

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA
CONDORCCOTA CON FINES DE REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS
DE CHECCA, CANAS – CUSCO 2024**

PRESENTADO POR:

Br. ZULEY ANDREA ARQUE GARCIA

Br. ERIC EMERSON PEÑA AUCCA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO GEÓLOGO**

ASESOR:

Dr. RONALD LUIS LOPEZ ZAPANA

CUSCO – PERÚ
2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** RONALD LUIS LOPEZ ZAPANA
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de Investigación/tesis titulada: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA
..... DE LA LAGUNA CONDORCOTA CON FINES DE REPRESENTACIÓN,
..... SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS - CUSCO 2024

Presentado por: ZULEY ANDREA ARQUE GARCIA DNI N°: 71729603
presentado por: ERIC EMERSON PENA AUCCA DNI N°: 73083400
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO
..... GEOLOGO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01... veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 01..... %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud	☒
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 7 de JULIO de 2026

.....
Firma

Post firma RONALD LUIS LOPEZ ZAPANA
Nro. de DNI 23923900
ORCID del Asesor 0000-0003-0148-6535

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud.oid: 27259-605277150

EVALUACION HIDROGEOLOGICA CONDORCCOTA.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:605277150

Fecha de entrega

6 jul 2026, 11:02 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

6 jul 2026, 11:10 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

EVALUACION HIDROGEOLOGICA CONDORCCOTA.pdf

Tamaño del archivo

6.2 MB

114 páginas

26.593 palabras

160.843 caracteres

1% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
63 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

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.

DEDICATORIA

A mi mamá, que lo es todo.

A mis hermanos, por ser siempre ejemplo y aliento.

A mi compañero de tesis, por su apoyo incondicional, confianza y cariño durante este proceso.

Gracias por compartir conmigo este camino y contribuir a que este sueño se hiciera realidad.

Zuley Andrea Arque García

A mi madre, Olga, por ser la inspiración constante que impulsa cada uno de mis logros.

A mi padre, Víctor, por su ejemplo de fortaleza, su compañía permanente y sus sabias orientaciones a lo largo de mi vida.

A mis hermanos, Anderson y Danna, por su cariño y apoyo constante.

A mi compañera de tesis, Zuley, por su paciencia, comprensión y por compartir conmigo este camino con dedicación y compromiso.

Eric Emerson Peña Aucca

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Mgt. Ronald Luis Lopez Zapana, asesor de la presente investigación, por su tiempo, su paciencia y sus valiosas observaciones a lo largo de este trabajo. Gracias por sus enseñanzas y por ser un docente excelente, de esos que despiertan en uno las ganas de seguir aprendiendo cada día más.

Al Mgt. Eddie Edgard Mercado Tejada, al Ing. Víctor Vidal Gárate Góngora y a la Dra. Rocío Pacheco Román, por sus observaciones, recomendaciones y aportes académicos, que contribuyeron significativamente a la culminación de este trabajo de investigación.

Al Mgt. Mauro Alberto Zegarra Carreón, por su apoyo durante el proceso de elaboración de la tesis y por los conocimientos impartidos en cada una de sus enseñanzas.

A toda la plana docente de nuestra Escuela Profesional, por la formación académica y humana brindada durante estos años de carrera.

Finalmente, a nuestros amigos, por hacer más ameno y llevadero nuestro paso por la universidad, y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, nos brindaron su apoyo y motivación para la realización de esta tesis.

RESUMEN

El presente estudio evaluó la viabilidad del represamiento de la laguna Condorccota, ubicada en el distrito de San Andrés de Checca, provincia de Canas (Cusco), como alternativa para incrementar la disponibilidad de agua para uso agrícola. La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, integrando información geológica e hidrogeológica con datos obtenidos mediante estudios geofísicos, ensayos geotécnicos e hidroquímicos.

Los resultados evidenciaron una alta heterogeneidad litológica, la presencia de materiales semipermeables a permeables y acuíferos fisurados en rocas volcánicas, que favorecen la circulación del agua subterránea. Asimismo, se identificaron zonas saturadas y manantiales subacuáticos que mantienen el equilibrio hídrico de la laguna. El análisis hidroquímico indicó aguas de baja a moderada mineralización.

El modelo hidrogeológico conceptual y numérico determinó que las condiciones naturales del sistema no favorecen el almacenamiento eficiente de agua debido a pérdidas significativas por filtración a través del fondo y las márgenes de la laguna. Se concluye que el represamiento sería técnicamente viable únicamente mediante la impermeabilización del vaso con geomembrana para reducir las pérdidas por infiltración y garantizar una adecuada capacidad de almacenamiento. En ausencia de esta intervención, la laguna no presenta condiciones hidrogeológicas favorables para el represamiento. Como alternativa complementaria, se propone la implementación de reservorios nocturnos aguas abajo para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico disponible.

Palabras clave: Evaluación hidrogeológica, Represamiento, Permeabilidad, Balance hídrico, Reservorio nocturno.

ABSTRACT

This study aimed to determine the feasibility of damming Condorccota Lake, located in the district of San Andrés de Checca, province of Canas, Cusco, as an alternative to improve water availability in an area with limited water resources for agricultural use. The research was conducted under a mixed-methods approach, integrating qualitative analysis of geological and hydrogeological information with quantitative data obtained from geophysical surveys, geotechnical tests, and hydrochemical analyses.

The results revealed a high lithological heterogeneity, as well as the presence of semi-permeable to permeable materials within the lake basin and fractured aquifers in volcanic rocks, which favor groundwater flow. Additionally, saturated zones and subaqueous springs were identified, contributing to a dynamic equilibrium between recharge and discharge within the system. Hydrochemical analysis indicated waters with low to moderate mineralization.

The conceptual and numerical hydrogeological model demonstrated that the natural conditions of the system are not suitable for efficient water storage due to significant seepage losses through the lakebed and margins. Consequently, it is concluded that Condorccota Lagoon could be considered technically feasible for impoundment purposes, provided that basin impermeabilization is implemented through the installation of a geomembrane liner, with the aim of minimizing infiltration losses and ensuring an adequate storage capacity. However, under its natural conditions, the lagoon does not exhibit favorable characteristics for water impoundment due to the hydrogeological conditions of the area. As a complementary engineering alternative, the implementation of downstream night storage reservoirs is proposed in order to optimize the utilization and regulation of the available water resource.

Keywords: Hydrogeological assessment, Damming feasibility, Permeability, Groundwater balance, Night storage reservoir.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES.....	3
1.1 Ubicación y acceso.....	3
1.2 Ubicación Hidrográfica.....	3
1.3 Planteamiento del problema	5
1.4 Problema general	5
1.5 Problemas específicos.....	5
1.6 Justificación de la investigación.....	6
1.7 Objetivo general.....	6
1.8 Objetivos específicos.....	7
1.9 Hipótesis General	7
1.10 Hipótesis específicas	7
CAPÍTULO II METODOLOGÍA.....	9
2.1 Etapas metodológicas	9
2.1.1 Pre-campo	9
2.1.2 Campo	10
2.1.3 Post-campo	10
2.2 Limitaciones del estudio	11
CAPÍTULO III BASES TEÓRICAS.....	12
3.1 ANTECEDENTES.....	12
3.1.1 Internacionales	12
3.1.2 Nacionales.....	14
3.1.3 Regionales.....	15
3.1.4 Locales	17
3.2 DEFINICIONES	18
3.2.1 Laguna.....	18
3.2.2 Represamiento	19
3.2.3 Impermeabilización con geomembrana	19
3.2.4 Reservorio nocturno	20
3.2.5 Cuenca hidrográfica.....	20

3.2.6	Balance hídrico.....	20
3.2.7	El agua subterránea en el ciclo hidrológico	21
3.2.8	Propiedades de los acuíferos y flujo de agua subterránea	22
3.2.9	Aguas subterráneas o acuíferos	24
3.2.10	Hidroquímica.....	27
3.2.11	Prospección geofísica.....	28
CAPÍTULO IV CARACTERIZACIÓN MORFOESTRUCTURAL Y GEOLÓGICA DEL ÁREA.....		30
4.1	CARÁCTER GEOLÓGICO	30
4.1.1	Geología regional	30
4.1.2	Geología local.....	30
4.2	TENDENCIAS ESTRUCTURALES	32
4.3	CARÁCTER MORFOLÓGICO.....	33
CAPÍTULO V GEOTECNIA – MECÁNICA DE SUELOS.....		35
5.1	SECUENCIA LITOLÓGICA EN EJE DE PRESA.....	35
5.1.1	Excavación C-1.....	35
5.1.2	Excavación C-2.....	36
5.1.3	Excavación C-3.....	37
5.1.4	Excavación C-4.....	38
5.2	NIVEL FREÁTICO	40
5.3	RESISTENCIA INSITU	41
5.4	PERMEABILIDAD.....	42
5.5	ANÁLISIS DE ESTANQUEIDAD DEL VASO.....	44
5.6	CARACTERÍSTICAS GEOHÍDRICAS DEL VASO	44
5.7	ANÁLISIS Y COMENTARIOS DE LOS ESTUDIOS GEOTÉCNICOS	45
CAPÍTULO VI PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.....		46
6.1	METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN GEOFÍSICA	46
6.2	LÍNEAS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA	47
6.2.1	Generalidades	47
6.2.2	Descripción de unidades geológicas	58
6.2.3	Interpretación de secciones tomográficas.....	60
6.3	SONDAJES ELÉCTRICOS VERTICALES	71

6.3.1	Resultados de sondajes de zona de embalse	71
6.3.2	Resultados de sondajes eléctricos	72
6.3.3	Resultados de zona de embalse.....	72
6.3.4	Análisis y comentarios de ensayos geoelectricos.....	73
CAPÍTULO VII HIDROGEOLOGÍA.....		74
7.1	GENERALIDADES	74
7.2	PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS	74
7.2.1	Permeabilidad en rocas volcánicas	74
7.2.2	Permeabilidad en suelos cuaternarios.....	76
7.3	INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA.....	76
7.3.1	Perforaciones manuales con Auger.....	77
7.3.2	Perforaciones.....	77
7.3.3	Análisis de caudales	80
7.3.4	Tipos de acuíferos	80
7.4	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	80
7.5	HIDROQUÍMICA.....	81
7.5.1	Estaciones de muestreo de aguas.....	81
7.5.2	Análisis de parámetros fisicoquímicos.....	82
7.5.3	Análisis de las facies hidroquímicas	82
7.6	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	85
7.6.1	Balance hídrico subterráneo	86
7.6.2	Sección hidrogeológica A-A'	87
7.6.3	Sección hidrogeológica B-B'	87
7.7	MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO	88
7.7.1	Construcción de modelo	88
7.7.2	Discretización horizontal.....	88
7.7.3	Discretización vertical	89
7.7.4	Condiciones de borde.....	89
7.7.5	Conductividad hidráulica (K)	90
7.7.6	Trayectoria de partículas	91
7.7.7	Resultado de simulaciones.....	91
CAPÍTULO VIII DISCUSIÓN.....		92

CAPÍTULO IX	ANÁLISIS DE VIABILIDAD.....	93
9.1	Caracterización Morfoestructural y Geológica	93
9.2	Geotecnia	93
9.3	Prospección Geofísica.....	94
9.4	Hidrogeología	94
9.5	Análisis conjunto.....	95
CONCLUSIONES.....		96
RECOMENDACIONES		97
BIBLIOGRAFÍA.....		98
ANEXOS		100

Lista de tablas

Tabla 1. Unidades geomorfológicas identificadas en el área de estudio _____	34
Tabla 2. Características físicas y mecánicas de estratos detectados _____	40
Tabla 3. Ensayos de Penetración Dinámica Ligera ejecutados _____	42
Tabla 4. Ensayos de permeabilidad ejecutados _____	43
Tabla 5. Ensayos de permeabilidad insitu ejecutados _____	44
Tabla 6. Ubicación de líneas tomográficas eléctricas _____	48
Tabla 7. Coordenadas UTM de sondajes eléctricos verticales ejecutados _____	72
Tabla 8. Sondaje 1P _____	72
Tabla 9. Sondaje 2P _____	72
Tabla 10. Coeficiente de permeabilidad indirecta de tres familias promedio de cuatro EMT para la zona sur de la laguna Condorccota _____	75
Tabla 11. Coeficiente de permeabilidad indirecta para dos familias de la zona norte de la laguna Condorccota _____	75
Tabla 12. Unidades hidrogeológicas _____	81
Tabla 13. Resultados de análisis de agua Condorccota _____	82
Tabla 14. Balance hídrico subterráneo _____	87
Tabla 15. Conductividad hidráulica observada _____	91

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación política del área de estudio	4
Figura 2. Tipos de lagos en función de su origen.	19
Figura 3. Diagrama del ciclo hidrológico que muestra la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, destacando los procesos de precipitación, infiltración, escurrimiento superficial, flujo subterráneo, evapotranspiración y descarga hacia lagos y océano.	20
Figura 4. Zonas en el subsuelo según el comportamiento del agua infiltrada.....	21
Figura 5. Zona saturada (azul) bajo el nivel freático totalmente llena de agua y zona no saturada (verde) con agua intersticial; los dibujos inferiores muestran el almacenamiento entre partículas y por fracturas.....	25
Figura 6. Tipos de acuíferos (confinado, no confinado) y pozos asociados (artesiano fluyente, artesiano no fluyente, al aire libre o noria), con indicación de la superficie piezométrica y capas confinantes impermeables.	26
Figura 7. Representación esquemática de los principales procesos hidroquímicos en la zona del suelo de las áreas de recarga.	27
Figura 8. Afloramientos andesíticos de la formación Suratera al sur de la laguna Condorccota	32
Figura 9. Andesitas muy fracturadas con aberturas en calicata excavada	32
Figura 10. Morfología de la cuenca con erosión glacial formando drumlins pleistocénicos	33
Figura 11. Excavación C-1 en el flanco izquierdo del eje proyectado de la presa	36
Figura 12. Excavación C-2 en el flanco izquierdo del eje proyectado de la presa	37
Figura 13. Excavación C-3 en el flanco derecho del eje proyectado de la presa.....	38
Figura 14. Excavación C-3 en el flanco derecho del eje proyectado de la presa.....	39
Figura 15. Vista de excavaciones y proyección del eje de represamiento	40
Figura 16. Líneas de tomografía eléctrica de las secciones 01 y 02 en proceso de registro	48
Figura 17. Sección tomográfica N° 01	49
Figura 18. Sección tomográfica N° 02	50
Figura 19. Sección tomográfica N° 03	51
Figura 20. Sección tomográfica N° 04	52
Figura 21. Sección tomográfica N° 05	53
Figura 22. Sección tomográfica N° 06	54
Figura 23. Sección tomográfica N° 07	55
Figura 24. Sección tomográfica N° 08	56
Figura 25. Sección tomográfica N° 09	57
Figura 26. Sección tomográfica N° 10	58

Figura 27. Afloramiento de rocas fracturadas en el área de estudio.....	59
Figura 28. Sección A-A' – Zona saturada de forma cóncava a 15m debajo del nivel del espejo de agua de la laguna.....	61
Figura 29. Sección B-B': Rocas saturadas debajo de 15m y a 40 m del inicio de la sección. Hacia los 160 m, 200 y 240 m se corrobora niveles freáticos que aparentemente tienen conexión	62
Figura 30. Sección C-C': Zonas húmedas que se observan por encima del nivel de espejo de agua de la laguna.....	62
Figura 31. Secciones noroeste-sureste	63
Figura 32. Observación de macizos rocosos y zona de rocas húmeda	64
Figura 33. Sección D-D': Zonas saturadas casi al nivel de la laguna 100 m de la orilla de la laguna y a 50 m de la orilla están por debajo de 5 m.....	65
Figura 34. Sección E-E': La saturación de agua se halla debajo de 5 m del espejo de agua a 50 m de la orilla de la laguna.....	65
Figura 35. Secciones Este-Oeste (Norte de la laguna).....	66
Figura 36. Sección F-F' - Zonas con saturación en la zona norte y sur a 30 m debajo del espejo de agua y otra zona más al sur a 4m debajo del nivel de la laguna	67
Figura 37. Sección G-G': Zona de saturación en dos sectores a 3 m debajo del nivel del espejo de agua de la laguna.....	68
Figura 38. Secciones Norte-Sur (Extremo oeste de la laguna).....	69
Figura 39. Sección H-H': Zona saturadas a 30 m escasamente perceptibles y a 55m con mayor claridad y amplitud.....	69
Figura 40. Sección I-I': zona saturada a 35 m debajo del espejo de agua de la laguna.....	70
Figura 41. Secciones Oeste-este (Paralelos al borde de macizo rocoso).....	71
Figura 42. Manantiales de la laguna cuyos acuíferos alimentadores sugieren el origen del suroeste de la cuenca	76
Figura 43. Imagen satelital de la disposición de las manantiales dentro de la laguna.....	77
Figura 44. Pozos de la zona noreste de la laguna con vista del nivel freático y ascenso lento	78
Figura 45. Pozos de la zona norte de la laguna con el ascenso rápido del nivel freático	79
Figura 46. Registros estratigráficos con comportamiento estratigráfico diferentes por sectores	79
Figura 47. Diagrama de Stiff para las Muestras evaluadas en Condorccota	83
Figura 48. Diagrama de Schoeller-Berkaloff de los resultados en las muestras de agua Condorccota	84
Figura 49. Resultado de muestras de pozo y manante en el diagrama de Koljinski mostrando presencia de micas y silicatos	85
Figura 50. Malla del modelo numérico hidrogeológico del área de estudio	89
Figura 51. Condiciones de borde.....	90

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico constituye un elemento fundamental para el desarrollo de las actividades agrícolas en las zonas altoandinas del Perú, donde su disponibilidad presenta una marcada variabilidad temporal y espacial. En este contexto, la gestión eficiente de fuentes naturales de agua, como lagunas altoandinas, representa una alternativa estratégica para garantizar el abastecimiento hídrico y contribuir al desarrollo sostenible de las comunidades.

La laguna Condorccota, ubicada en el distrito de San Andrés de Checca, provincia de Canas, región Cusco, ha sido considerada como una potencial fuente de almacenamiento hídrico mediante la implementación de una estructura de represamiento, en el marco de iniciativas orientadas a mejorar la disponibilidad de agua para uso agrícola. No obstante, las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del área pueden influir significativamente en la viabilidad de este tipo de proyectos, particularmente en relación con la permeabilidad de los materiales, la presencia de acuíferos y las pérdidas por filtración.

En este contexto, surge la necesidad de evaluar de manera integral las características hidrogeológicas de la laguna Condorccota y su área de influencia, con el fin de determinar su viabilidad para fines de represamiento y aportar información técnica para la adecuada gestión del recurso hídrico en la zona.

El presente estudio tiene como objetivo determinar la viabilidad del represamiento de la laguna Condorccota a partir de la evaluación de sus características hidrogeológicas y del entorno geológico asociado.

El trabajo se desarrolla en el marco del proyecto “Instalación y mejoramiento del Servicio de Agua de los Sistemas de Riego por Aspersión Condorccota y Lont’accota”, ejecutado por el Gobierno Regional del Cusco a través del Proyecto Especial Plan MERISS INKA, el cual busca optimizar el uso del recurso hídrico para fines agrícolas.

La investigación se estructura de manera progresiva en diferentes capítulos. En el Capítulo II se describe la metodología empleada, basada en un enfoque mixto que integra información geológica e hidrogeológica previa con datos obtenidos mediante investigaciones de campo, ensayos geofísicos, geotécnicos, hidráulicos e hidroquímicos. El Capítulo III presenta los antecedentes y las bases teóricas del estudio. En el Capítulo IV se desarrolla la caracterización geomorfológica y geológica del área, identificándose unidades que evidencian una marcada heterogeneidad litológica que condiciona el comportamiento hidrogeológico.

El Capítulo V aborda el análisis geotécnico del eje de presa, incluyendo excavaciones, niveles freáticos y ensayos de permeabilidad, que permiten evaluar las condiciones de estanqueidad del vaso lacustre. En el Capítulo VI se presentan los estudios geofísicos, mediante tomografía eléctrica y sondajes eléctricos verticales, que permiten identificar zonas saturadas, niveles freáticos y la distribución de materiales en el subsuelo.

En el Capítulo VII se integra la caracterización hidrogeológica del sistema, incluyendo el análisis de fuentes de agua, niveles freáticos, dirección de flujo subterráneo, clasificación de unidades hidrogeológicas, hidroquímica, balance hídrico y modelamiento conceptual y numérico, lo que permite comprender la dinámica del sistema.

En el Capítulo VIII se realiza el análisis integral de la viabilidad del represamiento, evidenciándose que el represamiento es técnicamente viable mediante la impermeabilización del vaso con geomembrana. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones, proponiéndose como alternativa técnica la implementación de reservorios nocturnos para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico disponible.

CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES

1.1 Ubicación y acceso

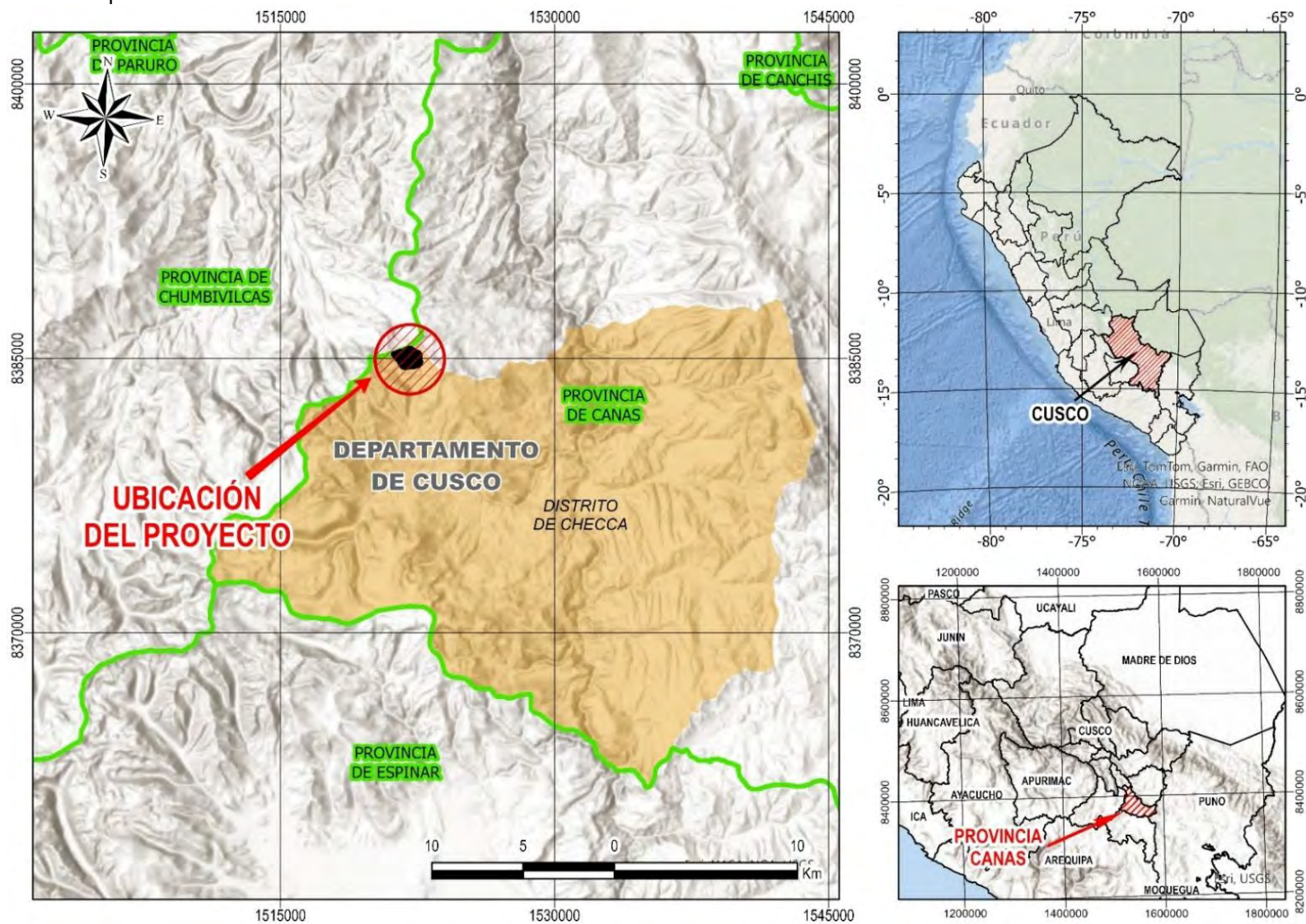
El área de estudio se ubica en el distrito de San Andrés de Checca, provincia de Canas, en la región Cusco (ver Figura 01 y Mapa 01 – Ubicación política). El acceso desde la ciudad de Cusco se realiza principalmente por la vía asfaltada hacia el sur, con un recorrido aproximado de 171 km, cuyo tiempo de viaje varía entre 2 h 30 min y 4 h 30 min, dependiendo del medio de transporte y de las condiciones de la vía.

La ruta inicia saliendo de la ciudad de Cusco en dirección a Urcos, continuando por la carretera principal hacia Sicuani y posteriormente tomando el desvío hacia el sector de Checca. La mayor parte del trayecto se desarrolla por carretera asfaltada, lo que facilita el acceso a la zona. En el tramo final, se continúa por una vía carrozable en dirección a la comunidad de Quehue, tomando luego el desvío por el puente Q'eswachaka hasta llegar al área de estudio.

1.2 Ubicación Hidrográfica

El área de estudio se localiza en la cabecera de la microcuenca Caquincora, la cual forma parte de la cuenca del Alto Apurímac (ver Mapa 02 – Ubicación hidrográfica).

Figura 1. Ubicación política del área de estudio



Nota: Modificado de ESRI Topographic Map (2026).

1.3 Planteamiento del problema

A nivel nacional, Perú presenta una marcada variabilidad en la disponibilidad hídrica, influida por la diversidad geográfica y climática. En las cuencas hidrográficas andinas, las comunidades ubicadas en los tramos altos suelen contar con mayor acceso al agua que las de los tramos medios y bajos (AGRO RURAL, 2021; ANA, 2023).

En el distrito de San Andrés de Checca, provincia de Canas, Cusco, la laguna Condorccota representa un potencial importante para el almacenamiento de agua a través de la construcción de una presa. Este proyecto podría garantizar un suministro más estable para la agricultura, el consumo humano y otras actividades económicas de la zona. Sin embargo, las fluctuaciones estacionales, la ausencia de infraestructura adecuada y las limitaciones hidrogeológicas actuales generan escasez hídrica recurrente, afectando la calidad de vida y el desarrollo económico local.

Por ello, surge la necesidad de evaluar con detalle las características hidrogeológicas de la laguna Condorccota y su entorno para determinar la factibilidad técnica y ambiental del represamiento, asegurando un manejo sostenible de los recursos hídricos y minimizando posibles impactos negativos.

1.4 Problema general

¿Cómo influyen las características hidrogeológicas de la laguna Condorccota y su área de influencia, en la viabilidad del proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas - Cusco, 2024?

1.5 Problemas específicos

1. ¿Cuáles son las variables hidrometeorológicas, la calidad fisicoquímica del agua y la morfometría (superficie y volumen) de la laguna Condorccota que determinan su disponibilidad hídrica actual?
2. ¿Cuáles son las unidades geológicas y litoestratigráficas del área de estudio, y qué estructuras geológicas influyen en la estabilidad del vaso y la capacidad de almacenamiento de la laguna Condorccota?
3. ¿Cómo la geomorfología y las condiciones geotécnicas del vaso lacustre (fondo y contorno) afectan las pérdidas potenciales por filtración en el escenario de represamiento de la laguna Condorccota?
4. ¿Cuáles son los manantiales sub-acuáticos presentes en la laguna Condorccota y cuál es su contribución cualitativa a la dinámica hídrica del sistema lacustre?
5. ¿Cuál es el balance hídrico de la laguna Condorccota (incluyendo entradas, salidas y almacenamiento), y cómo cuantifica los flujos de recarga y descarga subterránea en el sistema hidrogeológico?

1.6 Justificación de la investigación

Desde el punto de vista teórico, esta investigación aportará al conocimiento científico sobre los sistemas hidrogeológicos en regiones andinas de alta montaña. Proporcionará datos empíricos originales sobre la interacción entre el sistema hidrológico superficial y el subterráneo, la permeabilidad del suelo, las características de los acuíferos y la dinámica de los manantiales sub-acuáticos en la laguna Condorccota. Estos resultados enriquecerán el entendimiento de los procesos hidrogeológicos en entornos similares y podrán servir como base para el desarrollo de modelos hidrogeológicos más precisos en la región andina.

A nivel práctico y social, el estudio tiene una alta relevancia para la población de San Andrés de Checca y la provincia de Canas, Cusco. La laguna constituye una fuente estratégica de agua para la agricultura. La evaluación hidrogeológica detallada que se realiza hará posible a las autoridades regionales y locales tomar decisiones informadas sobre la gestión sostenible del recurso hídrico, evaluar la viabilidad del proyecto de represamiento y establecer un precedente técnico para futuros proyectos similares en el ámbito andino.

Además, la investigación ofrece implicaciones ambientales y técnicas significativas. Al caracterizar las condiciones geotécnicas, geomorfológicas y hidrodinámicas del vaso lacustre, se identificarán posibles riesgos asociados al represamiento (como filtraciones o inestabilidad del terreno) y se propondrán estrategias de mitigación que garanticen la sostenibilidad ambiental y técnica del proyecto.

Finalmente, desde el análisis metodológico, la integración de técnicas hidrometeorológicas, hidrogeoquímicas, geofísicas no invasivas y análisis de balance hídrico en un modelo conceptual del sistema hidrogeológico representa un enfoque innovador y replicable. Esta metodología puede servir como guía para futuras evaluaciones hidrogeológicas en lagunas de origen glaciar o zonas de alta montaña, mejorando la precisión y la eficiencia de los estudios de recursos hídricos en contextos similares.

En síntesis, esta investigación no solo aporta al avance del conocimiento científico en hidrogeología andina, sino que también genera beneficios directos para la comunidad local, las autoridades y el manejo sostenible del agua en la región.

1.7 Objetivo general

Determinar la viabilidad del represamiento de la laguna Condorccota a partir de la evaluación de sus características hidrogeológicas y del área de influencia.

1.8 Objetivos específicos

1. Caracterizar las variables hidrometeorológicas, la calidad fisicoquímica del agua y la morfometría (superficie, volumen) de la laguna Condorccota para determinar la disponibilidad hídrica actual.
2. Caracterizar las unidades geológicas y litoestratigráficas del área de estudio e identificar las estructuras geológicas que puedan influir en la estabilidad del vaso y la capacidad de almacenamiento.
3. Analizar la geomorfología y las condiciones geotécnicas del vaso lacustre (fondo y contorno) para cuantificar las pérdidas potenciales por filtración en el escenario de represamiento.
4. Identificar y caracterizar los manantiales sub-acuáticos presentes en la laguna Condorccota para establecer su contribución cualitativa a la dinámica hídrica del sistema lacustre.
5. Evaluar el balance hídrico de la laguna (entradas y salidas) para cuantificar los flujos de recarga y descarga subterránea del sistema hidrogeológico.

1.9 Hipótesis General

Las características hidrogeológicas del área de influencia de la laguna Condorccota en San Andrés de Checca, Canas – Cusco (2024), tienen un impacto significativo en la viabilidad técnica del proyecto de represamiento, determinando las oportunidades de almacenamiento (por recarga y estabilidad geotécnica) y las limitaciones por filtraciones y flujos subterráneos.

1.10 Hipótesis específicas

1. Las variables hidrometeorológicas, la calidad fisicoquímica del agua (pH, conductividad, sólidos disueltos) y la morfometría (superficie y volumen) de la laguna Condorccota determinan una disponibilidad hídrica suficiente para el represamiento, aunque dependerá de la cuantificación precisa de volúmenes y aptitud del agua para usos agrícolas y humanos.
2. Las unidades geológicas y litoestratigráficas del área (rocas volcánicas y sedimentos lacustres) presentan condiciones favorables para la estabilidad del vaso y la capacidad de almacenamiento, pero las estructuras geológicas identificadas (fallas o pliegues) generan riesgos de filtración o inestabilidad que deberán evaluarse.
3. La geomorfología del vaso lacustre (pendientes, fondo y contorno) y las condiciones geotécnicas (permeabilidad, cohesión y resistencia al corte) permiten pérdidas por filtración manejables, pero la viabilidad hidráulica dependerá de su cuantificación exacta y de la factibilidad de medidas de impermeabilización.

4. Los manantiales subacuáticos identificados en la laguna Condorccota contribuyen significativamente a la recarga natural y sostenibilidad del almacenamiento tras el represamiento, aunque su aporte real deberá confirmarse mediante caracterización y monitoreo.
5. El balance hídrico de la laguna presenta un saldo positivo (recarga > descarga) que favorece un almacenamiento estable, pero su sostenibilidad depende estrictamente de la cuantificación precisa de los flujos de recarga y descarga subterránea y su interacción con el nuevo régimen hidráulico.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

La presente investigación es de enfoque mixto (Hernández-Sampieri, Fernández Collado & Baptista Lucio, 2014). El enfoque cualitativo se basa en la revisión, análisis e interpretación técnica de la información hidrogeológica, geológica y geofísica proveniente de investigaciones previas en el área de la laguna. Asimismo, el enfoque cuantitativo se aplica de manera complementaria mediante el análisis de datos numéricos obtenidos de estudios geofísicos, ensayos hidráulicos e información hidroquímica existente, con la finalidad de respaldar las interpretaciones realizadas.

Se presenta un nivel descriptivo–analítico (Hernández-Sampieri, Fernández Collado & Baptista Lucio, 2014), ya que se caracteriza el sistema hidrogeológico del área de estudio y se evalúan sus principales componentes y condiciones a partir de información existente.

El diseño de investigación es no experimental de corte transversal (Hernández-Sampieri, Fernández Collado & Baptista Lucio, 2014), ya que se evaluaron las condiciones hidrogeológicas de la laguna Condorccota en su estado natural, sin manipular las variables de estudio. Asimismo, es transversal porque la información fue recopilada en un periodo específico, permitiendo analizar el comportamiento del sistema en un momento determinado.

Los métodos de recolección de información utilizadas corresponden principalmente a la revisión documental y al análisis de información secundaria. Esta información incluye boletines geológicos del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), informes hidrogeológicos y geofísicos, estudios geotécnicos, mapas temáticos, bases de datos hidroquímicos y antecedentes técnicos relacionados con el área de estudio.

Como instrumentos de apoyo se emplearon sistemas de información geográfica (SIG), software especializado para el procesamiento e interpretación de datos hidrogeológicos y herramientas de análisis cartográfico.

2.1 Etapas metodológicas

La metodología del estudio se estructuró en las siguientes subetapas:

2.1.1 *Pre-campo*

- Recopilación y análisis de información secundaria: Consistió en la recopilación, revisión y sistematización de información proveniente de estudios geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y geotécnicos previos desarrollados en el área de la laguna y su entorno. Esta etapa permitió

establecer el marco conceptual y técnico necesario para la evaluación hidrogeológica del área de estudio.

- **Evaluación de datos geofísicos, geotécnicos e hidroquímicos:** Esta subetapa comprendió la revisión, análisis e interpretación integrada de los datos geofísicos, geotécnicos e hidroquímicos disponibles para el área de estudio, obtenidos a partir de investigaciones y estudios técnicos previos. El objetivo fue evaluar las condiciones del subsuelo y del sistema hidrogeológico asociado a la laguna, considerando la complementariedad de cada tipo de información.

La evaluación de los datos geofísicos incluyó el análisis de resultados de tomografía eléctrica, enfocándose en la interpretación de valores de resistividad eléctrica en relación con la litología, el grado de saturación y la posible presencia de zonas permeables o fracturadas. Esta información permitió inferir la geometría del subsuelo y la continuidad lateral y vertical de las unidades hidroestratigráficas.

Los datos geotécnicos fueron analizados con la finalidad de caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales geológicos, tales como tipo de suelo o roca, compacidad, consistencia y comportamiento mecánico, aspectos relevantes para evaluar las condiciones de estabilidad y su relación con el comportamiento hidrogeológico del área de estudio.

Por su parte, la evaluación de la información hidroquímica se orientó al análisis de la composición química de las aguas superficiales y subterráneas disponibles, con el propósito de identificar posibles procesos de interacción agua-roca, condiciones de recarga, evolución hidroquímica y la relación entre la laguna y el sistema acuífero. La integración de estos datos permitió sustentar de manera técnica las interpretaciones hidrogeológicas realizadas.

2.1.2 *Campo*

Se desarrollaron actividades puntuales de verificación en campo con el objetivo de contrastar la información secundaria con las condiciones observadas en el área de estudio, tales como características geomorfológicas, afloramientos geológicos, evidencias de circulación de agua subterránea y relación entre la laguna y su entorno geológico.

2.1.3 *Post-campo*

- **Procesamiento e interpretación en gabinete:** Comprendió el procesamiento, análisis e integración de la información recopilada mediante el uso de herramientas SIG y software especializado. En esta etapa se elaboraron mapas temáticos, perfiles interpretativos y esquemas conceptuales, los cuales permitieron interpretar el comportamiento hidrogeológico del sistema asociado a la laguna y evaluar su viabilidad para fines de represamiento.

- Criterios de análisis e interpretación: La evaluación hidrogeológica se realizó considerando criterios técnicos tales como litología, estructura geológica, permeabilidad de los materiales, condiciones de recarga y descarga, comportamiento hidráulico del sistema acuífero y la interacción entre la laguna y el medio geológico circundante. Asimismo, se consideraron criterios de calidad y confiabilidad de la información, priorizando estudios con metodologías validadas, adecuada cobertura espacial y coherencia técnica entre resultados.

2.2 Limitaciones del estudio

Entre las principales limitantes del estudio se encuentra la dependencia de la calidad, alcance y resolución de la información proveniente de estudios previos, lo cual condiciona el nivel de detalle del análisis hidrogeológico realizado.

Adicionalmente, no fue posible calcular el caudal de aporte de los manantiales asociados al sistema hidrogeológico de la laguna, debido a que estos se encuentran por debajo del nivel de agua de la laguna, lo que impidió la identificación, medición directa y aforo de dichos puntos de descarga. En consecuencia, la contribución de los manantiales al balance hídrico del sistema fue evaluada de manera cualitativa, a partir de información secundaria y criterios hidrogeológicos.

Finalmente, el relieve del vaso de la laguna no cuenta con información batimétrica directa. La geometría del vaso fue estimada mediante modelamiento digital utilizando software especializado, lo cual permitió una aproximación razonable a su configuración interna.

3.1 ANTECEDENTES

3.1.1 *Internacionales*

Estudio hidrogeológico del acuífero localizado al este del lago de Valencia, municipio Libertador, estado Aragua (Otamendi, 2021). *Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela.*

Tuvo como objetivo caracterizar hidrogeológicamente el acuífero situado al este del lago de Valencia para extraer agua subterránea de forma eficaz y responsable, preservando el acuífero. Para el desarrollo del objetivo fue necesario crear un modelo conceptual y un mapa hidrogeológico del acuífero observado, por medio de la siguiente metodología, primero, se analizaron registros eléctricos de pozos próximos a la zona de estudio para caracterizar la litología, segundo, se corroboró la interpretación utilizando métodos geoelectricos en la zona de estudio, tercero, se identificaron los niveles piezométricos en los pozos de la región analizada a lo largo del tiempo, cuarto, se estimaron teóricamente los parámetros hidráulicos del acuífero analizado, cinco, se obtuvieron los indicadores de conductividad eléctrica y pH en varios pozos presentes en la región analizada y por último, se recogieron datos de precipitaciones en la zona de estudio a lo largo de todo el periodo de investigación. Los resultados indicaron que, el acuífero al este del lago de Valencia es de material arcilloso con lentes arenosas saturadas de agua, situado, tiene una longitud de 90 metros y es ideal para uso agroindustrial, además, posee excelente transmisividad y alta conductividad hidráulica.

- Aporte: La investigación aporta una metodología hidrogeológica que incluye análisis de registros eléctricos, monitoreo piezométrico y modelos conceptuales, útil para caracterizar acuíferos y evaluar su viabilidad en proyectos de aprovechamiento hídrico.

Recarga de sistemas lénticos en zonas de páramo casi de estudio: Origen de la recarga del sistema laguna negra, localizada en el páramo de ojetá a partir de la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual (Alvarado, 2022). *Tesis de maestría, Universidad Antonio Nariño.*

Tuvo como propósito elaborar un modelo hidrogeológico conceptual caracterizando el territorio y cartografiando sus unidades para integrar datos geológicos, estratigráficos y estructurales. Se utilizaron tres puntos del método geofísico en la zona (sondeo eléctrico vertical) para determinar la disposición de las capas en el subsuelo y sus potencias, basándose en las correlaciones lito-geofísicas, los resultados de resistividad obtenidos y los datos geológicos estudiados. En consecuencia, se encontraron litologías relacionadas con la formación Une (Kiu) y la formación Fomeque (Kif), así como depósitos cuaternarios relacionados con los depósitos lagunares (Ql) y coluvio-glaciares (Qcg). Estas

estructuras se disponen en un anticlinal erosionado que definió la geometría de la zona y la disposición de las capas. Por último, la información obtenida se combinó para generar el modelo hidrogeológico conceptual, que permitió comprender el comportamiento hidrogeológico del territorio, las posibles interacciones hidrogeológicas con el entorno y la disposición hidrogeológica de las unidades identificadas.

- Aporte: La investigación aporta una metodología para crear un modelo hidrogeológico conceptual que integra datos geológicos y geofísicos mediante ArcGIS y sondeos eléctricos, útil para comprender la dinámica hidrogeológica y la disposición de capas en proyectos de evaluación y manejo de recursos hídricos.

Hidrogeología y Balance Hídrico de la Cuenca Lacustre de Laguna Rayenantú, Ubicada en Comuna de Santa Juana, Región del Biobío (Vega, 2024). *Tesis de licenciatura, Universidad de Concepción*.

Tuvo como objetivo crear un modelo hidrogeológico de la cuenca lacustre de la Laguna Rayenantú, para lo cual se desarrollaron dos expediciones de campo y se visitaron un total de 14 puntos de la región, además de ello, se recopilaron los antecedentes disponibles, acompañados de revisión de la literatura y estudios que aportan información de los últimos 30 años. Con la recopilación de los antecedentes se realizó cálculos de balance hídrico y la creación de un modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio para confirmar la hipótesis del trabajo. Se utilizó el número de curva EASY BALANCE y el método de hoja de cálculo. Se consideraron dos periodos: un primer periodo (P1) que incluye los años 1989 a 2004 y un segundo periodo (P2) que incluye los años 2005 a 2019. A partir de los datos obtenidos, se elaboraron diagramas y tablas de precipitación, escorrentía e infiltración, derivando en un aumento de la escorrentía superficial, que pasó de 709,7 [mm/año] a 777,80 [mm/año], lo que representa un aumento del 8,21%, por otro lado, la disminución de la infiltración de 476,30 [mm/a] a 318,20 [mm/a], que equivale a 48,27%, siendo coherente con la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura en la zona de estudio. El climático también afectó al océano y la zona de la comunidad de Santa Juana también fue afectada por la continua expansión urbana, que ha aumentó en un 85,7% desde 1989.

- Aporte: Es posible decir que, el balance hídrico de la laguna Rayenantú esté influenciado tanto por el cambio climático como por la intervención humana en la zona.

Effects of morphology and sediment permeability on coastal lagoons' hydrological patterns (Warren et al., 2022). *Research papers, Journal of Hydrology Volume 612*.

El estudio se centra en analizar la dinámica hidrológica y evaluar los esfuerzos de restauración y conservación de cuatro lagunas de nueva construcción con dos lagunas naturales en las marismas de La Pletera. Con el fin de evaluar las variaciones en el volumen de agua, salinidad y dinámica de circulación en las lagunas (entradas, salidas y evaporación de aguas superficiales y subterráneas), se utilizó el Modelo General de Lagos para comparar y comprender mejor cómo influyen estos parámetros en el comportamiento hidrológico de cada laguna, se combinó la información sobre las características litológicas subyacentes y la morfometría de las lagunas. Los resultados indicaron que las lagunas naturales de mayor antigüedad presentan patrones de confinamiento más definidos, asociados a morfologías más profundas, una menor circulación del agua, mayores variaciones anuales de la salinidad y un menor efecto de la evaporación. Asimismo, la presencia de capas de baja permeabilidad contribuyó a reducir la variabilidad de los niveles más altos de salinidad. En contraste, en función de la presencia o ausencia de dichas capas, tres de las cuatro lagunas recientes presentaron morfologías similares, menores profundidades y mayores tasas de evaporación, evidenciando distintos patrones de circulación del agua. En ese sentido, se concluye que la morfometría de la laguna puede favorecer la estabilidad hidrológica y de la salinidad; sin embargo, la presencia o ausencia de capas de baja permeabilidad influye en las fluctuaciones de salinidad, tal como lo evidencian los resultados.

- Aporte: La investigación aporta un análisis detallado sobre cómo la morfometría de las lagunas y la permeabilidad de los sedimentos influyen en la estabilidad hidrológica y en los patrones de salinidad.

3.1.2 Nacionales

La influencia de estudios geológicos y geotécnicos en las ampliaciones de plazo de obras hidráulicas en una unidad ejecutora del departamento de Apurímac, 2017 al 2021 (Cuchillo Cayturo, 2023). *Tesis de maestría, Universidad Andina del Cusco*.

Analizó la influencia de los estudios geológicos y geotécnicos en las ampliaciones de plazo durante la ejecución de obras hidráulicas. Su objetivo principal fue determinar la relación entre la calidad de dichos estudios y las ampliaciones de plazo en una unidad ejecutora específica. La metodología adoptada fue de enfoque cuantitativo, con nivel explicativo, diseño no experimental y alcance correlacional. La población y muestra estuvieron conformadas por 10 residentes de obra de la unidad ejecutora, y se emplearon encuestas estructuradas mediante cuestionarios como instrumentos de recolección de datos. Los resultados estadísticos, obtenidos a través de la prueba de correlación

bivariada Rho de Spearman, arrojaron un coeficiente de -0.621, lo que evidencia una relación significativa entre los estudios geológicos y geotécnicos y las ampliaciones de plazo.

- Aporte: Proporciona evidencia sobre la relación entre la calidad de los estudios geológicos y geotécnicos y la disminución de las ampliaciones de plazo en obras hidráulicas.

3.1.3 Regionales

Estudio hidrogeológico para determinar el potencial hídrico en la microcuenca de Ccorao-Mandorani, distrito de San Sebastián, provincia de Cusco, región Cusco-2022 (López, 2023). *Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.*

Tuvo como objetivo determinar el potencial hídrico y proponer alternativas de intervención para el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos de la zona de estudio, orientados al consumo humano y la agricultura, mediante una metodología de tipo explicativo–descriptivo. Para ello, se realizó un análisis hidroquímico, en el que se identificaron facies hidroquímicas de tipo sulfato-cálcico y bicarbonato-cálcico. Los resultados indicaron que la calidad del agua varía de mediocre a buena para consumo humano; sin embargo, su uso para riego es posible bajo ciertas precauciones. En la cuenca, el almacenamiento hídrico en los acuíferos se estimó en 2598,18 mm/año, representando el balance entre entradas y salidas de agua. Finalmente, mediante prospección geofísica con tomografía eléctrica y el método de potencial espontáneo, se identificaron distintos tipos de acuíferos. Los acuíferos detríticos no consolidados presentan volúmenes de agua significativos a profundidades entre 20 y 40 metros, mientras que los acuíferos sedimentarios fisurados alcanzan profundidades de hasta 40 metros.

- Aporte: La investigación aporta una metodología para determinar el potencial hídrico y evaluar la calidad de agua subterránea mediante análisis hidroquímicos y prospección geofísica, proporcionando un marco útil para la identificación y caracterización de acuíferos.

Estudio geológico y geotécnico del terreno de fundación para la construcción de la presa Huisillopunku – Santo Tomás (Gutierrez Quispe & Quispe Lacuta, 2022). *Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.*

Se abordó el análisis del terreno destinado a la construcción de una represa en el sector de Huisillopunku, ubicado en el cuadrángulo de Cayarani 30r, a una altitud promedio de 4807 m.s.n.m. La investigación tuvo como objetivo evaluar la idoneidad geológica y geotécnica del sitio para la fundación de la presa, considerando la morfología del valle glaciar del Pleistoceno, caracterizado por laderas de pendientes variables y un fondo de valle de 68 Ha. La metodología incluyó el análisis de la composición geológica, que reveló la presencia de rocas volcánicas cenozoicas y depósitos cuaternarios cubriendo

el macizo rocoso en un 95%. Se identificaron importantes deformaciones estructurales y tectónicas en la zona, con fallas inversas y sistemas de fallas regionales y locales. Además, se analizaron parámetros morfológicos junto con información meteorológica del SENAMHI para la estimación del balance hídrico de la cuenca. Los resultados evidencian que la región presenta condiciones geológicas complejas, aunque favorables para la construcción de una represa, destacando una evaluación positiva del terreno en cuanto a su capacidad para soportar la infraestructura proyectada.

- Aporte: La investigación aporta una caracterización detallada de la geología, estructura tectónica e hidrología en áreas de alta montaña.

Evaluación de recarga del acuífero para incrementar captación de agua utilizando qochas en cabecera de cuenca río Sañu, Espinar 2021 (Ccahua Suni, 2021). *Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo*.

Evaluó el potencial de implementación de qochas para mejorar la recarga del acuífero en la región. Los objetivos principales fueron identificar los parámetros hidrogeológicos del área de embalse de la Qocha, realizar el análisis hidrológico para estimar la recarga del acuífero y proponer el diseño técnico de un dique para una qocha de infiltración. La metodología integró recopilación de información, trabajo de campo y gabinete, bajo un enfoque cuantitativo y de diseño no experimental. Se seleccionó la Qocha Manqqwere como caso de estudio, aplicándose levantamiento topográfico, pruebas de permeabilidad, aforamiento volumétrico y ensayos geotécnicos de laboratorio. Los resultados indican una conductividad hidráulica moderada ($K = 1.32 \text{ m/día}$) y una oferta hídrica de $125,654 \text{ m}^3/\text{año}$, asociada a precipitaciones y un caudal máximo de $2.24 \text{ m}^3/\text{s}$. La propuesta de diseño consideró un dique de tierra de 3 m de altura con cimentación de piedra y revestimiento de geomembrana, orientado a incrementar la captación de agua. Finalmente, se estimó un incremento teórico del 34.36% en la disponibilidad de agua potable para el centro poblado de Machupunte.

- Aporte: Se propone una metodología para la evaluación de la recarga de acuíferos, integrando pruebas de permeabilidad y análisis hidrológicos, además de plantear diseños técnicos de diques, lo cual resulta útil para proyectos de captación y gestión del recurso hídrico en cuencas de alta montaña.

Estudio hidrogeológico con fines de determinar el potencial hídrico en la cuenca de Cachimayo, dist. Santiago, prov. Cusco, reg. Cusco – 2019 (Apaza & Huamán, 2020). *Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.*

Tuvo como objetivo determinar las características hidrológicas de la cuenca del río Cachimayo, calcular su balance hídrico, así como identificar y caracterizar las unidades estructurales, geomorfológicas, geológicas e hidrogeológicas mediante el inventario de manantiales, análisis hidroquímico y evaluación de la permeabilidad, entre otros criterios. La investigación se desarrolló bajo un enfoque explicativo–descriptivo. La cuenca presenta la codificación 4994969. Los resultados climáticos indican una precipitación media anual de 773,55 mm, con una temperatura media de 7,95 °C, una máxima de 17,45 °C y una mínima de -1,78 °C. En cuanto al balance hídrico, se estimó una infiltración de 65,07 mm/año, una escorrentía superficial de 305,50 mm/año y una evapotranspiración real de 440,74 mm/año. Desde el punto de vista geomorfológico, mediante el análisis de pendientes e interpretación del relieve, se identificó el predominio de laderas con cobertura de pinos altamente degradados, con pendientes entre 25 % y 50 %, abarcando gran parte del área de estudio. Asimismo, se reconocen zonas de montañas bajas con pendientes variables entre 8 % y 75 %, y áreas de menor pendiente entre 4 % y 15 %, ubicadas principalmente en la parte baja de la cuenca.

- Aporte: La investigación aporta una metodología integral para evaluar el potencial hídrico de una cuenca, utilizando el análisis de balance hídrico, hidroquímica, permeabilidad y características geomorfológicas.

3.1.4 Locales

El área de influencia de la laguna Condorccota, ha sido objeto de estudios previos con el objetivo de evaluar su potencial para el desarrollo de infraestructura hidráulica orientada al almacenamiento y regulación de recursos hídricos. En ese marco, se han desarrollado investigaciones que constituyen la base técnica para el presente estudio hidrogeológico.

En el año 2014, el Proyecto Especial del Gobierno Regional del Cusco – Plan MERISS INKA, presentó una Evaluación Ambiental Preliminar del área donde se contempla la construcción de la represa. Este estudio tuvo como finalidad identificar de manera general los posibles impactos ambientales derivados del proyecto de represamiento, así como establecer lineamientos técnicos y ambientales para su desarrollo. Entre sus aportes más relevantes, se encuentran la caracterización física del entorno, el análisis del uso actual del suelo, y una primera aproximación al comportamiento hídrico superficial de la zona.

Posteriormente, en el año 2021, se elaboró el Estudio Hidrogeológico de la Represa Condorccota – San Andrés de Checca, Canas – Cusco, que tuvo como finalidad caracterizar las condiciones hidrogeológicas, geotécnicas y geomorfológicas del área de la laguna para evaluar la viabilidad del represamiento, mediante la elaboración de un modelo conceptual del sistema hídrico y del emplazamiento del dique de la presa.

Ambos antecedentes han sido fundamentales para el planteamiento del presente trabajo, el cual busca complementar y actualizar la información hidrogeológica existente, mediante una evaluación detallada que permita sustentar la viabilidad del represamiento de la laguna.

3.2 DEFINICIONES

3.2.1 *Laguna*

Cuerpo de agua léntico, de menor extensión y profundidad que un lago, y generalmente alimentado por precipitación directa, escorrentía superficial y/o aportes subterráneos. Su tamaño y régimen hidrológico pueden variar estacionalmente (Wetzel, 2001). En este estudio, se considera una depresión natural o seminatural que acumula agua, cuya evaluación hidrogeológica tiene por finalidad determinar su viabilidad y características para su eventual transformación en un embalse mediante represamiento.

Figura 2. Tipos de lagos en función de su origen.



Fuente: INTEF; ilustración de J. A. Bermúdez (CC).

3.2.2 Represamiento

El represamiento es el proceso mediante el cual se construye una presa o estructura de cierre transversal en el cauce de un río, quebrada o en la salida de una laguna con el fin de retener y almacenar agua, formando un embalse artificial que permite regular, almacenar y gestionar el recurso hídrico para distintos usos (Chow, 1959).

3.2.3 Impermeabilización con geomembrana

Sistema de sellado hidráulico que emplea una lámina sintética de muy baja permeabilidad, generalmente fabricada de polímeros como polietileno de alta densidad (HDPE), PVC o polipropileno, cuya función es impedir o reducir significativamente la infiltración y migración del agua a través del suelo o de una estructura hidráulica.

Este sistema se utiliza ampliamente en reservorios, canales, presas, depósitos de relaves y obras geotécnicas, donde la geomembrana actúa como una barrera continua e impermeable que

minimiza las pérdidas por filtración, mejora la eficiencia hidráulica y protege el entorno frente a procesos de erosión o contaminación (Rowe y Sangam, 2002; Vorlet y De Cesare, 2024).

3.2.4 *Reservorio nocturno*

Estructura hidráulica cuya función es almacenar, durante la noche, el agua proveniente de una fuente de suministro continuo, para su utilización durante el día en actividades de riego. Su principal beneficio radica en el aprovechamiento integral del caudal disponible, permitiendo concentrar la distribución del agua en horario diurno, lo que mejora la eficiencia operativa y facilita las labores de riego (Willet, 1998).

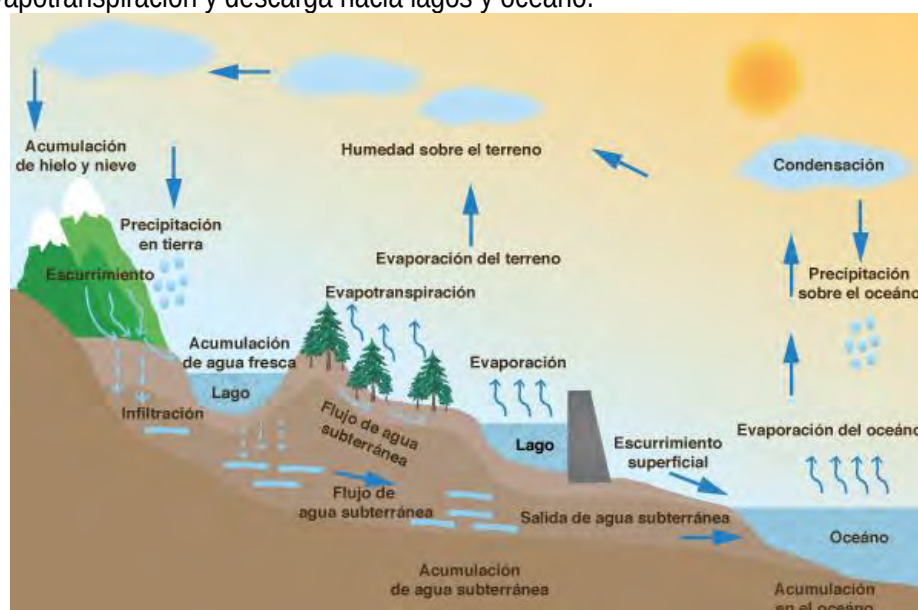
3.2.5 *Cuenca hidrográfica*

Área de terreno delimitada por divisorias topográficas en la cual el agua procedente de la precipitación drena hacia un punto de salida común, generalmente un río, lago o laguna (Chow, Maidment y Mays, 1988).

3.2.6 *Balance hídrico*

Balance de todas las entradas y salidas de agua en un sistema hidrológico (como una cuenca o un embalse) durante un período determinado. Permite cuantificar la disponibilidad de agua y entender los procesos de recarga, descarga, evaporación, precipitación y escorrentía, siendo fundamental para la planificación y gestión del recurso (Dingman, 2002).

Figura 3. Diagrama del ciclo hidrológico que muestra la relación entre aguas superficiales y subterráneas, destacando los procesos de precipitación, infiltración, escurrimiento superficial, flujo subterráneo, evapotranspiración y descarga hacia lagos y océano.



Fuente: Ponce (2020).

3.2.7 El agua subterránea en el ciclo hidrológico

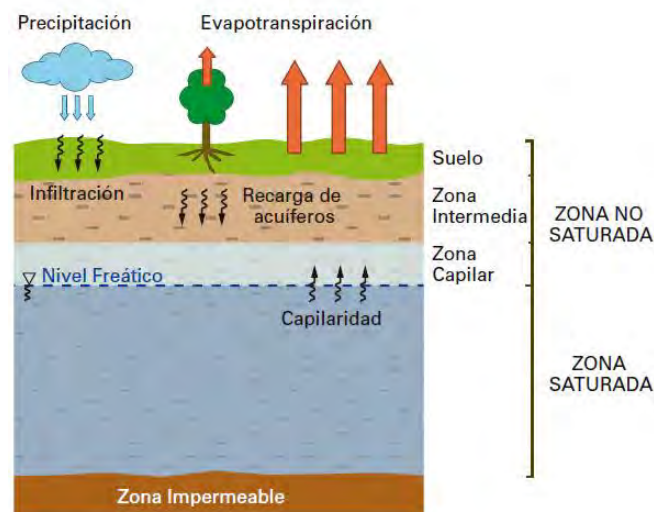
Se refiere a la componente del ciclo hidrológico que involucra el almacenamiento, movimiento y recarga del agua en el subsuelo, dentro de acuíferos y otras formaciones geológicas permeables, interactuando con el agua superficial (ríos, lagunas) y la atmósfera a través de procesos como infiltración, recarga, flujo subterráneo y descarga (Fetter, 2018). El agua subterránea constituye una reserva crítica del recurso hídrico, representando cerca del 30% del agua dulce existente en el planeta (Heath, 2020).

A menudo subestimada por su invisibilidad, representa una porción significativa del agua dulce existente en el planeta y ejerce un papel crucial en el mantenimiento de ecosistemas, la alimentación de cuerpos de agua superficiales y el suministro para diversas actividades humanas (Freeze & Cherry, 1979).

Dentro del ciclo hidrológico, el agua subterránea se interconecta con otros componentes a través de varios procesos:

- **Infiltración:** Es el proceso a través del cual el agua superficial (proveniente de la precipitación, ríos, lagos o lagunas) penetra en el suelo y se mueve hacia abajo a través de la zona no saturada (zona vadosa) hasta alcanzar la zona saturada, donde todos los poros y fracturas están llenos de agua (Custodio & Llamas, 1983).

Figura 4. Zonas en el subsuelo según el comportamiento del agua infiltrada



Fuente: Martínez et al. (2005).

- **Recarga:** Es el proceso mediante el cual el agua ingresa a la zona saturada de un acuífero, contribuyendo a la reposición de las reservas de agua subterránea. La recarga puede ocurrir

directamente por la infiltración de la precipitación, la escorrentía superficial, o indirectamente desde ríos, lagos y lagunas que se encuentran hidráulicamente conectados con el acuífero (Winter et al., 1998).

- **Flujo Subterráneo:** Una vez en el acuífero, el agua subterránea se mueve lentamente bajo la influencia de la gravedad, desde zonas de mayor potencial hidráulico (recarga) hacia zonas de menor potencial (descarga). La velocidad y dirección de este flujo están controladas por las propiedades hidráulicas de la formación geológica (conductividad hidráulica, gradiente hidráulico) (Fetter, 2018).
- **Descarga:** Es el proceso por el cual el agua subterránea sale del acuífero para alimentar cuerpos de agua superficiales como ríos, arroyos, lagos, lagunas, manantiales, humedales o el océano. Esta descarga es fundamental para mantener el caudal base de los ríos y los niveles de los cuerpos lacustres, especialmente durante períodos de baja o nula precipitación (Hem, 1985).

3.2.8 *Propiedades de los acuíferos y flujo de agua subterránea*

Las propiedades de los acuíferos se refieren a las características físicas e hidráulicas de las formaciones geológicas permeables que determinan su potencial para almacenar, transmitir y suministrar agua subterránea (Fetter, 2018). Estas propiedades incluyen parámetros como porosidad, permeabilidad, conductividad hidráulica y almacenamiento, que son fundamentales para evaluar el comportamiento hidrogeológico de un acuífero.

3.2.8.1 Porosidad

Proporción del volumen total de una formación geológica saturada por espacios vacíos, como poros o fracturas, expresada como un porcentaje o fracción (Fetter, 2018). La porosidad efectiva, que incluye solo los poros interconectados que permiten el flujo de agua, es crítica para determinar la capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea.

En evaluaciones hidrogeológicas para repesamiento, la porosidad del acuífero es fundamental para evaluar el volumen de agua que puede almacenarse y transmitirse bajo el embalse (Anderson et al., 2015). Un acuífero poroso con alta porosidad efectiva (p. ej., arena con 30%) puede generar filtraciones significativas desde el embalse, reduciendo su capacidad de almacenamiento y requiriendo medidas como cortinas de impermeabilización. Por ejemplo, un acuífero con alta porosidad bajo una laguna puede incrementar la percolación si no está confinado por un acuitardo. Además, la porosidad afecta la recarga inducida por el embalse, influenciando el nivel freático y los ecosistemas downstream, como manantiales o humedales, lo que exige un análisis detallado para mitigar impactos ambientales (Fetter, 2018).

3.2.8.2 Conductividad hidráulica

Sus valores cambian en la naturaleza, abarcando 13 órdenes de magnitud. En general, los materiales de grano grueso y fracturados presentan valores altos de conductividad hidráulica, mientras que los limos y arcillas de grano fino presentan valores bajos. En los acuíferos aluviales, el tamaño de grano del sedimento suele aumentar con la profundidad, de modo que la mayor conductividad hidráulica se encuentra generalmente en las profundidades del acuífero (Sharp, 1988).

En evaluaciones hidrogeológicas para represamiento, la conductividad hidráulica del acuífero subyacente es crucial para predecir la magnitud y dirección del flujo de agua subterránea (Anderson et al., 2015). Un acuífero con alta conductividad hidráulica puede generar filtraciones significativas desde el embalse, reduciendo su capacidad de almacenamiento y requiriendo intervenciones como drenes o cortinas de impermeabilización. Por ejemplo, un acuífero poroso bajo una laguna con alta conductividad hidráulica puede incrementar la percolación si no está confinado. En acuíferos fisurados, la conductividad hidráulica variable debido a fracturas puede crear caminos preferenciales, complicando el diseño del embalse.

3.2.8.3 Almacenamiento

Es la capacidad de una formación geológica para liberar o almacenar agua subterránea en respuesta a variaciones en la presión hidráulica o el nivel freático, cuantificado mediante parámetros como el coeficiente de almacenamiento o el almacenamiento específico (Fetter, 2018). Es un indicador clave de la respuesta del acuífero a la recarga o extracción.

Desde una perspectiva hidrogeológica, el almacenamiento en una laguna no se limita únicamente al volumen de agua superficial visible. Incluye también la interacción con el agua subterránea y la capacidad de los sedimentos y formaciones geológicas subyacentes para almacenar y liberar agua. En este sentido, la evaluación del almacenamiento implica considerar:

- **Volumen de almacenamiento superficial:** Es la cantidad de agua contenida en la laguna a diferentes niveles. Para fines de represamiento, se busca maximizar este volumen mediante la construcción de una estructura que eleve el nivel del agua y, por ende, su capacidad de embalse (ANA, 2011). La batimetría de la laguna es crucial para determinar con precisión este volumen (SENAMHI, 2015, citado en SIGRID, s.f.).
- **Almacenamiento en el acuífero asociado:** Las lagunas a menudo están conectadas hidráulicamente con acuíferos subyacentes. El represamiento de una laguna puede influir en la recarga y descarga de estos acuíferos, provocando un mayor almacenamiento de agua subterránea,

lo que a su vez puede favorecer la aparición o el incremento de manantiales y otros cuerpos de agua (CONCYTEC, s.f.). Este concepto es clave en la "siembra y cosecha de agua", donde el represamiento busca infiltrar agua al subsuelo para su aprovechamiento posterior (MINAM, s.f.).

- Volumen útil y volumen muerto: En el diseño de represas, se distingue entre el volumen útil, que es el agua que puede ser efectivamente utilizada para los fines del proyecto, y el volumen muerto, que es el volumen de agua que permanece en el embalse por debajo de la toma más baja y no es accesible para su uso (ANA, 2011).

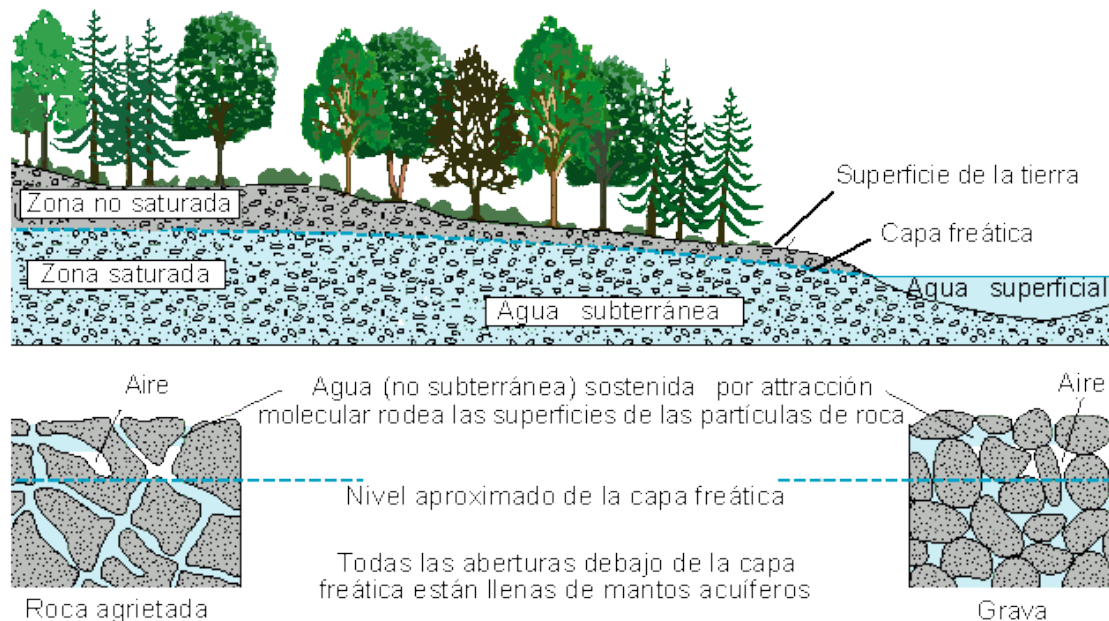
3.2.9 Aguas subterráneas o acuíferos

3.2.9.1 Acuíferos

Un acuífero es una formación geológica capaz de acumular y transferir agua subterránea en volúmenes apreciables, permitiendo su circulación a través de poros o fracturas interconectadas (Custodio y Llamas, 1983). Estos pueden desarrollarse en materiales no consolidados, como arenas y gravas, así como en rocas consolidadas fracturadas, tales como calizas o basaltos, siempre que presenten suficiente porosidad y permeabilidad para permitir el flujo del agua subterránea (Domenico y Schwartz, 1998).

En las lagunas destinadas al represamiento, la presencia de acuíferos es un factor crítico debido a que su alta permeabilidad puede favorecer la filtración del agua almacenada hacia el subsuelo, reduciendo la capacidad efectiva del embalse. La relación hidráulica entre aguas superficiales y acuíferos subyacentes puede incrementar los procesos de infiltración y percolación (Anderson, Woessner y Hunt, 2015). En estos casos, es necesario evaluar medidas de control como impermeabilización, sellado del fondo o sistemas de drenaje para reducir las pérdidas de agua hacia el subsuelo (Heath, 1983).

Figura 5. Zona saturada (azul) bajo el nivel freático totalmente llena de agua y zona no saturada (verde) con agua intersticial; los dibujos inferiores muestran el almacenamiento entre partículas y por fracturas.

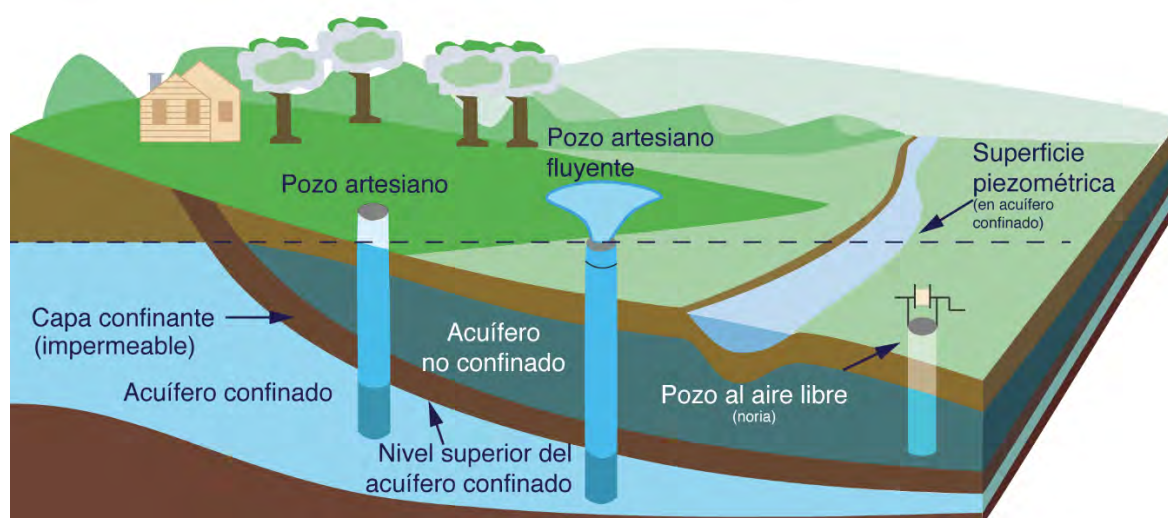


Nota: Adaptado de U.S. Geological Survey (s. f.).

- **Acuífero poroso:** Formación geológica permeable que almacena y transmite agua subterránea a través de poros interconectados en materiales no consolidados o semiconsolidados, como arena o grava (Fetter, 2018). Se caracteriza por su capacidad para facilitar el flujo de agua debido a la alta porosidad y permeabilidad de sus materiales.
Compuesto principalmente por sedimentos no consolidados, como arena, grava, arenisca o conglomerados, con poros interconectados que permiten el flujo de agua (Todd & Mays, 2005).
- **Acuífero fisurado:** Formación geológica que almacena y transmite agua subterránea a través de fracturas, fisuras o juntas en rocas consolidadas, como calizas o basaltos (Fetter, 2018). Su permeabilidad depende de la red de discontinuidades en la roca en lugar de poros interconectados.
- **Acuíferos libres:** Formación geológica permeable que almacena y transmite agua subterránea, con un nivel freático expuesto a la presión atmosférica, permitiendo el flujo libre del agua en su superficie superior (Fetter, 2018). La parte superior del acuífero está delimitada por la zona vadosa, donde los poros contienen aire y agua.
- **Acuífero confinado:** La formación permeable que constituye el acuífero está confinada superiormente (techo) e inferiormente (muro) por materiales impermeables. Todo su espesor se encuentra completamente saturado, y la presión del agua en los poros o fracturas supera la presión atmosférica; por ello, al ser interceptado mediante un sondeo, el agua asciende hasta un nivel superior al punto de captación del acuífero.

- **Acuífero semiconfinado:** Formación geológica permeable que almacena y transmite agua subterránea, delimitada por capas de baja permeabilidad (acuitardos) que permiten un flujo lento entre el acuífero y las unidades adyacentes, exhibiendo un comportamiento intermedio entre acuíferos libres y confinados (Fetter, 2018). El flujo vertical a través de los acuitardos afecta la presión y el almacenamiento del agua.

Figura 6. Tipos de acuíferos (confinado, no confinado) y pozos asociados (artesiano fluyente, artesiano no fluyente, al aire libre o noria), con indicación de la superficie piezométrica y capas confinantes impermeables.



Fuente: Ponce (2020).

3.2.9.2 Acuitardos

Un acuitardo es una formación geológica con baja permeabilidad que restringe el flujo de agua subterránea, actuando como una barrera parcial entre acuíferos u otras unidades hidrogeológicas (Fetter, 2018). Permite un movimiento lento de agua, diferenciándose de formaciones impermeables como los acuicludos.

Compuestas por arcilla, limo o rocas sedimentarias compactas, caracterizadas por poros pequeños y baja conectividad, lo que les confiere una muy baja permeabilidad (Todd & Mays, 2005).

En el represamiento de lagunas, los acuitardos son fundamentales porque reducen las filtraciones hacia acuíferos profundos, lo que mejora la eficiencia del almacenamiento de agua (Freeze & Cherry, 1979).

3.2.9.3 Acuifugos

Formación geológica completamente impermeable que no almacena ni transmite agua debido a la ausencia de porosidad efectiva o fracturas (Freeze & Cherry, 1979). Es una barrera absoluta al flujo de agua en sistemas hidrogeológicos.

3.2.9.4 Acuicludos

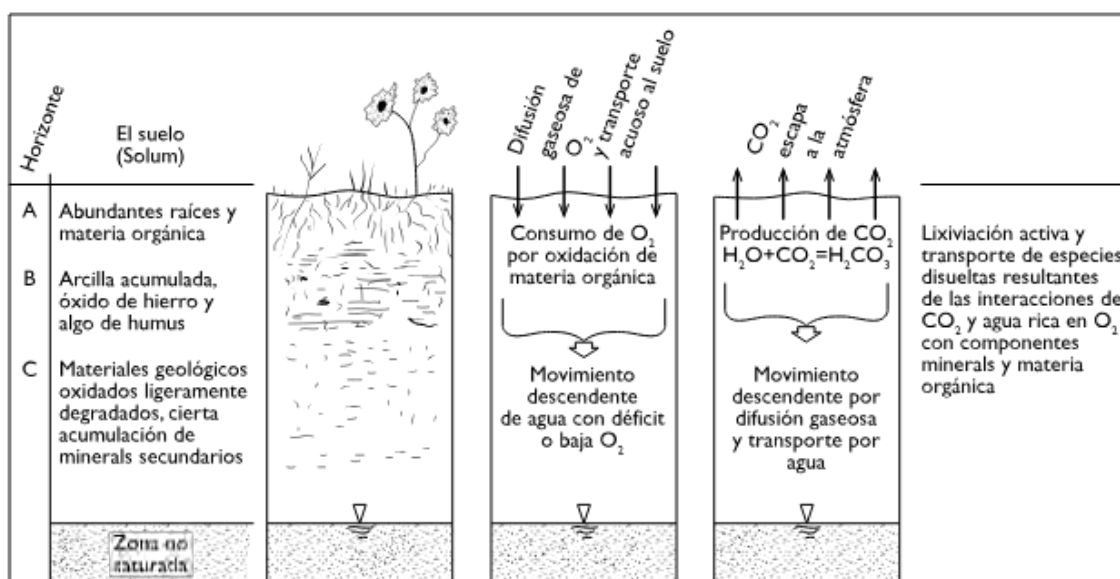
Definida por Custodio & Llamas (1983) como la formación geológica que, aun conteniendo agua en su interior —incluso en condiciones de saturación—, no la transmite, por lo que no resulta explotable (por ejemplo, arcillas de origen deltaico o estuarino). A pesar de presentar altos contenidos de agua (superiores al 50 % en volumen), no son aptas desde el punto de vista hidrogeológico para la construcción de captaciones de agua subterránea.

3.2.10 Hidroquímica

Es la rama de la hidrogeología que analiza la composición química del agua y los procesos que determinan su evolución en el medio natural, incluyendo la interacción agua-roca, la disolución mineral y la mezcla entre distintos tipos de agua. Estos procesos determinan las características químicas del agua subterránea y superficial (Freeze y Cherry, 1979).

El análisis hidroquímico permite identificar el origen de las aguas, su evolución geoquímica y las posibles interacciones con los materiales geológicos existentes en el área de estudio (Drever, 1997).

Figura 7. Representación esquemática de los principales procesos hidroquímicos en la zona edáfica de las áreas de recarga.



Fuente: Freeze & Cherry (1979, Fig. 7.1).

3.2.10.1 Clasificación de las aguas subterráneas

Consiste en la categorización del agua subterránea según su composición química, determinada principalmente por la proporción de iones mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) y parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica y pH, para identificar su tipo hidrogeoquímico y evaluar su calidad y usos potenciales (Appelo & Postma, 2005). Esta clasificación permite comprender el origen, la evolución química y las interacciones del agua con el medio geológico.

3.2.10.1.1 *Diagrama de Stiff*

Permite visualizar la composición iónica del agua mediante polígonos formados por las concentraciones de cationes y aniones principales. Este método facilita la comparación entre diferentes muestras y la identificación de similitudes hidroquímicas (Stiff, 1951).

3.2.10.1.2 *Diagrama de Schoeller-Berkaloff*

Representa las concentraciones de los principales iones en escala logarítmica, permitiendo comparar múltiples muestras de agua y analizar tendencias hidroquímicas o relaciones entre diferentes cuerpos de agua (Schoeller, 1962).

3.2.10.1.3 *Diagrama de Koljunski*

Se utiliza para evaluar la relación entre los principales iones disueltos en el agua, permitiendo interpretar procesos de evolución hidroquímica y relaciones entre aguas subterráneas y superficiales en un sistema hidrogeológico.

3.2.11 *Prospección geofísica*

Los aspectos de la geofísica en hidrogeología se refieren al conjunto de métodos y técnicas que utilizan propiedades físicas de la Tierra (p. ej., resistividad eléctrica, densidad, velocidad sísmica) para caracterizar la estructura, composición y comportamiento de los acuíferos y su relación con cuerpos superficiales como lagunas (Telford et al., 1990). Estos métodos permiten mapear la geometría del subsuelo, identificar zonas de recarga, detectar acuíferos y evaluar su vulnerabilidad sin necesidad de intervenciones invasivas como perforaciones extensivas.

Los métodos geofísicos comunes en hidrogeología son:

- **Métodos Eléctricos:** Miden la resistividad eléctrica del subsuelo. Los más usados son los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). Son excelentes para delimitar acuíferos, identificar zonas saturadas y detectar intrusión salina (RS-Ingeniería, 2023).

- **Métodos Sísmicos (Refracción y Reflexión):** Miden la velocidad de propagación de ondas sísmicas a través del subsuelo. Permiten determinar la profundidad a estratos rocosos, identificar discontinuidades geológicas y caracterizar la compactación de los materiales, lo cual es útil para definir la geometría del acuífero y el espesor de los sedimentos (RS-Ingeniería, 2023).

Las técnicas geofísicas, como los SEV y la TRE, son altamente efectivas para diferenciar entre capas de suelo y roca con diferentes conductividades eléctricas, permitiendo así delinear la extensión y el espesor de los acuíferos permeables y los acuitardos o acuitardos menos permeables (Sharma, 1997). Esto es vital para comprender el almacenamiento de agua y el potencial de flujo hacia o desde la laguna.

- **Detección de Niveles Freáticos y Zonas Saturadas:** La existencia de agua saturando los poros de las rocas y sedimentos reduce significativamente la resistividad eléctrica del medio. Los métodos eléctricos y electromagnéticos son particularmente aptos para detectar esta variación y, por ende, localizar la profundidad del nivel freático y las zonas con alta saturación de agua subterránea (RS-Ingeniería, 2023).

CAPÍTULO IV CARACTERIZACIÓN MORFOESTRUCTURAL Y GEOLÓGICA DEL ÁREA

4.1 CARÁCTER GEOLÓGICO

4.1.1 *Geología regional*

En este capítulo se describen los factores geológicos del área de estudio con base en el Boletín A-52 “Geología de los cuadrángulos de Cuzco y Livitaca. Hojas 28-s y 29-s” y el Boletín L-63 “Geología del cuadrángulo de Livitaca (hojas 29s3 y 29s4) y cuadrángulo de Velille (30s1, 30s2, 30s3 y 30s4), región Cusco”, ambos elaborados por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET, 1994 y 2025), así como los mapas geológicos asociados.

En el área de estudio afloran rocas volcánicas del Plioceno. Según Cerpa (2025), el Centro Volcánico Suratera está constituido por intercalaciones de flujos piroclásticos de ceniza y cristales de tonalidad gris oscura, asociados a depósitos lávicos de composición dacítica-andesítica y color gris azulado.

Hacia el sur del área se afloran los miembros 2 y 3 de la Formación Anta. El miembro 2 está conformado por depósitos lávicos de composición andesítica, textura porfirítica y matriz traquítica, con fenocristales de piroxenos y microlitos de plagioclasa. El miembro 3, por su parte, está compuesto por clastos volcánicos subredondeados de 10 a 20 cm de diámetro, intercalados con areniscas de grano fino a medio, de colores rojizos a rosáceos, formadas predominantemente por feldespatos potásicos y escaso cuarzo.

Al noroeste del área de estudio se localiza la Unidad Colquemarca y algunos cuerpos aislados pertenecientes al Centro Volcánico Llallahua. La Unidad Colquemarca (Quispesivana y Navarro, 2001) corresponde a un conjunto de plutones que forman parte del Batolito Andahuaylas-Yauri, compuestos por tonalitas y granodioritas leucócratas. Por otro lado, el Centro Volcánico Llallahua (Torres et al., 2010) está constituido por tobas de ceniza y pómez con líticos, de composición andesítica a basáltica, que contienen cristales de biotita y cuarzo. Presentan coloración blanquecina a grisácea y exhiben disyunción columnar.

El Mapa 03 – Geología regional, muestra la disposición regional de las unidades litológicas en relación con el área de estudio.

4.1.2 *Geología local*

El área de estudio está conformada por depósitos cuaternarios y rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Suratera. Los depósitos cuaternarios corresponden a materiales de origen

aluvial, eluvio-coluvial y lacustre, los cuales se distribuyen principalmente en las zonas adyacentes a la laguna. Por su parte, la Formación Suratera constituye el basamento geológico aflorante y está integrada por secuencias volcánicas de composición intermedia a ácida.

4.1.2.1 Depósito aluvial (Qr-al)

Constituidos principalmente por gravas bien gradadas, producto del transporte y sedimentación de materiales por acción fluvial. Estos depósitos se distribuyen principalmente en sectores de baja pendiente asociados a áreas de acumulación, presentando una permeabilidad relativamente alta debido al predominio de materiales gruesos.

4.1.2.2 Depósito eluvio-coluvial (Qr-el-col)

Conformados por gravas limo-arcillosas, gravas limosas y arenas limo-arcillosas generadas por procesos combinados de meteorización in situ y transporte gravitacional de corta distancia. Estos materiales presentan una composición heterogénea y una distribución irregular, siendo comunes en laderas y zonas de transición entre áreas elevadas y sectores de acumulación. Sus propiedades hidráulicas son variables debido a la diversidad granulométrica que los caracteriza.

4.1.2.3 Depósito lacustre (Qr-la)

Corresponden principalmente a arcillas inorgánicas de color pardo grisáceo claro, con presencia local de pequeños lentes de grava. Estos materiales se originaron por procesos de sedimentación en ambientes lacustres de baja energía y presentan, en general, una baja permeabilidad debido al predominio de fracciones finas.

4.1.2.4 Formación Suratera (Np-su3)

Constituye la unidad rocosa más importante en el área de estudio. Está compuesta por derrames volcánicos de composición andesítica, dacítica, traquiandesítica y riodacítica, los cuales presentan generalmente textura porfídica. Muestran una coloración gris oscura y una disposición estratificada de tipo horizontal a subhorizontal. En los niveles superiores se identifican capas de brechas volcánicas con distintos grados de compactación.

En el sector norte de la laguna afloran tobas brechosas caracterizadas por presentar clastos y bloques angulosos soportados por una matriz poco consolidada, con escasa cohesión y aberturas superiores a 5 cm entre fragmentos. Estas características evidencian un alto grado de fracturamiento y favorecen el desarrollo de espacios vacíos que pueden influir en la circulación del agua subterránea.

Figura 8. Afloramientos andesíticos de la formación Suratera al sur de la laguna Condorccota



Por otro lado, las tobas soldadas se observan principalmente en los afloramientos expuestos a lo largo de la trocha carrozable de acceso a la laguna. Estas presentan una matriz consistente y compacta, con fragmentos heterométricos predominantemente de color rosado, evidenciando un mayor grado de consolidación respecto a las tobas brechosas.

Figura 9. Andesitas muy fracturadas con aberturas en calicata excavada



Fuente: Plan Meriss, 2021.

4.2 TENDENCIAS ESTRUCTURALES

La cuenca de Condorccota tiene por lo menos tres direcciones estructurales que han modelado la morfología presente, dos direcciones que están directamente relacionadas a la forma de la laguna, una de NNW – SSE, y la otra NE-SW y la tercera concordante con la dirección del drenaje de la laguna y ha sido la de mayor incisión erosiva.

Estas tendencias tienen importancia, debido a que son zonas de aportes subterráneos de aguas hacia la laguna como se analizará en el capítulo de hidrogeología.

Figura 10. Morfología de la cuenca con erosión glacial formando drumlins pleistocénicos



4.3 CARÁCTER MORFOLÓGICO

Las características morfológicas son importantes desde la perspectiva del drenaje superficial que incide en el drenaje subterráneo, que será necesario evaluar como un factor de los aspectos hidrogeológicos de la cuenca de Condorccota.

La delimitación de las unidades geomorfológicas se realizó a través del análisis de imágenes satelitales y revisión de la cartografía geológica local. La interpretación de imágenes permitió identificar formas del relieve considerando criterios morfológicos como forma del terreno, textura superficial y patrones de drenaje.

Posteriormente, se relacionó las formas del relieve con las unidades litológicas y la edad de los materiales aflorantes. Esta integración permitió delimitar las unidades geomorfológicas identificadas en

el área de estudio, considerando su morfología, origen y contexto geológico (Demek y Embleton, 1978; Verstappen, 1983).

Tabla 1. Unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio

Unidad geológica	Relieve	Unidad geomorfológica	Código
Laguna	Laguna	Laguna	Laguna
Depósito aluvial	Ladera	Ladera aluvial del Holoceno	Qh-al-a
Depósito eluvio-coluvial	Ladera	Ladera eluvio-coluvial del Holoceno	Qh-elco-a
Depósito lacustre	Planicie	Planicie lacustre del Holoceno	Qh-la-a
Formación Suratera	Colina	Colina volcánica del Plioceno	Np-hu-b

Nota: Adaptado de Demek y Embleton (1978) y Verstappen (1983).

La ladera aluvial del Holoceno corresponde a superficies inclinadas formadas por la acumulación de sedimentos transportados por escorrentía superficial y procesos fluviales de corta distancia. Su morfología refleja la acción de procesos de transporte y deposición asociados a la dinámica hídrica reciente.

La ladera eluvio-coluvial del Holoceno corresponde a superficies inclinadas desarrolladas por la acumulación de materiales producto de la meteorización de la formación Suratera y su posterior transporte ladera abajo por acción de la gravedad.

La planicie lacustre del Holoceno corresponde a superficies planas asociadas a ambientes de sedimentación lacustre. Estas geoformas están vinculadas al entorno de la laguna, donde predominan procesos de acumulación de sedimentos finos bajo condiciones de baja energía.

La colina volcánica del Plioceno corresponde a relieves asociados al afloramiento de la Formación Suratera, que destacan topográficamente respecto a las unidades sedimentarias circundantes. Finalmente, la laguna ha sido formada por la actividad erosiva glacial durante Pleistoceno.

CAPÍTULO V GEOTECNIA – MECÁNICA DE SUELOS

5.1 SECUENCIA LITOLÓGICA EN EJE DE PRESA

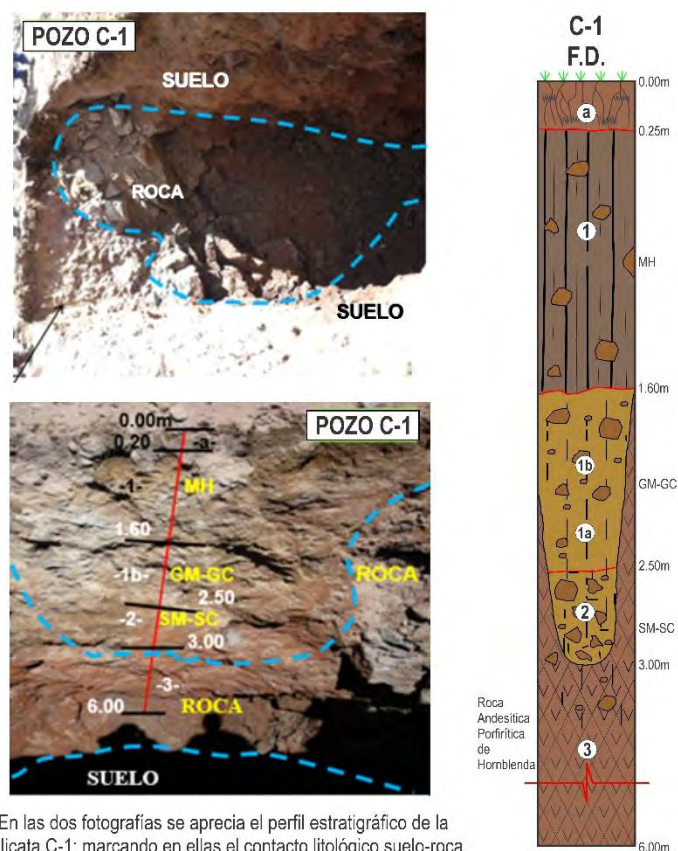
Con el fin de profundizar el análisis geológico-geotécnico y los perfiles estratigráficos del subsuelo a lo largo del posible eje de represamiento de la laguna, se realizaron excavaciones con maquinaria de cuatro calicatas de Investigación, dos en el flanco izquierdo (C-1 y C-2) y dos en el flanco derecho (C-3 y C-4), a profundidades de 6.00 m, 5.00 m, 7.10 m y 6.50 m respectivamente.

Se determinó por correlación estratigráfica que el depósito lacustre (arcillo limoso plástico) tiene una potencia mayor a los 7.10 m, con presencia de esporádicos lentes pequeños y delgados (milimétricos a centimétricos) de gravas arenosas a gravas arcillosas; el depósito aluvial (gravo arcilloso a arcilla arenosa) es superficial y el depósito eluvio-coluvial con escombreras (y matriz areno limo arcilloso a grava graduada en cementante arcilloso) es profundo en ambos flancos y cubre al basamento rocoso que en este caso está constituido por secuencias volcánicas de la formación Suratera.

5.1.1 *Excavación C-1*

En 2020, esta excavación llegó a la profundidad de 3.30 m, para el año 2021, con ayuda de maquinaria se amplió y profundizó hasta 6.00 m, apertura que se realizó en suelo eluvio-coluvial hasta la profundidad de 3.00 m en la zona central y en los flancos del pozo hasta profundidades de 0.20 m (flanco derecho) a 1.00 m (flanco izquierdo) y en roca volcánica de composición andesítica moderadamente fracturada y alterada hasta los 6.00 m; el depósito eluvio coluvial de acuerdo al perfil estratigráfico (ver Figura 11) representativo se clasifica como limo inorgánico de alta compresibilidad MH (de 0.20 m a 1.60 m); arena limo arcillosa SM-SC a grava limo arcillosa GM-GC (de 1.60 m a 2.50 m) y arena limo arcillosa SM-SC (de 2.50 m a 3.00 m), material formado como producto de la meteorización del substrato rocoso.

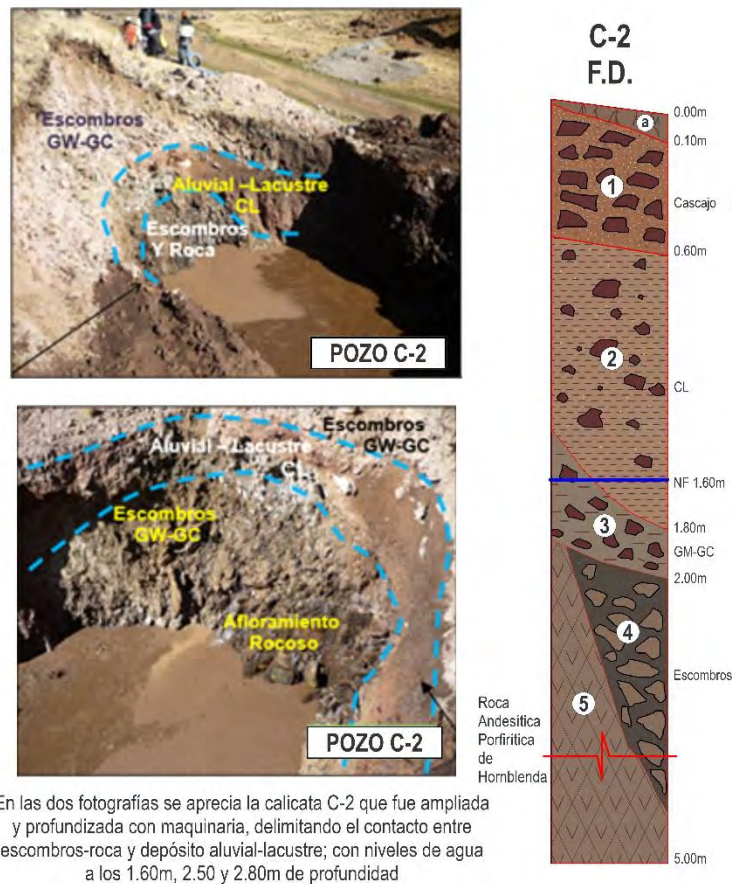
Figura 11. Excavación C-1 en el margen izquierdo del eje proyectado de la presa



5.1.2 Excavación C-2

La excavación C-2 se ejecutó manualmente hasta la profundidad de 1.90 m en 2020, y con maquinaria se llegó a la profundidad de 5.00 m, la excavación se realizó en suelo eluvio-coluvial hasta la profundidad de 1.80 m hacia el lado izquierdo del pozo; en la zona central y en el flanco derecho en depósito aluvial y lacustre desde 0.60 m hasta la profundidad de 1.80 m; en contacto con escombros hacia el lado izquierdo de la excavación y en roca volcánica de composición andesítica moderadamente fracturada hacia el flanco izquierdo paralelamente con escombreras desde 1.80 m hasta la profundidad de 5.00 m.

Figura 12. Excavación C-2 en el margen izquierdo del eje proyectado de la presa

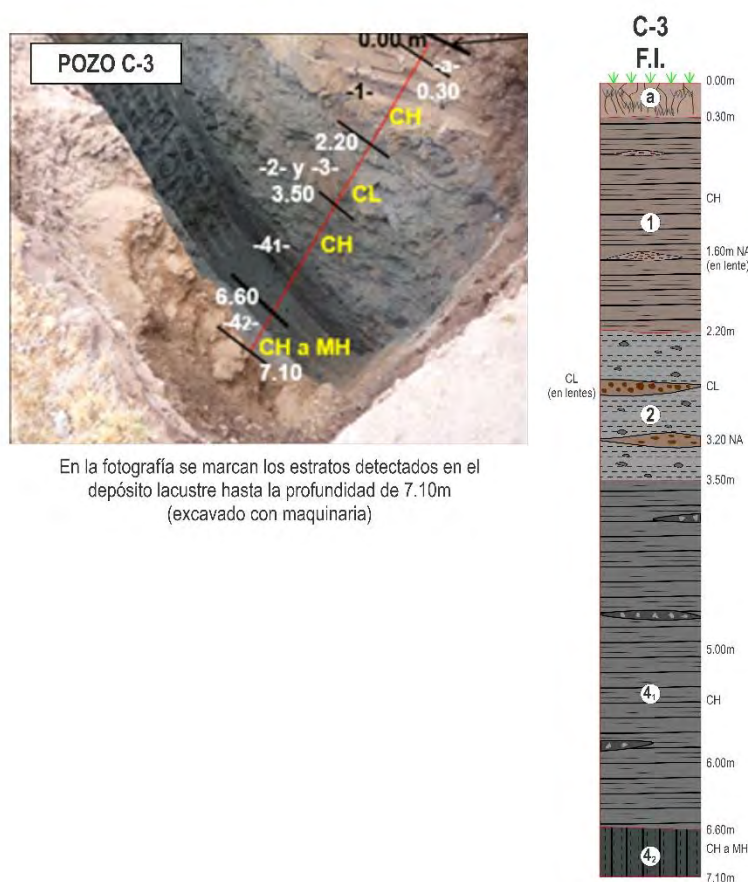


El depósito eluvio coluvial de acuerdo al perfil estratigráfico, está representado superficialmente por escombros con matriz clasificada como grava graduada en cementante gravo arcilloso GW-GC (de 0.10 m a 0.60 m); continua el depósito aluvial y lacustre clasificado como arcilla renosa CL (de 0.60 m a 1.80 m); vuelven a aparecer los escombros con matriz clasificada como grava graduada en cementante gravo arcilloso GW-GC (de 1.80 m a 5.00 m), material que está en contacto con el afloramiento rocoso conformado por rocas volcánicas de la formación Suratera. Los niveles freáticos en este pozo afloran a los 1.60 m, 2.00 m y 2.50 m.

5.1.3 Excavación C-3

Para 2020 la excavación C-3 tenía una profundidad de 3.50 m, el año 2021 se profundizó y amplió con maquinaria hasta los 7.10 m.

Figura 13. Excavación C-3 en el margen derecho del eje proyectado de la presa



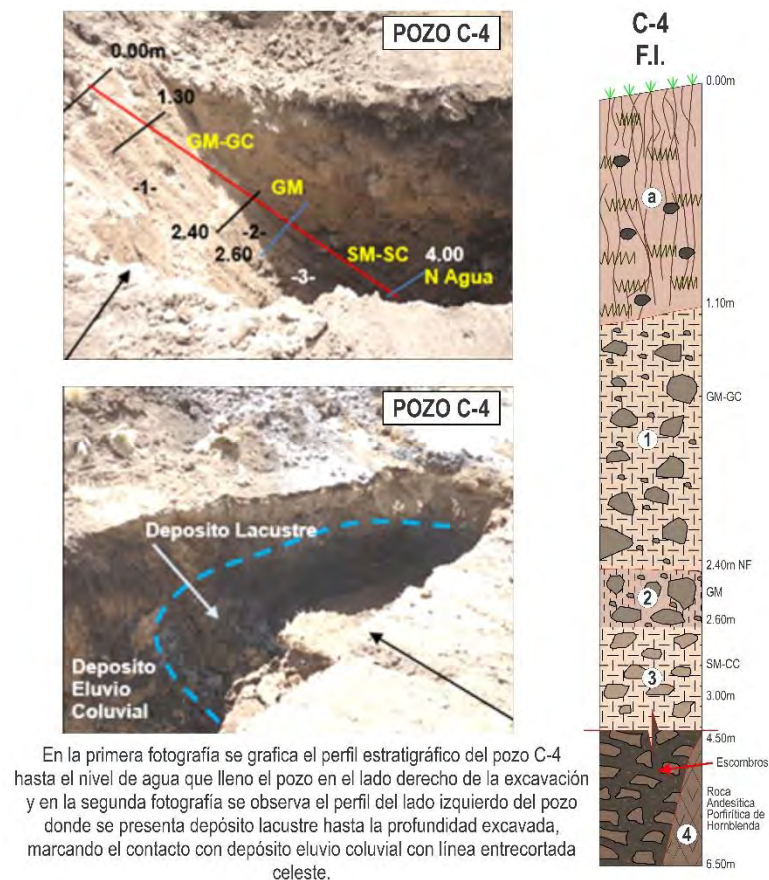
La excavación se realizó en depósito lacustre neto que se caracteriza por presentar lentes delgadas y pequeños de gravas envueltos en matriz arcillosa ubicados a diferentes profundidades, en general el depósito tiene carácter impermeable; el depósito lacustre de acuerdo al perfil estratigráfico (ver Figura 13) representativo se clasifica como arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH de color pardo grisáceo claro (de 0.30 m a 2.20); arcilla inorgánica de baja compresibilidad CL de color gris verdoso claro (de 2.20 m a 3.50 m); arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH de color gris verdoso oscuro (3.50 m a 6.60 m) y arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH a limo inorgánico de alta compresibilidad MH, en general de color gris verdoso oscuro (de 6.60 m a 7.10 m), material que (probablemente a la profundidad de 10.00 m a 12.00 m) subyace a escombros y/o roca volcánica de la formación Suratera.

5.1.4 Excavación C-4

La excavación C-4 presentaba una profundidad de 2,60 m en el año 2020; sin embargo, en 2021, mediante el uso de maquinaria, se logró profundizar la excavación hasta alcanzar los 6,50 m; la apertura se realizó en el lado derecho de la excavación en depósito eluvio-coluvial con escombros,

material que de acuerdo al perfil estratigráfico (ver Figura 14) representativo se clasifica como grava limo arcillosa GM-GC (de 1.10 m a 2.40 m); grava limosa GM (de 2.40 m a 2.60 m) y arena limo arcillosa SM-SC (2.60 a 4.50); la excavación sigue en escombros y roca volcánica moderadamente fracturada y alterada (de 4.50 m a 6.50 m); en el lado izquierdo se excavo en depósito lacustre clasificado como arcilla de alta compresibilidad CH (de 0.30 m a 1.80 m) de color pardo grisáceo claro; arcilla Inorgánica de baja compresibilidad CL color gris verdoso claro (de 1.80 m a 6.50 m). En esta excavación los niveles de agua se presentan a las profundidades de 2.40 m, 3.00 m y 4.50 m.

Figura 14. Excavación C-3 en el margen derecho del eje proyectado de la presa



En la siguiente tabla se presentan de forma resumida las propiedades físico-mecánicas de los estratos identificados en las exploraciones directas realizadas a lo largo del eje de represamiento:

Tabla 2. Características físicas y mecánicas de estratos detectados

Eje proyectado presa Condorccota	Prof. (m)	Análisis granulométrico (%)			Límites de consistencia (%)			Clasificación SUCS	Contenido humedad (%)
		GRAVA	ARENA	L O A	LL	LP	IP		
C-1 M-1 F.I.	1.60	4.98	26.39	68.63	54.49	43.72	10.77	MH	30.94
C-1 M-1a	2.00	17.15	42.49	40.36	45.77	39.73	6.04	SM-SC	29.57
*C-1 M-1b	2.50	44.04	27.29	28.67	37.50	31.80	5.70	GM-GC	28.94
*C-1 M-2	3.00	31.18	37.19	31.63	39.80	33.50	6.30	SM-SC	26.84
C-2 M-2 F.I.	1.70	9.58	39.53	50.89	48.67	27.54	21.13	CL	28.70
C-2 M-3	1.90	61.55	30.08	8.37	33.76	23.22	10.54	GW-GC	13.70
C-3 M-1 F.D.	2.20	10.14	14.31	75.55	64.84	20.21	44.63	CH	50.82
C-3 M-2	3.50	1.58	12.04	86.38	48.21	27.03	21.18	CL	35.99
C-2 M-3 lente	3.20	0.00	15.00	85.00	48.90	26.83	22.07	CL	40.80
*C-3 M-41	6.60	0.04	15.71	84.25	77.96	35.06	42.90	CH	44.31
*C-3 M-42	7.00	0.07	15.86	84.07	75.93	35.00	40.93	CH	47.09
*C-3 M-42 (UNI)	7.00	0.92	9.58	89.50	79.00	40.00	39.00	MH	35.70
C-4 M-1 F.D.	2.30	37.66	26.47	35.87	32.83	26.10	6.73	GM-GC	22.09
C-4 M-2	2.60	45.84	37.68	16.48	31.68	28.09	3.59	GM	17.33
*C-4 M-3	4.50	6.24	51.62	42.14	34.99	28.68	6.31	SM-SC	27.66

* Muestras obtenidas en la ampliación y profundización de los 04 pozos

Nota. El texto señalado con asterisco corresponde textualmente a la información consignada en el Plan Meriss (2021).

Figura 15. Vista de excavaciones y proyección del eje de represamiento



5.2 NIVEL FREÁTICO

En la excavación C-2 se presenta flujos de agua a las profundidades de 1.60 m, 2.00 m y 2.50 m y en la excavación C-4 los flujos de agua afloran a las profundidades de 2.40 m, 3.00 m y 4.50 m, flujos que circulan a través del depósito aluvial y del contacto depósito eluvio-coluvial (con escombreras)

con roca volcánica andesítica, alimentados por la laguna. En la excavación C-3 se presentan flujos de agua ínfimos a través de los lentes de arena limo arcilloso y grava limosa, alimentados también por la laguna.

5.3 RESISTENCIA INSITU

A lo largo del eje de represasamiento proyectado se realizaron ensayos de Resistencia Insitu con equipo de Penetración Dinámica Ligera (P.D.L.), 02 ensayos R-1 y R-2 en el margen izquierdo de la quebrada Condorccota y 06 ensayos R-3, R-4, R-5, R-6, R-7 y R-8 en el flanco derecho, con profundidades de 2.30 m a 4.50 m.

Los ensayos R-1 y R-2 presentan un manto vegetal superficial (0.10 m de espesor) y el depósito eluvio-coluvial tiene un espesor de 0.50 m a 0.70 m con resistencia de 0.13 Kg/cm² ; mientras que en el flanco derecho la cobertura vegetal tiene espesor de 0.50 m a 1.10 m y ofrece resistencias de 0.13 Kg/cm² a 0.40 Kg/cm²; el depósito lacustre de acuerdo a los ensayos presenta resistencias de 0.40 Kg/cm² a 4.00 Kg/cm², correspondiendo los valores más altos a los lentes de arena limo arcillosa a grava limo arcillosa y a los fragmentos de roca de hasta 0.50 m de diámetro que presenta en su composición y que dan resistencias de 4.66 Kg/cm² a 5.20 Kg/cm² en R-1 de 3.20 a 3.50 m de profundidad y en R-4, R-5 y R-7 de 4.10 a 4.50 m de profundidad. En la siguiente tabla se resumen los resultados de los ensayos de resistencia insitu efectuados con Penetrometro Dinámico Ligero (PDL).

Tabla 3. Ensayos de penetración dinámica ligera ejecutados

Ensayo de resistencia insitu (PDL)	Ubicación	Profundidad m.	Depósito	Resistencia $q_u = \text{Kg/cm}^2$
R-1	Margen izquierda	0.00 a 0.60	Cobert. y Qr-el-col	0.13
		0.60 a 3.20	Depósito lacustre	0.66 - 1.60
		3.20 a 3.50	Dep. Lac. con clastos	5.2
R-2	Margen izquierda	0.00 a 0.80	Cobert. y Qr-el-col	0.13
		0.80 a 3.30	Depósito lacustre	0.53 - 1.20
R-3	Margen derecha	0.00 a 0.60	Cobertura vegetal	0.13
		0.60 a 3.30	Depósito Lac. Lentos	1.46 - 2.66
R-4	Margen derecha	0.00 a 0.80	Cobertura vegetal	0.13
		0.80 a 4.00	Depósito lacustre	0.40 - 4.00
		4.00 a 4.50	Dep. Lac. con clastos	4.66
R-5	Margen derecha	0.00 a 1.10	Cobertura vegetal	0.26
		1.10 a 4.10	Depósito lacustre	1.06 - 3.60
		4.10 a 4.50	Dep. Lac. con clastos	4.93
R-6	Margen derecha	0.00 a 0.70	Cobertura vegetal	0.4
		0.70 a 2.30	Depósito lacustre	0.80 - 2.80
R-7	Margen derecha	0.00 a 0.60	Cobertura vegetal	0.4
		0.60 a 4.10	Depósito lacustre	0.80 - 2.13
		4.10 a 4.40	Dep. Lac. con clastos	2.93
R-8	Margen derecha	0.00 a 0.50	Cobertura vegetal	0.13
		0.50 a 3.00	Depósito lacustre	0.66 - 2.00

Fuente: Plan Meriss, 2021

5.4 PERMEABILIDAD

Los ensayos de permeabilidad realizados mediante el método de carga variable en muestras remoldeadas a densidad natural dieron los siguientes resultados:

Tabla 4. Ensayos de permeabilidad ejecutados

DEPÓSITO	PERFORACIÓN	CLASIFICACIÓN SUCS	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD K ₂₀ =cm/s
D. Eluvio Coluv.	C-1 M-2	SM-SC	Inalterada	3.3	0.509x10 ⁻⁵
Lacustre	C-2 M-2	CL	Inalterada	1.7	0.518x10 ⁻⁵
Lacustre	C-3 M-1	CH	Inalterada	2.2	0.596x10 ⁻⁵
Lacustre	C-3 M-2	CL	Inalterada	3.5	0.539x10 ⁻⁵
Lacustre-lente	C-3 M-3	CL	Inalterada	3.2	0.571x10 ⁻⁵

Fuente: Plan Meriss, 2021

Los valores obtenidos para los depósitos eluvio-coluviales y lacustre con lentes, son considerados como muy poco permeables (0.509×10^{-5} cm/s a 0.596×10^{-5} cm/s) al encontrarse estos valores en el rango de 1×10^{-5} cm/s a 1×10^{-7} cm/s (según el cuadro de Valores Relativos de Permeabilidad de Terzaghi y Peck).

La presa proyectada se cimentaría en roca volcánica denominada Andesita Porfírica de Hornblenda que aflora en el eje de represamiento (flanco izquierdo y flanco derecho) y alrededor del vaso, se caracteriza por ser impermeable, por lo tanto, si existen filtraciones es a través de los sistemas de fracturas, micro fracturas y planos de estratificación y no a través de la roca propiamente dicha.

En 2020, por el fracturamiento que presentan los afloramientos rocosos se realizaron ensayos de Permeabilidad Insitu a lo largo del eje de represamiento proyectado (04 ensayos) y en el vaso (04 ensayos). Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Ensayos de permeabilidad insitu ejecutados

Calicata	Profundidad	Cota	Coefficiente de permeabilidad	Valores de permeabilidad	Sustrato
Eca-1 Eje Presa F. Izq.	-3.05	4455	7.90 E-05	Impermeable	Roca fracturada
Eca-2 Eje Presa F. Izq.	-1.55	4450	1.01 E-04	Baja permeabilidad	Roca
Eca-3 Eje Presa F. Der.	-3.1	4450	1.24 E-04	Baja permeabilidad	Suelo lacustre
Eca-4 Eje Presa F-Der.	-1.8	4451	3.08 E-03	Semipermeable	Roca fracturada
Vca-5 Vaso F. Der.	-0.7	4452	3.36 E-05	Impermeable	Roca / Suelo
Vca-6 Vaso F. Der.	-0.8	4451	4.04 E-05	Impermeable	Roca / Suelo
Vca-7 Vaso F. Der.	-0.65	4453	2.21 E-4	Baja permeabilidad	Suelo lacustre
Vca-8 Vaso F. Der.	-0.75	4453	1.94 E-05	Impermeable	Suelo lacustre

Fuente: Plan Meriss, 2020.

5.5 ANÁLISIS DE ESTANQUEIDAD DEL VASO

El vaso presenta rasgos de haber sido una laguna más grande, por la acumulación estratigráfica plana laminar de material orgánico y fino, comprobado visualmente en la Excavación C-3; lo cual es un indicio favorable para la estanqueidad del vaso.

5.6 CARACTERÍSTICAS GEOHÍDRICAS DEL VASO

- Tipo de suelo SUCS: Suelos arcillosos (CL), arena limosa (SM-SC) y grava limosa arcillosa (GM-GC).
- Porosidad: Baja a moderada
- Permeabilidad: Baja en los niveles superficiales; sin embargo, en profundidad se evidencian niveles asociados a materiales gruesos que favorecen la infiltración
- Transmisibilidad: Moderada
- Almacenamiento: Bajo a moderado

Clasificado como Unidad Geohidrológica: Sustrato de baja permeabilidad – Acuífero Libre.

La característica geohídrica regional pertenece a la formación Suratera que está compuesta por andesitas porfíricas de hornblenda moderadamente fracturadas, unidad que está considerado como:

- Substrato de Baja Permeabilidad e Impermeable (Codificada como 1 acuífero regular).
- Substrato con presencia de grietas substrato permeable (codificada como 1-b Mal acuífero).

5.7 ANÁLISIS Y COMENTARIOS DE LOS ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Tal como se puede evidenciar en las excavaciones, los suelos que se presentan hasta los 7 m de profundidad los depósitos son heterogéneos con mayores cambios en la margen izquierda y estos cambios en el perfil vertical y horizontal son indicativos que la estratificación no mantiene una uniformidad.

Respecto al nivel freático en las excavaciones C-1 y C-2 se indica que se tienen más de dos niveles de flujos desde 1.60 hasta 4.5 m y en la margen derecha los flujos son ínfimos, lo que corrobora que los niveles de depósitos son heterogéneos en la horizontal como en la vertical.

Los ensayos de permeabilidad obtenidos en campo están en el rango de $3.08\text{E-}3$ cm /s considerados como semipermeable a los 1.80 m, siendo $1.24\text{E-}4$ cm/s y $1.01\text{E-}4$ cm/s a 3.10 m y 1.50 m respectivamente como de baja permeabilidad y existen cuatro ensayos con coeficientes de $1.94\text{E-}5$ cm/s en depósitos lacustre. Estos resultados son también heterogéneos en general y en niveles distintos, lo cual corrobora las características heterogéneas del material y de los niveles freáticos presentes.

Finalmente, el análisis de estanqueidad del vaso resulta correcto considerando que las características de los suelos como arcillas y arenas arcillosa y con los valores obtenidos de los ensayos de permeabilidad in situ y de laboratorio, sin embargo, se debe considerar que existen niveles freáticos a distintos niveles y estos hidrogeológicamente deben tener un valor de transmisibilidad, que en el análisis se especifica como moderada para el conjunto, pero se debe tener presente que estos representan a los materiales que se hallan entre los niveles freáticos.

CAPÍTULO VI PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Para identificar los tipos de acuíferos es preciso conocer la litología del subsuelo, para ello, existen diversos métodos que se valen de las propiedades físicas de los materiales presentes en el acuífero, entre ellos los métodos geofísicos geoeléctricos.

Alvarez (2003) señala que los métodos eléctricos se fundamentan en la medición de las propiedades eléctricas del subsuelo, considerando que todos los materiales presentes en la corteza terrestre ofrecen resistencia al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad, denominada resistividad, permite diferenciar los distintos materiales que conforman la corteza terrestre. Existen diversas metodologías para determinar la resistividad del suelo, entre las cuales se encuentran los SEV y la tomografía geoeléctrica.

6.1 METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN GEOFÍSICA

La prospección geofísica es una herramienta esencial para la investigación no invasiva del subsuelo. Su objetivo fue identificar la geometría de las capas geológicas, la presencia de zonas saturadas de agua y posibles discontinuidades estructurales que pudieran afectar la interacción entre la laguna y los acuíferos, así como la estabilidad del eje de presa proyectada.

En 2021, se aplicaron métodos geofísicos con el fin de caracterizar las condiciones del subsuelo en el entorno de la laguna Condorccota y del eje de presa propuesto. La prospección geofísica permitió identificar contrastes en las características físicas de los materiales del subsuelo, facilitando la delimitación de unidades geológicas, zonas saturadas y posibles discontinuidades estructurales que controlan la circulación del agua subterránea.

Se ejecutaron 10 líneas de tomografía eléctrica resistiva (ERT) y 06 sondeos eléctricos verticales. Los datos obtenidos fueron procesados e interpretados para generar modelos de resistividad del subsuelo. A partir de esta integración se identificaron sectores con valores bajos de resistividad asociados a zonas saturadas y a la posible circulación de agua subterránea (Alarcón, 2021).

Los valores obtenidos de esta etapa confirmaron la estanqueidad aceptable del vaso de la laguna, sustentada por depósitos lacustres de baja permeabilidad (arcillas inorgánicas y limos), y la viabilidad del eje de la presa, cimentado sobre rocas volcánicas andesíticas con moderado fracturamiento.

6.2 LÍNEAS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA

6.2.1 Generalidades

La prospección geofísica mediante prospección eléctrica de resistividad, es un medio importante en el estudio de aguas subterráneas, que permite identificar el grado de fracturamiento, fallamiento, presencia de cavernas, presencia de niveles de agua y otros que son de importancia en la evaluación hidrogeológica y geotécnica.

La ejecución de los estudios se realizó a través de los ensayos de Tomografía eléctrica resistiva, en secciones y área definida por la unidad usuaria de la Entidad. Se ha realizado mediante el equipo DUK -2ª, con los métodos en prospección geolétrica de Wenner y Wenner-Schlumberger.

6.2.1.1 Ubicación de líneas

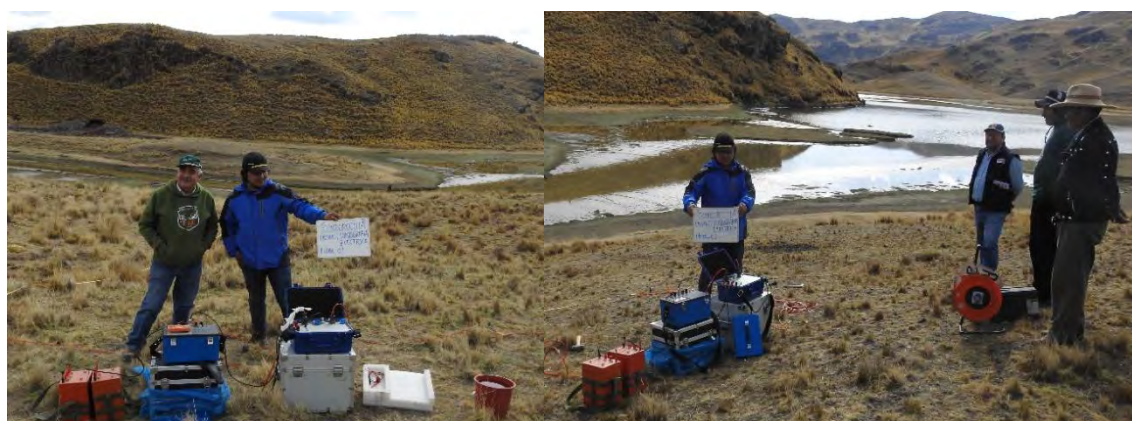
Se han realizado diez secciones tomográficas resistivas en el entorno de la laguna y eje de presa propuesta, las mismas que tienen traslapes con la finalidad de tener información a profundidad y la visualización de contexto pueda favorecer en la interpretación hidrogeológica lo más aproximada posible.

A continuación, en la tabla 6 se presenta con las principales características geométricas y de ubicación de cada línea tomográfica (Mapa 08 – Mapa de ubicación de ensayos geofísicos).

Tabla 6. Ubicación de líneas tomográficas eléctricas

Línea	Longitud (m)	Dirección	Descripción	Coord. Inicial		Coord. Final	
				Este	Norte	Este	Norte
LÍNEA 01	296.0	NO-SE	Desde estribo en margen izquierda (aguas abajo del eje) hasta zona media de colina, paralela al borde de la laguna	225003	8404309	224837	8404550
LÍNEA 02	296.3	NO-SE	Paralela a L01, desplazada 20 m hacia la orilla de la laguna, próxima a zona de depresión	224975	8404293	224799	8404521
LÍNEA 03	296.6	NO-SE	Inicia en zona media de colina (traslapada con L01) hasta talud norte, pasando por depresión	224729	8404700	224913	8404472
LÍNEA 04	303.2	E-O	A lo largo del lado norte de la laguna, desde depresión hasta base del talud norte	224791	8404684	224524	8404553
LÍNEA 05	299.8	E-O	Inicia en tercio superior norte, paralela a L04 y subparalela a L03-L04	224796	8404527	224526	8404492
LÍNEA 06	178.0	N-S	Borde oeste de la laguna, desde colina norte hasta colina lateral oeste	224510	8404536	224472	8404363
LÍNEA 07	62.9	E-O	Sector oriental de la laguna, paralela al borde	224506	8404397	224490	8404336
LÍNEA 08	300.0	E-O	Borde sur de la laguna, entre orilla y macizo de andesitas	224474	8404343	224755	8404370
LÍNEA 09	142.9	NO-SE	Continúa desde L08, borde sur hacia estribo del eje de presa	224737	8404390	224853	8404331
LÍNEA 10	120.0	Transversal	Cruza el riachuelo de salida aguas abajo de calicatas (línea principal local)	224893	8404336	224946	8404230

Figura 16. Líneas de tomografía eléctrica de las secciones 01 y 02 en proceso de registro



Fuente: Plan Meriss, 2021.

6.2.1.2 Descripción de la interpretación de secciones

En base a las diez líneas tomográficas, tras las iteraciones correspondientes y sus respectivas interpretaciones, se procedió a describir cada una de las secciones tomográficas. Previamente, se realizó la adaptación a la topografía superficial del terreno. Estas diez secciones de tomografía eléctrica resistiva representan los modelos geoelectricos obtenidos luego de la inversión de las resistividades aparentes registradas en campo para cada perfil.

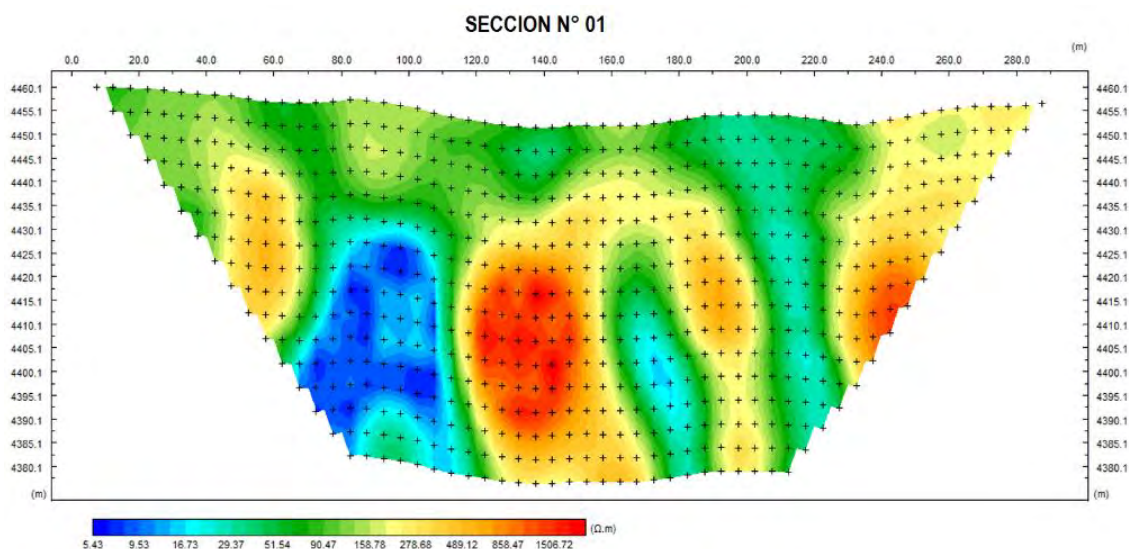
6.2.1.2.1 Sección 01

En la sección tomográfica se identifican resistividades que varían entre 5.43 Ωm y más de 1500 Ωm , con una potencia promedio de aproximadamente 80 m.

La zona de baja resistividad se concentra en el sector norte, correspondiente al estribo de la margen izquierda, con valores entre 5.43 Ωm y 30 Ωm , ubicándose principalmente por debajo de los 30 m de profundidad y presentando una geometría de tipo globular. La zona de resistividad media se distribuye en niveles superficiales hasta los 25 m, con valores entre 30 Ωm y 160 Ωm .

Por otro lado, la zona de alta resistividad se presenta en la parte central y norte por debajo de los 15 m, mientras que en el sector sur aflora desde superficie, con valores entre 160 Ωm y más de 1500 Ωm , asociados a materiales más competentes y menos saturados.

Figura 17. Sección tomográfica N° 01



Fuente: Plan Meriss, 2021.

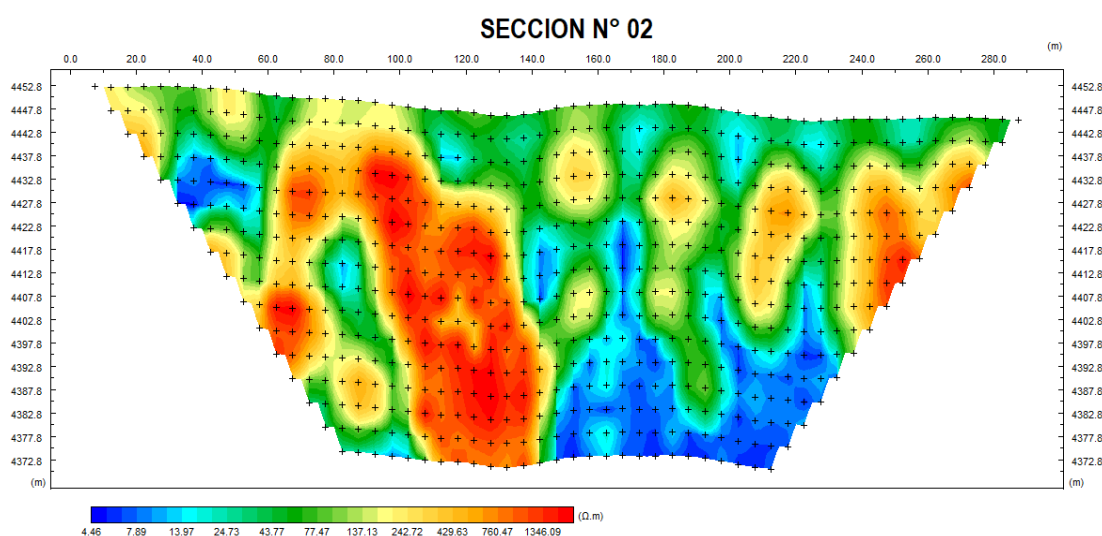
6.2.1.2.2 Sección 02

Se identifican resistividades que varían entre 4.48 Ωm y más de 1346 Ωm , con un espesor investigado promedio cercano a los 80 m.

La zona de baja resistividad se ubica principalmente a partir de los 20 m de profundidad en los sectores sur y central de la sección, de manera continua, mientras que en el sector norte se presenta de forma más reducida y cercana a superficie (5 a 8 m), con geometría tipo “gotas de lluvia”. Los valores oscilan entre 4.48 Ωm y 25 Ωm . La zona de resistividad media se distribuye en niveles superficiales, profundizando de manera subparalela, con valores entre 25 Ωm y 140 Ωm .

Por otro lado, la zona de alta resistividad se ubica en el sector del estribo de la margen derecha, aflorando desde superficie y alcanzando aproximadamente 60 m de profundidad, con un espesor cercano a 30 m. Los valores varían entre 140 Ωm y más de 1346 Ωm , asociados a materiales más competentes y menos saturados.

Figura 18. Sección tomográfica N° 02



Fuente: Plan Meriss, 2021.

6.2.1.2.3 Sección 03

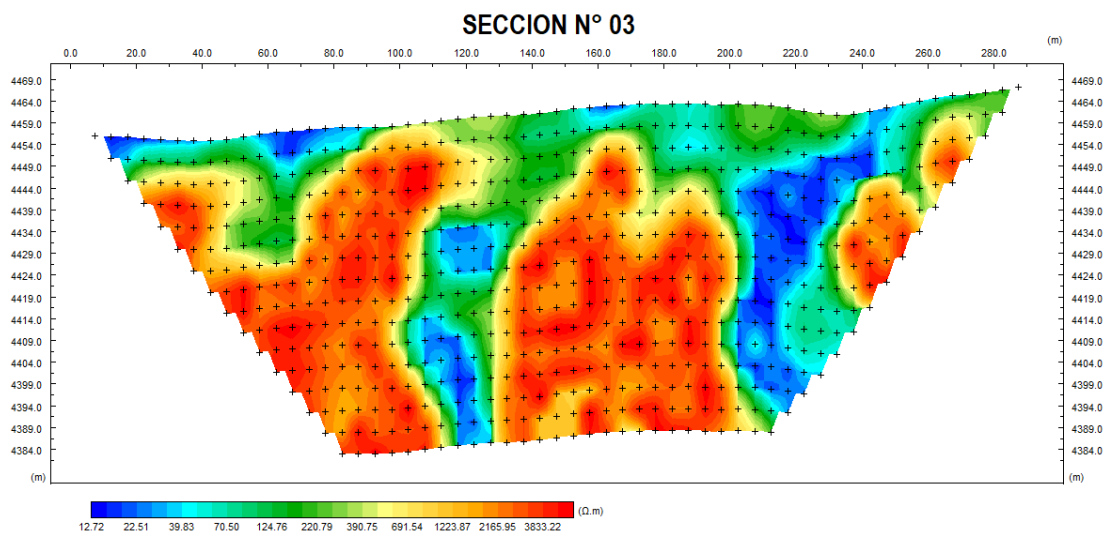
Se identifican resistividades que varían entre 12.72 Ωm y 3866 Ωm , con un espesor promedio cercano a los 80 m.

La zona de baja resistividad se presenta en los sectores sur y central de la sección, con una geometría tabular inclinada hacia el norte y un ancho aproximado de 10 a 20 m, profundizándose en dicha dirección. Los valores oscilan entre 12.72 Ωm y 80 Ωm . La zona de resistividad media engloba a

la anterior y actúa como transición hacia las zonas de mayor resistividad, con valores entre 80 Ωm y 2000 Ωm .

Por su parte, la zona de resistividad muy alta se localiza principalmente en los sectores medio y norte de la sección, desde aproximadamente los 5 m hasta los 80 m de profundidad, representando una porción reducida del perfil. Presenta valores entre 2000 Ωm y más de 3900 Ωm , asociados a materiales altamente competentes y poco saturados.

Figura 19. Sección tomográfica N° 03



Fuente: Plan Meriss, 2021.

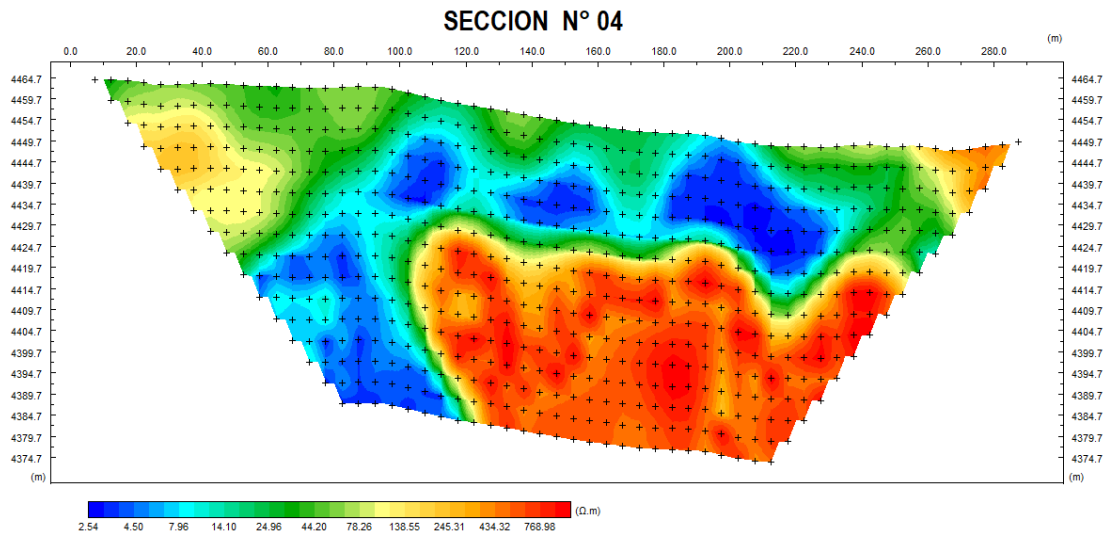
6.2.1.2.4 Sección 04

Se identifican resistividades que varían entre 2.54 Ωm y más de 800 Ωm , con un espesor promedio cercano a los 80 m.

La zona de baja resistividad se distribuye en cerca del 30% de la sección, ubicándose por debajo de los 15 m en la zona alta y desde aproximadamente 5 m de profundidad en la zona baja, alcanzando hasta los 25 m. Presenta valores entