2 Parámetros de Sitio a ser usados en el diseño sísmico | 37 |
| Tabla 3 Clasificación RMR de Bieniawski | 39 |
| Tabla 4 Clasificación de calidad de la roca según el RMR..... | 42 |
| Tabla 5 Rangos de permeabilidad de macizos rocosos..... | 46 |
| Tabla 6 Parámetros de adquisición de datos para el ensayo de Tomografía Eléctrica . | 48 |
| Tabla 7 Valores de resistividad (Ohm.m)..... | 49 |
| Tabla 8 Parámetros de Profundidad..... | 62 |
| Tabla 9 Puntos de Perforaciones de Diamantina | 63 |
| Tabla 10 Clasificación RMR de la zona 1 en el estribo derecho DHPH - 1 | 65 |
| Tabla 11 Clasificación RMR de la zona 2 en el estribo derecho DHPH - 1 | 66 |
| Tabla 12 Clasificación RMR de la zona 3 en el estribo derecho DHPH - 1 | 67 |
| Tabla 13 Clasificación RMR de la zona 4 en el estribo derecho DHPH - 1 | 68 |
| Tabla 14 Clasificación RMR de la zona 5 en el estribo derecho DHPH - 1 | 69 |
| Tabla 15 Resultados finales de la clasificación RMR en el estribo derecho DHPH - | 170 |
| Tabla 16 Clasificación RMR de la zona 1 en el estribo central | 71 |
| Tabla 17 Clasificación RMR de la zona 2 en el estribo central | 72 |
| Tabla 18 Clasificación RMR de la zona 3 en el estribo central | 73 |
| Tabla 19 Clasificación RMR de la zona 4 en el estribo central | 74 |
| Tabla 20 Clasificación RMR de la zona 5 en el estribo central | 75 |
| Tabla 21 Clasificación RMR de la zona 6 en el estribo central | 76 |
| Tabla 22 Clasificación RMR de la zona 7 en el estribo central | 77 |
| Tabla 23 Clasificación RMR de la zona 8 en el estribo central | 78 |

| | |
|---|----|
| Tabla 24 Clasificación RMR de la zona 9 en el estribo central | 79 |
| Tabla 25 Resultados finales de la clasificación RMR en el estribo central | 79 |
| Tabla 26 Clasificación RMR de la zona 1 en el estribo izquierdo | 80 |
| Tabla 27 Clasificación RMR de la zona 2 en el estribo izquierdo | 81 |
| Tabla 28 Clasificación RMR de la zona 3 en el estribo izquierdo | 82 |
| Tabla 29 Clasificación RMR de la zona 4 en el estribo izquierdo | 83 |
| Tabla 30 Clasificación RMR de la zona 5 en el Estribo izquierdo..... | 84 |
| Tabla 31 Clasificación RMR de la zona 6 en el Estribo izquierdo..... | 85 |
| Tabla 32 Resultados finales de la clasificación RMR en el Estribo izquierdo..... | 85 |
| Tabla 33 Clasificación RMR de la zona 1 en ríos aguas arriba..... | 86 |
| Tabla 34 Clasificación RMR de la zona 2 en ríos aguas arriba..... | 87 |
| Tabla 35 Clasificación RMR de la zona 3 en ríos aguas arriba..... | 88 |
| Tabla 36 Clasificación RMR de la zona 4 en ríos aguas arriba..... | 89 |
| Tabla 37 Clasificación RMR de la zona 5 en ríos aguas arriba..... | 90 |
| Tabla 38 Resultados finales de la clasificación RMR en ríos aguas arriba | 91 |
| Tabla 39 Clasificación RMR de la zona 1 en ríos aguas abajo | 91 |
| Tabla 40 Clasificación RMR de la zona 2 en ríos aguas abajo | 92 |
| Tabla 41 Clasificación RMR de la zona 3 en ríos aguas abajo | 93 |
| Tabla 42 Clasificación RMR de la zona 4 en ríos aguas abajo | 94 |
| Tabla 43 Clasificación RMR de la zona 5 en ríos aguas abajo | 95 |
| Tabla 44 Resultados finales de la clasificación RMR en ríos aguas abajo | 96 |
| Tabla 45 Resumen de resultados de Clasificación Geomecánica RMR..... | 96 |
| Tabla 46 Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 1... 100 | |
| Tabla 47 Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 2... 102 | |

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Tabla 48 | Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 3... | 104 |
| Tabla 49 | Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 4... | 106 |
| Tabla 50 | Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 5... | 108 |
| Tabla 51 | Resumen de resultados de ensayos de permeabilidad..... | 109 |
| Tabla 52 | Interpretación de Resultados de Tomografía Eléctrica..... | 121 |

Índice de Figuras

| | |
|--|-----|
| Figura 1 Presa por gravedad | 16 |
| Figura 2 Presa de Arco | 17 |
| Figura 3 Presas de relleno de tierra | 18 |
| Figura 4 Unidades Geológicas Regionales de la Zona de Estudio | 26 |
| Figura 5 Depósitos Coluviales | 27 |
| Figura 6 Depósitos Aluviales | 28 |
| Figura 7 Afloramiento de rocas Intrusivas (Monzodioritas) | 31 |
| Figura 8 Geomorfología regional..... | 33 |
| Figura 9 Pendiente ligeramente inclinada en la zona de estudio | 34 |
| Figura 10 Mapa de distribución de intensidades sísmicas de la región Apurímac | 35 |
| Figura 11 Ensayo de Permeabilidad por Método Lefranc | 44 |
| Figura 12 Ensayo de Permeabilidad por Método Lugeon | 46 |
| Figura 13 Esquema de base usado por las investigaciones eléctricas | 48 |
| Figura 14 Ubicación de los puntos de perforación..... | 63 |
| Figura 15 Inspección de terreno en la zona de excavación | 64 |
| Figura 16 Ubicación de los 6 puntos de ensayo geoelectrico..... | 114 |
| Figura 17 Perfil Geoeléctrico del TE - 01 | 115 |
| Figura 18 Perfil Geoeléctrico del TE - 02 | 116 |
| Figura 19 Perfil Geoeléctrico del TE - 03 | 117 |
| Figura 20 Perfil Geoeléctrico del TE - 04 | 118 |
| Figura 21 Perfil Geoeléctrico del TE - 05 | 120 |
| Figura 22 Perfil Geoeléctrico del TE - 06 | 121 |

Índice de Anexos

| | |
|--|-----|
| Anexo A Matriz de Consistencia | 145 |
| Anexo B Matriz de Operacionalización de Variables | 146 |
| Anexo C Resultados de perforación diamantina | 147 |
| Anexo D Resultados de laboratorio | 157 |
| Anexo E Resultados de Ensayo de Permeabilidad | 162 |
| Anexo F Resultados de tomografía eléctrica..... | 172 |
| Anexo G Panel fotográfico..... | 179 |
| Anexo H Certificado de calibración de equipos | 185 |

I. Introducción

El presente estudio tiene como propósito principal determinar las propiedades geotécnicas del macizo rocoso localizado en el área prevista para la construcción de la presa Tacracocha, ubicada en el distrito de Lambrama, provincia de Abancay, durante el año 2024. El comportamiento de este tipo de macizo resulta determinante en el diseño de obras de infraestructura, ya que es necesario conocer sus características tanto físicas como mecánicas, esenciales para alcanzar estabilidad, funcionalidad y seguridad estructural a largo plazo.

Las presas desempeñan un rol clave en el progreso económico y social de las regiones, al permitir un uso sostenible de los recursos hídricos en actividades como generación energética, riego agrícola y abastecimiento de agua. Sin embargo, la construcción de estos proyectos exige un conocimiento detallado del terreno y sus condiciones geológicas, especialmente en áreas con alta complejidad geotécnica como la zona de estudio.

En este contexto, la investigación tiene como finalidad verificar la viabilidad técnica del proyecto, identificar posibles riesgos geotécnicos y plantear soluciones apropiadas que permitan asegurar su correcta ejecución. A través del análisis de información recopilada y sistematizada, el estudio busca generar evidencia técnica confiable que sirva de sustento para la toma de decisiones en las etapas de diseño y ejecución del proyecto.

Del mismo modo, los resultados contribuirán al fortalecimiento de la planificación de infraestructuras hidráulicas en contextos similares, apoyando el desarrollo sostenible en la región de Abancay.

Este documento está estructurado en cinco capítulos: el primero aborda el planteamiento del problema, los objetivos e hipótesis; el segundo describe el marco teórico; el tercero desarrolla la metodología utilizada; el cuarto presenta los resultados y análisis; y el quinto incluye las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

A nivel mundial, diversos informes advierten que hacia el año 2030 aproximadamente el 20 % de los países en vías de desarrollo podría enfrentar escasez de agua debido al crecimiento demográfico y a los efectos del cambio climático. Esta situación es especialmente crítica en sectores como el agrícola, que depende en gran medida de la disponibilidad de recursos hídricos. Por ello, se vuelve fundamental promover el uso eficiente del agua mediante la aplicación de tecnologías y criterios técnicos en el desarrollo de infraestructura hidráulica (Food and Agriculture Organization, 2023).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Banco Mundial, el recurso hídrico se encuentra en riesgo, particularmente en regiones semiáridas, afectando no solo la seguridad alimentaria sino también la estabilidad socioeconómica de millones de personas. Las infraestructuras hidráulicas, como las presas, juegan un papel importante al permitir el almacenamiento de agua en épocas de abundancia para su uso en periodos de escasez, reduciendo así los efectos de las variaciones climáticas. La inversión en este tipo de obras se considera una estrategia efectiva de adaptación al cambio climático (Centro Nacional de Planeamiento Estratégico, 2023).

Del mismo modo, las presas tienen un papel fundamental en la seguridad alimentaria, energética e hídrica. En países como China o India, la construcción de grandes represas ha sido una respuesta al incremento poblacional y a la necesidad de asegurar el abastecimiento hídrico en zonas vulnerables. Sin embargo, la ejecución de este tipo de proyectos requiere de una planificación técnica rigurosa, en especial en lo referente a los estudios geológicos y geotécnicos del terreno (Rosengaus et al., 2020, p. 25).

La construcción de presas cumple un rol fundamental en la conservación y gestión sostenible del recurso hídrico, especialmente en zonas agrícolas, donde su disponibilidad condiciona directamente el desarrollo social y económico. Para asegurar la estabilidad y funcionamiento de estas infraestructuras, es necesario realizar estudios geotécnicos rigurosos, que permitan caracterizar con precisión el macizo rocoso y el suelo de cimentación, elementos críticos para la seguridad estructural de la presa (Quinto, 2022, p. 31).

A nivel nacional, la escasez de agua también se ha convertido en una amenaza creciente, principalmente en zonas altoandinas y rurales donde las fuentes naturales se ven afectadas por la variabilidad climática. Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2022), la disponibilidad hídrica per cápita ha disminuido significativamente en las últimas décadas, lo cual afecta directamente la producción agrícola y ganadera. En este contexto, se promueve la construcción de infraestructuras hidráulicas como presas medianas y pequeñas para asegurar el riego y consumo humano (Bergmann et al., 2021, p. 47).

En el Perú, investigaciones realizadas por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) evidencian que muchos proyectos de presas han enfrentado retrasos y sobrecostos debido a la falta de estudios geotécnicos detallados durante la etapa de diseño. Este tipo de estudios permite anticipar riesgos asociados a inestabilidades del terreno, presencia de fallas geológicas o materiales inadecuados para la cimentación. De allí la importancia de realizar perforaciones exploratorias, ensayos geotécnicos y análisis estructurales del macizo rocoso (Chirinos & Alfaro, 2023, p. 30).

Los estudios geotécnicos abarcan la evaluación detallada del terreno, incluyendo el comportamiento del agua subterránea, análisis litológico y estructural del macizo rocoso, así como ensayos de permeabilidad y resistencia. Estas investigaciones son indispensables tanto en la fase de diseño como durante la ejecución del proyecto, ya que proporcionan la información

técnica necesaria para tomar decisiones acertadas en torno a la viabilidad del proyecto. Su omisión o subestimación puede comprometer la estabilidad de la estructura, aumentar los costos y poner en riesgo la seguridad de las poblaciones aguas abajo.

En la provincia de Abancay, distrito de Lambrama, se viene desarrollando el proyecto de la presa Taccracocha, cuya ejecución se encuentra actualmente detenida por la falta de datos precisos sobre la calidad y resistencia del terreno destinado para la cimentación. La ausencia de estudios geotécnicos detallados, como perforaciones profundas, pruebas eléctricas del subsuelo y ensayos de permeabilidad, ha generado incertidumbre respecto a la viabilidad técnica del proyecto, lo cual ha frenado su avance.

Este panorama se vuelve aún más crítico debido a la limitada disponibilidad de agua que enfrenta la población durante los periodos de sequía. La presa Taccracocha surge como una opción estratégica para asegurar el acceso al recurso hídrico; sin embargo, su ejecución implica superar diversos retos técnicos vinculados a las características geológicas del macizo rocoso presente en la zona del proyecto.

En ese contexto, esta investigación tiene como finalidad principal analizar el comportamiento geotécnico del macizo rocoso en el área donde se planea construir la presa. Para ello, se emplearán datos recopilados mediante perforaciones profundas con técnica diamantina, pruebas geoelectricas y ensayos de permeabilidad realizados en campo. Esta evaluación permitirá establecer si el proyecto es técnicamente viable y plantear posibles soluciones que contribuyan a su reactivación y ejecución adecuada.

2.1.1. Problema general

¿Cuáles son las propiedades geotécnicas del macizo rocoso para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025?

2.1.2. Problemas específicos

¿Cuál será la clasificación geomecánica del macizo rocoso (RMR) para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025?

¿Cuál es la permeabilidad del macizo rocoso para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025?

¿Cuáles son los parámetros geoelectrico del macizo rocoso para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025?

2.2 Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Determinar las propiedades geotécnicas del macizo rocoso para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025.

2.2.2. Objetivos específicos

Determinar la clasificación geomecánica del macizo rocoso (RMR) para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025.

Determinar la permeabilidad del macizo rocoso para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025.

Determinar los parámetros geoelectrico del macizo rocoso para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025.

2.3 Justificación e importancia

En este contexto, la construcción de la presa Taccracocha, ubicada en el distrito de Lambrama (región Apurímac), ha sido planteada como una solución estratégica frente a la creciente escasez de agua que afecta a la zona, especialmente durante los períodos de sequía. Sin embargo, el avance del proyecto se ha visto limitado debido a la falta de información técnica precisa sobre las condiciones geológicas del macizo rocoso en el área, lo cual ha generado

incertidumbre respecto a la estabilidad estructural de la presa y ha provocado la paralización temporal de su ejecución.

Ante esta situación, se vuelve necesario realizar un estudio detallado de las propiedades geotécnicas del macizo, con el fin de contar con datos confiables que sustenten el diseño estructural y garanticen la operación segura y eficiente de la infraestructura a lo largo del tiempo. Esta evaluación debe incluir la clasificación geomecánica del terreno (RMR), el análisis de la permeabilidad y otros parámetros fundamentales del macizo rocoso, ya que todos ellos son claves para definir el diseño adecuado de la cimentación y abordar los desafíos técnicos del proyecto.

El presente trabajo responde a esa necesidad mediante una investigación aplicada, que involucra el uso de herramientas especializadas, como ensayos de campo y estudios geotécnicos con enfoque hidrogeológico. A partir de estos análisis, se espera generar criterios técnicos precisos que orienten el diseño estructural en la zona de emplazamiento, así como para definir soluciones viables que permitan reactivar la ejecución del proyecto.

Desde una perspectiva técnica, esta investigación también busca aportar al desarrollo sostenible de la infraestructura hidráulica en la región de Abancay, fomentando una planificación más eficiente y segura de futuras construcciones. Además, pretende sentar una base metodológica útil para estudios similares en otras regiones con condiciones geológicas complejas, sirviendo como referencia en el diseño de futuras presas.

2.4 Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Las propiedades geotécnicas del macizo rocoso son favorables para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025.

2.4.2. Hipótesis específicas

La clasificación geomecánica del macizo rocoso (RMR) son buena a muy buena para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025.

La permeabilidad del macizo rocoso mostrara valores de conductividad hidráulica baja a moderadas para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025.

Los parámetros geoelectrico del macizo rocoso mostraran valores de resistividad eléctrica altos para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025.

2.5 Variables

2.5.1. Variable Dependiente

V.D = Diseño de la presa

2.5.2. Variable Independiente

V.I = Propiedades Geotécnicas

Tabla 1.*Matriz de Operacionalización de Variables*

| Variables | Definición Conceptual | Definición Operacional | Dimensiones | Indicadores | Escala de medición | Unidad | Instrumentos |
|---|---|---|--|--|---------------------------|---------------------------|--|
| V. D: Diseño de la presa | El propósito de este estudio es identificar las características del suelo de cimentación con el fin de evaluar su comportamiento. Para ello, se emplean como base los resultados obtenidos de investigaciones especializadas, tales como perforaciones diamantinas, ensayos geoelectricos y el método MASW (Khan et al., 2021). | La construcción de la presa es un proceso técnico que será evaluado a través de las dimensiones, cuyos parámetros serán determinados mediante el análisis de los resultados obtenidos, realizados en la zona de emplazamiento (Espinosa, 2010). | Viabilidad Técnica | Factibilidad de construcción | Razón | Categoría Cuantitativa | Ficha de recolección de datos y ficha de laboratorio |
| | | Serán evaluadas mediante la interpretación de los resultados. Los métodos utilizados proporcionarán información cuantitativa, sobre las propiedades del terreno de cimentación (Estaire, 2004). | Clasificación geomecánicas del macizo rocoso | RMR de Bieniawski | | | |
| V. I: Propiedades Geotécnicas | Es una rama especializada de la ingeniería civil que integra conocimientos de hidrología, geología, estructuras e hidráulica para concebir y especificar estructuras de retención de agua seguras y eficientes (Sardón & Cuellar, 2021). | Los métodos utilizados proporcionarán información cuantitativa, sobre las propiedades del terreno de cimentación (Estaire, 2004). | Permeabilidad | Ensayo Lefranc y Lugeon para determinar la permeabilidad | Razón | cm/seg | |
| | | | Parámetros Geoelectrico | Tomografía Eléctrica. | | (Ohm.m) | |

Nota. La tabla muestra la matriz de operacionalización de variables del estudio, detallando para el Diseño de la presa (VD) y las Propiedades geotécnicas (VI) sus definiciones, dimensiones, indicadores, escalas de medición, unidades e instrumentos.

III. Marco Teórico

3.1 Antecedentes

3.1.1. Antecedentes internacionales

Villarreal (2020), en su investigación titulada Caracterización geotécnica de formaciones rocosas en etapa de prefactibilidad para la instalación de presas destinadas al control de crecidas inusuales, con referencia a la Hoja Tandil 3760-IV, tuvo como propósito principal el análisis geotécnico preliminar de los macizos rocosos ubicados en posibles sitios de construcción de presas en la ciudad de Tandil, Buenos Aires. El estudio se basó en una metodología combinada, que incluyó revisión bibliográfica y cartográfica, trabajo de campo conforme a la normativa ISRM, y la implementación de sistemas de clasificación geomecánica como RMR, Q y GSI. De acuerdo con los hallazgos, se identificó que en una de las zonas evaluadas se presentaban valores de RMR que la ubicaban dentro de la categoría VI, es decir, roca de calidad muy pobre con escasa resistencia y alta deformabilidad; mientras que en las otras áreas se observó una mejor clasificación, correspondiente a clase II, con una capacidad portante aceptable. Como resultado, se concluyó que el enfoque metodológico empleado permitió diferenciar con claridad zonas con condiciones geotécnicas críticas, ofreciendo información clave para respaldar decisiones técnicas en el diseño de obras de infraestructura hidráulica dentro del ámbito regional.

Alvarado (2020), en su trabajo de tesis titulado Aplicación de técnicas geoestadísticas para la clasificación geomecánica RMR según Bieniawski, planteó como objetivo principal el desarrollo de un modelo de predicción que permitiera estimar valores de RMR en un yacimiento tipo skarn, evaluando la incertidumbre mediante simulaciones geoestadísticas. La metodología empleada se basó en la recopilación de datos provenientes de sondeos subterráneos, análisis de variografía y dos tipos de simulación: una directa y otra mediante cosimulación gaussiana truncada. Los resultados arrojaron valores de RMR entre 50 y 63 en una de las simulaciones, y

entre 53 y 64 en la otra, rangos que ubican la calidad de la roca entre “media” y “buena”. Ambos enfoques estadísticos mostraron solidez en sus estimaciones, permitiendo identificar zonas con menor riesgo geomecánico. El estudio concluye que estas técnicas son útiles para planificar actividades mineras subterráneas con mayor eficiencia y control de riesgos.

Boyás et al. (2021), en su estudio titulado Determinación de áreas óptimas para la recarga artificial de acuíferos subterráneos en la Subregión Valle de México, utilizaron herramientas de análisis SIG y álgebra de mapas con el propósito de identificar las zonas más adecuadas para implementar procesos de recarga artificial. Su metodología consideró la combinación de seis variables principales: pendiente del terreno, cobertura del suelo, capacidad de infiltración, precipitación, densidad de drenaje y características litológicas, aplicando el Modelo de Factor de Influencia Múltiple (MIF). Entre los hallazgos, se encontró que aproximadamente el 21 % del territorio analizado presenta condiciones altamente favorables para llevar a cabo recarga hídrica, especialmente en áreas ubicadas en piedemontes y planicies lacustres. La investigación contribuye con una perspectiva técnica integral orientada a la planificación eficiente de proyectos de recarga de acuíferos, promoviendo una gestión sostenible en escenarios de estrés hídrico.

Alonso et al. (2023) en su estudio titulado Aplicación de métodos geofísicos en el análisis de balsas de relaves y su consideración dentro del marco normativo del ACUERDO N.º MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM en Ecuador, desarrollaron una investigación orientada a evaluar la efectividad de diversas técnicas geofísicas en estudios geotécnicos relacionados con presas de residuos mineros. El objetivo principal fue incentivar el uso de herramientas geofísicas en la caracterización del subsuelo, utilizando métodos como refracción sísmica, MASW, ReMi, tomografía eléctrica (ERT) y sísmica de superficie (SEV), complementados con ensayos de permeabilidad en campo. Los análisis realizados revelaron que los valores de resistividad

eléctrica oscilaron entre 100 y 250 $\Omega \cdot m$ en los estratos superficiales, mientras que en profundidades mayores se registraron entre 500 y 800 $\Omega \cdot m$. Además, se determinaron velocidades sísmicas en rangos de 1200–2800 m/s para ondas P y 200–1500 m/s para ondas S. En cuanto a la permeabilidad, los ensayos arrojaron valores entre 2.0×10^{-6} y 1.5×10^{-7} cm/s, lo que indica una permeabilidad de nivel moderado. El estudio concluye que la implementación de estas metodologías permite una mejor interpretación de las condiciones del terreno, por lo que se sugiere su incorporación dentro de los estándares técnicos nacionales.

Padilla (2024) con título de tesis “Análisis Geomecánico de Cimentaciones Rocosas para Presas de Hormigón a Gravedad”, planteó como objetivo la formulación de un procedimiento para evaluar la calidad de las rocas de cimentación mediante la aplicación comparativa de los sistemas RQD y RMR. La metodología se basó en el análisis de 12 escenarios de presas con alturas de 30, 50, 65 y 80 metros, considerando tres tipos de calidad de roca (excelente, regular y muy mala). Los resultados mostraron que las capacidades admisibles obtenidas fueron de 2000 kN/m² para roca excelente, 1500 kN/m² para roca regular y solo 800 kN/m² para roca de baja calidad, lo que limita su viabilidad. Se concluye que las presas construidas sobre macizos de calidad baja no resultan viables sin aplicar técnicas de mejoramiento del terreno, resaltando la importancia de caracterizar adecuadamente la cimentación en etapas preliminares de diseño.

3.1.2. Antecedentes nacionales

Castillo (2020) en su tesis titulada “Estudio geotécnico para el diseño de la presa de hormigón a gravedad de la cuenca del río Coltani”, planteó como objetivo general evaluar la capacidad de cimentación y estabilidad del terreno donde se proyecta construir una presa de gravedad. La investigación se desarrolló a través de perforaciones exploratorias, muestreo de suelos, ensayos Lugeon y Lefranc, así como clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso mediante el sistema RMR (Rock Mass Rating). Los resultados obtenidos indicaron coeficientes

de permeabilidad en un rango de 1.23×10^{-3} cm/s a 5.51×10^{-3} cm/s, asociados principalmente a rocas dacíticas fracturadas, lo que representa una permeabilidad baja a media. Los valores de RMR se ubicaron entre 52 (calidad media) y 85 (calidad buena), con predominancia de roca de calidad media en la zona de cimentación. A pesar de la favorable resistencia mecánica, se advirtió la necesidad de un control efectivo de filtraciones mediante inyección de lechadas, sellado de juntas y drenaje profundo. En conclusión, el estudio demostró que el sitio es viable para el desarrollo de una presa de hormigón, siempre que se ejecuten las medidas correctivas adecuadas, especialmente en cuanto a impermeabilización y refuerzo del contacto presa–fundación.

Quinto (2022), en su estudio titulado Propuesta de inyección para mejorar la impermeabilidad de macizos rocosos fracturados en la Presa de Relaves Cortadera, tuvo como propósito principal desarrollar una alternativa técnica que permita disminuir la permeabilidad del macizo rocoso en la zona de cimentación de dicha presa. La metodología aplicada incluyó perforaciones geotécnicas, análisis de testigos de sondeo y pruebas de permeabilidad tipo Lugeon. Los resultados revelaron que el macizo presentaba una estructura fracturada, con heterogeneidad litológica y niveles de permeabilidad relativamente altos, con valores que oscilaron entre 50 y 150 Lugeon, correspondientes a una conductividad hidráulica entre 6.5×10^{-7} y 1.95×10^{-7} cm/s. A partir de estos datos, se diseñó una barrera de inyección con lechada de cemento de tipo B y C, aplicada a través de perforaciones ubicadas en una malla de 3 metros. Tras la aplicación del tratamiento, la permeabilidad se redujo a valores cercanos a 3 Lugeon (3.9×10^{-8} cm/s), lo cual evidenció la eficacia del procedimiento. El estudio concluye que el uso de lechada de cemento resulta ser una técnica adecuada para limitar la conductividad hidráulica en macizos fracturados, constituyendo una solución efectiva para mejorar la estanqueidad y

garantizar la estabilidad estructural en presas de relaves ubicadas en terrenos con condiciones geológicas complejas.

Chirinos y Alfaro (2023) en el marco de un estudio geotécnico enfocado en la edificación de una represa destinada al almacenamiento de agua en la zona de Huayllumaquico, distrito de Espinar, región Cusco, centraron su investigación en caracterizar las propiedades geotécnicas tanto del suelo como del macizo rocoso en el área seleccionada para la infraestructura hidráulica. El estudio también buscó identificar parámetros relevantes para el diseño estructural y ofrecer lineamientos técnicos para cimentación, estabilidad de taludes y control de deformaciones. Para ello, se empleó una metodología que incluyó sondajes exploratorios, levantamientos geológicos y geotécnicos, ensayos de laboratorio como granulometría, límites de Atterberg, pruebas de permeabilidad, y ensayos mecánicos como resistencia a la compresión uniaxial y pruebas de corte directo, además del análisis de estabilidad por parte de especialistas. Los resultados indicaron que el terreno presenta depósitos aluviales recientes sobre roca sedimentaria, con un nivel freático cercano a la superficie y actividad sísmica moderada en la región. Se concluyó que la capacidad portante del terreno es media y que los taludes se consideran estables bajo condiciones estáticas, aunque se recomienda reforzarlos en zonas vulnerables. Finalmente, se propusieron medidas de mitigación como sistemas de drenaje superficial y subterráneo, muros de contención, filtros, y otros elementos que aseguren el comportamiento estable y seguro de la estructura a largo plazo.

Viteri (2023) en su estudio titulado “Análisis geotécnico de las filtraciones en la presa Huacatina, provincia de Julcán, departamento de La Libertad”, se enfocó en la evaluación de la permeabilidad y calidad geomecánica del macizo rocoso de cimentación de la presa. Se aplicaron diversos ensayos, incluyendo permeabilidad en pozo Lefranc, ensayos Lugeon y clasificación RMR. Los resultados indicaron una conductividad hidráulica que varió entre

7.5×10^{-3} y 1.5×10^{-1} cm/s, evidenciando una permeabilidad heterogénea y variable, y valores RMR de 60 a 85, lo que corresponde a rocas de calidad media a buena. Se identificaron sectores con riesgo de filtración y se propusieron soluciones como inyección en malla cerrada, reforzamiento de juntas y monitoreo geotécnico continuo. La conclusión establece que, si no se implementan las medidas correctivas necesarias, el comportamiento hidráulico del macizo puede comprometer la seguridad de la estructura, siendo prioritario el control de filtraciones y la adopción de soluciones integrales en el diseño y operación de la presa.

Catalan (2024) en su investigación titulada “Estudio geotécnico de la permeabilidad en los suelos de la zona de la presa Coltani”, tuvo como propósito evaluar las propiedades hidráulicas del macizo rocoso en la zona de cimentación de la presa, con la finalidad de determinar su aptitud técnica para proyectos hidráulicos de gran envergadura. Se aplicaron ensayos Lefranc y Lugeon, complementados con clasificación del macizo mediante el sistema RMR. Los resultados mostraron que la roca dacita muy fracturada presentó coeficientes de permeabilidad entre 1.68×10^{-3} y 6.77×10^{-4} cm/s, clasificándola como de baja a media permeabilidad. Asimismo, los valores de RMR alcanzaron hasta 85 puntos, lo que representa una roca de calidad buena, favorable para cimentaciones estructurales. No obstante, se identificaron sectores con permeabilidad alta que requieren tratamientos de mejoramiento del terreno, como inyección y sellado de discontinuidades. El estudio concluye que, si bien el macizo rocoso presenta buenas características geomecánicas, su comportamiento hidráulico puede limitar el diseño de presas de gran altura, recomendándose su uso para presas medianas o pequeñas con medidas de impermeabilización.

3.1.3. Antecedente Local

Pro Desarrollo Apurimac (2021) desarrolló estudios preliminares para evaluar las condiciones físicas del terreno y sustentar el diseño de la presa Taccracocha, proyectada en el

distrito de Lambrama, provincia de Abancay. La evaluación incluyó un estudio topográfico para definir la morfología del área, un estudio geológico con observaciones de superficie para caracterizar los materiales presentes, y un estudio hidrológico que permitió analizar el comportamiento del recurso hídrico en la cuenca. Adicionalmente, se definió el diseño preliminar de la infraestructura hidráulica, considerando los datos recogidos en los estudios anteriores. En conjunto, estos insumos técnicos permitieron identificar zonas con mejores condiciones de estabilidad superficial, prever posibles restricciones constructivas y orientar adecuadamente el planteamiento de las obras, garantizando así una propuesta coherente con el entorno natural y funcionalmente viable para la gestión del agua.

Otros estudios a nivel local no se encontraron más, y esta es una de las razones de esta investigación.

3.2 Bases teóricas

3.2.1. Presas

Las presas son estructuras de ingeniería que actúan como barreras artificiales en ríos o lagunas. Construidas con materiales como piedra, hormigón o materiales sueltos, estas obras se ubican estratégicamente en cerradas o desfiladeros. Su función principal es almacenar agua, creando embalses que permiten múltiples usos. Entre estos se incluyen el suministro de agua potable, la irrigación agrícola, el control de inundaciones mediante la regulación de caudales, y la generación de energía hidroeléctrica al aprovechar la diferencia de altura del agua embalsada (Pérez, 2018, p. 49).

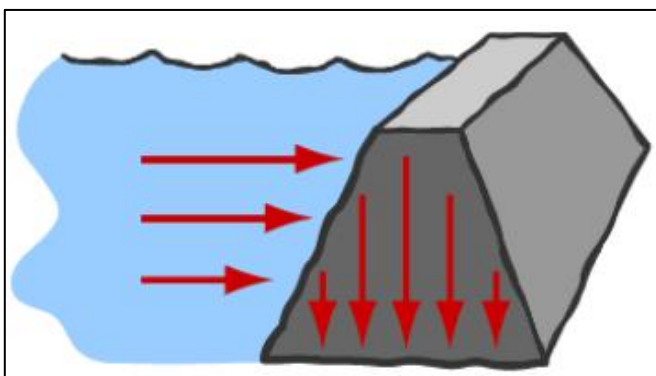
3.2.1.1. Tipos de Presas

Presas de Gravedad. Estas son las impresionantes presas que resisten la presión del agua principalmente a través de su propio peso, conocidas como presas de gravedad. Están compuestas generalmente de concreto macizo, piedra o mampostería, diseñadas con una

geometría triangular que permite que su base ancha soporte eficientemente el empuje hidráulico. Gracias a su masa y a la fuerza gravitacional, estas estructuras no requieren elementos de soporte adicionales, lo que las hace especialmente estables frente a la acción del agua. Son altamente efectivas en zonas donde el firme del terreno o la roca de cimentación es competente y poco deformable, ya que pueden transmitir de manera directa las cargas al suelo sin comprometer su integridad. Además de su resistencia estructural, estas presas suelen ofrecer una vida útil prolongada y requieren un mantenimiento relativamente bajo, lo que las convierte en una opción preferida para grandes embalses o proyectos hidroeléctricos de gran envergadura (Trivedi & Calbimonte, 2018, p. 21).

Figura 1

Presa por gravedad



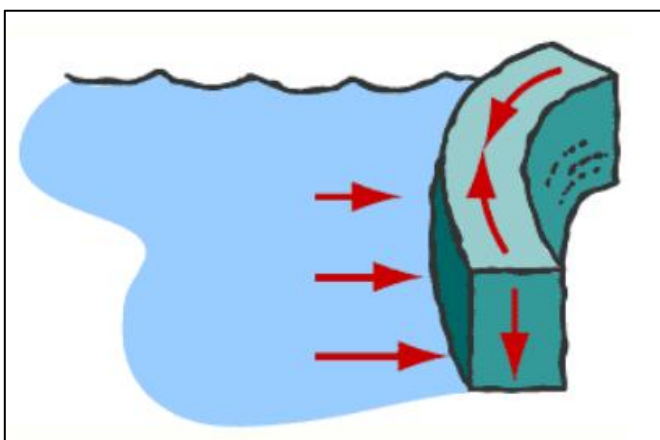
Nota. Esquema de una presa de gravedad que muestra la presión hidrostática lateral del agua y el peso propio actuando verticalmente sobre la estructura. Tomado de “*Análisis de control de infiltraciones en la fundación de la presa Coltani, Tacna, aplicando la técnica de pilotes secantes*” (Jayo, 2021, p. 29).

Presa de Arco. Una presa de arco se construye con una curvatura orientada aguas arriba, de modo que la fuerza del agua es transmitida lateralmente hacia las laderas de la montaña o los estribos rocosos. Esta geometría permite que la presión del embalse sea absorbida en gran parte

por las paredes laterales del valle, reduciendo la necesidad de grandes volúmenes de concreto o material de construcción, lo que la hace más eficiente en cuanto a recursos que otros tipos de presas, como las de gravedad. Son ideales para valles estrechos con paredes de roca dura y resistentes, ya que dependen de la capacidad de los estribos para resistir y redistribuir las cargas hidráulicas. Debido a su forma, estas presas no solo requieren menos material, sino que también permiten un mejor control del flujo del agua y presentan mayor estabilidad ante sismos, gracias a la distribución más uniforme de las fuerzas (Trivedi & Calbimonte, 2018, p. 36).

Figura 2

Presa de Arco



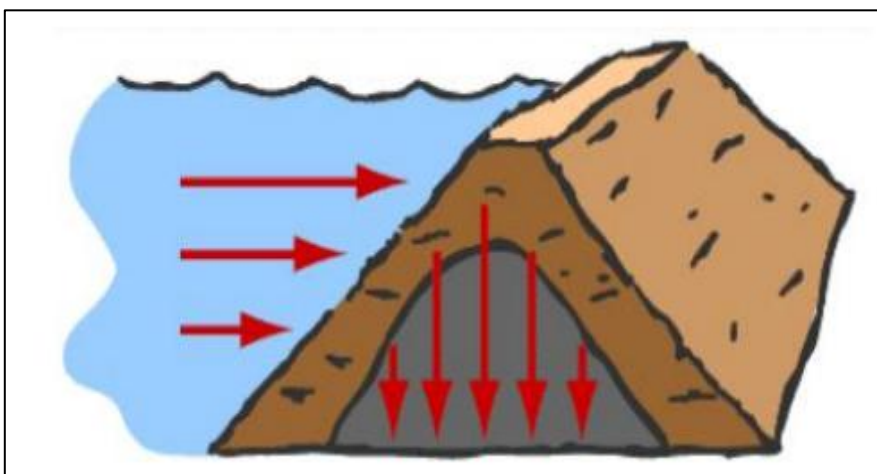
Nota. Esquema de una presa de arco donde la presión del agua se canaliza a lo largo del arco y se transfiere hacia los estribos y la cimentación. Tomado de “*Análisis de control de infiltraciones en la fundación de la presa Coltani, Tacna, aplicando la técnica de pilotes secantes* “ (Jayo, 2021, p. 29).

Presas de Relleno de Tierra. Las presas de relleno de tierra son estructuras construidas principalmente con materiales naturales como arcilla, arena, grava y limos, compactados en capas para formar un cuerpo estable que retenga el agua. Su diseño puede incluir un núcleo impermeable, generalmente de arcilla, rodeado por zonas de materiales más permeables que

actúan como filtros y drenajes. Estas presas son ampliamente utilizadas debido a la disponibilidad local de materiales, lo que reduce costos de transporte y construcción. A diferencia de las presas de concreto, su construcción no implica elementos artificiales como el silicio, y no están diseñadas para proteger contra radiación, por lo que la referencia a rayos gamma y silicio no es aplicable en este contexto. Sin embargo, requieren un estricto control de calidad durante su construcción, especialmente en lo que respecta a la compactación de los materiales y la impermeabilización del núcleo, ya que una mala ejecución puede provocar filtraciones, erosión interna (piping) y pérdida de agua (Trivedi & Calbimonte, 2018, p. 39).

Figura 3

Presas de relleno de tierra



Nota. Esquema de una presa de relleno de tierra donde el talud resiste el empuje hidrostático y el núcleo impermeable transmite el peso a la cimentación. Tomado de “*Análisis de control de infiltraciones en la fundación de la presa Coltani, Tacna, aplicando la técnica de pilotes secantes*” (Jayo, 2021, p. 29).

3.2.1.2. Clasificación

Serrano (2011) indica que la clasificación de las presas se realiza en función de varios factores técnicos, los cuales permiten seleccionar el tipo de estructura más adecuado según

las condiciones del terreno, el objetivo del proyecto y los materiales disponibles. Entre los tipos de clasificación existentes se encuentran:

- ***Según la función***

Presas de almacenamiento: Como su nombre lo indica, estas estructuras están diseñadas para retener grandes volúmenes de agua durante periodos prolongados. El agua almacenada en estos embalses puede tener múltiples usos estratégicos, como el abastecimiento de agua potable para comunidades, el riego agrícola en zonas con escasez hídrica, o la generación de energía hidroeléctrica mediante turbinas. Además, las presas de almacenamiento permiten regular el caudal de los ríos, controlar crecidas y mantener reservas en épocas de sequía (Pinilla, 2020, p. 21).

Presas de control de inundaciones: Estas estructuras están diseñadas con el propósito principal de regular y contener los caudales excesivos que se generan durante las temporadas de lluvias intensas o eventos hidrometeorológicos extremos. Actúan como barreras temporales, almacenando el agua de escorrentía en un embalse para luego liberarla de forma controlada y gradual mediante compuertas, vertederos u otros sistemas hidráulicos, evitando así desbordes repentinos que puedan causar daños en zonas urbanas, agrícolas o infraestructuras aguas abajo (López, 2020, p. 35).

Presas de derivación: Estas presas tienen como función principal desviar el flujo natural de un río o corriente de agua hacia otras zonas donde puede ser aprovechado para diversos usos, como el riego agrícola, procesos industriales o generación hidroeléctrica. A diferencia de las presas de almacenamiento, no buscan retener grandes volúmenes de agua, sino canalizar el recurso hídrico a través de túneles, canales o conductos hacia un punto específico. Son

especialmente útiles en regiones donde el agua debe ser transportada a largas distancias o elevaciones distintas para su uso productivo (Vásquez, 2021, p. 13).

- *Según el material*

Presas de concreto: Las presas de concreto son estructuras diseñadas para ofrecer una gran durabilidad y resistencia frente a las altas presiones del agua embalsada. Están construidas principalmente con hormigón armado, lo que les permite resistir el paso del tiempo y las condiciones climáticas adversas, garantizando su estabilidad y seguridad a largo plazo. Aunque su costo inicial es generalmente más alto en comparación con otros tipos de presas, como las de tierra o mampostería, su vida útil es considerablemente mayor, lo que justifica la inversión a largo plazo (Monteiro, 2021, p. 46).

Presas de tierra o materiales sueltos: Estas presas se caracterizan por ser económicas y relativamente fáciles de construir, ya que utilizan materiales disponibles localmente, como arcilla, arena, grava y otros materiales sueltos. Son ideales para ubicaciones donde estos materiales son abundantes y accesibles, lo que reduce significativamente los costos de construcción (Glez et al., 2021, p. 32).

- *Según el diseño*

Presa de gravedad: Este tipo de presa utiliza su propio peso para resistir la presión del agua embalsada. Está construida generalmente de concreto macizo o mampostería, y su diseño es recto y pesado, lo que permite que la presa ejerza una fuerza vertical hacia abajo, contrarrestando la presión del agua sin necesidad de soportes adicionales. La estabilidad de la estructura depende principalmente de su masa y la capacidad del suelo para soportar esa carga. Son muy eficaces en valles anchos donde el terreno es firme y estable (Moreno, 2021, p. 24).

Presa de arco: Las presas de arco tienen una curvatura que permite que la presión del agua se distribuya hacia las paredes laterales del valle o las rocas circundantes. Este diseño optimiza el uso de materiales, ya que la curvatura transmite la fuerza del agua hacia las laderas del valle, reduciendo la cantidad de material necesario. Son especialmente útiles en valles estrechos y profundos, donde la roca dura de las laderas puede resistir la presión y no es necesario utilizar grandes volúmenes de concreto (Cortijo et al., 2021, p. 19).

3.2.1.3. Características de las Presas

Las singularidades de cada presa son importantes para asegurar estabilidad a largo plazo. Normalmente se consideran a la resistencia, almacenamiento, permeabilidad, entre otras. Sin embargo, las más importantes para el correcto desempeño de la presa son:

Capacidad de almacenamiento: El principal propósito de una presa es el almacenamiento de agua, lo cual está ligado a su altura, volumen de embalse y el terreno en donde se construyó. Esto se puede calcular teniendo en cuenta el área que fue inundada y la profundidad máxima que alcanza el embalse de la presa. En el diseño, la capacidad de almacenamiento depende no solo de la altura de la presa, sino también de la topografía de su embalse. En algunos lugares, las presas satisfacen las necesidades de energía y agua con compuertas o vertederos que están disponibles en cualquier momento del año, mientras que la eliminación de inundaciones importantes ocurre en otros lugares, en parte por diseño, pero principalmente por la ausencia de estas. En la evaluación de la capacidad de almacenamiento, se necesita considerar las fluctuaciones en el nivel del agua en diferentes estaciones, así como los cambios climáticos a largo plazo afectarán este parámetro. La llegada de fenómenos climáticos también. Por ejemplo, El Niño puede afectar con su intervención la cantidad de agua

esperada de ríos o en embalses, impactando en la capacidad de almacenamiento (Huang et al., 2021, p. 12).

Resistencia estructural: Una presa debe contar con una estructura capaz de resistir tanto la presión del agua almacenada como las vibraciones sísmicas, así como soportar las fuerzas generadas por la carga proveniente del acuífero. La capacidad de resistencia dependerá de los materiales empleados, el diseño estructural y la ubicación del proyecto. La calidad del diseño estructural está influenciada por múltiples factores, entre ellos, la resistencia del concreto utilizado, el tipo de árido (como grava o materiales similares) y su correcta distribución de carga. En las presas de concreto, la estructura debe estar diseñada para resistir tanto la presión del agua como los esfuerzos generados por eventos sísmicos y actividades humanas. En presas de tierra, la estabilidad está estrechamente relacionada con el comportamiento de los suelos en contacto con algún tipo de elemento impermeable. Al tener un control adecuado de estos factores, se puede ampliar la vida útil de la estructura por largos periodos. Para asegurar durabilidad y funcionamiento a largo plazo, se recomienda el uso de materiales de alta resistencia, como concreto reforzado y roca de buena calidad. Además, el diseño estructural debe contemplar el uso de refuerzos apropiados. Por último, es fundamental realizar un monitoreo continuo durante el tiempo en que la presa esté en operación, a fin de mantener su integridad estructural (Wang et al., 2021, p. 57).

Permeabilidad: Este punto es crítico en la construcción de una presa, pues, si es demasiado permeable el agua se puede filtrar y cuando eso sucede la estructura se debilita. Es por eso que al construir una presa se deben hacer estudios de permeabilidad para que la estructura de la presa no se dañe y de ese modo asegurar que almacene el agua. En el caso de una presa de materiales sueltos, se utiliza arcilla o bentonita como material impermeable para

limitar las filtraciones. Las pruebas de permeabilidad adoptan la forma de pruebas de Lugeon (para roca) o pruebas de Lefranc para suelos, y se intenta determinar la permeabilidad/porosidad del entorno de una presa. Si la filtración es excesiva, se deben encontrar maneras de evitar que el agua traspase la presa, lo que podría llevar directamente a una falla en sus medidas de seguridad. Las fugas o filtraciones podrían derribar no solo una estructura que de otro modo sería estable, sino también causar erosión de la roca y el suelo de las pendientes, que actúan como protección para las estructuras aguas arriba (p. ej., túneles). Por lo tanto, es importante impermeabilizar correctamente y evaluar con precisión cuán permeable debe ser una presa de materiales sueltos durante su etapa de diseño (Fei et al., 2023, p. 38).

3.2.1.4. Características para diseño de presa

Estudio geológico: Antes de que comience cualquier trabajo de construcción, se debe realizar una evaluación geológica exhaustiva para conocer las condiciones del suelo. Esta investigación examina la resistencia de la masa rocosa, qué fallas geológicas podrían surgir y las características del suelo particulares de este lugar en la presa. En terrenos inestables o aquellos con fallas geológicas activas, el diseño debe ser elaborado para mitigar los riesgos asociados a deslizamientos de tierra y movimientos tectónicos. El tipo particular de suelo (arcilla, roca, arena) es decisivo en la técnica utilizada para construir. En suelos blandos o débiles, pueden ser necesarios refuerzos especiales, así como modificaciones de diseño, como el aumento de la altura de los pilotes y las cimentaciones profundas. Conjuntamente, las investigaciones geotécnicas también incluyen estudios sobre la permeabilidad del suelo, en los que podría ser necesario usar productos impermeables si la permeabilidad del suelo es alta (Rais et al., 2021, p. 27).

Hidrología: El análisis hidráulico de la presa es de gran importancia para el diseño seguro de la misma. Este estudio estima el caudal del río/lago que alimentará la presa y la variación del caudal a lo largo del año. El plan debe incorporar medios de control del caudal, como compuertas, aliviaderos y sistemas de retorno. Los diques deben ser capaces de consolidar grandes cantidades de agua durante lluvias intensas de manera segura y sin poner en peligro su estabilidad ni la seguridad de las personas. Los ingenieros deben investigar la variación estacional de la entrada de agua, la variación estacional de las lluvias y el escurrimiento que llenarán la cavidad natural embalsada, para determinar cómo se podría almacenar agua detrás de la presa. Además, el diseño de la construcción debe ser capaz de contrarrestar la medida de riesgo de seguridad, para que otras áreas circundantes no se inunden a partir de allí, un sistema de liberación de agua adecuado (Fatahi et al., 2021, p. 15).

Resistencia sísmica: Los movimientos sísmicos son fuerzas que deben ser consideradas en el diseño de las presas, en especial en lugares donde los sismos son recurrentes. El diseño debe ser pensado para soportar terremotos, por lo que se deben seleccionar los materiales óptimos para ello e incorporar los refuerzos sísmicos necesarios para la infraestructura. Si una presa tiene resistencia sísmica va a estar ligada a su diseño y a la topografía de la zona. Además, el concreto armado es usualmente más resistente ante los movimientos sísmicos, pero, se debe integrar material que le permita a la estructura seguir el movimiento de los sismos para que no colapse. Es por ello que es necesario hacer pruebas sísmicas, pues de ese modo se puede saber si la presa resistiría durante un terremoto, con lo que se puede detectar algún daño o desprendimiento de la estructura alrededor de la ocurrencia de un sismo (Lotfi & Jahanitabar, 2025, p. 34).

3.2.2. Macizo Rocosos

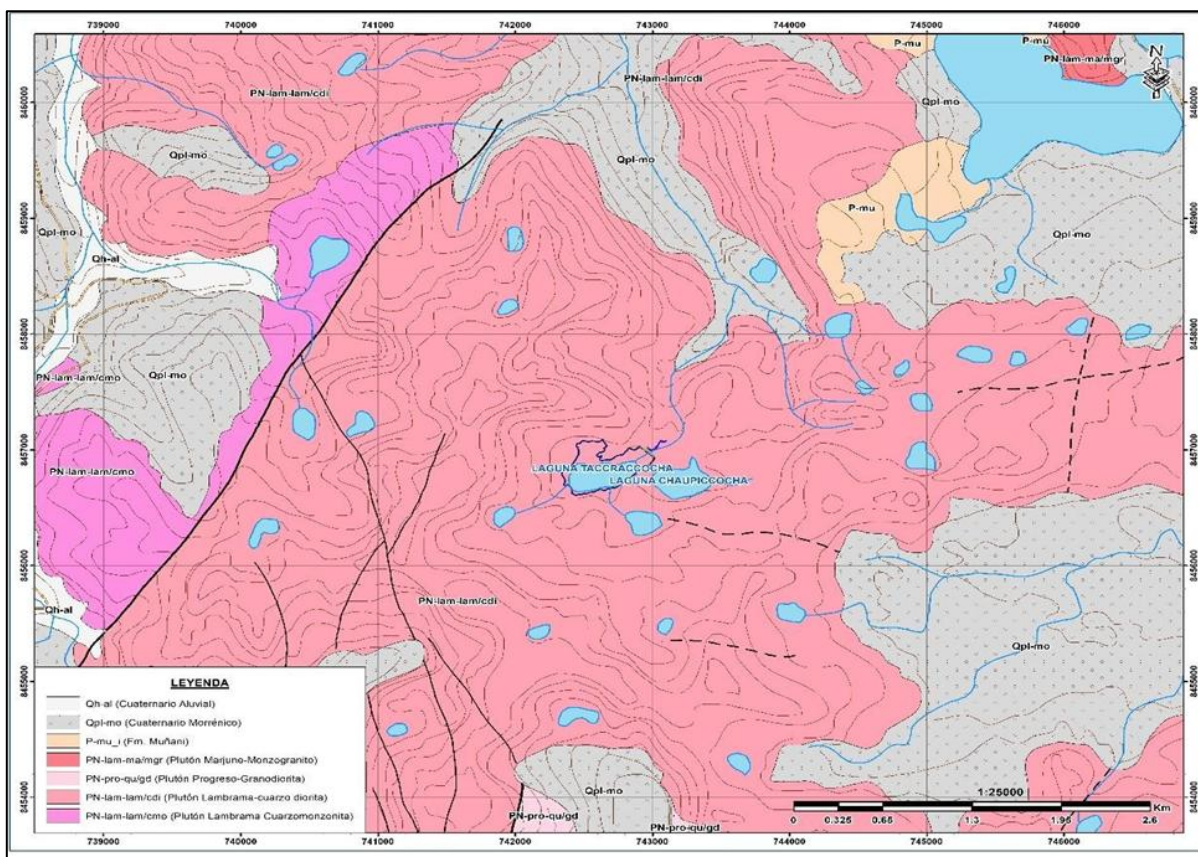
Los macizos rocosos suelen clasificarse en tres grandes grupos según su origen y composición: ígneas, sedimentarias y metamórficas, cada una con características geotécnicas particulares que influyen directamente en el comportamiento del terreno. Las rocas ígneas se originan por el enfriamiento y posterior solidificación del magma, lo que les confiere una estructura compacta y de alta resistencia. Entre sus representantes más comunes se encuentran la diorita, el granito y el basalto, materiales ampliamente utilizados en la construcción de presas y cimentaciones por su durabilidad y baja permeabilidad. En contraste, las rocas sedimentarias se generan por la acumulación y compactación de materiales como restos minerales, arcillas y fragmentos orgánicos, depositados en capas a lo largo del tiempo. Dentro de este grupo se encuentran las areniscas, que suelen presentar mayor porosidad y, por tanto, ser más vulnerables a los procesos erosivos. Aunque algunas de estas rocas pueden tener buena resistencia, esta puede verse afectada por la cohesión entre sus partículas, lo cual varía en función de las condiciones del entorno. Por último, las rocas metamórficas son aquellas que han sufrido transformaciones significativas debido a la exposición a elevadas presiones y temperaturas, lo cual modifica su estructura mineralógica original. Un ejemplo representativo es el mármol, que se forma a partir de la caliza y se caracteriza por su alta resistencia a la compresión. No obstante, estas rocas también pueden presentar fracturas debido a su estructura cristalina interna. Su resistencia a cargas elevadas las convierte en materiales importantes para obras de gran exigencia estructural (Mendoza & Cueva, 2024, p. 39).

3.2.3. Geológico

Pro Desarrollo Apurímac (2021) indica que las unidades regionales presentes se pueden visualizar en el mapa Geotécnico Regional (Figura N° 9) editado para el presente trabajo, las unidades son:

Figura 4

Unidades Geológicas Regionales de la Zona de Estudio



Nota: Tomado de “Mapa geológico adaptado del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico” (INGEMET, 2023).

- Litoestratigráfica Regional

Cenozoico

Formación Muñani

La Formación Muñani se encuentra de manera concordante sobre la Formación Ausangate. Desde el punto de vista litológico, está compuesta predominantemente por capas de areniscas de tonalidades rojas y pardas, con una textura feldespática y un tamaño de grano que varía entre medio y grueso. Estas capas se alternan con estratos de pelitas y limolitas de color rojizo. Asimismo, se presentan niveles de conglomerados que contienen clastos sub-angulosos

a subredondeados de origen cuarzoso, ígneo intrusivo y de areniscas rojas, todos ellos inmersos en una matriz de carácter arenoso (Pro Desarrollo Apurímac, 2021).

Depósitos cuaternarios

Durante el Cuaternario, en la zona de estudio se depositaron sedimentos de origen Aluvial, Fluvial y Coluvial.

Depósitos Coluviales (Qh-co)

Estos depósitos se localizan en las laderas de los valles y están conformados por bloques y cantos angulosos de diferentes dimensiones, los cuales se encuentran inmersos en una matriz compuesta por arena y arcilla. En el área de estudio, estos materiales coluviales están presentes a lo largo de las márgenes de los ríos Lambrama, Pachachaca, Cachimayo y Apurímac (Pro Desarrollo Apurímac, 2021).

Figura 5

Depósitos Coluviales



Nota. Vista de ladera andina donde se señalan depósitos coluviales en el pie del talud. Tomado de “Evaluación geotécnica para la construcción de la Presa Taccraccocha, Lambrama–Abancay” (Pro Desarrollo Apurímac, 2021, p. 4).

Depósitos Aluviales (Qh-al)

Estos depósitos corresponden a acumulaciones ubicadas en conos aluviales y ciertas terrazas, relacionadas principalmente con las zonas de desembocadura de las quebradas principales, en áreas cercanas a los valles fluviales. Están constituidos por bloques grandes de roca y gravas de forma subangular a subredondeada, los cuales se encuentran contenidos en una matriz compuesta por arena y limo. Dentro del área evaluada, se han identificado sectores con estos materiales aluviales que muestran volúmenes significativos, especialmente en quebradas vinculadas al río Apurímac, como Pachachaca y Cachimayo, así como en sectores próximos a la ciudad de Abancay, incluyendo Lambrama, Sihuinco, Silcon, entre otros (Pro Desarrollo Apurímac, 2021).

Figura 6

Depósitos Aluviales



Nota. Corte de talud donde se observa un depósito aluvial no consolidado expuesto en superficie.

Tomado de “*Evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa en el sector Quillalla, distrito de Uñón, provincia de Castilla, región Arequipa (Informe técnico N.º A7147)*” (Instituto Geológico, 2021, p. 10).

Depósitos morrénicos (Qpl-mo)

En el área de estudio se observan afloramientos representativos de este tipo de depósitos, especialmente en el sector sur, donde se extienden ampliamente en las zonas elevadas de los grandes valles. Estos depósitos están compuestos por acumulaciones de bloques de tamaños diversos, cantos y gravas con composición polimíctica, todos ellos contenidos en una matriz arenosa con presencia de arcilla (Pro Desarrollo Apurímac, 2021).

Rocas Ígneas

En buena parte del cuadrángulo geológico se observan afloramientos de rocas ígneas, predominantemente de origen plutónico, que forman parte del batolito de Andahuaylas–Yauri, con una orientación este-oeste.

Dentro del área de análisis, estas rocas ígneas se encuentran representadas por cuerpos del Grupo Mitu —posiblemente de edad Pérmica— y del Grupo Tacaza, correspondiente al Paleógeno-Neógeno. Además, en la región también se identifican rocas volcánicas de edad pliocuaternaria. En cuanto a su composición, las rocas plutónicas presentan diversas litologías, entre ellas: dioritas, gabros, granodioritas, cuarzodioritas, monzogranitos, cuarzomonzodioritas, cuarzomonzonitas, granodioritas, tonalitas y sienogranitos. Estas unidades han sido diferenciadas con base en estudios previos y también se reconocen como parte de diversos plutones.

Unidad Progreso

El Plutón Progreso (PN-pro-pro/gd) aflora en las cercanías del poblado de Pampahuite, donde intruye las rocas de la Formación Labra. Su composición predominante es de granodioritas leucocráticas, con textura fanerítica y tamaño de grano medio. Los minerales

principales identificados son plagioclasa, cuarzo y ortosa, mientras que en menor proporción se presentan minerales accesorios como biotita y hornblenda.

El Plutón Quello (PN-pro-qu/gd) se localiza en la parte sur del cuadrángulo, en el límite con el cuadrángulo de Antabamba. Intruye las rocas de la Formación Arequipa y está formado por granodioritas de textura fanerítica, ricas en plagioclasa, cuarzo y ortosa.

Finalmente, el Plutón Ojooccha (PN-pro-oj/gd) aflora en las proximidades de la laguna Tipiochca, en el extremo sur del área de estudio, donde corta la Formación Arequipa. Se caracteriza por la presencia de granodioritas leucocráticas, faneríticas, compuestas también por plagioclasa, cuarzo y ortosa.

Unidad Lambrana

El Plutón Lambrama (PN-lam-lam/di, cdi, cmo) se encuentra al sur y sureste del centro poblado de Lambrama. Este cuerpo ígneo intruye a las formaciones geológicas Arequipa, Muiñani y Soneco. Su composición incluye cuarzodioritas, cuarzomonzonitas y una porción menor de diorita granítica de textura holocristalina y equigranular, destacando por contener cristales de plagioclasa y hornblenda como minerales principales.

El Plutón Marjune (PN-lam-mar/mgr) aflora en las cercanías de la localidad de Marjune, extendiéndose hacia el centro y la parte sur del cuadrángulo geológico. Este plutón intruye tanto al Grupo Yura como a las formaciones Arequipa, Muiñani y Soneco. Su constitución mineralógica está dominada por monzogranitos de tonalidad clara, con plagioclasas, feldespatos potásicos y cuarzo como componentes principales.

Por su parte, el Plutón Sanjo (PN-lam-sj/di) tiene afloramientos ubicados en la zona central del cuadrángulo, especialmente entre Sanjo y Parjobamba. En su sector sur, intruye rocas metamórficas del Grupo Mitu, y en otros sectores se encuentra en contacto con el basamento de

Abancay. Se caracteriza por presentar dioritas claras a oscuras, algunas veces con textura granular, compuestas mayoritariamente por plagioclasas y piroxenos.

Figura 7

Afloramiento de rocas Intrusivas (Monzodioritas)



Nota. Vista altoandina con afloramiento superficial de rocas intrusivas (Monzodiorita) señalado en el terreno junto a una laguna. Tomado de “*Evaluación geotécnica para la construcción de la Presa Taccracocha, Lambrama–Abancay*” (Pro Desarrollo Apurimac, 2021, p. 6).

Geomorfología

Las principales unidades geomorfológicas de la región han sido ampliamente descritas en la obra *Revisión y actualización del cuadrángulo de Abancay (28-p)*, elaborada por J. Waldir Valdivia Vera y Omar Latorre Borda, y publicada por INGEMMET en 2003.

Entre las formas de relieve más representativas del área se encuentran: zonas montañosas, el Altiplano, glaciares de valle, depósitos morrénicos y geformas asociadas a glaciares. A continuación, se presentan algunas de las unidades geomorfológicas relevantes:

Cordillera Oriental

Esta unidad abarca las estribaciones ubicadas al oeste de la Cordillera Oriental del sur del Perú. Su principal rasgo distintivo es la diferencia en morfología respecto a otras cadenas montañosas, ya que aquí los relieves no son tan abruptos ni se aprecian las formas suaves propias de las Altas Mesetas.

Desde un punto de vista estructural, esta cordillera se asocia con una zona de fallas con orientación este-oeste (como la Falla de Abancay). El levantamiento tectónico ocurrido en el Plioceno-Cuaternario de los Andes fue generado por fallas inversas de tipo normal, que contribuyeron a la elevación del bloque de la Puna. En esta área, se observa una erosión diferenciada que afecta principalmente a la parte superior de la superficie. Las últimas fases de levantamiento (Cordillera Oriental) reactivaron procesos erosivos, originando formas rejuvenecidas. Desde el Paleozoico hasta la actualidad, esta unidad ha experimentado una evolución geodinámica positiva, marcada por diversos episodios de levantamiento y fases de erosión sucesiva.

Los Valles

La Cordillera Oriental presenta un relieve profundamente disectado por valles profundos, muchos de los cuales son estrechos y encañonados. En la zona analizada, los valles más representativos están asociados al río Apurímac y sus principales afluentes: el río Santo Tomás, río Antilla, río Pachachaca, río Pincos, entre otros. Varios de estos cauces presentan encajamientos significativos, en algunos tramos con profundidades que superan los 1,000 metros.

A lo largo de su trayecto, los flancos de estos valles muestran pendientes marcadas y, en muchas zonas, están cubiertos por depósitos gruesos de origen aluvial. La alta energía del flujo fluvial sugiere que estos ríos aún no han alcanzado un estado de equilibrio geomorfológico. En

particular, el río Apurímac y sus tributarios presentan dificultades para estabilizar su cauce, lo cual se evidencia en el desarrollo de valles estrechos y encajonados, especialmente en las proximidades de sus zonas de confluencia.

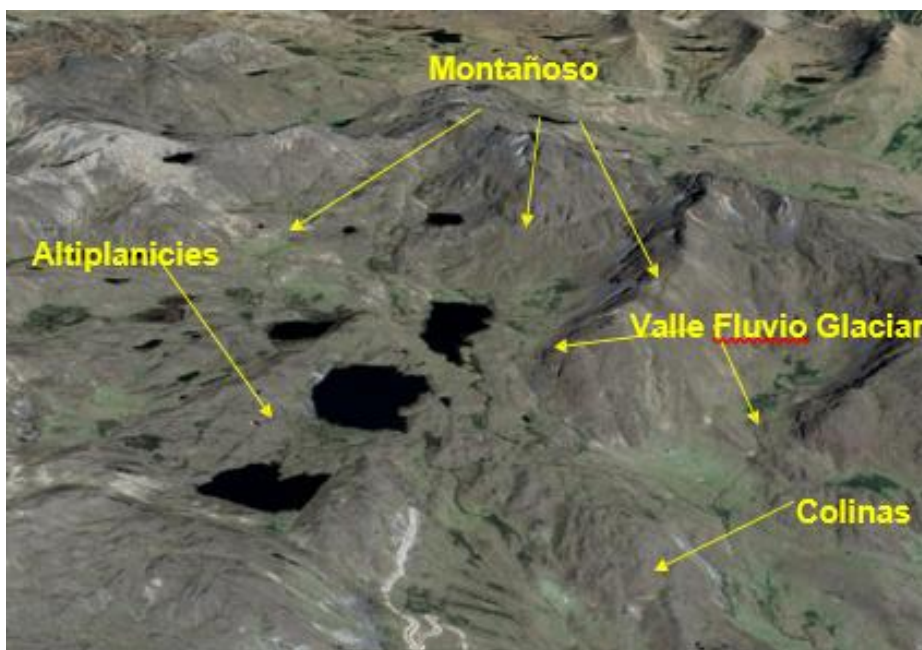
Algunos valles ilustran de forma notable este comportamiento, como los valles colgados de Ccurahuasi y Sahuinto (ubicados a unos 8 km al sur de la ciudad de Abancay). Estas formas se originan por el levantamiento andino ocurrido durante el Cuaternario, el cual generó un sobreajuste del nivel de base de los ríos y dio inicio a procesos de erosión regresiva.

Unidades Geomorfológicas Locales

A nivel de geomorfología local, la zona de estudio ha sido modelado por procesos denudacionales propio de zonas de relieve montañoso – altiplánico. Se puede identificar, Relieves de Montaña, Colinas, Valles Aluvio-Glaciares, etc.

Figura 8

Geomorfología regional



Nota. Vista satelital de la geomorfología altoandina que identifica altiplanicies, relieves montañosos, colinas y un valle fluvio-glaciar con lagunas. Tomado de “*Evaluación geotécnica*”

para la construcción de la Presa Taccracocha, Lambrama–Abancay” (Pro Desarrollo Apurímac, 2021, p. 3).

Geodinámica

Geodinámica Externa

La manifestación de procesos asociados a la geodinámica externa depende de diversos factores, entre ellos: la litología, la presencia de estructuras geológicas, las características del relieve, las condiciones climáticas y la influencia de actividades humanas.

En la zona de estudio no se han podido apreciar fenómenos geodinámicos activos que puedan ser causa de peligro geotécnico, esto se debe a su pendiente ligeramente inclinada, pero sobre todo a la presencia de suelos eluviales que cubren los afloramientos rocosos existentes. En algunas zonas hay presencia de bloques de roca caliza superficial que pueden rodar a la parte inferior, por lo que se debe tener sumo cuidado al momento de ejecutar el proyecto.

Figura 9

Pendiente ligeramente inclinada en la zona de estudio



Nota. Panorámica de ladera altoandina con pendiente suavemente inclinada en la zona de estudio. Tomado de “*Evaluación geotécnica para la construcción de la Presa Taccraccocha, Lambrama–Abancay*” (Pro Desarrollo Apurímac, 2021, p. 5).

Geodinámica Interna

La ocurrencia de los fenómenos de geodinámica externa está condicionada por factores importantes como la litología, estructuras geológicas, geomorfología y el clima.

Los procesos naturales que ocurren en esta región están fuertemente influenciados por las características geológicas de cada sector, así como por la geomorfología accidentada propia de su ubicación en la cordillera de los Andes. A ello se suma el clima, que actúa como factor detonante en la manifestación de fenómenos relacionados con la geodinámica externa.

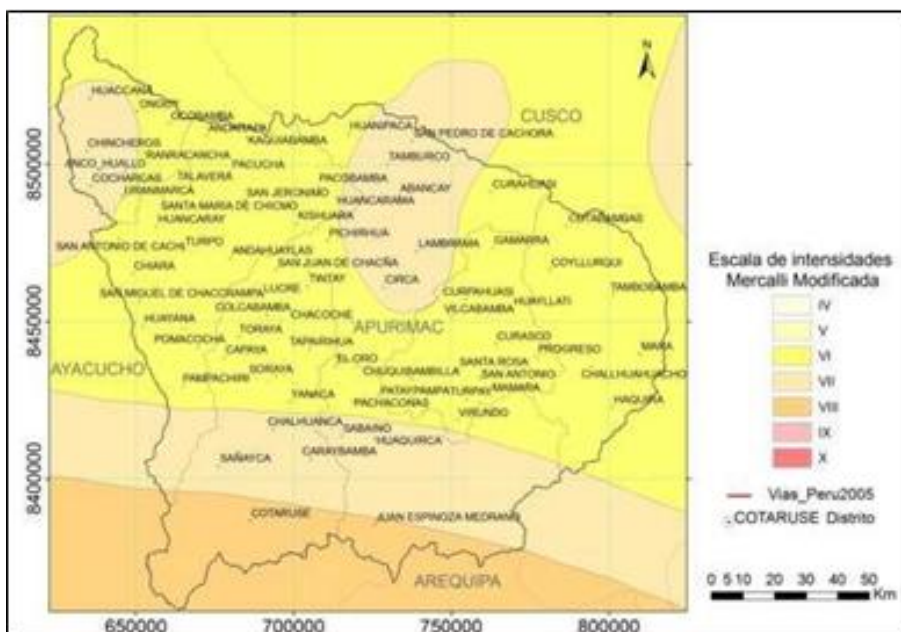
El análisis de los movimientos en masa exige una comprensión integral de estos procesos, lo cual implica considerar tanto sus atributos espaciales como temporales. Esto es clave para lograr una adecuada evaluación y representación de amenazas, lo que a su vez permite una gestión de riesgos más eficaz en contextos de emergencia.

En cuanto a la geodinámica externa en el área andina, los principales fenómenos observados son los movimientos de masas. No obstante, en la zona de estudio no se identifican amenazas activas significativas, salvo por algunos signos de erosión en quebradas asociadas a escurrimientos temporales durante la temporada de lluvias.

Finalmente, se concluye que en el área analizada no se presentan indicios de geodinámica externa activa, debido a que se ubica sobre una llanura aluvial de alta altitud.

Figura 10

Mapa de distribución de intensidades sísmicas de la región Apurímac



Nota. Mapa temático de Apurímac que muestra la distribución de intensidades sísmicas según la Escala de Mercalli Modificada. Tomando de “*Informe técnico de reporte de zonas críticas y peligros geológicos y geo-hidrológicos en la región Apurímac. Ministerio del Ambiente*”(Villacorta et al., 2013, p. 20).

3.2.4. Geotecnia

El estudio geotécnico tiene como objetivo principal determinar las características del subsuelo donde se planifica ejecutar una cimentación, con el propósito de analizar su comportamiento. Para ello, se emplean diversas investigaciones basadas en ensayos de laboratorio, registros geológicos y estudios geotécnicos, además de pruebas de mecánica de suelos, análisis sobre agregados y rocas, entre otros. Todo este proceso se realiza en conformidad con los lineamientos estipulados en el Reglamento Nacional de Edificaciones (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2020).

3.2.4.1. Capacidad de Carga.

Contreras (2013) señala que, para estimar la capacidad de carga admisible en macizos rocosos, es necesario considerar diversos parámetros relacionados con la geología del terreno,

la calidad del material y el valor del RQD (Rock Quality Designation). En este tipo de análisis, se aplican coeficientes de seguridad junto con límites de tolerancia que permiten ajustar el valor del RQD. Por ejemplo, si se tiene un macizo con un RQD promedio del 75 %, el factor de seguridad adoptado debe estar entre 6 y 10.

Para calcular dicha capacidad, pueden emplearse métodos como los propuestos por Terzaghi, que utilizan el ángulo de fricción y la cohesión del macizo rocoso. Además, se recurre a la fórmula de Bowles (1994), requerida por la norma técnica NTP E 050 (2018), en la que los coeficientes relacionados con la capacidad portante se expresan como:

La capacidad de carga última calculada es de todas formas función del coeficiente RQD según la siguiente expresión:

$$Q_{ult}(\text{Bowles 1994} - \text{NTP E050 2018}) = Q_{ult} * (RQD)^2(\text{MPA})$$

Si el sondeo en roca no suministra piezas intactas (RQD tiende a 0), la roca se trata como un terreno, estimando mejor los parámetros c y ϕ .

Los parámetros de diseño correspondientes al suelo de fundación de la presa son:

Tabla 2

Parámetros de Sitio a ser usados en el diseño sísmico

| Parámetro | Magnitud | Descripción |
|----------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Zona | 2 | Mapa de Zonificación Sísmica |
| Factor de Zona | 0.25g. | Tabla N° 02 |
| Perfil de Suelo | Tipo S2 | Suelo intermedio |
| Parámetros del Suelo | $T_p = 0.60$ seg. | Período Predominante |
| | $T_L = 2.00$ seg | Factor de Amplificación del Suelo |
| | $S = 1.20$ | |

Nota. La tabla resume los parámetros de sitio para el diseño sísmico: zona 2, factor de zona 0,25 g, perfil de suelo S2, $T_p=0,60$ s, $T_L=2,00$ s y $S=1,20$, con sus descripciones de referencia. Tomado de “*Evaluación geotécnica para la construcción de la Presa Taccraccocha, Lambrama–Abancay*” (Pro Desarrollo Apurímac, 2021, p. 8).

3.2.4.2. Clasificación Geomecánica

La clasificación de macizos rocosos con fines geotécnicos tiene como objetivo obtener parámetros que permitan su utilización en el diseño y ejecución de obras de ingeniería civil. Debido a que los macizos rocosos son medios discontinuos con comportamiento geomecánico complejo, su evaluación puede realizarse mediante sistemas simplificados que permiten organizarlos y analizarlos según su respuesta ante distintos tipos de aplicaciones.

Con esta finalidad, se han desarrollado diversos métodos de clasificación geomecánica que permiten estimar propiedades relevantes del macizo, a partir de características como su calidad estructural, su respuesta frente a esfuerzos mecánicos, y parámetros relacionados con estabilidad de taludes, sostenimiento subterráneo y facilidad de excavación, entre otros aspectos (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, 2017).

Las características de los macizos rocosos que se consideran en las distintas clasificaciones son las siguientes:

- Resistencia del material rocoso.
- Índice RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades
- Condiciones Hidrológicas

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas en la actualidad son la RMR. Se emplea tanto para la caracterización de los macizos rocosos y sus propiedades como para su aplicación en obras de ingeniería (Mendoza & Cueva, 2024, p. 32).

3.2.4.3. Clasificación RMR

El sistema de Clasificación Geomecánica RMR (Rock Mass Rating) fue desarrollado por el ingeniero geotécnico Zbigniew Bieniawski en 1973 y actualizado posteriormente en los años 1979 y 1989. Esta metodología se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas para evaluar y categorizar la calidad de los macizos rocosos. El RMR proporciona un enfoque estructurado para interpretar el comportamiento del macizo con base en sus características geotécnicas, lo que resulta especialmente útil para proyectos en minería y en obras civiles.

Mediante este sistema, es posible establecer un índice que representa la calidad del macizo en función de parámetros técnicos como la resistencia del material rocoso, el tipo y la orientación de las discontinuidades, la presencia de agua freática, entre otros factores que influyen directamente en su estabilidad y capacidad de soporte (Ochoa et al., 2020, p. 28).

La Clasificación RMR resulta esencial no solo para estimar la estabilidad de túneles, sino también para su aplicación en presas, galerías subterráneas y otras infraestructuras. Al analizar la calidad del macizo a través de esta metodología, se puede optimizar el diseño, aplicar medidas de protección más adecuadas y realizar estudios geotécnicos con mayor exactitud.

Tabla 3

Clasificación RMR de Bieniawski

| Parámetros de clasificación | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|-------------------------|------|------|-----|-----|-------------------------|
| 1 | Resistencia de la | Ensayo de Carga Puntual | > 10 | 10-4 | 4-2 | 2-1 | Compresión Simple (MPa) |

| | Matriz | Compresión | | | | | | | |
|----------|---------------|---------------------------------------|---------------|----------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------|-----|
| | | Rocosa | Simple | > 250 | 250-100 | 100-50 | 50-25 | 25-5 | 5-1 |
| 2 | | <i>Puntuación</i> | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| | | RQD | 100-90% | 90-75% | 75-50% | 50-25% | 25% | | |
| | | <i>Puntuación</i> | 20 | 17 | 13 | 6 | 3 | | |
| 3 | | Espaciados de discontinuidades | > 2m | 2-0.6m | 0.6-0.2m | 0.2-0.06m | <0.06m | | |
| | | <i>Puntuación</i> | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | |
| | | Longitud de la discontinuidad | <1m | 1-3m | 3-10m | 10-20m | > 20m | | |
| 4 | | <i>Puntuación</i> | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 | | |
| | | Abertura | Nada | <0.1mm | 0.1-1.0mm | 1-5mm | > 5mm | | |
| | | <i>Puntuación</i> | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | |
| | | Rugosidad | Muy rugosa | Rugoso | Ligeramente rugoso | Ondulada | Suave | | |
| | | <i>Puntuación</i> | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | |
| | | Relleno | Ninguno | Relleno duro < 5mm | Relleno duro >5mm | Relleno blando < 5mm | Relleno blando >5mm | | |
| 5 | | <i>Puntuación</i> | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 | | |
| | | Meteorización | Inalterada | Ligeramente alterada | Moderadamente alterada | Muy alterada | Descompuesta | | |
| | | <i>Puntuación</i> | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | |
| 5 | | Condiciones hidrológicas | Seco | Húmedo | Mojado | Goteo | Flujo | | |
| | | <i>Puntuación</i> | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de Bieniawski, con parámetros y puntajes para la resistencia de la matriz rocosa, RQD, espaciamiento y condición de discontinuidades (longitud, abertura, rugosidad, relleno, meteorización) y condiciones hídricas. Tomado de “*Evaluación geomecánica del macizo rocoso aplicando el RMR para el diseño del banco en U.E.A*” (Alvarez, 2020, p. 36).

Como se puede observar en la Tabla 3, los diversos parámetros que buscan clasificar a un macizo rocoso son:

- **Resistencia uniaxial de la matriz rocosa:** La resistencia uniaxial de una matriz rocosa es uno de los parámetros más relevantes dentro de los sistemas de clasificación geomecánica, ya que permite determinar la capacidad de la roca intacta para resistir esfuerzos de compresión. Esta propiedad se obtiene mediante la Prueba de Compresión Uniaxial (UCS, por sus siglas en inglés), que consiste en aplicar carga axial creciente sobre un testigo cilíndrico de roca hasta alcanzar su punto de fractura (Celli & Falcioni, 2022, p. 54).
- **Grado de fracturación en términos del RQD:** Morales y Velarde (2025) explican que el RQD (Rock Quality Designation o Índice de Calidad de la Roca) es un parámetro utilizado en geotecnia para determinar la calidad estructural del macizo rocoso, considerando el grado de fracturamiento de la roca. Este índice se calcula a partir de la suma de longitudes de los fragmentos de roca intactos extraídos durante una perforación. Su valor puede obtenerse empleando la siguiente fórmula:

$$RQD = \frac{\text{Longitud total de fragmentos de roca intacta} > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total de perforación}} \times 100$$

- **Espaciado de las discontinuidades:** El espaciamiento entre discontinuidades hace referencia a la distancia que separa las fracturas o fisuras presentes en un macizo rocoso. Este aspecto es esencial para evaluar el grado de conectividad entre las fracturas, así como su influencia en la estabilidad del terreno y su permeabilidad (Pérez et al., 2021, p. 6).
- **Condiciones de las discontinuidades:** Las condiciones de las discontinuidades aluden a las propiedades físicas de las fracturas en el macizo, como su persistencia, apertura, rugosidad y la naturaleza del material que las rellena (Mendoza & Cueva, 2024, p. 47).

- **Condiciones hidrogeológicas:** Desde el punto de vista geotécnico, las condiciones hidrogeológicas representan un aspecto clave, ya que la existencia y comportamiento del agua dentro de las fisuras de la roca puede afectar de forma significativa tanto la estabilidad del macizo como su permeabilidad. La presencia de agua subterránea en fisuras o cavidades puede alterar las propiedades mecánicas del macizo rocoso, especialmente la cohesión y el ángulo de fricción en las zonas fracturadas (Jiménez, 2022, p. 34).

El efecto que ejercen estos parámetros sobre el comportamiento geomecánico de un macizo puede representarse mediante el índice de calidad RMR (Rock Mass Rating), el cual se expresa dentro de una escala que va de 0 a 100 (Mendoza & Cueva, 2024, p. 26).

Tabla 4

Clasificación de calidad de la roca según el RMR

| Clase | I | II | III | IV | V |
|-------------------|-----------|-----------|------------|-----------|----------|
| Calidad | Muy buena | Buena | Media | Mala | Muy mala |
| Puntuación | 100 – 81 | 80 – 61 | 60 – 41 | 40 – 21 | < 20 |

Nota. La tabla resume la calidad de roca según RMR, clasificándola en clases I–V con categorías cualitativas (muy buena a muy mala) y sus rangos de puntuación correspondientes. Tomado de “*Evaluación geomecánica del macizo rocoso aplicando el RMR para el diseño del banco en U.E.A*” (Alvarez, 2020, p. 40).

Para determinar la clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating) del macizo rocoso en la zona de estudio, se consideran cinco (05) perforaciones diamantinas estratégicamente ubicadas en el área de emplazamiento de la Presa.

El procedimiento de perforación diamantina consiste en la extracción continua de testigos de roca mediante una broca cilíndrica hueca impregnada con diamantes industriales, que gira y avanza simultáneamente penetrando la roca mientras es refrigerada por agua o lodos de perforación. Los testigos recuperados son introducidos en un tubo interior que forma parte del varillaje de perforación, el cual es extraído periódicamente mediante un cable de acero (wire line) sin necesidad de retirar la sarta completa de perforación. Este proceso permite obtener muestras cilíndricas continuas del subsuelo con un porcentaje de recuperación superior al 85%, las cuales son colocadas en cajas portatestigos debidamente identificadas con la profundidad, orientación y características principales del sondeo, facilitando así el posterior análisis geotécnico y estructural del macizo rocoso (Pro Desarrollo Apurímac, 2021).

3.2.5. Ensayo de Permeabilidad

Una prueba de permeabilidad es un procedimiento geotécnico utilizado para determinar la capacidad de un material para permitir el paso del agua a través de él. Este tipo de ensayo resulta clave en la evaluación de suelos y macizos rocosos dentro de proyectos de infraestructura, ya que la permeabilidad influye directamente en la estabilidad de estructuras subterráneas, como presas y túneles, así como en el manejo del agua en el subsuelo. Entre los métodos más utilizados para medir la permeabilidad se encuentran los de Lefranc y Lugeon, cada uno adecuado para distintos tipos de materiales y condiciones geológicas (Cantos & Pinargote, 2021, p. 45)

Anteliz et al. (2022), el método Lefranc es comúnmente aplicado en suelos sueltos o aluviales, donde se busca conocer el caudal de agua que ingresa a un pozo bajo flujo constante. Este procedimiento implica establecer una carga hidráulica constante y medir el volumen de agua extraído del pozo en un intervalo específico. Para llevarlo a cabo, se conecta una manguera de una pulgada al pozo perforado, utilizando un caudalímetro que permite controlar y medir el

flujo de agua. Esta prueba se realiza manteniendo constante el caudal de entrada, y suele durar entre 10 y 15 minutos, dependiendo de las características del terreno. Es especialmente útil en suelos homogéneos y con alta permeabilidad, donde el flujo de agua es significativo y el proceso de medición resulta más sencillo. Para obtener los resultados, se aplica la fórmula correspondiente:

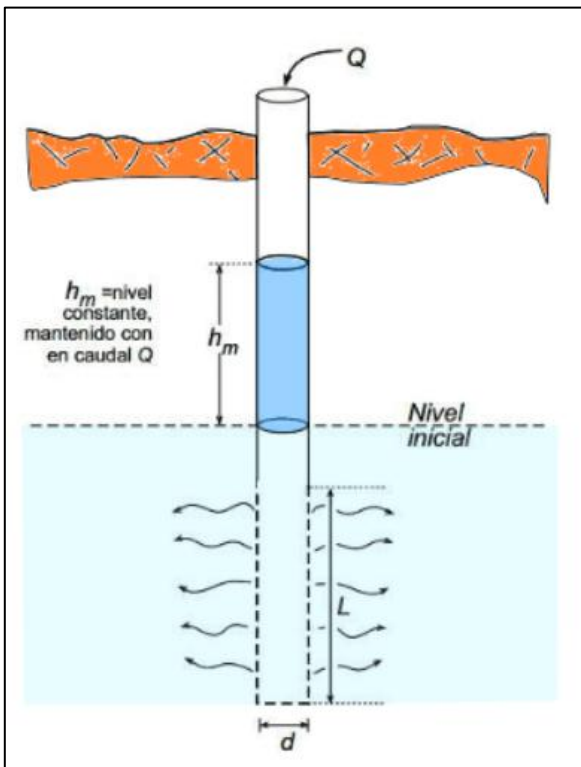
$$K = \frac{\ln\left(\frac{2L}{d}\right)}{6.28 L h_m} Q$$

Donde:

- Q = Caudal
- L = Longitud ensayada
- D = Diámetro inferior del tubo

Figura 11

Ensayo de Permeabilidad por Método Lefranc



Nota. Esquema del ensayo Lefranc in situ, donde se inyecta un caudal Q para mantener nivel constante en un pozo y estimar la permeabilidad del suelo. Extraído de “*Ensayo Lefranc*” (Maldonado, 2020).

Huamaní (2021) señala que el método Lugeon está orientado a suelos o rocas con mayor grado de compactación, donde la permeabilidad suele ser considerablemente baja. Esta técnica consiste en medir la cantidad de agua que atraviesa un material rocoso compacto durante un ensayo con carga variable.

Durante el procedimiento, se evalúa la reducción del volumen de agua infiltrado en un periodo de tiempo específico, con el objetivo de determinar la permeabilidad del terreno bajo condiciones de presión cambiantes. La medición del agua que se va perdiendo se lleva a cabo mediante un cronómetro, registrando los datos en intervalos determinados: 1 minuto, 5 minutos, 10 minutos y hasta 90 minutos. Asimismo, se utiliza una sonda de nivel para medir la variación del nivel del agua durante el ensayo:

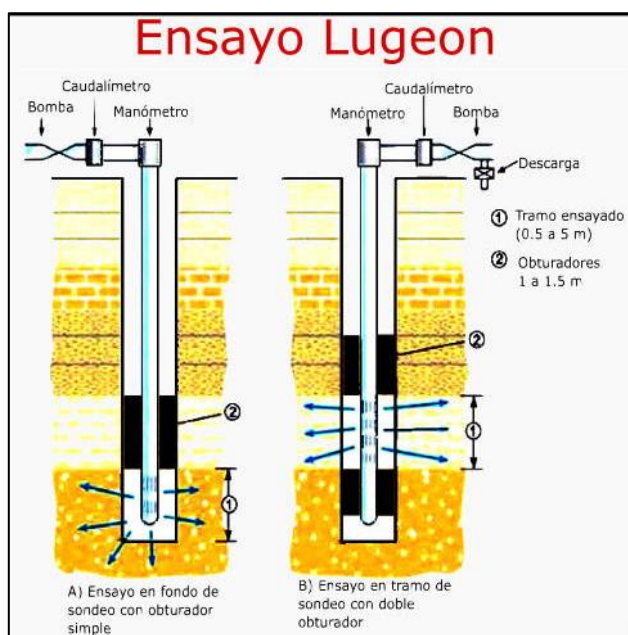
$$k_{U.L.} = \frac{V_{(l)}}{l_{(m)}} * \frac{1000}{P_{(Kpa)}} * \frac{10}{t_{(min)}}$$

Donde:

- $k_{U.L.}$ = Permeabilidad del macizo rocoso (cm/s)
- $V(l)$ = Volumen de agua que se inyecta en el ensayo (litros)
- $P(Kpa)$ = Presión aplicada durante el ensayo (kilopascales)
- $T(min)$ = Tiempo de prueba (minutos)

Además, la unidad de permeabilidad se relaciona con la siguiente conversión de unidades:

$$l.U.L = l \frac{t}{m * min} = 10^{-5} \frac{cm}{s}$$

Figura 12*Ensayo de Permeabilidad por Método Lugeon*

Nota. Esquema del ensayo Lugeon en macizos rocosos, donde se inyecta agua a presión con obturador simple o doble para medir la absorción por tramo. Extraído de “*Ensayo Lugeon*” (Maldonado, 2020).

Tabla 5*Rangos de permeabilidad de macizos rocosos*

| Tipo de macizo | Permeabilidad aprox. (cm/s) | Presión (kPa) |
|---------------------------|---|---------------|
| Muy impermeable | $\leq 1 \times 10^{-5}$ | 1000 |
| Prácticamente impermeable | $1 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-5}$ | 1000 |
| Permeable | 3×10^{-5} a 1×10^{-4} | 1000 |
| Muy permeable | $> 1 \times 10^{-4}$ | 1000 |

Nota. La tabla presenta los rangos de permeabilidad de macizos rocosos, vinculando categorías con valores aproximados en cm/s y presiones de ensayo de 1000 kPa. Extraído de “*Ensayos de campo, Monografía N° 5*” (Olalla y Sopena, 1991, p. 30).

3.2.6. *Ensayo Geoeléctrico*

La evaluación geoeléctrica consiste en explorar el terreno mediante ensayos de refracción sísmica, que permiten determinar la potencia de los estratos del subsuelo a partir del análisis de la velocidad de propagación de las ondas “P”. Este tipo de estudio facilita la interpretación de las propiedades elásticas del terreno a través de perfiles sísmicos (Instituto Geofísico del Perú, 2021).

- **Tomografía eléctrica**

La tomografía eléctrica tiene como finalidad construir un modelo bidimensional (2D) o tridimensional (3D) del subsuelo, mediante la inyección de corriente eléctrica en el terreno a través de un par de electrodos. Las mediciones de diferencia de potencial eléctrico generadas por esta corriente permiten estimar la resistividad aparente del terreno. En otras palabras, cada tipo de material del subsuelo posee un rango específico de resistividad que lo caracteriza. Mediante la interpolación e interpretación de estos datos, se elabora una imagen o corte de resistividad, a partir de la cual es posible inferir los distintos tipos de materiales presentes en el terreno (Pinto & Aracil, 2021, p. 24).

El ensayo de tomografía eléctrica se ejecuta conforme a los lineamientos establecidos en la NTP 339-157:2001. En dicha norma se especifica que las mediciones de resistividad eléctrica deben realizarse en ohmios, usando un equipo de inyección de corriente en el terreno:

$$J = \delta * E$$

Donde:

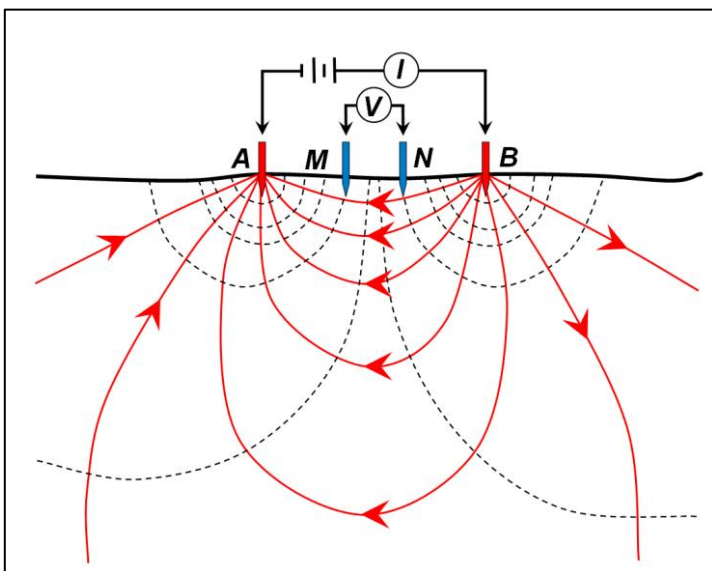
- δ es la conductividad eléctrica [Siemens/m] del medio.
- E es la intensidad del campo eléctrico sobrepuesto [V/m]
- J es la densidad de corriente [A/m²].

En las investigaciones geoelectricas, la conductividad y la resistividad se expresan comúnmente como $\rho = 1/\delta[\Omega\text{m}]$

En la práctica lo que es medido, es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie.

Figura 13

Esquema de base usado por las investigaciones eléctricas



Nota: Esquema base de prospección geoelectrica que muestra la disposición AMNB de electrodos para inyectar corriente y medir potencial. Extraído de “*Review of selected geophysical methods used in the assessment of water resources for agricultura*” (Badora y Wawer, 2018, p. 9).

Tabla 6

Parámetros de adquisición de datos para el ensayo de Tomografía Eléctrica

| Parámetros | Descripción |
|-----------------------|------------------------|
| Medición | Resistividad eléctrica |
| Arreglo de electrodos | Wenner – Schlumberger |

| | |
|---------------------------------|---------|
| Espaciamiento entre electrodos | 7 y 10m |
| Formato de los datos adquiridos | .dat |
| Intervalo de muestreo | 2 s |
| Stacking | 1 a 5 |

Nota: La tabla resume los parámetros de adquisición para tomografía eléctrica: resistividad medida, arreglo Wenner–Schlumberger, espaciamientos 7–10 m, formato .dat, muestreo de 2 s y stacking 1–5. Extraído de “*Review of selected geophysical methods used in the assessment of water resources for agricultura*” (Badora y Wawer, 2018, p. 10).

El arreglo geométrico utilizado en la adquisición de registros de resistividad para el presente ensayo, fue Wenner-Schlumberger, esto porque permite obtener buena resolución vertical y lateral de los perfiles de resistividad.

Tabla 7

Valores de resistividad (Ohm.m)

| Conductividad | Resistividad (Ohm.m) | Material |
|---------------------------------|---|---|
| Material de alta conductividad | $30 \text{ Ohm.m} < \rho < 500 \text{ Ohm.m}$ | Roca fracturada saturada o posible zona de filtración |
| Material de conductividad media | $501 \text{ Ohm.m} < \rho < 4500 \text{ Ohm.m}$ | Roca fracturada húmeda |
| Material de baja conductividad | $4501 \text{ Ohm.m} < \rho < 36115 \text{ Ohm.m}$ | Roca fracturada seca |

Nota. Valores de resistividad (Ohm.m) para diferentes tipos de rocas fracturadas según su conductividad. Extraído de “*A New Method for the Determination of the Resistivity of the Earth's Surface*” (Wenner, 1925, p. 25).

3.3 Definición de términos

Estudio geológico: Este tipo de estudio abarca el análisis de aspectos como la geomorfología, la geología local y las condiciones geológicas asociadas a los sistemas de captación, conducción y obras complementarias. En el caso de infraestructuras como las presas, se pone especial énfasis en el estudio geológico del sitio, considerando la estratigrafía, estructuras geológicas e hidrogeología. Se analizan detalladamente las condiciones geológicas del eje de la presa y sus estructuras asociadas. Asimismo, se examinan las características geológicas del vaso o zona destinada al embalse, prestando atención a los factores morfológicos y a la capacidad de impermeabilidad del terreno. Todos estos aspectos son esenciales para asegurar la estabilidad y funcionalidad de la obra proyectada (Cabrera et al., 2020, p. 10).

Estudio geotécnico: En proyectos hidráulicos examinan las características del suelo en sistemas de conducción y distribución, así como en obras especiales como bocatomas y reservorios. Para presas, se realiza un levantamiento detallado de la boquilla y vaso, complementado con técnicas avanzadas como perforaciones diamantinas, ensayos geoeléctricos y análisis MASW. Además, se evalúan canteras para materiales de construcción. Estos análisis proporcionan datos cruciales sobre las condiciones del terreno, esenciales para el diseño seguro y eficaz de las estructuras hidráulicas (Lozano & Ventura, 2021, p. 32).

Calicatas: Las calicatas son excavaciones exploratorias realizadas en la fase preliminar de un proyecto de construcción. Su propósito principal es evaluar las características del subsuelo para asegurar que sean apropiadas para la obra planificada. Estas excavaciones permiten a los ingenieros y geólogos examinar directamente los estratos del suelo, recoger muestras para análisis y determinar la idoneidad del terreno para la construcción propuesta (Quinto, 2022).

Mecánica De Rocas: Es una disciplina que investiga tanto teórica como prácticamente las características y el comportamiento mecánico de los materiales rocosos. Se enfoca en

analizar cómo estos materiales responden a las diversas fuerzas presentes en su ambiente natural. Este campo de estudio examina las propiedades físicas de las rocas y su interacción con las tensiones y cargas aplicadas, proporcionando información crucial para proyectos de ingeniería en entornos rocosos (Chirinos & Alfaro, 2023, p. 29).

Topografía: Las características topográficas del terreno son un factor decisivo en la selección del tipo de presa. Valles angostos con flancos rocosos suelen favorecer la construcción de presas de concreto armado. Por otro lado, áreas de relieve suave son más apropiadas para presas de tierra, que requieren aliviaderos separados. En situaciones intermedias, aunque otros factores pueden influir, el principio general recomienda diseñar la estructura en armonía con la configuración natural del terreno. Esta adaptación a las condiciones geográficas existentes optimiza la eficiencia y seguridad de la presa (Martínez & Bermeo, 2023).

Método geofísico: Los métodos de exploración geofísica, como el de resistividad eléctrica, son técnicas no invasivas que permiten estudiar el subsuelo desde la superficie. Estos métodos se basan en la medición de diversas propiedades físicas de los materiales y estructuras subterráneas. Al detectar variaciones en estas propiedades, es posible identificar y diferenciar distintos elementos del subsuelo, distinguiéndolos del entorno circundante (Scivetti et al., 2021).

Ensayo de permeabilidad tipo Lefranc: Este método, de aplicación sencilla, se emplea para determinar la permeabilidad en suelos, especialmente en aquellos de tipo granular, permeables o semipermeables, ubicados cerca del nivel freático. En su modalidad de carga constante, el procedimiento consiste en llenar el pozo con agua hasta que se expulse el aire y se estabilice el flujo. Una vez alcanzado este punto, se mide el tiempo de descenso y el volumen de agua extraído, lo que permite afirmar que se ha establecido un flujo constante. A partir de estos datos, se obtienen tiempos y caudales que permiten estimar el coeficiente de

permeabilidad, constituyendo así una herramienta útil para evaluar la capacidad del suelo para conducir agua (Anteliz et al., 2022).

Ensayo de permeabilidad tipo Lugeon: El ensayo tipo Lugeon se emplea para evaluar la permeabilidad de macizos rocosos bajo condiciones de baja conductividad hidráulica, especialmente en formaciones fracturadas o fisuradas. Este procedimiento se basa en la inyección de agua en el interior del sondeo, monitoreando la cantidad de fluido que atraviesa el macizo rocoso durante un intervalo de tiempo determinado. A partir de esta información, se calcula el coeficiente de permeabilidad. Este método es comúnmente utilizado en estudios de presas o túneles, donde es necesario conocer la capacidad de las formaciones rocosas para conducir agua en condiciones de baja presión y bajo gradiente de filtración (Huamaní, 2021).

Refracción Sísmica: es una técnica geofísica que mide la propagación de ondas sísmicas en el subsuelo. Principalmente se enfoca en las ondas compresionales (P) y ocasionalmente en las ondas de corte (S). El proceso implica generar ondas mediante una fuente de energía impulsiva y registrar su llegada en diferentes puntos a lo largo de una línea en la superficie. Los sensores detectan, amplifican y registran estas ondas, permitiendo determinar con precisión su tiempo de arribo en cada ubicación (Villalobos, 2025).

Diseño sismo-resistente: Esta sección ofrece los criterios necesarios para un posible diseño antisísmico. Su objetivo es reducir al mínimo el riesgo de daños materiales y garantizar que las estructuras de ingeniería mantengan su funcionalidad después de un evento sísmico (Gallegos, 2022).

Presas: Construcciones de ingeniería que funcionan como obstáculos artificiales en cursos de agua. Se edifican con diversos materiales, incluyendo piedra, hormigón o materiales sueltos, y se sitúan en puntos clave como gargantas o desfiladeros. El propósito fundamental de estas estructuras es retener agua, formando reservorios que posibilitan una variedad de

aplicaciones. Estos embalses creados por las presas permiten gestionar y aprovechar los recursos hídricos de manera eficiente para diferentes fines (Ochoa et al., 2020).

Resistencia al corte: Es la capacidad de un material para resistir fuerzas que tienden a deformarlo o deslizarlo sobre otro material. En geotecnia, la resistencia al corte se utiliza para analizar la estabilidad de suelos y rocas bajo carga, siendo un parámetro clave para el diseño de fundaciones y estructuras subterráneas (Estela & Siesquén, 2020).

Análisis de riesgos geotécnicos: Este análisis evalúa los posibles riesgos asociados con el terreno y las condiciones geológicas de un sitio, como deslizamientos de tierra, asentamientos del terreno o movimientos sísmicos. Es esencial para determinar la viabilidad de proyectos de infraestructura, permitiendo identificar y mitigar posibles problemas antes de la construcción (Torres, 2020).

Estructura geotécnica: Se refiere a la disposición y características de los materiales y capas del subsuelo en un área determinada, y cómo estas interactúan con las cargas aplicadas en las estructuras. Este estudio es fundamental para garantizar la estabilidad y seguridad de las obras de ingeniería, como presas y túneles, asegurando que los materiales en el terreno sean capaces de soportar los esfuerzos sin comprometer la integridad de la construcción (Maccaferri, 2025).

Permeabilidad hidráulica: La permeabilidad hidráulica es una propiedad de los materiales que describe su capacidad para permitir el paso del agua a través de ellos. Es un parámetro crucial en la geotecnia, ya que afecta el drenaje subterráneo, la estabilidad de las estructuras subterráneas y la gestión de los recursos hídricos. Los ensayos de permeabilidad, como los de tipo Lefranc y Lugeon, permiten evaluar la permeabilidad de suelos y rocas y determinar su capacidad para transmitir agua (Estela & Siesquén, 2020).

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación

La investigación científica puede agruparse en distintas categorías según el propósito que persiga. Por un lado, la investigación básica tiene como objetivo generar nuevo conocimiento teórico sin estar necesariamente vinculada a una aplicación práctica inmediata. Por otro lado, la investigación aplicada se enfoca en resolver problemáticas concretas mediante el uso de conocimientos previamente existentes.

En este sentido, el presente estudio se inscribe dentro del enfoque de investigación aplicada, ya que busca aplicar fundamentos científicos y técnicos para examinar las propiedades geotécnicas del macizo rocoso, y a partir de ello, plantear soluciones prácticas que contribuyan al diseño adecuado de la presa Taccracocha, localizada en el distrito de Lambrama – Abancay.

De acuerdo con Castro et al. (2023), la investigación aplicada se distingue por su orientación práctica y su capacidad de implementación directa. Su propósito central es intervenir en situaciones reales, promoviendo mejoras, innovaciones o cambios concretos en un entorno específico. Este tipo de investigación se apoya principalmente en conocimientos ya generados, ya sea de tipo básico o sustantivo, con el objetivo de convertirlos en herramientas útiles para enfrentar necesidades reales.

Nivel de investigación

Este estudio se enmarca dentro del nivel descriptivo, ya que tiene como propósito principal identificar y caracterizar las propiedades geotécnicas del macizo rocoso en el área designada para la construcción de la presa Taccracocha. Según Alban et al. (2020), la investigación descriptiva se orienta a recopilar información detallada sobre las características, propiedades y dimensiones de los fenómenos o elementos estudiados. Este tipo de investigación

es esencial para plantear y resolver problemas con claridad, reconociendo su relevancia teórica y práctica, y sirviendo como base para futuras investigaciones.

En esta investigación, el enfoque descriptivo permite realizar un análisis sistemático y objetivo del macizo rocoso, basado en datos obtenidos mediante perforación diamantina, ensayos geofísicos y pruebas de permeabilidad. Esta metodología busca ofrecer información precisa sobre las condiciones geotécnicas, sin manipular variables, lo cual facilita una interpretación clara y detallada del comportamiento del terreno en el sitio de estudio.

Enfoque de Investigación

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo, el cual se fundamenta en la recolección y análisis numérico de datos, así como en la evaluación objetiva de variables geotécnicas. Entre estas variables se consideran la clasificación geomecánica del macizo rocoso (RMR), la permeabilidad y otros parámetros geofísicos y geotécnicos, los cuales son obtenidos mediante ensayos tanto de campo como de laboratorio.

Según Hernandez y Mendoza (2018). este tipo de enfoque permite analizar la información de forma estructurada y con posibilidad de ser reproducida, lo que contribuye a obtener resultados precisos y útiles para el diseño técnico de la presa. Al utilizar herramientas cuantificables, se busca generar evidencia confiable que sirva de respaldo para la toma de decisiones en la planificación e implementación del proyecto.

Diseño de Investigación

El diseño metodológico adoptado en este estudio es de tipo no experimental, ya que no se realiza manipulación directa sobre las variables del fenómeno en análisis, sino que estas son observadas tal como se manifiestan en su entorno natural. El propósito es registrar, examinar e interpretar las condiciones geotécnicas del macizo rocoso sin intervenir ni modificar su estado original (Sampieri et al., 2019).

Este diseño resulta adecuado para investigaciones en ingeniería civil y geotecnia, donde se requiere evaluar propiedades del terreno en situaciones reales. Al no intervenir sobre las condiciones del terreno, se garantiza una mayor fidelidad en los datos obtenidos, lo que contribuye a un diagnóstico técnico más riguroso del sitio de emplazamiento de la presa Taccracocha.

4.2 Ámbito temporal y espacial

La presente investigación se desarrolló durante el año 2024 y se enmarca dentro de un análisis técnico especializado en el área geotécnica.

En cuanto al ámbito espacial, el estudio se llevó a cabo en el distrito de Lambrama, perteneciente a la provincia de Abancay, en la región Apurímac, Perú. Esta zona fue seleccionada como el entorno de estudio debido a que permite una evaluación directa de las características del macizo rocoso y su comportamiento geotécnico.

4.3 Población y muestra

Población

Según Condori (2020), se entiende por población al conjunto de elementos, individuos u objetos sujetos a análisis en un estudio, sobre los cuales se requiere obtener información. En términos generales, la población representa el universo de estudio que será investigado.

En este caso particular, la población corresponde al macizo rocoso localizado en la zona destinada para la construcción de la presa Taccracocha, cuya área aproximada es de 124,474 m². Este cuerpo rocoso constituye la unidad central de análisis dentro del estudio geotécnico.

Muestra

De acuerdo con Jorge et al. (2021), la muestra se define como una parte cuidadosamente seleccionada de una población, que refleja las características esenciales del conjunto. Esta

selección tiene como objetivo facilitar la generalización de los resultados y su aplicación a contextos similares.

La presente investigación emplea un muestreo no probabilístico, basado en criterios técnicos y estratégicos según el objetivo del estudio. La selección de las unidades de análisis no se realiza de manera aleatoria ni mecánica, sino en función de las características del terreno y las necesidades de evaluación (Martínez & Torres, 2021).

La muestra está compuesta por:

- Cinco (05) unidades del macizo rocoso extraídas mediante perforación diamantina, utilizadas para determinar la clasificación geomecánica y realizar ensayos de permeabilidad en el área de cimentación.
- Seis (06) sectores evaluados mediante líneas de tomografía eléctrica (TE), correspondientes al ensayo geoelectrico, con el objetivo de determinar la distribución de materiales del subsuelo, estimar zonas de posible filtración y la profundidad de la roca competente.

La cantidad de ensayos necesarios para un estudio geotécnico o de inversión es determinada de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Anexo 03 del contenido mínimo para la elaboración de estudios de inversión a nivel de expediente técnico, según lo estipulado por el programa invierte.pe. (Ministerio de Agricultura y Riego, 2020).

4.4 Instrumentos

Los estudios geotécnicos empleados en esta investigación fueron realizados de acuerdo con estándares técnicos y normativas nacionales reconocidas. Para la recolección y análisis de datos se utilizaron los siguientes instrumentos técnicos:

- Fichas de clasificación geomecánica RMR, elaboradas con base en el Sistema de Clasificación Rock Mass Rating (RMR) propuesto por Bieniawski (1989), utilizadas

para evaluar la calidad del macizo rocoso en las perforaciones diamantinas (Alvarez, 2020).

- Ficha de ensayo de permeabilidad, diseñada para registrar los resultados de las pruebas Lefranc y Lugeon aplicadas en las perforaciones exploratorias. Estas fichas consignaron la profundidad del ensayo, el tipo de prueba realizada, la presión de inyección utilizada, así como los caudales y coeficientes de permeabilidad obtenidos (Cantos & Pinargote, 2021).
- Fichas de campo para tomografía eléctrica, aplicadas bajo los criterios técnicos establecidos por la Norma Técnica Peruana NTP 339-157, empleadas para registrar los parámetros de resistividad eléctrica del subsuelo (Pinto & Aracil, 2021).

4.5 Procedimientos

La metodología empleada en esta investigación incluyó la recopilación, organización, análisis e interpretación de información proveniente de estudios geotécnicos previos realizados en el área proyectada para la presa Taccracocha.

En una primera fase, se sistematizaron los datos obtenidos a partir del mapeo geológico superficial, elaborado conforme a los lineamientos del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Este trabajo permitió identificar las unidades litológicas predominantes, las estructuras geológicas presentes y las condiciones geomorfológicas del área de estudio.

A continuación, se revisaron los resultados correspondientes a la clasificación geomecánica del macizo rocoso mediante el sistema RMR, propuesto por Bieniawski (1989). Esta evaluación se basó en la interpretación de registros obtenidos en cinco (05) perforaciones diamantinas estratégicamente ubicadas en el área del proyecto, con el fin de determinar la calidad del macizo y su viabilidad para cimentación.

Adicionalmente, se llevó a cabo la evaluación de la permeabilidad del macizo rocoso utilizando los métodos Lefranc y Lugeon, aplicados en distintos segmentos de las perforaciones diamantinas. Estos ensayos consistieron en la inyección de agua a diferentes presiones en los intervalos de perforación, registrando los volúmenes absorbidos por el terreno. A partir de esta información, se calcularon los coeficientes de permeabilidad en cm/s, expresados como unidades Lugeon (U.L.), lo que permitió establecer el grado de permeabilidad o impermeabilidad del macizo.

De forma complementaria, se procesaron los datos obtenidos de seis (06) líneas de tomografía eléctrica, ejecutadas siguiendo las especificaciones de la Norma Técnica Peruana NTP 339-157. Estas pruebas permitieron determinar la resistividad eléctrica del subsuelo, identificar zonas con materiales de baja consolidación, posibles focos de filtración y estimar la profundidad de la roca competente. Finalmente, se integró toda la información recopilada para generar una caracterización geotécnica completa del macizo rocoso. Esta integración permitió establecer criterios técnicos para el diseño estructural de la presa, identificando condiciones críticas y zonas óptimas para cimentación, y brindando soporte científico a la toma de decisiones durante la planificación del proyecto.

4.6 Análisis de datos

El análisis de datos en esta investigación se realizó bajo un enfoque técnico y científico, enfocado en evaluar cuantitativamente los parámetros geotécnicos del macizo rocoso, utilizando la información recopilada tanto en campo como en laboratorio. Para ello, se diseñó una estrategia de trabajo que incluyó observaciones directas del terreno y el levantamiento de información estructural.

En etapas posteriores, se revisaron los resultados de los ensayos de clasificación geomecánica del macizo rocoso mediante el sistema RMR, considerando variables como la

resistencia de la roca intacta, el espaciado y estado de las discontinuidades, así como la presencia del nivel freático. Al mismo tiempo, se procesaron datos obtenidos mediante tomografía eléctrica, los cuales permitieron interpretar los perfiles de resistividad y establecer la variación lateral y vertical de los materiales del subsuelo.

También se tomaron en cuenta los resultados de los ensayos de permeabilidad aplicados en las perforaciones, los cuales fueron clave para analizar el comportamiento hidrogeológico del macizo.

Finalmente, toda la información cuantitativa fue organizada y procesada con el propósito de obtener una visión clara de las condiciones del terreno, permitiendo establecer relaciones entre las variables estudiadas y definir la idoneidad del sitio para la cimentación del proyecto. Estos análisis contribuyeron al diseño estructural de la infraestructura hidráulica, ayudando a reducir riesgos geotécnicos asociados.

4.7 Consideraciones éticas

La investigación se basa de acuerdo a la comisión de ética de la universidad tecnológica de los andes describe la comisión universitaria, su finalidad es proteger la privacidad de la persona y su dignidad y entro otros, quienes participan en la presente investigación considerando la normativa y la ética a nivel nacional e internacional donde se considera como fundamental salvaguardar sus derechos de los habitantes, sin dejar de considerar la excelencia de la investigación científica. Considerando los principios éticos del que esta investigación que se reflejan la norma o reglamento, actuando con toda sinceridad en el proceso de la investigación, respetando la privacidad de la persona, su bienestar, salud de las individuos implicadas en la investigación.

Yo, Yanit Carbajal Espinoza, en mi calidad de bachiller de la carrera profesional de Ingeniería Civil, declaro que desarrollaré este trabajo de investigación bajo los más altos

estándares éticos, adhiriéndome rigurosamente a los lineamientos establecidos por el comité de ética de la universidad y guiándome por mis principios éticos personales. Me comprometo a respetar todos los protocolos y normativas éticas aplicables durante el proceso de elaboración de esta investigación, garantizando la integridad y transparencia en cada etapa del estudio.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

Los resultados se presentan de manera organizada, alineándose con los objetivos específicos previamente definidos. Se enfatizan los datos más relevantes que fueron cruciales para el desarrollo de la investigación. Además, los hallazgos se exponen en concordancia con el objetivo general, adhiriéndose estrictamente a lo planteado en los objetivos y la metodología del estudio. Tanto para la clasificación RMR como para los ensayos de permeabilidad de utilizar 5 puntos estratégicos los cuales tuvieron la misma profundidad de 50 metros lo cual es visible en la siguiente tabla 8.

Tabla 8

Parámetros de Profundidad

| Parámetros | Estribo | Estribo | Estribo | Ríos Aguas | Ríos Aguas |
|--------------------------------|----------------|----------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | Derecho | Central | Izquierdo | Arriba | Abajo |
| Profundidad de Desplante(m) | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |

Nota. La tabla indica la profundidad de desplante en cinco ubicaciones, fijada en 50 m en todos los casos. Tomado de “*Evaluación geotécnica para la construcción de la Presa Taccracocha, Lambrama–Abancay*” (Pro Desarrollo Apurimac, 2021, p. 2).

5.1.1. Resultados del Objetivo Específico 1

“Determinar la clasificación geomecánica del macizo rocoso (RMR) para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025”.

Para la evaluación se realizaron 5 perforaciones diamantinas, complementadas con ensayos in situ y laboratorio, con el propósito de caracterizar geomecánicamente el subsuelo empleando la clasificación de Bieniawski (RMR - Rock Mass Rating) para determinar la calidad

del macizo rocoso. Dichas perforaciones presentaron las siguientes características dado la zona donde se obtuvieron como se aprecia en la tabla 8.

Tabla 9

Puntos de Perforaciones de Diamantina

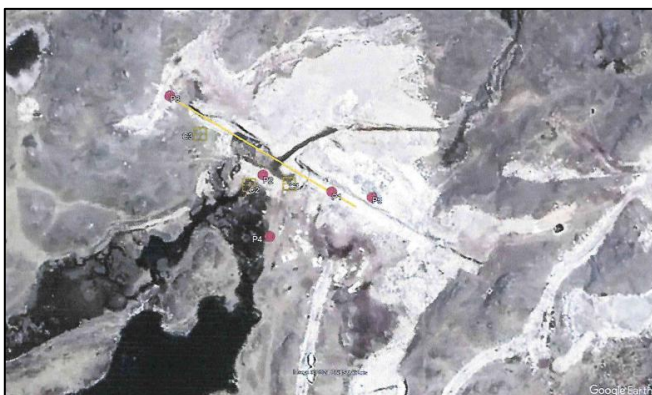
| Sondaje | Coordenadas | | Estructura |
|------------|-------------|--------|------------|
| | Norte | Este | |
| P-1 | 8456980 | 742955 | |
| P-2 | 8456988 | 742926 | |
| P-3 | 8457022 | 742888 | |
| P-4 | 8456962 | 742928 | |
| P-5 | 8456977 | 742972 | |

Nota. La tabla lista los puntos de perforación diamantina P-1 a P-5 con sus coordenadas UTM Norte y Este.

También se establece la ubicación de los 5 puntos de perforación como se puede visualizar en la figura.

Figura 14

Ubicación de los puntos de perforación



Nota. Mapa satelital que muestra la ubicación de los puntos de perforación diamantina en el área de estudio.

Con el fin de realizar la clasificación, se desarrolló una revisión in situ de la roca determinando cada componente clave del RMR.

Figura 15

Inspección de terreno en la zona de excavación



Nota. Inspección de campo en la zona de excavación, con técnico evaluando el macizo rocoso.

La clasificación se desarrolló de la siguiente manera para los 5 puntos de perforación a analizar:

Estribo Derecho DPH – 1

Para el análisis del primer punto de perforación, se obtuvieron resultados muy variados que para poder denotar o analizar de mejor manera el punto se optó por dividirlo en 5 zonas de análisis las cuales son:

- Zona 1 (0 – 8 m)

En los primeros 8 metros del perfil, la roca identificada corresponde principalmente a monzonitas muy fracturadas, con un índice RQD notablemente bajo, que varía entre 10% y 50%. Esta condición implica una masa rocosa altamente fragmentada y meteorizada, lo que reduce considerablemente su resistencia a la compresión uniaxial. Además, el espaciamiento entre

discontinuidades es muy reducido, y la presencia de rellenos, junto con la rugosidad baja y meteorización alta, favorece la presencia de agua en las fracturas. Todos estos factores justifican un RMR estimado de 28, catalogando esta sección como de calidad muy mala a mala. En términos geotécnicos, este tramo representa el segmento más desfavorable del perfil, requiriendo medidas de refuerzo y drenaje en caso de excavaciones.

Tabla 10

Clasificación RMR de la zona 1 en el estribo derecho DHPH - 1

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 0 | Material Suelo, 0 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 3 | RQD < 25% |
| Espaciado de Discontinuidades | 5 | < 0.06 m |
| Longitud de Discontinuidades | 6 | < 1 m |
| Separación/Apertura | 0 | >5 mm |
| Rugosidad | 6 | Muy Rugosa |
| Relleno | 0 | Relleno Blando > 5 mm |
| Meteorización | 1 | Muy Alterado |
| Condiciones Hidrológicas | 7 | Mojado |
| Total | 27 | Roca Mala - IV |

Nota. La tabla sintetiza la clasificación RMR de la zona 1 en el estribo derecho (DHPH-1), con puntajes por categoría que suman 27, calificando el macizo como Roca Mala (Clase IV), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 2 (8 – 20.5 m)

A partir de los 8 metros y hasta los 20.5 metros, el perfil atraviesa cuarzodioritas que, aunque mejoran levemente respecto a la zona superficial, aún presentan una calidad de roca

deficiente a regular. El RQD en este intervalo oscila entre 20% y 60%, señalando una disminución en la fragmentación, aunque la roca aún presenta importantes discontinuidades y una resistencia a compresión generalmente baja a media. El espaciamiento entre fracturas mejora ligeramente, pero la presencia ocasional de agua y el estado de las discontinuidades todavía imponen limitaciones para la estabilidad. Por estos motivos, el RMR estimado para esta zona es de 39, ubicando la calidad de la roca media. Aunque más estable que la zona superior, este tramo aún exige consideraciones especiales para el diseño y sostenimiento.

Tabla 11

Clasificación RMR de la zona 2 en el estribo derecho DHPH - 1

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 4 | 26.50 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 6 | RQD entre 25% a 50% |
| Espaciado de Discontinuidades | 8 | 0.06 m a 0.2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 4 | 1 a 3 m |
| Separación/Apertura | 3 | 0.1 – 1 mm |
| Rugosidad | 3 | Ligeramente Rugoso |
| Relleno | 2 | Poco relleno |
| Meteorización | 1 | Muy Alterada |
| Condiciones Hidrológicas | 7 | Mojado |
| Total | 39 | Roca Mala - IV |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 2 en el estribo derecho (DHPH-1), con puntajes que suman 39 y califican el macizo como Roca Mala (Clase IV), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- **Zona 3 (20.5 – 31 m)**

Entre los 20.5 y 31 metros, se observa una mejora significativa en las condiciones geomecánicas. Las cuarzodioritas aquí presentan un RQD que varía entre 60% y 80%, lo que evidencia una roca menos fracturada y con bloques de mayor tamaño. La resistencia a compresión es media y el espaciamiento entre discontinuidades es más favorable. Las condiciones de las discontinuidades también mejoran, presentando menos relleno y mayor rugosidad, además de una presencia mínima de agua subterránea. Esto justifica un RMR estimado de 50, caracterizando este segmento como de calidad media, donde las excavaciones pueden realizarse con menor requerimiento de soporte.

Tabla 12

Clasificación RMR de la zona 3 en el estribo derecho DPHH - 1

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 4 | 25.83 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 13 | RQD 50 - 75% |
| Espaciado de Discontinuidades | 10 | 0.2 m a 0.6 m |
| Longitud de Discontinuidades | 4 | 1 – 3m |
| Separación/Apertura | 1 | 1 – 5 mm |
| Rugosidad | 3 | Ligeramente Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Blanco < 5 mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 50 | Roca Media - III |

Nota. La tabla muestra la clasificación RMR de la zona 3 en el estribo derecho (DHPH-1), con puntaje total 50 que clasifica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 4 (31 – 49 m)

En el intervalo comprendido entre los 31 y 49 metros de profundidad, la roca mantiene un RQD que varía entre 75% y 90%, lo cual sigue indicando una roca de calidad regular a buena. La resistencia es media-alta y el espaciamiento entre discontinuidades se considera suficiente para la estabilidad de la masa rocosa. Las discontinuidades muestran buena rugosidad y poco relleno, mientras que la meteorización es baja y el agua prácticamente ausente. Este conjunto de características permite estimar un RMR con un valor de 58, lo que señala que la roca es apta para obras subterráneas o fundaciones profundas con requerimientos mínimos de refuerzo.

Tabla 13

Clasificación RMR de la zona 4 en el estribo derecho DHPH - 1

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 4 | 25.05 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 17 | RQD 75-90% |
| Espaciado de Discontinuidades | 10 | 0.06 a 0.2 mm |
| Longitud de Discontinuidades | 6 | < 1m |
| Separación/Apertura | 3 | 0.1 – 1 mm |
| Rugosidad | 3 | Ligeramente Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Blando < 5 mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 58 | Roca Media - III |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 4 en el estribo derecho (DHPH-1), con puntaje total 58 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 5 (49 m a 50 m)

Finalmente, en el último metro del sondeo, la calidad de la roca alcanza su punto máximo. Aquí se encuentran monzonitas de excelente calidad, con un RQD de 85%, alta resistencia a compresión uniaxial, amplio espaciamiento entre discontinuidades y ausencia de agua o meteorización significativa. Las condiciones de las discontinuidades son óptimas, con muy poca o ninguna presencia de relleno y buena rugosidad. Estos factores explican un RMR estimado de 70, lo que sitúa esta sección como roca de calidad buena, prácticamente masiva y extremadamente favorable para cualquier tipo de excavación.

Tabla 14

Clasificación RMR de la zona 5 en el estribo derecho DHPH - 1

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 4 | 25.05 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 17 | RQD 75 - 90% |
| Espaciado de Discontinuidades | 15 | 0.6 – 2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 6 | < 1 m |
| Separación/Apertura | 3 | 0.1 – 1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Duro >5 mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 15 | Completamente Seco |
| Total | 70 | Roca Buena - II |

Nota. La tabla muestra la clasificación RMR de la zona 5 en el estribo derecho (DHPH-1), con puntaje total 70 que califica el macizo como Roca Buena (Clase II), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

En función a los análisis realizados, se obtiene la siguiente tabla resumen:

Tabla 15

Resultados finales de la clasificación RMR en el estribo derecho DHPH - 1

| Zona | Profundidad | RMR Estimado | Calidad de roca |
|---------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Zona 1 | 0 – 8 m | 27 | Roca Mala IV |
| Zona 2 | 8 – 20.5 m | 39 | Roca Mala IV |
| Zona 3 | 20.5 – 31 m | 50 | Roca Media III |
| Zona 4 | 31 – 49 m | 58 | Roca Media III |
| Zona 5 | 49 – 50 m | 70 | Roca Buena II |

Nota. La tabla resume los resultados finales de RMR por profundidad (0–50 m) en el estribo derecho DHPH-1, con valores 27–70 que clasifican de Roca Mala IV a Roca Buena II.

Estribo Central

En este segundo punto de perforación, se obtuvieron resultados muy variados que para poder denotar o analizar de mejor manera el punto se optó por dividirlo en 9 zonas de análisis las cuales son:

- Zona 1 (0 – 8 m)

En los primeros 8 metros de profundidad, el perfil está dominado por suelo con presencia de roca intensamente intemperizada. Esta sección carece prácticamente de estructura rocosa y se comporta como un material suelto, con baja o nula resistencia a la compresión uniaxial y RQD prácticamente nulo. El espaciamiento entre discontinuidades es muy reducido y la longitud de las mismas es corta, mientras que la apertura y la presencia de rellenos sugieren una alta

permeabilidad y muy baja estabilidad. La meteorización es total y las condiciones hidrológicas pueden incluir agua en abundancia. Por lo tanto, esta zona se considera de calidad muy mala, con un RMR estimado de 21, siendo inadecuada para sostén natural y requiriendo soluciones de ingeniería especiales para cualquier tipo de excavación.

Tabla 16

Clasificación RMR de la zona 1 en el estribo central

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 0 | Material Suelo, 0 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 0 | No aplica/RQD \approx 0% |
| Espaciado de Discontinuidades | 5 | < 0.06 M |
| Longitud de Discontinuidades | 0 | < 1 m |
| Separación/Apertura | 0 | >5 mm |
| Rugosidad | 6 | Muy Rugosa |
| Relleno | 0 | Relleno Blando >5mm |
| Meteorización | 0 | Descompuesta |
| Condiciones Hidrológicas | 4 | Goteo |
| Total | 15 | Roca Muy Mala V |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 1 en el estribo central, con puntaje total 21 que califica el material como suelo muy malo (fuera de RMR), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 2 (8 – 13.5 m)

Entre los 8 y 13.5 metros, se identifica una transición hacia roca, principalmente cuarzodiorita y monzonita, pero con una calidad aún muy baja. El RQD en este intervalo es menor al 25% indicando una masa rocosa muy fracturada y poco competente. La resistencia a

compresión es baja, y las discontinuidades se presentan muy juntas y abiertas, con presencia de rellenos y alta meteorización. El agua sigue presente en muchos puntos, lo que agrava las condiciones de estabilidad. Con un RMR estimado de 20, esta zona se clasifica como muy mala, presentando serias limitaciones para obras subterráneas o de cimentación directa.

Tabla 17

Clasificación RMR de la zona 2 en el estribo central

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 23.10 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 3 | < 25 % |
| Espaciado de Discontinuidades | 5 | < 0.06 m |
| Longitud de Discontinuidades | 1 | 10 a 20 m |
| Separación/Apertura | 0 | > 5 mm |
| Rugosidad | 1 | Ondulada |
| Relleno | 0 | Relleno Blando <5mm |
| Meteorización | 1 | Muy Alterado |
| Condiciones Hidrológicas | 7 | Mojado |
| Total | 20 | Roca Muy Mala – V |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 2 en el estribo central, con puntaje total 20 que califica el macizo como Roca Muy Mala (Clase V), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 3 (13.5 a 18.5 m)

En el intervalo de 13.5 a 18.5 metros, la roca mejora levemente y se sitúa en una calidad de mala a regular, con un RQD entre 25% y 50%. La resistencia de la masa rocosa es baja a media, y aunque las discontinuidades todavía son frecuentes, comienzan a espaciarse más. Se observa una ligera reducción en la meteorización y los rellenos, mientras que las condiciones

hidrológicas muestran menor presencia de agua. El RMR estimado para esta zona es de 41, situando a la roca en un rango donde la estabilidad mejora respecto a las zonas superiores, pero aún se requiere soporte adicional para garantizar la seguridad de cualquier excavación.

Tabla 18

Clasificación RMR de la zona 3 en el estribo central

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 20.55 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 6 | 25 a 50% |
| Espaciado de Discontinuidades | 8 | 0.06 a 0.2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 3 a 10 m |
| Separación/Apertura | 3 | 0.1 – 1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Duro >5mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 41 | Roca Media III |

Nota. La tabla muestra la clasificación RMR de la zona 3 en el estribo central, con puntaje total 41 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 3 (18.50 – 23 m)

Entre los 18.5 y 23 metros, se aprecia una mejora significativa en las condiciones geomecánicas del macizo rocoso. El RQD aumenta hasta valores de 75% a 90%, lo que refleja una roca regular a buena, con bloques de mayor tamaño y menor número de discontinuidades abiertas. La resistencia a compresión es media y las discontinuidades tienen espaciamiento suficiente para brindar mayor estabilidad. La meteorización y los rellenos disminuyen, y la

presencia de agua subterránea se vuelve ocasional o casi ausente. El RMR para este tramo se estima de 57, lo que indica una roca MEDIA para obras subterráneas con bajo requerimiento de soporte.

Tabla 19

Clasificación RMR de la zona 4 en el estribo central

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 21.25 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 13 | 50 – 75% |
| Espaciado de Discontinuidades | 15 | 0.6 m a 2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 3 a 10 m |
| Separación/Apertura | 3 | 0.1 – 1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno duro >5mm |
| Meteorización | 5 | Ligeramente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 57 | Roca Media (III) |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 4 en el estribo central, con puntaje total 57 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 5 (23 – 27 m)

En la franja de 23 a 27 metros de profundidad, el RQD disminuye levemente hasta situarse entre 50% y 75%, clasificando a la roca como regular a mala. Aunque la resistencia y el espaciamiento de discontinuidades siguen siendo aceptables, se nota una ligera regresión en la calidad debido a la mayor frecuencia de fracturas y la posible presencia de agua ocasional. El relleno en discontinuidades y la meteorización son moderados. Un RMR estimado de 50 ubica

esta zona en un rango donde la estabilidad puede ser adecuada, pero no se descartan necesidades de soporte adicional, especialmente en obras exigentes o en presencia de cargas elevadas.

Tabla 20

Clasificación RMR de la zona 5 en el estribo central

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 21.08 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 13 | 50–75% |
| Espaciado de Discontinuidades | 10 | 200 – 600 mm |
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 3 a 10 m |
| Separación/Apertura | 3 | 0.1 – 1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno duro >5mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 50 | Roca Media (III) |

Nota. La tabla muestra la clasificación RMR de la zona 5 en el estribo central, con puntaje total 50 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 6 (27 – 36.5 m)

En este tramo, la roca vuelve a mostrar características de mala a regular calidad, con un RQD variable de 25% a 50%. La litología principal es cuarzodiorita, pero con alta presencia de fracturas y resistencia baja a media. El espaciamiento de las discontinuidades es moderado, pero su longitud sigue siendo limitada y la meteorización aún está presente en ciertos sectores. Las condiciones hidrológicas pueden incluir filtraciones ocasionales. En conjunto, el RMR se estima

de 45, lo que implica que esta sección requiere atención especial en el diseño de sostenimiento y drenaje.

Tabla 21

Clasificación RMR de la zona 6 en el estribo central

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 21.18 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 8 | 25% – 50% |
| Espaciado de Discontinuidades | 10 | 200 – 600 mm |
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 3 – 10 m |
| Separación/Apertura | 3 | 0.1 – 1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Duro >5mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 45 | Roca Media III |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 6 en el estribo central, con puntaje total 45 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 7 (36.5 – 41 m)

Entre los 36.5 y 41 metros, la calidad de la roca mejora de manera apreciable, con un RQD en torno al 65%. El espaciamiento de las discontinuidades es mayor y la resistencia a compresión se eleva a valores medios. La meteorización disminuye y las condiciones hidrológicas son generalmente favorables, con poca o ninguna presencia de agua. En este intervalo, el RMR estimado es de 64, clasificando la roca como media y permitiendo excavaciones con poco soporte y buen comportamiento estructural.

Tabla 22*Clasificación RMR de la zona 7 en el estribo central*

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 22.15 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 13 | 50 – 75% |
| Espaciado de Discontinuidades | 15 | 0.6 – 2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 3 – 10 m |
| Separación/Apertura | 5 | < 0.1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Duro >5mm |
| Meteorización | 5 | Ligeramente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 15 | Completamente Seco |
| Total | 64 | Roca Buena II |

Nota. La tabla muestra la clasificación RMR de la zona 7 en el estribo central, con puntaje total 64 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 8 (41 – 46.5 m)

Este intervalo se caracteriza por una roca de calidad regular a buena, con RQD entre 50% y 75%. La resistencia es media-alta y el espaciamiento de discontinuidades suficiente para favorecer la estabilidad del macizo rocoso. La rugosidad de las fracturas y la escasa presencia de rellenos contribuyen positivamente a la integridad estructural, mientras que la meteorización es baja y el agua ausente. El RMR estimado se sitúa en 74, lo que la convierte en una zona óptima para excavaciones profundas y obras subterráneas, con mínimos requerimientos de sostenimiento.

Tabla 23*Clasificación RMR de la zona 8 en el estribo central*

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 21.40 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 13 | 50 – 75% |
| Espaciado de Discontinuidades | 15 | 0.6 a 2.0 m |
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 3 a 10 m |
| Separación/Apertura | 5 | < 0.1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno duro >5mm |
| Meteorización | 5 | Ligeramente Rugoso |
| Condiciones Hidrológicas | 15 | Completamente Seco |
| Total | 64 | Roca Buena II |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 8 en el estribo central, con puntaje total 64 que califica el macizo como Roca Buena (Clase II), por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 9 (46.5 – 50 m)

Finalmente, en el tramo de 46.5 a 50 metros, la roca alcanza su máxima calidad en el perfil, con un RQD estable de 75%. La resistencia es alta, las discontinuidades son muy espaciadas y la presencia de rellenos y meteorización es mínima o inexistente. Además, las condiciones hidrológicas son óptimas, sin presencia de agua. Todo esto permite estimar un RMR de 79, lo que clasifica a esta zona como roca buena, ideal para cualquier obra subterránea o cimentación profunda, y con un comportamiento estructural sobresaliente y requerimientos mínimos de refuerzo.

Tabla 24*Clasificación RMR de la zona 9 en el estribo central*

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 4 | 26.87 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 17 | 75% a 90% |
| Espaciado de Discontinuidades | 20 | >2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 4 | 1 a 3 m |
| Separación/Apertura | 5 | < 0.1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 4 | Relleno duro <5mm |
| Meteorización | 5 | Ligeramente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 15 | Completamente Seco |
| Total | 79 | Roca Buena II |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 9 en el estribo central, con puntaje total 79 que califica el macizo como Roca Buena (Clase II), por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

En función a los análisis realizados, se obtiene la siguiente tabla resumen del segundo punto:

Tabla 25*Resultados finales de la clasificación RMR en el estribo central*

| Zona | Profundidad | RMR Estimado | Calidad de roca |
|---------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Zona 1 | 0 – 8 m | 15 | Roca Muy Mala V |
| Zona 2 | 8 – 13.5 m | 20 | Roca Muy Mala V |
| Zona 3 | 13.5 – 18.5 m | 41 | Roca Media III |
| Zona 4 | 18.5 – 23 m | 57 | Roca Media III |

| | | | |
|---------------|-------------|----|----------------|
| Zona 5 | 23 – 27 m | 50 | Roca Media III |
| Zona 6 | 27 – 36.5 m | 45 | Roca Media III |
| Zona 7 | 36.5 – 41 m | 64 | Roca Buena II |
| Zona 8 | 41 – 46.5 m | 64 | Roca Buena II |
| Zona 9 | 46.5 – 50 m | 79 | Roca Buena II |

Nota. La tabla resume los resultados finales de RMR por profundidad (0–50 m) en el estribo central, con valores 21–79 que varían de suelo muy malo (fuera de RMR) a Roca Buena II, por Geoingeniería E.I.R.L., 2024.

Estribo Izquierdo

En este tercer punto de perforación, se obtuvieron resultados muy variados que para poder denotar o analizar de mejor manera el punto se optó por dividirlo en 6 zonas de análisis las cuales son:

- Zona 1 (0 – 4 m)

En los primeros 4 metros, el perfil está compuesto por arenas limosas que actúan como un suelo granular sin resistencia rocosa apreciable. Este material presenta alta meteorización y comportamiento inestable, con nula capacidad de auto-sostenimiento, presencia probable de agua y escasa cohesión. Esta zona queda fuera del rango de la clasificación RMR y requiere soluciones geotécnicas especiales para cualquier excavación o cimentación, como pilotes o entibación temporal.

Tabla 26

Clasificación RMR de la zona 1 en el estribo izquierdo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 0 | Material Suelo, 0 MPA |

| | | |
|-------------------------------|-----------|--------------------------------------|
| Índice de Calidad de Roca RQD | 0 | Sin RQD |
| Espaciado de Discontinuidades | 5 | Muy juntas, comportamiento granular |
| Longitud de Discontinuidades | 6 | Muy corta |
| Separación/Abertura | 0 | Muy abiertas |
| Rugosidad | 0 | Lisa |
| Relleno | 0 | Presencia de suelo o material blando |
| Meteorización | 0 | Meteorización total |
| Condiciones Hidrológicas | 4 | Agua probable, baja permeabilidad |
| Total | 15 | Roca Muy Mala V |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 1 en el estribo izquierdo, con puntaje 21 que identifica suelo fuera de escala RMR, por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 2 (4 – 13.5 m)

Entre los 4 y 13.5 metros se encuentran monzonitas muy fracturadas con RQD menor al 25%. Esta roca presenta baja resistencia, alta meteorización, discontinuidades muy juntas y rellenos abundantes, además de posible presencia de agua. Estas condiciones la clasifican como una roca muy mala, con un RMR cercano a 24, siendo la sección más crítica para la estabilidad, que demanda refuerzos intensivos y un control estricto del agua durante cualquier excavación.

Tabla 27

Clasificación RMR de la zona 2 en el estribo izquierdo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 1 | 17.80 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 3 | < 25% |
| Espaciado de Discontinuidades | 5 | < 60 mm |
| Longitud de Discontinuidades | 6 | < 1 m |

| | | |
|--------------------------|-----------|-----------------------|
| Separación/Apertura | 0 | >5 mm |
| Rugosidad | 1 | Liso |
| Relleno | 0 | Fracturas con relleno |
| Meteorización | 1 | Muy Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 7 | Mojado |
| Total | 24 | Roca Mala IV |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 2 en el estribo izquierdo, con puntaje total 24 que califica el macizo como Roca Mala (Clase IV), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 3 (13.5 – 17.5 m)

En el tramo de 13.5 a 17.5 metros, la calidad mejora ligeramente hacia roca regular, con RQD entre 25% y 50%. La resistencia es baja a media y las discontinuidades presentan un espaciamiento algo mayor, con menor cantidad de relleno y reducción moderada de la meteorización. Aun así, es necesaria una planificación cuidadosa del sostenimiento, con un RMR de aproximadamente 39, que la sitúa en el rango de roca mala, inadecuada para excavaciones.

Tabla 28

Clasificación RMR de la zona 3 en el estribo izquierdo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 21.50 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 4 | 25% - 50% |
| Espaciado de Discontinuidades | 10 | 200 – 600 mm |
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 3 – 10 m |
| Separación/Apertura | 1 | 1 – 5 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |

| | | |
|--------------------------|-----------|---------------------------|
| Relleno | 2 | Relleno duro > 5mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 39 | Roca Mala (IV) |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 3 en el estribo izquierdo, con puntaje total 39 que califica el macizo como Roca Mala (Clase IV), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 4 (17.5 – 29.5 m)

Esta es la mejor zona del perfil, dominada por monzonitas con RQD de 90% a 100%, bloques grandes y muy pocas fracturas abiertas. La resistencia es media-alta, el agua es escasa y la meteorización mínima. Un RMR de alrededor de 80 la ubica como una roca buena, ideal para obras subterráneas o cimentaciones profundas, donde se esperan mínimos requerimientos de sostenimiento y comportamiento estable durante la excavación.

Tabla 29

Clasificación RMR de la zona 4 en el estribo izquierdo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 4 | 27.19 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 20 | 90 % a 100% |
| Espaciado de Discontinuidades | 20 | >2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 4 | 1 a 3 m |
| Separación/Apertura | 5 | < 0.1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno duro > 5mm |
| Meteorización | 5 | Ligeramente Rugoso |
| Condiciones Hidrológicas | 15 | Completamente Seco |

- **Zona 6 (39 – 50 m)**

Desde los 39 metros hasta el fondo, el perfil muestra cuarzodioritas de buena a regular calidad, con RQD de 75% a 90%. Aquí predominan bloques grandes, resistencia media-alta, fracturas espaciadas, poca meteorización y agua escasa o ausente. Un RMR promedio de 72, clasifica esta zona como roca buena, apta para excavaciones seguras, cimentaciones profundas y obras subterráneas, con requerimientos mínimos de soporte estructural.

Tabla 31

Clasificación RMR de la zona 6 en el Estribo izquierdo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 4 | 28.15 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 17 | RQD 75–90% |
| Espaciado de Discontinuidades | 15 | 0.6 a 2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 4 | 1 a 3 m |
| Separación/Apertura | 5 | < 0.1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Duro >5mm |
| Meteorización | 5 | Ligeramente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 15 | Completamente Seco |
| Total | 72 | Roca Buena (II) |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 6 en el estribo izquierdo, con puntaje total 72 que califica el macizo como Roca Buena (Clase II), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

En función a los análisis realizados, se obtiene la siguiente tabla resumen del tercer punto:

Tabla 32

Resultados finales de la clasificación RMR en el Estribo izquierdo

| Zona | Profundidad | RMR Estimado | Calidad de roca |
|---------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Zona 1 | 0 – 4 m | 15 | Roca Muy Mala V |
| Zona 2 | 4 – 13.5 m | 24 | Roca Mala IV |
| Zona 3 | 13.5 – 17.5 m | 39 | Roca Mala IV |
| Zona 4 | 17.5 – 29.5 m | 80 | Roca Buena II |
| Zona 5 | 29.5 – 39 m | 56 | Roca Media III |
| Zona 6 | 39 – 50 m | 72 | Roca Buena II |

Nota. La tabla resume los resultados finales de RMR por profundidad (0–50 m) en el estribo izquierdo, con valores 21–72 que varían de suelo fuera de escala RMR a Roca Buena II.

Ríos Aguas Arriba

En este cuarto punto de perforación, se obtuvieron resultados muy variados que para poder denotar o analizar de mejor manera el punto se optó por dividirlo en 5 zonas de análisis las cuales son:

- **Zona 1 (0 – 6.5 m)**

En los primeros 6.5 metros, el perfil corresponde a suelo con roca intemperizada, con baja recuperación y sin estructura rocosa significativa. El material está altamente meteorizado y fracturado, con comportamiento similar al de un suelo granular y probable presencia de agua. Esta sección es inadecuada para cualquier excavación sin tratamiento especial y queda fuera de la escala RMR, por lo que se recomienda el uso de técnicas de sostenimiento propias de suelos, como pilotes o entibaciones.

Tabla 33

Clasificación RMR de la zona 1 en ríos aguas arriba

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|------------------|-----------------------|-------------------|
|------------------|-----------------------|-------------------|

| | | |
|-------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 0 | Material Suelo, 0 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 0 | No aplica/RQD muy bajo |
| Espaciado de Discontinuidades | 5 | Muy juntas |
| Longitud de Discontinuidades | 6 | Muy corta |
| Separación/Apertura | 0 | Muy abiertas |
| Rugosidad | 0 | Lisa |
| Relleno | 0 | Fracturas con relleno/suelo |
| Meteorización | 0 | Meteorización total |
| Condiciones Hidrológicas | 4 | Agua probable, permeabilidad alta |
| Total | 15 | Roca Muy Mala V |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 1 en ríos aguas arriba, con puntaje total 21 que identifica suelo fuera de escala RMR, por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 2 (6.5 – 11 m)

En este tramo se identifican cuarzodioritas con calidad regular, con RQD entre 50% y 75%. La roca presenta resistencia media, fracturas moderadamente espaciadas y escasa meteorización. Aunque es apta para excavaciones convencionales, puede requerir soporte adicional en zonas puntuales, especialmente si se encuentra agua localmente. El RMR estimado es de 35, clasificando esta roca mala.

Tabla 34

Clasificación RMR de la zona 2 en ríos aguas arriba

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 1 | 1 a 5 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 6 | 25% - 50% |
| Espaciado de Discontinuidades | 5 | < 0.06 m |

| | | |
|------------------------------|-----------|---------------------------|
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 10 a 20 m |
| Separación/Apertura | 1 | 0.1 – 1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Duro >5 mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 35 | Roca Mala (IV) |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 2 en ríos aguas arriba, con puntaje total 35 que califica el macizo como Roca Mala (Clase IV), por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 3 (11 – 19.5 m)

Entre 11 y 19.5 metros, la cuarzodiorita se encuentra en muy buenas condiciones, con RQD alto (75–90%), bloques grandes y fracturas bien espaciadas. La resistencia es media-alta, la meteorización es baja y la presencia de agua subterránea es mínima. El RMR de aproximadamente 44 posiciona este tramo como roca media, adecuada para obras subterráneas y cimentaciones profundas.

Tabla 35

Clasificación RMR de la zona 3 en ríos aguas arriba

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 1 | 1 a 5 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 6 | 25% a 50% |
| Espaciado de Discontinuidades | 8 | 0.06 m a 0.2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 4 | 3 a 10 m |
| Separación/Apertura | 3 | 0.1 a 1.0 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |

| | | |
|--------------------------|-----------|-------------------------|
| Relleno | 2 | Relleno duro > 5mm |
| Meteorización | 5 | Ligeramente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 44 | Roca Media (III) |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 3 en ríos aguas arriba, con puntaje total 44 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

- **Zona 4 (19.5 – 43 m)**

Este tramo, el más extenso, corresponde a monzonitas de excelente calidad, con RQD entre 90% y 100%. Las condiciones estructurales son óptimas, con bloques masivos, mínima meteorización y ausencia de agua. El RMR de 66 ubica a este intervalo como roca buena, apta para excavaciones y túneles sin necesidad de sostenimiento especial, salvo para condiciones muy específicas de carga o vibración.

Tabla 36

Clasificación RMR de la zona 4 en ríos aguas arriba

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 21.08 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 13 | 50 a 75% |
| Espaciado de Discontinuidades | 15 | 0.6 a 2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 4 | 1 a 3 m |
| Separación/Apertura | 5 | < 0.1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Duro >5mm |
| Meteorización | 5 | Ligeramente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 15 | Completamente Seco |

En función a los análisis realizados, se obtiene la siguiente tabla resumen del cuarto punto:

Tabla 38

Resultados finales de la clasificación RMR en ríos aguas arriba

| Zona | Profundidad | RMR Estimado | Calidad de roca |
|---------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Zona 1 | 0 – 6.5 m | 15 | Roca Muy Mala V |
| Zona 2 | 6.5 – 11 m | 35 | Roca Mala IV |
| Zona 3 | 11 – 19.5 m | 44 | Roca Media III |
| Zona 4 | 19.5 – 43 m | 66 | Roca Buena II |
| Zona 5 | 43 – 50 m | 77 | Roca Buena II |

Nota. La tabla resume los resultados finales de RMR por profundidad (0–50 m) en ríos aguas arriba, con valores 21–77 que van de suelo fuera de escala RMR a Roca Buena II.

Ríos Aguas Abajo

- Zona 1 (0 – 9 m)

En los primeros 9 metros, el perfil está dominado por monzonitas muy fracturadas con RQD extremadamente bajo (< 25%). La resistencia es muy baja, el espaciamiento entre fracturas es mínimo y la meteorización es alta, con probable presencia de agua en las discontinuidades. Esta zona, con un RMR estimado de 25, corresponde a roca mala, donde las excavaciones requieren soluciones de sostenimiento intensivas y tratamiento especial para el control de agua y estabilidad.

Tabla 39

Clasificación RMR de la zona 1 en ríos aguas abajo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 21.87 MPA |

| | | |
|-------------------------------|-----------|---------------------|
| Índice de Calidad de Roca RQD | 3 | < 25 % |
| Espaciado de Discontinuidades | 5 | < 60 mm |
| Longitud de Discontinuidades | 6 | < 1 m |
| Separación/Apertura | 0 | >5 mm |
| Rugosidad | 1 | Ondulada |
| Relleno | 0 | Relleno Blando >5mm |
| Meteorización | 1 | Muy Alterado |
| Condiciones Hidrológicas | 7 | Mojado |
| Total | 25 | Roca Mala IV |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 1 en ríos aguas abajo, con puntaje total 25 que califica el macizo como Roca Mala (Clase IV), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 2 (9 – 18.5 m)

Desde los 9 hasta los 18.5 metros, se atraviesan cuarzodioritas de calidad mala a regular, con RQD entre 25% y 50%. Aunque mejora respecto a la zona superficial, la roca aún presenta fracturas frecuentes y resistencia solo moderada, con posibilidad de presencia de agua. El RMR de 43 indica que se trata de una zona de roca media, apta para excavaciones con soporte convencional, pero con precaución en zonas puntuales de menor calidad.

Tabla 40

Clasificación RMR de la zona 2 en ríos aguas abajo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 20.25 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 6 | 25% - 50% |
| Espaciado de Discontinuidades | 10 | 200 – 600 mm |
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 3 – 10 m |

| | | |
|--------------------------|-----------|---------------------------|
| Separación/Apertura | 3 | 0.1 – 1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Blando < 5 mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 43 | Roca Media (III) |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 2 en ríos aguas abajo, con puntaje total 43 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

- Zona 3 (18.5 – 27.5 m)

En el intervalo de 18.5 a 27.5 metros, la cuarzodiorita mantiene una calidad mala a regular, con RQD entre 25% y 50%. Las fracturas siguen siendo frecuentes y la resistencia es solo baja a media, aunque la meteorización disminuye levemente. El RMR estimado de 45 sitúa a esta zona en el límite inferior de la roca media, demandando diseño de sostenimiento acorde y un control cuidadoso durante la excavación.

Tabla 41

Clasificación RMR de la zona 3 en ríos aguas abajo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 19.85 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 6 | 25% - 50% |
| Espaciado de Discontinuidades | 10 | 200 – 600 mm |
| Longitud de Discontinuidades | 2 | 3 – 10 m |
| Separación/Apertura | 5 | < 0.1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |

| | | |
|--------------------------|-----------|---------------------------|
| Relleno | 2 | Relleno Duro > 5mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizada |
| Condiciones Hidrológicas | 10 | Húmedo |
| Total | 45 | Roca Media III |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 3 en ríos aguas abajo, con puntaje total 45 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- **Zona 4 (27.5 – 33.5 m)**

Entre los 27.5 y 33.5 metros, la calidad de la cuarzodiorita mejora sensiblemente, con RQD que varía de 50% a 75%. Las fracturas están más espaciadas y la resistencia se incrementa, con poca meteorización y menor cantidad de agua. El RMR de 59 califica esta zona como roca media, apta para obras subterráneas o fundaciones con bajo a moderado requerimiento de soporte.

Tabla 42

Clasificación RMR de la zona 4 en ríos aguas abajo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 20.30 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 13 | 50% - 75% |
| Espaciado de Discontinuidades | 10 | 200 – 600 mm |
| Longitud de Discontinuidades | 4 | 1 – 3 m |
| Separación/Apertura | 5 | < 0.1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Duro > 5mm |
| Meteorización | 3 | Moderadamente Meteorizado |

| | | |
|--------------------------|-----------|-------------------------|
| Condiciones Hidrológicas | 15 | Completamente Seco |
| Total | 59 | Roca Media (III) |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 4 en ríos aguas abajo, con puntaje total 59 que califica el macizo como Roca Media (Clase III), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

- **Zona 5 (33.5 – 50 m)**

A partir de los 33.5 metros hasta el fondo del sondeo, la cuarzodiorita muestra excelente calidad, con RQD muy estable entre 75% y 90%. Las fracturas son poco frecuentes, la resistencia es alta y la meteorización mínima, sin presencia significativa de agua. El RMR de 69 indica que esta es una zona de roca buena, con comportamiento ideal para excavaciones profundas, túneles o fundaciones, y con mínimos requerimientos de refuerzo estructural.

Tabla 43

Clasificación RMR de la zona 5 en ríos aguas abajo

| Categoría | Valor estimado | Comentario |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Resistencia a Compresión UCS | 2 | 23.58 MPA |
| Índice de Calidad de Roca RQD | 17 | 75% - 90% |
| Espaciado de Discontinuidades | 15 | 0.6 m – 2 m |
| Longitud de Discontinuidades | 4 | 1 – 3 m |
| Separación/Apertura | 4 | < 0.1 mm |
| Rugosidad | 5 | Rugoso |
| Relleno | 2 | Relleno Duro > 5 mm |
| Meteorización | 5 | Ligeramente Meteorizado |
| Condiciones Hidrológicas | 15 | Completamente Seco |
| Total | 69 | Roca Buena (II) |

Nota. La tabla presenta la clasificación RMR de la zona 5 en ríos aguas abajo, con puntaje total 69 que califica el macizo como Roca Buena (Clase II), por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

En función a los análisis realizados, se obtiene la siguiente tabla resumen del primero punto:

Tabla 44

Resultados finales de la clasificación RMR en ríos aguas abajo

| Zona | Profundidad | RMR Estimado | Calidad de roca |
|---------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Zona 1 | 0 – 6.5 m | 25 | Roca Mala IV |
| Zona 2 | 6.5 – 11 m | 43 | Roca Media III |
| Zona 3 | 11 – 19.5 m | 45 | Roca Media III |
| Zona 4 | 19.5 – 43 m | 59 | Roca Media III |
| Zona 5 | 43 – 50 m | 69 | Roca Buena II |

Nota. La tabla resume los resultados finales de RMR por profundidad (0–50 m) en ríos aguas abajo, con valores 25–69 que van de Roca Mala IV a Roca Buena II, por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

Con los 5 puntos analizados, se procede a establecer la siguiente tabla resumen detallada:

Tabla 45

Resumen de resultados de Clasificación Geomecánica RMR

| Perforación | Profundidad | Clasificación Geomecánica (RMR) | | |
|-----------------------------|--------------------|--|----------------|-------------------|
| | | Clase | Calidad | Puntuación |
| Estribo Derecho DHPH – 1 | 0 – 8 m | IV | Roca Mala | 27 |
| | 8 – 20.5 m | IV | Roca Mala | 39 |
| | 20.5 – 31 m | III | Roca Media | 50 |

| | | | | |
|-------------------|---------------|-----|---------------|----|
| | 31 – 49 m | III | Roca Media | 58 |
| | 49 – 50 m | II | Roca Buena | 70 |
| | 0 – 8 m | V | Roca Muy Mala | 15 |
| | 8 – 13.5 m | V | Roca Muy Mala | 20 |
| | 13.5 – 18.5 m | III | Roca Media | 41 |
| Estribo Central | 18.5 – 23 m | III | Roca Media | 57 |
| DHPH – 2 | 23 – 27 m | III | Roca Media | 50 |
| | 27 – 36.5 m | III | Roca Media | 45 |
| | 36.5 – 41 m | II | Roca Buena | 64 |
| | 41 – 46.5 m | II | Roca Buena | 64 |
| | 46.5 – 50 m | II | Roca Buena | 79 |
| | 0 – 4 m | V | Roca Muy Mala | 15 |
| | 4 – 13.5 m | IV | Roca Mala | 24 |
| Estribo Izquierdo | 13.5 – 17.5 m | IV | Roca Mala | 39 |
| DHPH – 3 | 17.5 – 29.5 m | II | Roca Buena | 80 |
| | 29.5 – 39 m | III | Roca Media | 56 |
| | 39 – 50 m | II | Roca Buena | 72 |
| | 0 – 6.5 m | V | Roca Muy Mala | 15 |
| | 6.5 – 11 m | IV | Roca Mala | 35 |
| Ríos Aguas Arriba | 11 – 19.5 m | III | Roca Media | 44 |
| DHPH – 4 | 19.5 – 43 m | II | Roca Buena | 66 |
| | 43 – 50 m | II | Roca Buena | 77 |
| Ríos Aguas Abajo | 0 – 6.5 m | IV | Roca Mala | 25 |

| | | | | |
|----------|-------------|-----|------------|----|
| DHPH – 5 | 6.5 – 11 m | III | Roca Media | 43 |
| | 11 – 19.5 m | III | Roca Media | 45 |
| | 19.5 – 43 m | III | Roca Media | 59 |
| | 43 – 50 m | II | Roca Buena | 69 |

Nota. Resumen comparativo de la clasificación geomecánica RMR por perforación y tramo de profundidad en estribo derecho, central e izquierdo y ríos aguas arriba/abajo, indicando clase, calidad y puntuación ($\approx 15-80$).

Los resultados de las perforaciones diamantinas ejecutadas en la zona de emplazamiento de la presa evidencian una marcada heterogeneidad geomecánica del macizo rocoso, reflejada en la variabilidad de los valores de clasificación RMR obtenidos en los distintos puntos investigados.

En el Estribo Derecho (DHPH-1), el macizo rocoso evoluciona de roca mala a media en los primeros 20.5 m (RMR entre 27 y 39), pasando luego a condiciones de roca media en profundidades intermedias (RMR entre 50 y 58), hasta alcanzar roca buena en el tramo de 49–50 m (RMR 70). Esta tendencia indica una mejora progresiva en la calidad geomecánica con la profundidad.

En el Estribo Central (DHPH-2), la variabilidad es más marcada, iniciando con roca muy mala (RMR 15-20, 0–13.5 m). A partir de los 13.5 m, el macizo mejora a roca media (RMR 41–45, hasta 36.5 m) y finalmente alcanza roca buena en los niveles más profundos (RMR 64–79, 36.5–50 m). Esto evidencia un aumento gradual de competencia del macizo en función de la profundidad.

En el Estribo Izquierdo (DHPH-3), la perforación muestra la presencia de roca muy mala (RMR 15, 0–4 m), seguido por tramos de roca mala (RMR 24–39, hasta 17.5 m). Posteriormente, el macizo mejora notablemente, alcanzando roca buena (RMR 80, 17.5–29.5 m), y alternando con tramos de roca media (RMR 56, 29.5–39 m) y nuevamente roca buena en profundidad (RMR 72, 39–50 m). Esta perforación refleja una heterogeneidad importante, pero con predominancia de roca competente a mayores profundidades.

En la zona de Ríos Aguas Arriba (DHPH-4), el perfil presenta roca muy mala (RMR 15, 0–6.5 m), seguido por un tramo de roca mala (RMR 35, 6.5–11 m). A partir de allí, predominan rocas de calidad media a buena (RMR 44–77, hasta 50 m), destacando que desde los 19.5 m predomina la roca buena (RMR 66–77), lo que indica que esta zona constituye un sector geomecánicamente favorable para cimentación.

Por su parte, en Ríos Aguas Abajo (DHPH-5) se evidencia un comportamiento intermedio, con tramos iniciales de roca mala (RMR 25, 0–6.5 m) y roca media (RMR 43–59, hasta 43 m). Finalmente, entre los 43 y 50 m se alcanza un intervalo de roca buena (RMR 69), lo que confirma una mejora significativa de la calidad del macizo en profundidad.

En conjunto, estos resultados demuestran que la zona de emplazamiento de la presa presenta una variabilidad significativa en la calidad geomecánica del macizo rocoso, oscilando entre suelos y rocas muy malas en superficie hasta alcanzar condiciones de roca buena en profundidad, con mayor consistencia en los estribos izquierdo y en la zona de ríos aguas arriba.

5.1.2. Resultados del Objetivo Específico 2

“Determinar la permeabilidad del macizo rocoso para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama, Abancay - 2025”

En el marco de la campaña de caracterización hidrogeológica del terreno, se llevaron a cabo ensayos de permeabilidad utilizando los métodos Lefranc y Lugeon, con el objetivo de evaluar el comportamiento hidráulico de los diferentes materiales presentes en el área de estudio. El ensayo Lefranc se realizó en las zonas superficiales y en terrenos menos consolidados, así como en capas donde se identificó roca intemperizada y suelos aluviales. En estas zonas más cortas, se establecieron pozos de prueba en los que se aplicaron distintos niveles de agua para analizar la respuesta hidráulica del medio, midiendo la velocidad de drenaje y la capacidad de almacenamiento. A partir de estos datos, se determinaron los coeficientes de permeabilidad vertical y horizontal, utilizando las fórmulas del método Lefranc. Por otro lado, el ensayo Lugeon se llevó a cabo en el resto de las profundidades, cubriendo los intervalos hasta los 50 metros. Estos dos ensayos se realizaron en 5 puntos diferentes los cuales son:

- **Punto DHPH-1**

En el punto de perforación DHPH-1 se realizaron ensayos con dos métodos de permeabilidad: el ensayo Lefranc para las profundidades superficiales (hasta 21 m) y el ensayo Lugeon para las profundidades mayores (de 21 m a 50 m). Los resultados son los siguientes:

Tabla 46

Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 1

| Nº Ensayo | Profundidad (m) | Método | Permeabilidad (cm/s) | Clasificación |
|-----------|-----------------|---------|----------------------|---------------|
| 1 | 0.00 – 3.00 | Lefranc | 7.69E-03 | Muy Permeable |
| 2 | 3.00 – 6.00 | | 3.85E-03 | Muy Permeable |
| 3 | 6.00 – 9.00 | | 1.82E-03 | Muy Permeable |
| 4 | 9.00 – 12.00 | | 1.48E-03 | Muy Permeable |

| | | | | |
|----|---------------|--------|----------|---------------|
| 5 | 12.00 – 15.00 | | 1.65E-03 | Muy Permeable |
| 6 | 15.00 – 18.00 | | 1.12E-03 | Muy Permeable |
| 7 | 18.00 – 21.00 | | 1.79E-03 | Muy Permeable |
| 7 | 21.00 – 24.00 | | 3.33E-04 | Muy Permeable |
| 8 | 24.00 – 27.00 | | 5.19E-04 | Muy Permeable |
| 9 | 27.00 – 30.00 | | 5.48E-04 | Muy Permeable |
| 10 | 30.00 – 33.00 | | 6.05E-04 | Muy Permeable |
| 11 | 33.00 – 36.00 | Lugeon | 7.53E-04 | Muy Permeable |
| 12 | 36.00 – 39.00 | | 7.11E-04 | Muy Permeable |
| 13 | 39.00 – 42.00 | | 8.45E-04 | Muy Permeable |
| 14 | 42.00 – 45.00 | | 1.00E-04 | Muy Permeable |
| 15 | 45.00 – 48.00 | | 4.58E-04 | Muy Permeable |
| 16 | 45.00 – 50.00 | | 6.78E-04 | Muy Permeable |

Nota. La tabla reporta, por tramos de profundidad en el punto DPH-1, las permeabilidades medidas con los métodos Lefranc y Lugeon, con clasificación mayoritariamente muy permeable, por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

El método Lefranc, aplicado en los primeros 21 m de profundidad, mostró valores de permeabilidad elevados, que oscilaron entre 7.69E-03 cm/s (0–3 m) y 1.79E-03 cm/s (15–21 m). De acuerdo con la clasificación de Olalla y Sopena (1991), estos resultados corresponden a un macizo muy permeable, lo cual es característico de depósitos aluviales o materiales poco cementados como arenas y gravas, donde el agua fluye con gran facilidad. Si bien los valores presentan una ligera variación con la profundidad, el comportamiento general confirma que las capas superficiales favorecen una alta circulación de agua subterránea.

En el caso del método Lugeon, aplicado desde los 21 m hasta los 50 m de profundidad, los valores de permeabilidad variaron entre 1.00E-04 cm/s (42–45 m) y 8.45E-04 cm/s (39–42 m). Aunque estos valores son menores en comparación con los niveles superficiales, todos se encuentran igualmente dentro de la categoría de muy permeable, lo que indica que incluso en profundidad el macizo mantiene condiciones de alta transmisividad hidráulica. Esta situación sugiere que la circulación de agua ocurre principalmente a través de fracturas abiertas o sistemas de discontinuidades interconectadas, lo cual constituye un aspecto crítico a considerar en el diseño de la cimentación y en la implementación de medidas de impermeabilización en la presa.

- Punto DHPH-2

En el punto DHPH-2, se realizaron ensayos de permeabilidad Lefranc en las primeras capas (hasta 21 m) y de permeabilidad Lugeon en las profundidades mayores (de 21 m a 50 m). A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada método, y posteriormente, una interpretación global de ambos.

Tabla 47

Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 2

| Nº Ensayo | Profundidad (m) | Método | Permeabilidad (cm/s) | Clasificación |
|-----------|-----------------|---------|----------------------|---------------|
| 1 | 0.00 – 3.00 | | 3.03E-03 | Muy Permeable |
| 2 | 3.00 – 6.00 | | 1.65E-03 | Muy Permeable |
| 3 | 6.00 – 9.00 | | 1.23E-03 | Muy Permeable |
| 4 | 9.00 – 12.00 | Lefranc | 1.29E-03 | Muy Permeable |
| 5 | 12.00 – 15.00 | | 1.10E-03 | Muy Permeable |
| 6 | 15.00 – 18.00 | | 1.14E-03 | Muy Permeable |
| 7 | 18.00 – 21.00 | | 1.43E-03 | Muy Permeable |

| | | | | |
|----|---------------|--------|----------|---------------|
| 8 | 21.00 – 24.00 | | 5.02E-04 | Muy Permeable |
| 9 | 24.00 – 27.00 | | 3.67E-04 | Muy Permeable |
| 10 | 27.00 – 30.00 | | 3.15E-04 | Muy Permeable |
| 11 | 30.00 – 33.00 | | 4.13E-04 | Muy Permeable |
| 12 | 33.00 – 36.00 | Lugeon | 3.48E-04 | Muy Permeable |
| 13 | 36.00 – 39.00 | | 4.65E-04 | Muy Permeable |
| 14 | 39.00 – 42.00 | | 4.20E-04 | Muy Permeable |
| 15 | 42.00 – 45.00 | | 3.80E-04 | Muy Permeable |
| 16 | 45.00 – 48.00 | | 4.07E-04 | Muy Permeable |
| 17 | 45.00 – 50.00 | | 7.66E-04 | Muy Permeable |

Nota. La tabla resume, por tramos de profundidad en el punto DPH-2, las permeabilidades medidas con los métodos Lefranc y Lugeon, clasificadas en su mayoría como muy permeables, por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

En el punto DPH-2, los resultados del método Lefranc muestran que las primeras capas hasta los 21 m presentan valores de permeabilidad elevados, que varían entre 3.03E-03 cm/s y 1.10E-03 cm/s. De acuerdo con la clasificación de Olalla y Sopena (1991), estos resultados corresponden a un macizo muy permeable, característico de suelos aluviales compuestos por arenas y gravas poco cementadas, que permiten un flujo rápido y abundante de agua subterránea. Aunque se aprecia una ligera disminución de la permeabilidad con la profundidad, el terreno superficial y medio conserva una alta transmisividad hidráulica.

Por otro lado, el método Lugeon, aplicado entre los 21 y 50 m de profundidad, registró valores de permeabilidad en el rango de 3.15E-04 a 7.66E-04 cm/s, que igualmente se clasifican como muy permeables. Esto indica que, incluso en las zonas más profundas, el macizo mantiene condiciones de alta conductividad hidráulica, probablemente asociadas a la presencia de

fracturas abiertas o sistemas de discontinuidades interconectadas. Esta condición confirma que el perfil completo presenta muy alta permeabilidad, aspecto crítico que debe considerarse en el diseño de la cimentación y en la implementación de medidas de impermeabilización, tales como cortinas de inyección o tratamientos de sellado, para garantizar la estabilidad y seguridad de la presa.

- Punto DHPH-3

Al igual que el punto anterior, en el punto DHPH-3 se realizaron ensayos de permeabilidad Lefranc en las primeras capas (hasta 21 m) y de permeabilidad Lugeon en las profundidades mayores (de 21 m a 50 m). A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada método, y posteriormente, una interpretación global de ambos.

Tabla 48

Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 3

| N° Ensayo | Profundidad (m) | Método | Permeabilidad (cm/s) | Clasificación |
|------------------|------------------------|---------------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | 0.00 – 3.00 | | 1.24E-03 | Muy Permeable |
| 2 | 3.00 – 6.00 | | 7.07E-03 | Muy Permeable |
| 3 | 6.00 – 9.00 | | 4.27E-03 | Muy Permeable |
| 4 | 9.00 – 12.00 | Lefranc | 2.61E-03 | Muy Permeable |
| 5 | 12.00 – 15.00 | | 2.19E-03 | Muy Permeable |
| 6 | 15.00 – 18.00 | | 9.22E-03 | Muy Permeable |
| 7 | 18.00 – 21.00 | | 7.44E-03 | Muy Permeable |
| 8 | 21.00 – 24.00 | | 7.53E-04 | Muy Permeable |
| 9 | 24.00 – 27.00 | Lugeon | 7.35E-04 | Muy Permeable |
| 10 | 27.00 – 30.00 | | 5.12E-04 | Muy Permeable |

| | | | |
|----|---------------|----------|---------------|
| 11 | 30.00 – 33.00 | 4.65E-04 | Muy Permeable |
| 12 | 33.00 – 36.00 | 3.99E-04 | Muy Permeable |
| 13 | 36.00 – 39.00 | 4.65E-04 | Muy Permeable |
| 14 | 39.00 – 42.00 | 4.19E-04 | Muy Permeable |
| 15 | 42.00 – 45.00 | 3.80E-04 | Muy Permeable |
| 16 | 45.00 – 48.00 | 4.20E-04 | Muy Permeable |
| 17 | 45.00 – 50.00 | 6.11E-04 | Muy Permeable |

Nota. La tabla presenta, por tramos de profundidad en el punto DHPH-3, las permeabilidades obtenidas con los métodos Lefranc y Lugeon, predominantemente clasificadas como muy permeable, por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

En el punto evaluado, los resultados del método Lefranc en los primeros 21 m muestran valores de permeabilidad elevados, que varían entre 1.24E-03 cm/s y 9.22E-03 cm/s. De acuerdo con la clasificación de Olalla y Sopeña (1991), todos estos valores corresponden a un macizo muy permeable, característico de materiales aluviales poco cementados, como arenas y gravas, que permiten un flujo rápido y abundante de agua subterránea. Aunque los resultados presentan cierta variabilidad vertical, la condición general confirma que las capas superficiales favorecen una alta transmisividad hidráulica.

A partir de los 21 m de profundidad, los ensayos con el método Lugeon registraron valores de permeabilidad entre 3.80E-04 cm/s y 7.53E-04 cm/s, que igualmente se clasifican como muy permeables. Esto demuestra que, incluso en los tramos más profundos, el macizo mantiene una elevada capacidad de conducción de agua, probablemente asociada a fracturas interconectadas o discontinuidades abiertas en la roca. En conjunto, el perfil completo evidencia condiciones de muy alta permeabilidad, aspecto que, desde el punto de vista geotécnico, implica

la necesidad de implementar tratamientos de impermeabilización como cortinas de inyección o sellado de discontinuidades, con el fin de garantizar la estanqueidad y seguridad de la presa.

- **Punto DHPH-4**

Como el caso anterior, en el punto DHPH-4 se realizaron ensayos de permeabilidad Lefranc en las primeras capas (hasta 15 m) y de permeabilidad Lugeon en las profundidades mayores (de 15 m a 50 m). A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada método, y posteriormente, una interpretación global de ambos.

Tabla 49

Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 4

| N° Ensayo | Profundidad (m) | Método | Permeabilidad (cm/s) | Clasificación |
|-----------|-----------------|---------|----------------------|---------------|
| 1 | 0.00 – 3.00 | | 1.59E-03 | Muy Permeable |
| 2 | 3.00 – 6.00 | | 9.76E-03 | Muy Permeable |
| 3 | 6.00 – 9.00 | Lefranc | 2.03E-03 | Muy Permeable |
| 4 | 9.00 – 12.00 | | 7.07E-03 | Muy Permeable |
| 5 | 12.00 – 15.00 | | 3.18E-03 | Muy Permeable |
| 6 | 15.00 – 18.00 | | 9.54E-03 | Muy Permeable |
| 7 | 18.00 – 21.00 | | 6.70E-03 | Muy Permeable |
| 8 | 21.00 – 24.00 | | 4.97E-04 | Muy Permeable |
| 9 | 24.00 – 27.00 | | 1.03E-04 | Muy Permeable |
| 10 | 27.00 – 30.00 | Lugeon | 7.96E-04 | Muy Permeable |
| 11 | 30.00 – 33.00 | | 6.25E-04 | Muy Permeable |
| 12 | 33.00 – 36.00 | | 6.43E-04 | Muy Permeable |
| 13 | 36.00 – 39.00 | | 6.70E-04 | Muy Permeable |
| 14 | 39.00 – 42.00 | | 2.70E-04 | Muy Permeable |

| | | | |
|----|---------------|----------|---------------|
| 15 | 42.00 – 45.00 | 4.15E-04 | Muy Permeable |
| 16 | 45.00 – 48.00 | 2.99E-04 | Muy Permeable |
| 17 | 45.00 – 50.00 | 7.78E-04 | Muy Permeable |

Nota. La tabla resume, por tramos de profundidad en el punto DHPH-4, las permeabilidades medidas con Lefranc y Lugeon, mayormente clasificadas como muy permeable, por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

En el punto evaluado, los primeros cinco ensayos con el método Lefranc, realizados entre los 0 y 15 m de profundidad, muestran valores de permeabilidad que varían entre 1.59E-03 cm/s y 9.76E-03 cm/s, clasificándose todos como muy permeables. Estos resultados evidencian que las capas superficiales están constituidas por materiales poco consolidados, probablemente arenas y gravas, que permiten un flujo abundante y rápido de agua subterránea. Se observa una marcada heterogeneidad en los valores, lo que confirma la variabilidad estratigráfica del depósito, aunque siempre dentro de la misma categoría de muy alta permeabilidad.

A partir de los 15 m de profundidad, los ensayos realizados mediante el método Lugeon mantienen igualmente valores en el rango de muy permeable, variando entre 9.54E-03 cm/s y 7.78E-04 cm/s hasta los 50 m de profundidad. Esto refleja que incluso en los niveles más profundos el macizo conserva una elevada capacidad de transmisión hidráulica, probablemente asociada a la presencia de fracturas interconectadas o discontinuidades abiertas en la roca. En conjunto, el perfil completo confirma un comportamiento muy permeable en todo el espesor investigado, lo que representa una condición crítica desde el punto de vista geotécnico, ya que requiere la implementación de tratamientos de impermeabilización (cortinas de inyección o sellado de fracturas) para garantizar la estanqueidad de la futura estructura hidráulica.

- **Punto DHPH-5**

Finalmente, en el punto DHPH-5 se realizaron ensayos de permeabilidad Lefranc en las primeras capas (hasta 30 m) y de permeabilidad Lugeon en las profundidades mayores (de 30 m a 50 m). A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada método, y posteriormente, una interpretación global de ambos.

Tabla 50

Ensayos de Permeabilidad por Lefranc y Lugeon en el punto DHPH - 5

| Nº Ensayo | Profundidad (m) | Método | Permeabilidad (cm/s) | Clasificación |
|-----------|-----------------|---------|----------------------|---------------|
| 1 | 0.00 – 3.00 | Lefranc | 7.85E-03 | Muy Permeable |
| 2 | 3.00 – 6.00 | | 2.41E-03 | Muy Permeable |
| 3 | 6.00 – 9.00 | | 2.69E-03 | Muy Permeable |
| 4 | 9.00 – 12.00 | | 1.95E-03 | Muy Permeable |
| 5 | 12.00 – 15.00 | | 1.73E-03 | Muy Permeable |
| 6 | 15.00 – 18.00 | | 1.26E-03 | Muy Permeable |
| 7 | 18.00 – 21.00 | | 1.14E-03 | Muy Permeable |
| 8 | 21.00 – 24.00 | | 1.12E-04 | Muy Permeable |
| 9 | 24.00 – 27.00 | | 1.00E-04 | Muy Permeable |
| 10 | 27.00 – 30.00 | | 9.63E-04 | Muy Permeable |
| 11 | 30.00 – 33.00 | Lugeon | 6.75E-04 | Muy Permeable |
| 12 | 33.00 – 36.00 | | 4.95E-04 | Muy Permeable |
| 13 | 36.00 – 39.00 | | 4.82E-04 | Muy Permeable |
| 14 | 39.00 – 42.00 | | 4.20E-04 | Muy Permeable |
| 15 | 42.00 – 45.00 | | 5.02E-04 | Muy Permeable |
| 16 | 45.00 – 48.00 | | 3.24E-04 | Muy Permeable |

| | | | |
|----|---------------|----------|---------------|
| 17 | 45.00 – 50.00 | 5.16E-04 | Muy Permeable |
|----|---------------|----------|---------------|

Nota. La tabla muestra, por intervalos de profundidad en el punto DHPH-5, las permeabilidades medidas con Lefranc y Lugeon, clasificadas en su mayoría como muy permeable, por Geoingeniería E.I.R.L, 2024.

En el punto evaluado, los primeros siete ensayos realizados con el método Lefranc entre los 0 y 21 m de profundidad registraron valores de permeabilidad que varían entre 7.85E-03 cm/s y 1.14E-03 cm/s, todos ellos clasificados como muy permeables. Estos resultados reflejan que las capas superficiales corresponden a materiales poco consolidados, posiblemente arenas y gravas, que permiten un flujo rápido y abundante de agua subterránea. Si bien se aprecia una tendencia decreciente en los valores con el aumento de la profundidad, el terreno mantiene en todo momento una condición de muy alta permeabilidad.

A partir de los 21 m de profundidad, los resultados de los ensayos, incluidos los realizados mediante el método Lugeon entre los 30 y 50 m, también se clasifican como muy permeables, con valores que varían entre 1.00E-04 cm/s y 9.63E-04 cm/s. Aunque se observa una reducción relativa de la permeabilidad respecto a los niveles superficiales, el macizo conserva una elevada capacidad de transmisión hidráulica en profundidad, lo que sugiere la presencia de fracturas abiertas o interconexiones que facilitan la circulación del agua. En conjunto, el perfil geotécnico confirma que todo el espesor investigado presenta condiciones de muy alta permeabilidad, lo que representa un factor crítico en términos de seguridad hidráulica y refuerza la necesidad de implementar medidas de impermeabilización o tratamiento del macizo.

En función a los 5 puntos analizados, se presenta el siguiente cuadro resumen:

Tabla 51

Resumen de resultados de ensayos de permeabilidad

| Perforación | Método | Profundidad | Permeabilidad (cm/s) | Clasificación |
|--------------------|---------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|
| DHPH – 1 | Lefranc | 0 – 3 m | 7.69E-03 | Muy Permeable |
| | | 3 – 6 m | 3.85E-03 | Muy Permeable |
| | | 6 – 9 m | 1.82E-03 | Muy Permeable |
| | | 9 – 12 m | 1.48E-03 | Muy Permeable |
| | | 12 – 15 m | 1.65E-03 | Muy Permeable |
| | | 15 – 18 m | 1.12E-03 | Muy Permeable |
| | Lugeon | 21 – 24 m | 3.33E-04 | Muy Permeable |
| | | 24 – 27 m | 5.19E-04 | Muy Permeable |
| | | 27 – 30 m | 5.48E-04 | Muy Permeable |
| | | 30 – 33 m | 6.05E-04 | Muy Permeable |
| | | 33 – 36 m | 7.53E-04 | Muy Permeable |
| | | 36 – 39 m | 7.11E-04 | Muy Permeable |
| | | 39 – 42 m | 8.45E-04 | Muy Permeable |
| | | 42 – 45 m | 1.00E-04 | Muy Permeable |
| | | 45 – 48 m | 4.58E-04 | Muy Permeable |
| | | 48 – 50 m | 6.78E-04 | Muy Permeable |
| DHPH – 2 | Lefranc | 0 – 3 m | 3.03E-03 | Muy Permeable |
| | | 3 – 6 m | 1.65E-03 | Muy Permeable |
| | | 6 – 9 m | 1.23E-03 | Muy Permeable |
| | | 9 – 12 m | 1.29E-03 | Muy Permeable |
| | | 12 – 15 m | 1.10E-03 | Muy Permeable |
| | | 15 – 18 m | 1.14E-03 | Muy Permeable |
| | | 18 – 21 m | 1.43E-03 | Muy Permeable |
| | Lugeon | 21 – 24 m | 5.02E-04 | Muy Permeable |

| | | | | |
|----------|---------|-----------|----------|---------------|
| | | 24 – 27 m | 3.67E-04 | Muy Permeable |
| | | 27 – 30 m | 3.15E-04 | Muy Permeable |
| | | 30 – 33 m | 4.13E-04 | Muy Permeable |
| | | 33 – 36 m | 3.48E-04 | Muy Permeable |
| | | 36 – 39 m | 4.65E-04 | Muy Permeable |
| | | 39 – 42 m | 4.20E-04 | Muy Permeable |
| | | 42 – 45 m | 3.80E-04 | Muy Permeable |
| | | 45 – 48 m | 4.07E-04 | Muy Permeable |
| | | 48 – 50 m | 7.66E-04 | Muy Permeable |
| | | 0 – 3 m | 1.24E-03 | Muy Permeable |
| | | 3 – 6 m | 7.07E-03 | Muy Permeable |
| | | 6 – 9 m | 4.27E-03 | Muy Permeable |
| | Lefranc | 9 – 12 m | 2.61E-03 | Muy Permeable |
| | | 12 – 15 m | 2.19E-03 | Muy Permeable |
| | | 15 – 18 m | 9.22E-03 | Muy Permeable |
| | | 18 – 21 m | 7.44E-03 | Muy Permeable |
| | | 21 – 24 m | 7.53E-04 | Muy Permeable |
| DHPH – 3 | | 24 – 27 m | 7.35E-04 | Muy Permeable |
| | | 27 – 30 m | 5.12E-04 | Muy Permeable |
| | | 30 – 33 m | 4.65E-04 | Muy Permeable |
| | Lugeon | 33 – 36 m | 3.99E-04 | Muy Permeable |
| | | 36 – 39 m | 4.65E-04 | Muy Permeable |
| | | 39 – 42 m | 4.19E-04 | Muy Permeable |
| | | 42 – 45 m | 3.80E-04 | Muy Permeable |
| | | 45 – 48 m | 4.20E-04 | Muy Permeable |

| | | | | |
|----------|---------|-----------|----------|---------------|
| | | 48 – 50 m | 6.11E-04 | Muy Permeable |
| | | 0 – 3 m | 1.59E-03 | Muy Permeable |
| | | 3 – 6 m | 9.76E-03 | Muy Permeable |
| | Lefranc | 6 – 9 m | 2.03E-03 | Muy Permeable |
| | | 9 – 12 m | 7.07E-03 | Muy Permeable |
| | | 12 – 15 m | 3.18E-03 | Muy Permeable |
| | | 15 – 18 m | 9.54E-03 | Muy Permeable |
| | | 18 – 21 m | 6.70E-03 | Muy Permeable |
| | | 21 – 24 m | 4.97E-04 | Muy Permeable |
| DHPH – 4 | | 24 – 27 m | 1.03E-04 | Muy Permeable |
| | | 27 – 30 m | 7.96E-04 | Muy Permeable |
| | Lugeon | 30 – 33 m | 6.25E-04 | Muy Permeable |
| | | 33 – 36 m | 6.43E-04 | Muy Permeable |
| | | 36 – 39 m | 6.70E-04 | Muy Permeable |
| | | 39 – 42 m | 2.70E-04 | Muy Permeable |
| | | 42 – 45 m | 4.15E-04 | Muy Permeable |
| | | 45 – 48 m | 2.99E-04 | Muy Permeable |
| | | 48 – 50 m | 7.78E-04 | Muy Permeable |
| | | 0 – 3 m | 7.85E-03 | Muy Permeable |
| | | 3 – 6 m | 2.41E-03 | Muy Permeable |
| | | 6 – 9 m | 2.69E-03 | Muy Permeable |
| DHPH – 5 | Lefranc | 9 – 12 m | 1.95E-03 | Muy Permeable |
| | | 12 – 15 m | 1.73E-03 | Muy Permeable |
| | | 15 – 18 m | 1.26E-03 | Muy Permeable |
| | | 18 – 21 m | 1.14E-03 | Muy Permeable |

| | | | |
|--------|-----------|----------|---------------|
| | 21 – 24 m | 1.12E-04 | Muy Permeable |
| | 24 – 27 m | 1.00E-04 | Muy Permeable |
| | 27 – 30 m | 9.63E-04 | Muy Permeable |
| | 30 – 33 m | 6.75E-04 | Muy Permeable |
| | 33 – 36 m | 4.95E-04 | Muy Permeable |
| | 36 – 39 m | 4.82E-04 | Muy Permeable |
| Lugeon | 39 – 42 m | 4.20E-04 | Muy Permeable |
| | 42 – 45 m | 5.02E-04 | Muy Permeable |
| | 45 – 48 m | 3.24E-04 | Muy Permeable |
| | 48 – 50 m | 5.16E-04 | Muy Permeable |

Nota. La tabla resume, por perforación (DHPH-1 a DHPH-5) y por método (Lefranc/Lugeon), las permeabilidades medidas en distintos intervalos de profundidad, clasificadas en todos los casos como muy permeable, por Geingeniería E.I.R.L, 2024.

El análisis de permeabilidad realizado mediante los métodos Lefranc y Lugeon evidencia que, en todas las perforaciones evaluadas, el macizo rocoso presenta en general condiciones de muy alta permeabilidad, aunque con una clara tendencia a la disminución de los valores conforme aumenta la profundidad. Los resultados obtenidos con el método Lefranc, aplicado en los primeros metros (0–21 m), muestran los valores más elevados, propios de suelos poco consolidados o depósitos aluviales (arenas y gravas), como se observa en DHPH-1 (0–3 m, 7.69E-03 cm/s) y en DHPH-3 (3–6 m, 9.76E-03 cm/s).

A partir de los 21 m de profundidad, los ensayos con el método Lugeon registran valores numéricamente menores, en un rango entre 1.00E-04 cm/s y 8.45E-04 cm/s, aunque todos continúan clasificándose como muy permeables. Este comportamiento refleja que, si bien el terreno en profundidad es más compacto o corresponde a macizos fracturados parcialmente

cementados, las discontinuidades y la interconexión de poros aún permiten una circulación significativa de agua subterránea.

En conjunto, los resultados confirman que el perfil geotécnico presenta una heterogeneidad vertical, con máximos de permeabilidad en las capas superficiales y una reducción relativa en profundidad; sin embargo, tanto las capas superiores como las más profundas mantienen condiciones de muy alta transmisividad hidráulica.

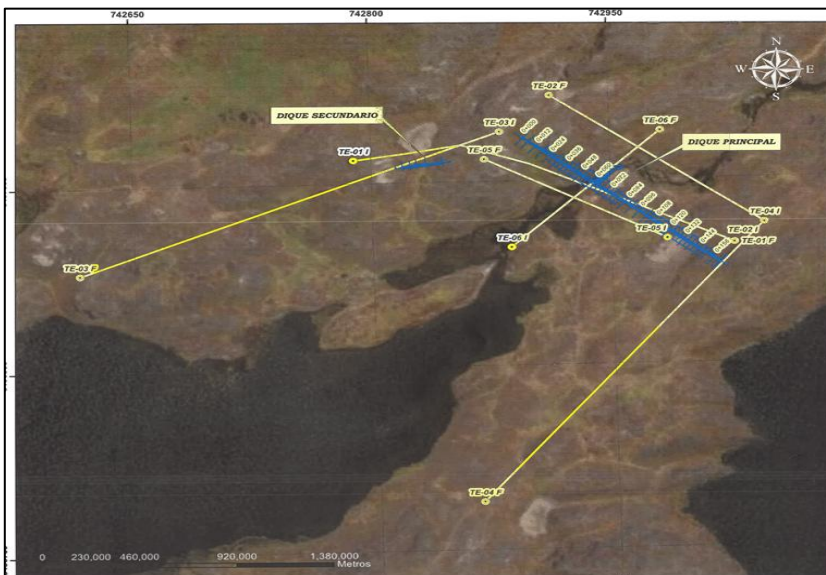
5.1.3. Resultado del Objetivo Específico 3

“Determinar los parámetros geoelectrico del macizo rocoso, para el diseño de la presa Taccracocha, distrito de Lambrama – Abancay, 2025”.

El ensayo de Tomografía Eléctrica se encuentra normalizado de acuerdo a la norma técnica peruana NTP 339.157, en la guía normalizada para el uso del método de Tomografía Eléctrica, la prospección geofísica consistió en la ejecución de 06 líneas de tomografía eléctrica (TE), con la finalidad de determinar los espesores de los materiales presentes en el subsuelo.

Figura 16

Ubicación de los 6 puntos de ensayo geoelectrico



Nota. Mapa satelital que localiza los seis puntos de ensayo geoelectrico a lo largo del dique principal y del dique secundario.

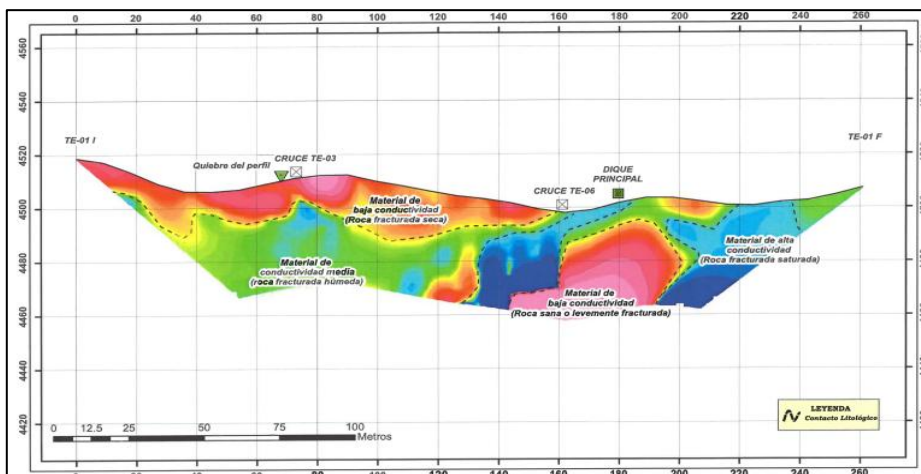
Estas 6 líneas de tomografía son las siguientes:

- **TE - 01**

El primer horizonte muestra una baja conductividad, lo que indica que la roca está fracturada seca, lo que sugiere que el material tiene baja permeabilidad y no presenta una presencia significativa de agua en sus fracturas. En el segundo horizonte, la conductividad es media, y la roca se describe como fracturada húmeda, lo que indica que el agua podría estar presente en cantidades moderadas dentro de las fracturas, lo que aumenta ligeramente la permeabilidad del material. El margen derecho y el eje de perfil muestran conductividad alta, lo que implica una mayor saturación del material, resultando en una mayor permeabilidad y una presencia significativa de agua en la roca fracturada, lo que podría ser indicativo de una zona más filtrante o saturada. Finalmente, el dique principal presenta baja conductividad, sugiriendo que la roca es sana o solo ligeramente fracturada, con menor permeabilidad y una presencia reducida de agua.

Figura 17

Perfil Geoelectrico del TE - 01



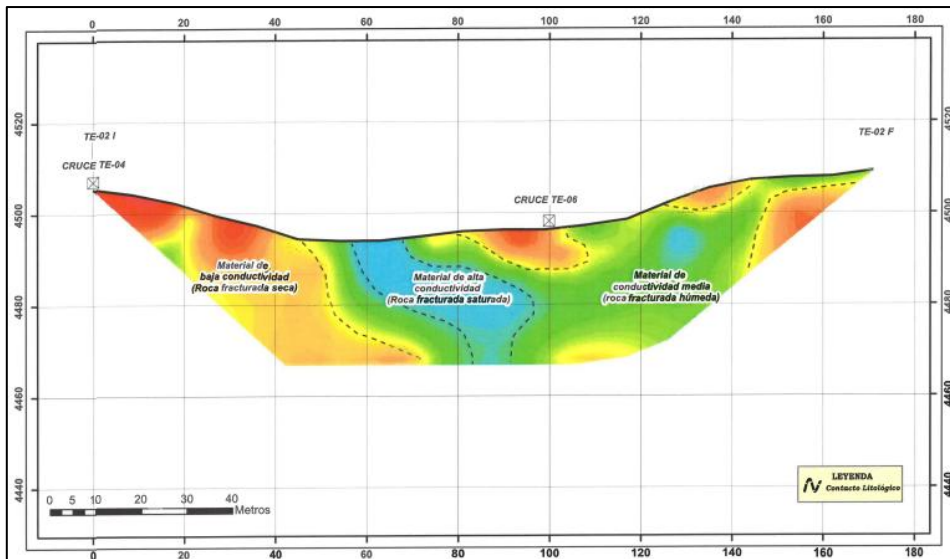
Nota. El perfil geoelectrico 1 revela una variabilidad en la conductividad del macizo rocoso, destacando zonas de alta permeabilidad que requieren medidas de control de filtraciones, por Universal Testing S.A.C, 2024.

- **TE - 02**

El primer horizonte es descrito como roca fracturada seca con baja conductividad, lo que indica que el material en este nivel tiene una permeabilidad reducida y una escasa presencia de agua. Esto es similar a lo observado en el primer horizonte de TE-01, lo que sugiere que las fracturas en esta capa no permiten el paso significativo de agua. El segundo horizonte está compuesto por roca fracturada húmeda, con conductividad media, lo que significa que hay agua presente dentro de las fracturas, pero no en cantidades suficientes como para saturar completamente la roca. Esto sugiere una permeabilidad moderada, donde el agua puede infiltrarse en las fracturas, pero no fluye libremente a través del material. Por otro lado, el eje de perfil muestra roca fracturada saturada con conductividad alta, lo que implica que esta capa está totalmente saturada de agua y presenta una alta permeabilidad. Esto indica que el agua circula libremente a través de las fracturas, lo que sugiere que en este nivel existe una importante filtración o flujo de agua, lo que podría tener implicaciones sobre la capacidad de drenaje y la dinámica del flujo de agua en el terreno.

Figura 18

Perfil Geoelectrico del TE - 02



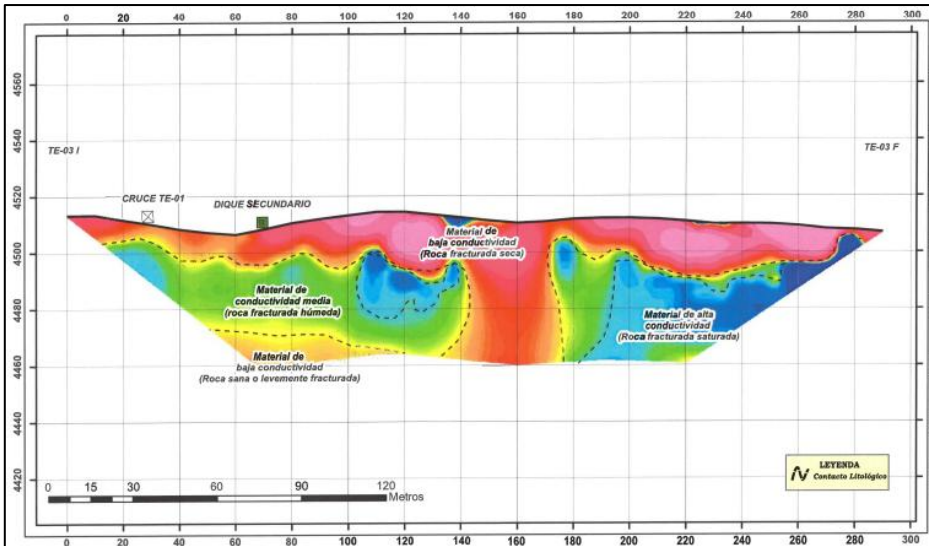
Nota. El perfil geoelectrico 2 evidencia un núcleo de alta conductividad rodeado por zonas de menor permeabilidad, indicando riesgo de filtraciones en el centro del macizo, por Universal Testing S.A.C, 2024.

- TE - 03

El primer horizonte se caracteriza por roca fracturada seca con baja conductividad, lo que indica que el material en esta capa tiene poca o casi nula presencia de agua en sus fracturas, sugiriendo una baja permeabilidad. El segundo horizonte está compuesto por roca fracturada húmeda, con conductividad media, lo que sugiere una mayor presencia de agua en las fracturas, aunque aún no es suficiente para saturar completamente la roca, resultando en una permeabilidad moderada. El tercer horizonte muestra roca fracturada saturada o una posible zona de filtración, con conductividad alta, lo que indica que este nivel podría estar totalmente saturado de agua o tener un alto flujo de agua a través de las fracturas, lo que incrementa significativamente la permeabilidad en esta capa, permitiendo un mayor paso de agua y posiblemente favoreciendo la filtración o el drenaje en la zona.

Figura 19

Perfil Geoelectrico del TE - 03



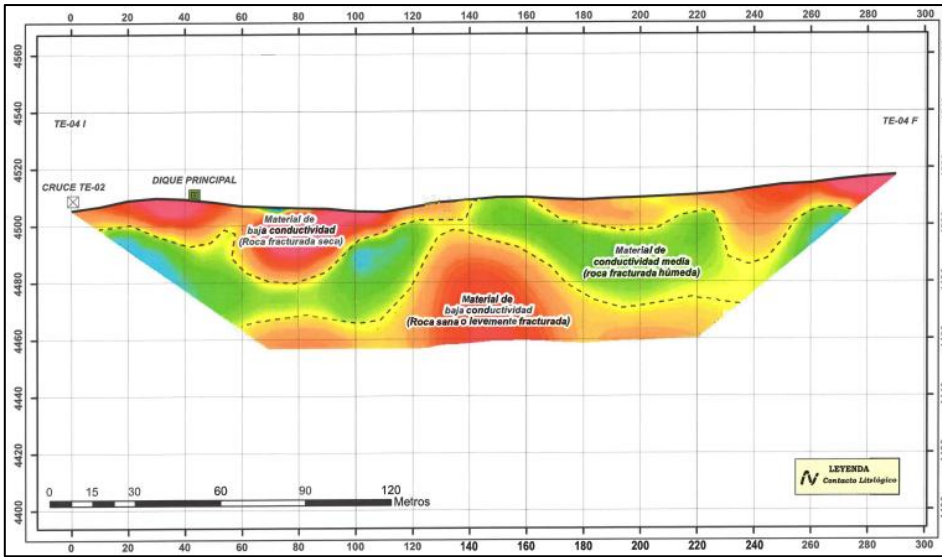
Nota. El perfil geoelectrico 3 muestra una distribución heterogénea, con zonas de alta conductividad en el extremo derecho y sectores centrales de baja conductividad, por Universal Testing S.A.C, 2024.

- TE - 04

El primer horizonte está compuesto por roca fracturada seca, con baja conductividad, similar a otros horizontes superficiales, lo que indica que hay poca presencia de agua en esta capa, sugiriendo una baja permeabilidad. El segundo horizonte muestra roca fracturada húmeda, con conductividad media, lo que sugiere que el agua está presente en mayor cantidad en las fracturas, pero sin saturar completamente la roca, lo que implica una permeabilidad moderada. Finalmente, el tercer horizonte vuelve a ser roca fracturada seca, con baja conductividad, lo que indica que en este nivel no hay una mayor saturación de agua, manteniendo las características de baja permeabilidad y una presencia de agua limitada.

Figura 20

Perfil Geoelectrico del TE - 04



Nota. El perfil geoelectrico 4 evidencia un predominio de materiales de baja conductividad en el centro y flanco izquierdo, con presencia de conductividad media en el extremo derecho, por Universal Testing S.A.C, 2024.

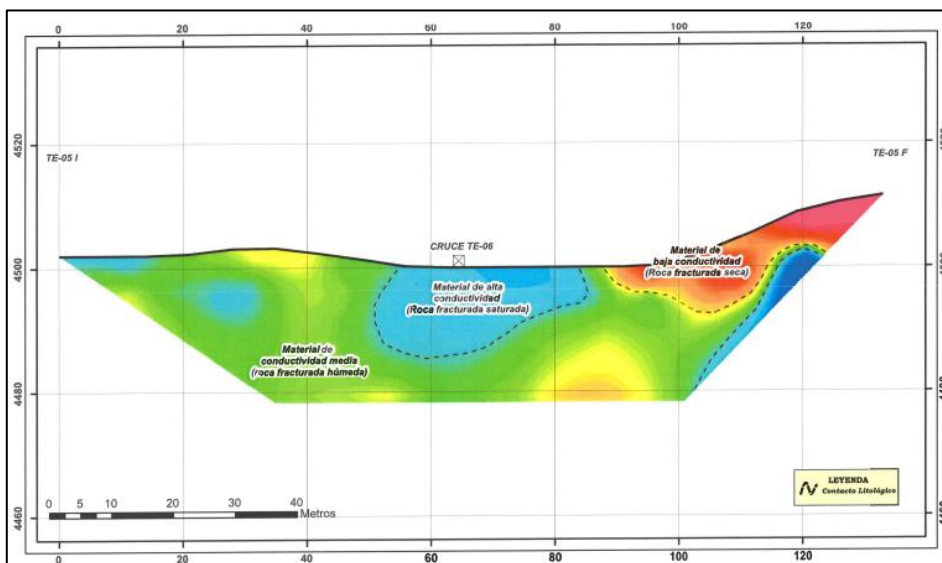
- TE - 05

El primer horizonte se caracteriza por roca fracturada seca con baja conductividad, lo que indica una baja permeabilidad en esta capa, lo que significa que la presencia de agua es mínima y las fracturas en este nivel no permiten el paso de agua con facilidad. Este comportamiento es común en los primeros niveles del subsuelo, donde la roca suele estar más compacta y menos afectada por la saturación. En el segundo horizonte, la roca fracturada húmeda tiene conductividad media, lo que sugiere que las fracturas están moderadamente saturadas de agua, permitiendo una mayor circulación de agua, pero aún sin llegar a la saturación completa de la roca. Este horizonte tiene mayor permeabilidad que el primero, lo que facilita la infiltración de agua en este nivel. Finalmente, en el eje del perfil, se encuentra roca fracturada saturada o una posible zona de filtración, con conductividad alta, lo que sugiere que este nivel está totalmente saturado de agua o experimenta un alto flujo de agua a través de las fracturas, lo que resulta en una alta permeabilidad. Esto indica que el agua puede moverse libremente a través

de este nivel, sugiriendo que este punto es clave para el drenaje o la filtración de agua dentro del terreno.

Figura 21

Perfil Geoeléctrico del TE - 05



Nota. El perfil geoeléctrico 5 muestra un sector central con alta conductividad (roca fracturada saturada), flanqueado por zonas de conductividad media y baja, por Universal Testing S.A.C, 2024.

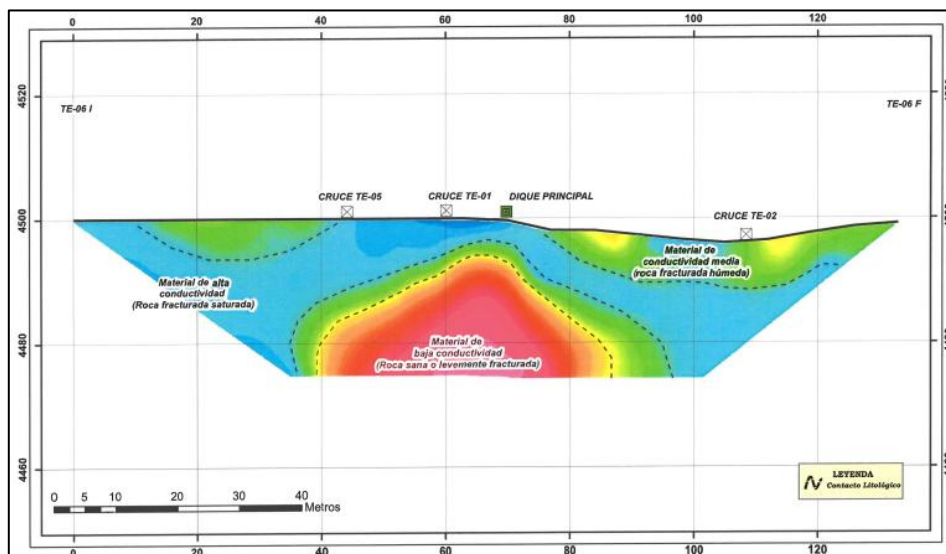
- TE - 06

El primer horizonte muestra roca fracturada saturada o una posible zona de filtración, con conductividad alta, lo que indica una alta permeabilidad y una presencia significativa de agua en este nivel, lo que sugiere que el agua fluye libremente a través de las fracturas o podría estar saturando completamente el material. El segundo horizonte está compuesto por roca fracturada húmeda, con conductividad media, lo que sugiere que hay agua presente en las fracturas, pero no en cantidades suficientes para saturar completamente la roca, indicando una permeabilidad moderada y una filtración parcial de agua. El tercer horizonte consiste en roca fracturada seca, con baja conductividad, lo que implica que la roca está relativamente seca y

tiene baja permeabilidad, lo que dificulta la circulación de agua a través de las fracturas en este nivel.

Figura 22

Perfil Geoeléctrico del TE - 06



Nota. El perfil geoeléctrico 6 muestra un núcleo central de baja conductividad rodeado por zonas de conductividad media y alta, por Universal Testing S.A.C, 2024.

Con los 6 puntos analizados, se establece el siguiente cuadro resumen del análisis completo:

Tabla 52

Interpretación de Resultados de Tomografía Eléctrica

| Línea | Descripción | Espesor (m) | Rango de Resistividad (Ohm.m) | Conductividad | Interpretación |
|-------|-------------------|-------------|-------------------------------|---------------|------------------------|
| TE-01 | Primer horizonte | 20 | 4501 - 36115 | baja | roca fracturada seca |
| | Segundo horizonte | 35 | 501 - 4500 | media | roca fracturada húmeda |

| | | | | | |
|-------|-------------------|----|--------------|-------|---|
| | Margen derecho | 40 | 30 - 500 | alta | roca fracturada saturada |
| | Eje de perfil | 45 | 30 - 500 | alta | roca fracturada saturada |
| | Dique principal | 35 | 4501 - 36115 | baja | roca fracturada sana o levemente fracturada |
| TE-02 | Primer horizonte | 30 | 4501 - 36115 | baja | roca fracturada seca |
| | Segundo horizonte | 30 | 501 - 4500 | media | roca fracturada húmeda |
| | Eje de perfil | 30 | 30 - 500 | alta | roca fracturada saturada |
| TE-03 | Primer horizonte | 50 | 4501 - 36115 | baja | roca fracturada seca |
| | Segundo horizonte | 35 | 501 - 4500 | media | roca fracturada húmeda |
| | Tercer horizonte | 38 | 30 - 500 | alta | roca fracturada saturada o posible zona de filtración |
| TE-04 | Primer horizonte | 28 | 4501 - 36115 | baja | roca fracturada seca |
| | Segundo horizonte | 27 | 501 - 4500 | media | roca fracturada húmeda |
| | Tercer horizonte | 38 | 4501 - 36115 | baja | roca fracturada seca |
| TE-05 | Primer horizonte | 10 | 4501 - 36115 | baja | roca fracturada seca |
| | Segundo horizonte | 25 | 501 - 4500 | media | roca fracturada húmeda |

| | | | | | |
|-------|-------------------|----|--------------|-------|---|
| | Eje del perfil | 15 | 30 - 500 | alta | roca fracturada saturada o posible zona de filtración |
| | Primer horizonte | 15 | 30 - 500 | alta | roca fracturada saturada o posible zona de filtración |
| TE-06 | Segundo horizonte | 10 | 501 - 4500 | media | roca fracturada húmeda |
| | Tercer horizonte | 38 | 4501 - 36115 | baja | roca fracturada seca |

Nota. Resumen de los perfiles geoelectrónicos TE-01–TE-06 con espesor, rangos de resistividad-conductividad e interpretación litológica (roca fracturada seca, húmeda o saturada, posibles filtraciones y dique principal), por Universal Testing S.A.C, 2024.

El análisis de las líneas de tomografía eléctrica (TE-01 a TE-06) revela una estructura del subsuelo con tres horizontes principales: un primer horizonte predominantemente seco (4501-36115 Ohm.m), un segundo horizonte con humedad moderada (501-4500 Ohm.m), y zonas de alta conductividad (30-500 Ohm.m) que indican saturación o posible filtración, particularmente notables en los ejes de perfil y márgenes. El dique principal en TE-01 muestra condiciones de roca sana o levemente fracturada, mientras que los espesores de los horizontes varían desde 10 hasta 50 metros, sugiriendo una heterogeneidad significativa en la distribución de la humedad y fracturamiento del macizo rocoso.

5.2. Discusión

La investigación realizada en la zona de Taccracocha tuvo como finalidad caracterizar integralmente el macizo rocoso y el subsuelo para el diseño de la presa, considerando tres ejes principales: la clasificación geomecánica mediante RMR, los ensayos de permeabilidad (Lefranc y Lugeon) y la tomografía eléctrica. La integración de estos resultados permitió tener una visión más completa de las condiciones del terreno, fundamentales para la estabilidad geotécnica e hidráulica de la cimentación.

5.2.1. *Discusión de Resultados de Hipótesis Específica 1*

Los resultados de la clasificación RMR mostraron una marcada heterogeneidad en el macizo rocoso, con valores que variaron entre 15 y 80, evidenciando desde suelos de muy mala calidad hasta sectores con roca buena. En el estribo derecho y central, las capas superficiales mostraron roca de calidad mala a media, mejorando con la profundidad hasta alcanzar valores de roca buena (RMR 70–79). En el estribo izquierdo se observó una evolución similar, con una transición desde suelos poco competentes hacia roca de buena calidad en profundidad. En tanto, los sectores de río aguas arriba y aguas abajo mostraron predominancia de roca media a buena (RMR 56–77). Este comportamiento es similar a los hallazgos de Villarreal (2020), quien reportó que algunas zonas en la región de Tandil presentaban rocas de calidad mala a muy mala, mientras que otras mostraban características geotécnicas mucho más favorables. En este contexto, los valores bajos de RMR indican una mayor deformabilidad y baja resistencia de las rocas, lo cual es un factor crítico al evaluar la capacidad de carga y la estabilidad de la cimentación. En cambio, las zonas de mayor RMR, como las que se observaron en las profundidades más grandes de las perforaciones, presentan mejores condiciones para la

cimentación, pero la presencia de áreas de baja calidad geotécnica resalta la necesidad de aplicar tratamientos del terreno o refuerzos en aquellas zonas con baja capacidad portante.

5.2.2. Discusión de Resultados de Hipótesis Específica 2

Los ensayos de permeabilidad reflejaron también una clara tendencia de disminución de la permeabilidad con la profundidad. En las capas superficiales (0–21 m) evaluadas con el método Lefranc, los valores oscilaron entre $1.12\text{E-}03$ y $9.76\text{E-}03$ cm/s, lo que confirma que los depósitos poco consolidados, como arenas y gravas, son altamente permeables. A partir de los 21 m, los ensayos Lugeon mostraron permeabilidades en el rango de $1.00\text{E-}04$ a $7.78\text{E-}04$ cm/s, lo que indica un medio más compacto o fracturado parcialmente, con menor capacidad de filtración. Esta transición de suelos altamente permeables en superficie hacia materiales más densos en profundidad es consistente con la estratigrafía de la zona y representa un aspecto clave para el control de filtraciones en la presa. Comparando estos resultados con los encontrados en estudios previos, como los de Catalan (2024), que reportaron valores similares de permeabilidad entre $1.68\text{E-}03$ cm/s y $6.77\text{E-}04$ cm/s en macizos rocosos de la zona de la presa Coltani, es evidente que las condiciones de permeabilidad en la zona de Taccracocha son comparables en cuanto a la moderada permeabilidad de la roca, aunque la variabilidad encontrada subraya la necesidad de intervenciones adicionales. De acuerdo con Quinto (2022), para mitigar el riesgo de filtraciones excesivas, es esencial reducir la permeabilidad mediante técnicas de impermeabilización o refuerzo de las fracturas, lo que resulta en una mejora de las condiciones de cimentación, especialmente en áreas con permeabilidad más alta.

5.2.3. *Discusión de Resultados de Hipótesis Específica 3*

Los ensayos geoelectricos realizados durante la investigación permitieron obtener datos clave sobre la estructura del macizo rocoso y sus propiedades hidráulicas. A través de la tomografía eléctrica, se identificaron tres horizontes geoelectricos en el terreno: seco, húmedo y saturado. Los valores de resistividad eléctrica obtenidos variaron entre 4501–36000 $\Omega \cdot m$ para el horizonte seco, 501–4500 $\Omega \cdot m$ para el húmedo y 30–500 $\Omega \cdot m$ para el saturado. Estos valores indican una alta variabilidad en la conductividad del terreno, con zonas con alta resistividad que corresponden a materiales secos, y zonas de baja resistividad asociadas con mayor saturación de agua, lo que confirma la presencia de acuíferos en el terreno. Este tipo de información es esencial para el diseño de las cimentaciones y la gestión de infiltraciones, como lo indican los estudios de Alonso et al. (2023), que también utilizaron parámetros geoelectricos para definir zonas de alta y baja permeabilidad en presas de relaves. La distribución de los niveles de saturación y la conductividad hidráulica también proporcionan información valiosa para estimar el comportamiento hidráulico del terreno, especialmente en términos de la capacidad del macizo para filtrar y almacenar agua. La combinación de estos parámetros con los datos de permeabilidad es fundamental para garantizar la estabilidad de la presa y prevenir futuros problemas de filtración que puedan comprometer la seguridad y la eficiencia operativa del proyecto. En conclusión, el análisis geoelectrico complementa de manera eficiente los estudios de permeabilidad y clasificación RMR al ofrecer información detallada sobre la estructura hidráulica del terreno y las condiciones de saturación.

En conclusión, el análisis comparativo de estos resultados con investigaciones previas, como las de Villarreal (2020) y Padilla (2024), muestra que la metodología aplicada en la investigación de Taccracocha ha permitido una evaluación detallada de las propiedades del terreno en relación con la permeabilidad, la clasificación geomecánica y la estructura

geoeléctrica. A pesar de las diferencias en la técnica utilizada y las condiciones geológicas específicas de cada estudio, se ha encontrado una relación positiva entre las zonas de alta calidad geotécnica (según RMR) y la baja permeabilidad. Sin embargo, la presencia de zonas más permeables y menos estables subraya la importancia de aplicar estrategias adicionales, como la inyección de cemento o el sellado de fracturas, para mejorar las condiciones del terreno en áreas críticas. La incorporación de ensayos geoeléctricos ha sido crucial para obtener una visión más completa del terreno, permitiendo identificar variaciones significativas en la saturación y la distribución de las capas permeables. Esta integración de métodos ofrece un enfoque integral para la gestión de riesgos hidráulicos y geotécnicos en el diseño de infraestructuras hidráulicas complejas como presas de gran envergadura.

VI. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el macizo rocoso presenta propiedades geotécnicas variables que deben ser tomadas en cuenta para el diseño estructural de la presa Taccracocha. En líneas generales, se identificó que la calidad del macizo cambia de manera significativa según la profundidad y la ubicación de las perforaciones realizadas. Esta variabilidad puede influir directamente en la capacidad portante del terreno y, por tanto, en la estabilidad de la cimentación. Asimismo, los ensayos de permeabilidad revelaron que existen zonas con permeabilidad moderada, con valores de conductividad hidráulica que fluctúan entre $1.10\text{E-}03$ cm/s y $2.03\text{E-}02$ cm/s. Estas condiciones podrían comprometer la integridad de la obra hidráulica si no se implementan medidas preventivas apropiadas para controlar las filtraciones y asegurar su funcionamiento a largo plazo.

El análisis de la clasificación RMR (Rock Mass Rating) evidenció una variabilidad marcada en la calidad geomecánica del macizo rocoso, con valores que oscilaron entre 15 y 80. Esta amplitud ubica al macizo dentro de categorías que van desde roca de muy mala calidad (clase VI) hasta roca de buena calidad (clases II–III). En las zonas superficiales, los valores más bajos (cerca de 21–40) reflejan condiciones de alta fracturación, baja resistencia y elevada deformabilidad, lo que conlleva riesgos de asentamientos diferenciales, menor capacidad portante y mayor susceptibilidad a procesos de meteorización y filtración. Estas características limitan su aptitud natural para servir como base de cimentación sin intervención adicional. En contraste, en las zonas más profundas se registraron valores de RMR entre 60 y 80, que corresponden a un macizo de buena calidad, con mayor grado de compactación, menor presencia de discontinuidades abiertas y mayor resistencia mecánica. Estas condiciones ofrecen una base más estable y confiable para la cimentación de la presa, garantizando mejor comportamiento

estructural a largo plazo. No obstante, la coexistencia de sectores con baja calidad geotécnica junto a áreas con condiciones favorables confirma que el macizo no es homogéneo. Esta heterogeneidad implica la necesidad de aplicar tratamientos de refuerzo y estabilización en los tramos más débiles, como inyecciones de consolidación, sellado de fracturas o anclajes, con el fin de mejorar la resistencia y reducir la permeabilidad en esas zonas.

Los valores obtenidos de las pruebas de permeabilidad evidencian un comportamiento heterogéneo del macizo rocoso en profundidad. En la zona superficial, los ensayos Lefranc registraron valores de permeabilidad comprendidos entre $1.12\text{E-}03$ cm/s y $9.76\text{E-}03$ cm/s, lo cual corresponde a un terreno altamente permeable. Estas condiciones son características de materiales poco consolidados, como arenas y gravas aluviales, que poseen alta porosidad e interconexión de poros, favoreciendo una rápida infiltración del agua. Esta elevada permeabilidad en las capas superficiales representa un riesgo significativo para la estabilidad hidráulica de la presa, ya que podría facilitar pérdidas por filtración y aumentar la posibilidad de erosión interna. En contraste, en las zonas más profundas, los ensayos Lugeon reportaron valores mucho más bajos, entre $1.00\text{E-}04$ cm/s y $7.78\text{E-}04$ cm/s, lo que corresponde a un medio moderadamente permeable a poco permeable. Estas condiciones son típicas de rocas más compactas, parcialmente fracturadas o con discontinuidades cementadas, donde el agua circula principalmente a través de las fracturas existentes y no por la matriz del material. Esta disminución progresiva de la permeabilidad con la profundidad es favorable desde el punto de vista geotécnico, ya que reduce el riesgo de filtraciones excesivas en los niveles basales de la cimentación. La marcada diferencia entre los niveles superficiales y profundos confirma que el macizo presenta una estratigrafía heterogénea, donde los sectores más permeables coexisten con otros de menor conductividad hidráulica. Este comportamiento resalta la necesidad de aplicar

medidas de tratamiento diferenciado del terreno, priorizando las zonas más críticas con técnicas de inyecciones de lechada de cemento, sellado de fracturas o cortinas de impermeabilización.

En cuanto al análisis de los parámetros geoelectricos, los resultados obtenidos de los ensayos de tomografía eléctrica permitieron identificar tres horizontes geoelectricos en el terreno: seco, húmedo y saturado. Los valores de resistividad eléctrica variaron significativamente, con 4501–36000 $\Omega \cdot m$ para el horizonte seco, 501–4500 $\Omega \cdot m$ para el húmedo y 30–500 $\Omega \cdot m$ para el saturado. Estos resultados indican una alta variabilidad en la conductividad del terreno, lo que sugiere la presencia de zonas con saturación de agua que podrían influir en el comportamiento hidráulico del macizo rocoso. La identificación de estas zonas es crucial para la gestión del agua subterránea y el diseño de las cimentaciones, ya que las áreas con baja resistividad pueden presentar mayores niveles de infiltración.

VII. Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos mediante el sistema de clasificación RMR, se recomienda considerar la reubicación parcial de las estructuras principales hacia sectores del macizo rocoso con mejores condiciones geotécnicas. Los valores de RMR obtenidos indicaron que el estribo derecho tiene una clasificación RMR de clase II (roca buena), con valores superiores a 60 a partir de los 2 metros de profundidad, lo que sugiere una mayor capacidad portante y estabilidad para las cimentaciones en esa zona. Por otro lado, las zonas del eje central y el estribo izquierdo mostraron valores de $RMR \leq 37$ (roca de calidad muy mala) hasta profundidades considerables, lo que compromete la capacidad portante y la estabilidad de las cimentaciones. Dado esto, se debe evaluar con mayor detalle el diseño de la estructura en estas áreas críticas para optimizar la seguridad y estabilidad de la presa.

En relación a los resultados de los ensayos de permeabilidad Lefranc y Lugeon, se evidenció una alta variabilidad en la conductividad hidráulica del macizo rocoso, con valores que alcanzan hasta 2.19×10^{-3} cm/s en zonas superficiales y superiores a 1.0×10^{-3} cm/s en sectores como los estribos izquierdo y central. Estos valores indican una permeabilidad alta en ciertos tramos del terreno, lo que podría generar filtraciones que comprometan la estabilidad hidráulica de la presa. Por lo tanto, se recomienda el diseño e implementación de un sistema de drenaje subsuperficial, que contemple drenes horizontales profundos, drenes perimetrales, y, de ser necesario, la instalación de cortinas impermeables o barreras de inyección en las zonas críticas, con el objetivo de controlar el flujo de agua y reforzar la seguridad estructural del proyecto.

Los resultados obtenidos mediante tomografía eléctrica han identificado claramente tres unidades geoelectricas diferenciadas (seca, húmeda y saturada), lo que proporciona información

valiosa sobre la distribución de la saturación de agua en el terreno. Las zonas de alta conductividad eléctrica indican posibles trayectorias de filtración o fracturamiento profundo. Por esta razón, se recomienda incorporar los datos geoelectricos obtenidos de manera sistemática en el modelo geotécnico tridimensional del sitio. Esta integración permitirá una mejor comprensión del comportamiento del macizo rocoso, lo que a su vez ayudará a refinar el diseño de las cimentaciones, los tratamientos del terreno y las obras de contención, asegurando una mayor precisión en la gestión del agua y la estabilidad de la presa.

VIII. Referencias

- Alban, G., Verdesoto, A., & Castro, N. (2020). *Metodologías de investigación educativa. Recimundo*, 4(3), 163–173. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)
- Alonso, O., Andrade, C., & Torrijo, F. J. (2023). *La investigación geofísica en los estudios de balsas de relaves: su aplicación e inclusión en el acuerdo nro. mernnr-mernnr-2020-0043-am de la República de Ecuador. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 16(2), 39–57. <https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4488>
- Alvarado, F. (2020). *Modelamiento geostadístico de la clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio U. de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176858/Modelamiento-geostad%C3%ADstico-de-la-clasificaci%C3%B3n-geomec%C3%A1nica-de-Bieniawski-%28RMR%29.pdf>
- Álvarez, J. J. (2020). *Evaluación geomecánica del macizo rocoso aplicando el SMR para el diseño del banco en U.E.A. Encanto Blanco LYOF, Chongos Alto* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8743/4/IV_FIN_110_TE_Alvarez_Tovar_2020.pdf
- Anteliz, Y. G., Holguín, J. V., Mercado, D. C., & Rojas, E. E. (2022). *Evaluación de las propiedades hidro-litológicas de las unidades geológicas y depósitos sedimentarios al sureste del municipio de Villanueva (La Guajira, Colombia) para la determinación del potencial acuífero. Respuestas Journal of Engineering Sciences*, 27(Especial diciembre), 35–48. <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/3667/5468>

- Badora, D., & Wawer, R. (2018). *Review of selected geophysical methods used in the assessment of water resources for agriculture. Polish Journal of Agronomy*, 34, 23–33.
<https://doi.org/10.26114/pja.iung.328.2018.34.03>
- Bergmann, J. K., Vinke, C. A., Fernandez, C., Gornott, S., Gleixner, R., Laudien, A., Lobanova, J., Ludescher, J., & Schellnhuber, H. (2021). *Cambio climático y migración en el Perú. Organización Internacional para las Migraciones*.
<https://publications.iom.int/system/files/pdf/assessing-the-evidence-peru-es.pdf>
- Boyás, E., González, M. F., & Paredes, J. (2021). *Determinación de sitios potenciales de recarga artificial de agua subterránea en cinco acuíferos de la Zona Metropolitana del Valle de México. Cuadernos Geográficos*, 60(3), 73–94.
<https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i3.16226>
- Cabrera, Á., Rodríguez, R., & Martín, Á. (2020). *Estudio geológico y bioestratigráfico del Paleozoico del Complejo Maláguide en la zona de Cogollos Vega (Granada) mediante conodontos. Boletín Geológico y Minero*, 131(4), 831–855.
<https://doi.org/10.21701/BOLGEOMIN.131.4.018>
- Cantos, M. D., & Pinargote, K. A. (2021). *Análisis empírico de la permeabilidad del macizo rocoso: Aplicación en un túnel* [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio ESPOL.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/53987/1/T-70627%20Cantos-Pinargote.pdf>
- Castillo, R. S. (2020). *Modelos de filtraciones para el aseguramiento hídrico de presas* [Tesis Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio UNSA.
<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/6ed289ae-635d-492f-8f49-54484cc4a3e1/content>

- Castro, J., Gómez, L., & Camargo, E. (2023). *La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. Tecnura*, 27(75), 140–174.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/19171>
- Catalán, D. F. (2024). *Comportamiento geomecánico del macizo rocoso analizado mediante clasificaciones geomecánicas: Galería nivel 4040, mina Victoria, Andahuaylas, 2024* [Tesis Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Repositorio UNAMBA.
https://repositorio.unamba.edu.pe/bitstream/handle/UNAMBA/1504/T_1504.pdf
- Celli, A. E., & Falcioni, F. E. (2022). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso de la Formación Santa Cruz en la zona de Condor Cliff, río Santa Cruz, Patagonia Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 79(1), 106–124.
<https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/640>
- Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN). (2023). *Estudio prospectivo sobre el estrés hídrico e inseguridad alimentaria en el Perú*.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5511475/4909702-estudio-prospectivo-de-estres-hidrico-e-inseguridad-alimentaria-ceplan.pdf>
- Chirinos, J. C. C., & Alfaro, M. (2023). *Estudio geotécnico para la construcción de la represa de almacenaje de agua en Huayllumayo, Espinar, Cusco* [Informe/tesis Universidad Continental]. Repositorio Continental.
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13036>
- Condori, P. (2020). Universo, población y muestra. *Acta Académica*.
<https://www.aacademica.org/cporfirio/18>
- Contreras, M. G. (2013). *Cimentaciones en roca* [Tesis Universidad Nacional Autónoma de México].

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4131/Thesis.pdf>

Cortijo, A., De Miguel, M. A., Rodríguez, J., García, M., & Arcos, A. A. (2021). *Aplicación de BIM a la modelización de una presa arco*. *Anales de Edificación*, 7(3), 20–25.

<https://doi.org/10.20868/ade.2021.4971>

Espinosa, M. (2010). *Ingeniería de presas de enrocado*. Universidad Nacional de Cuyo.

https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/6083/ingenieriapresasescollera.pdf

Estaire, J. (2004). Comportamiento de cimentaciones superficiales sobre suelos granulares sometidas a solicitaciones dinámicas [Tesis doctoral Universidad Politécnica de

Madrid]. <https://oa.upm.es/86/1/04200408.pdf>

Estela, N., & Siesquén, J. C. (2020). *Análisis de la resistencia al corte y la disminución de la permeabilidad en suelos aplicando polietileno de alta densidad con fines de edificaciones en la Urbanización Los Sauces II Etapa, Pimentel* [Tesis Universidad

Señor de Sipán]. Repositorio USS.

<https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/7469/Estela%20Coronel%20Nardeli%20%26%20Siesqu%20%26%20Zapata%20Juan.pdf>

Fatahi, R., Yaghoobi, P., Reaisi, H., Ostad-Ali, K., Nouri, J., & Maghsoudlou, B. (2021). *Eco-hydrologic stability zonation of dams and power plants using the combined models of SMCE and CE-QUAL-W2*. *Applied Water Science*, 11, 109.

<https://doi.org/10.1007/s13201-021-01427-z>

Fei, T., Anan, Z., Jie, Y., & Lin, C. (2023). *Inversion analysis of rock mass permeability coefficient of dam engineering based on particle swarm optimization and support vector machine: A case study*. *Measurement*, 221, 113482.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224123011442>

- Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). *Día Mundial de la Alimentación: El agua es vida, el agua nutre*. <http://www.fao.org/documents/card/es/c/cc7194es>
- Gallegos, P. F. (2022). *Análisis comparativo del diseño sismorresistente de estructura de hormigón armado basado en normativa ecuatoriana y colombiana (NSR-10)* [Tesis Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/items/19d30d67-cd39-468b-ae28-bb4c7483dfd2>
- Glez, Y., Flores, I., & García, J. (2021). *Efecto de desembalse en la estabilidad de presas de tierra: Dos casos de estudio en Cuba*. *Ingeniería Hidráulica*, 42(1), 42–53. (Enlace consultado) <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/193286/Definicion-de-un-indice-de-estabilidad-fisica-para-depositos-de-relaves-en-Brasil.pdf>
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (4.ª ed.)*. McGraw-Hill.
- Huamaní, A. G. (2021). *Análisis numérico de la infiltración con el software Slide en la represa de material suelto Pallca, Ayacucho 2020* [Tesis Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/ee781670-c42e-4692-81b8-add594426d67>
- Huang, T., Ding, M., Gao, Z., & Delgado, R. (2021). *Check dam storage capacity calculation based on high-resolution topogrammetry: Case study of the Cutou Gully, Wenchuan County, China*. *Science of the Total Environment*, 790, 148110. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721031545>
- Instituto Geofísico del Perú (IGP). (2021). *Evaluación geofísica de los acantilados de la Costa Verde: Distrito de Miraflores*. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/12448>
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET). (2021). *Evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa en el sector Quillalla, distrito de Uñón*,

- provincia de Castilla, región Arequipa (Informe técnico N.º A7147).*
https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//11103_informe-tecnico-n0-a7147-evaluacion-de-peligros-geologicos-por-movimientos-en-masa-en-el-sector-quillalla-distrito-de-unon-provincia-castilla-region-a.pdf
- Jayo, P. (2021). *Análisis de control de infiltraciones en la fundación de la presa Coltani, Tacna, aplicando la técnica de pilotes secantes* [Tesis Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].
https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/658496/Jayo_VP.pdf
- Jiménez, M. J. (2022). *Caracterización del macizo rocoso ubicado en el sector Ingamullo II (km 11), proyecto: Reconstrucción de la carretera Gualaceo–Limón Indanza, tramo: Gualaceo–Plan de Milagro* [Tesis Universidad del Azuay].
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/12379/1/17906.pdf>
- Jorge, E., Díaz, E., & Fuentes, L. (2021). *Descripción de población, muestra y muestreo*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/xxxx>
- Khan, M. S., Park, J., & Seo, J. (2021). *Geotechnical property modeling and construction safety zoning based on GIS and BIM integration*. *Applied Sciences*, 11(9), 3952.
<https://doi.org/10.3390/app11094004>
- López, J. L. (2020). *Riesgo climático y definición de estrategias financieras para su mitigación en el sector agua y saneamiento en ALC*. Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Riesgo-climatico-y-definicion-de-estrategias-financieras-para-su-mitigacion-en-el-sector-agua-y-saneamiento-en-ALC-Inundaciones-Implicaciones-de-los-acuerdos-de-Paris-NDCs-en-la-gestion-de-riesgo>
- Lotfi, V., & Jahanitabar, A. A. (2025). *Seismic resistance of concrete arch dams including*

- contraction joints based on damage plasticity model. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 21(3), 635–656. <https://doi.org/10.1108/MMMS-06-2024-0159>
- Lozano, J. P., & Ventura, R. L. (2021). *Estudio geotécnico empleando la teoría de Terzaghi para determinar la cimentación de la I.E. San Francisco de Asís, Oxapampa, Pasco* [Tesis Universidad César Vallejo]. http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf
- Maccaferri. (2025). Erdox: Innovación en estabilización de taludes. *Boletín Técnico de Ingeniería Geotécnica*, 28(2), 58–72.
- Maldonado, Y. (2020a). *Ensayo Lefranc*. Geologiaweb. <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/ensayo-lefranc/>
- Maldonado, Y. (2020b). *Ensayo Lugeon*. Geologiaweb. <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/ensayo-lugeon/>
- Martínez, A., & Torres, L. (2021). *Técnicas de muestreo en estudios de población*. Editorial Universitaria.
- Martínez, J. S., & Bermeo, V. F. (2023). *Análisis comparativo de precisión y eficiencia de tecnologías topográficas para levantamientos: Fotogrametría y LiDAR aerotransportado con dron y receptor GNSS (modo RTK), aplicado al parque El Paraíso de la ciudad de Cuenca* [Tesis]. Repositorio institucional.
- Mendoza, M. Y., & Cueva, C. K. (2024). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso para la viabilidad de construcción de un inclinado, empresa Minera Los Diamantes de Aguada S.A.C.* [Tesis Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/15460>

- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2020). *Anexo N.º 03 MFSA: Contenido mínimo para la elaboración de estudio de inversión a nivel de expediente técnico (Invierte.pe)*.
<https://www.gob.pe/institucion/minagri/normas-legales/1090567-0183-2020->
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2020). *Manual de carreteras: Suelos, geotecnia y pavimentos*.
http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4040.pdf
- Monteiro, R. M. (2021). *Proceso de rotura de las presas de enrocado por sobrevertido* [Tesis Universidad Politécnica de Madrid].
https://oa.upm.es/67371/1/RICARDO_MANUEL_MONTEIRO_ALVES.pdf
- Morales, M. A., & Velarde, J. A. (2025). *Análisis de parámetros técnicos iniciales en la clasificación RMR para uso en fortificación minera* [Tesis Universidad del Azuay].
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/15764/1/21280.pdf>
- Moreno, D. (2021). *Influencia de algunas medidas geotécnicas en la estimación de caudales y subpresiones bajo presas de gravedad* [Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/10212/tfg-mor-inf.pdf>
- Ochoa, A., Cartaya, M., & Blanco, J. L. (2020). *Clasificación geomecánica óptima para evaluar el macizo rocoso en el frente de arranque del tramo iv del túnel Levisa-Mayarí*. *Minería y Geología*, 36(1), 50–64. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122020000100050
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*.
https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Public

caciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf

- Padilla, E. S. (2024). *Análisis geomecánico de cimentaciones rocosas de presas de hormigón a gravedad* [Tesis Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27242/1/TTS1777.pdf>
- Pérez, I., Moreno, J., & Muñiz, M. (2021). *Efecto del espaciado en el cálculo de estabilidad de cuñas en taludes rocosos*. *Ingeniería Civil*, 199, 1–10.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8415858>
- Pérez, M. (2018). *Estudio hidráulico y de estabilidad de una presa de materiales sueltos sobre el río Callazas en la región de Tacna* [Tesis Pontificia Universidad Católica del Perú].
<https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/714906ba-8aa8-48d0-af4f-8f1a07112d5d/content>
- Pinilla, A. (2020). *Proyecto de presa para el almacenamiento de 550,000 m³ de agua en Almaraz de Duero (Zamora)* [Trabajo fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid].
https://oa.upm.es/66326/1/TFM_ADRIANO_PINILLA_PEREZ.pdf
- Pinto, A. C., & Aracil, E. (2021). *Prospección geofísica por tomografía eléctrica en el abrigo de Sopeña (Asturias, norte de España)*. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 43, 89–100. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2021.43.0.8770>
- Pro Desarrollo Apurímac. (2021). *Mejoramiento del sistema de riego por aspersión Atancama–Urpipampa–Siusay–Pichiuca–Lambrama (Presa Taccraccocha)* [Documento técnico].
- Quinto, J. M. (2022). *Evaluación geotécnica para la construcción de la Presa Ucuscancha I, Huancayo–Junín* [Tesis Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2615/1/T026_44068282_T.pdf
- Rais, J., Barakat, A., Louz, E., & Barka, A. A. (2021). *Geological heritage in the M’Goun geopark: A proposal of geo-itineraries around the Bine El Ouidane dam (Central High*

- Atlas, Morocco*). *International Journal of Geoheritage and Parks*, 9(2), 173–189.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2577444121000095>
- Rosengaus, M., Arreguín, F., Pujol, A., Marengo, H., García, P., Morales, A., Mogliati, S., Vázquez, L., Gutiérrez, G., Alcocer, V. H., González, F., Jaime, A., & Espinoza, D. (2020). *Seguridad de presas y cambio climático*. CERSHI.
<https://www.cershi.org/images/nuestra-labor/publicaciones/PDF/2020/Memoria-SeguridaddePresas-CambioClimatico.pdf>
- Sampieri, H., Collado, R., & Lucio, P. (2019). Diseños no experimentales. *En Metodología de la investigación*. Aliat Universidades.
http://online.aliat.edu.mx/adistancia/InvCuantitativa/LecturasS4/Hernandez_Sampieri_Cap._7_disenos_no_experimentales.pdf
- Scivetti, N., Bahía, M., & Spagnuolo, J. (2021). *Manual de geofísica y métodos geofísicos*. EDIUNS. https://ediuns.com.ar/wp-content/uploads/2021/08/Manual-de-Geofisica-y-metodos-geofisicos_web.pdf
- Serrano, A. (2011). *Desarrollo de una herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].
<https://riunet.upv.es/bitstreams/b228e541-caf3-49ad-b802-8b783b9a419a/download>
- Torres, C. R. (2020). *Evaluación de riesgo de deslizamientos y propuesta geotécnica de la trocha Ayash-Huaripampa, tramo km 3+260 al km 3+300*. *Perfiles de Ingeniería*, 16(16), 13–22. https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v20i15.3542
- Trivedi, N., & Calbimonte, J. (2018). *Outlier analysis in sensor data streams: A case study*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31769.88167>
- Vásquez, L. (2021). *Hydraulic modeling in the estimation of the increase in erosion in high andean rivers with contraction of the riverbed due to the presence of derived dams*.

Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 1–8. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.168>

- Villacorta, S., Vásquez, E., Valderrama, P., & Madueño, M. (2013). *Informe técnico de reporte de zonas críticas y peligros geológicos y geo-hidrológicos en la región Apurímac. Ministerio del Ambiente.* https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-apurimac/archivos/public/docs/03r_zonas_criticas_apurimac.pdf
- Villalobos, M. A. (2025). *Determinación de velocidades sísmicas y parámetros geotécnicos indirectos mediante la tomografía de refracción sísmica (TRS) y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) en las estaciones Campo Hermoso, Nazareth, La Rosita y Morrónico del observatorio* [Tesis Universidad de Santander]. <https://repositorio.udes.edu.co/server/api/core/bitstreams/f1bc720d-4ea4-4ae0-be0a-cd53c5c0b9b5/content>
- Villarreal, M. C. (2020). *Caracterización geotécnica de macizos rocosos, a nivel de prefactibilidad, en el área de implantación de presas de laminación de crecidas extraordinarias actuales y proyectadas sitas en la Hoja Tandil 3760-IV* [Tesis Universidad Nacional de La Plata]. https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/104830/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf
- Viteri, S. G. (2023). *Análisis geotécnico de las filtraciones en la presa Huacatina, provincia de Julcán, departamento de La Libertad, 2023* [Tesis Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/35710/Viteri%20Montes%20Sandra%20Giovana.pdf>
- Wang, C., Wei, P., Wang, X., Zhang, S., & Cui, W. (2021). *Blast-resistance and damage evaluation of concrete gravity dam exposed to underwater explosion: considering the*

initial stress field. KSCE Journal of Civil Engineering, 25(8), 2879–2893. (Enlace consultado) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798824016118>

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes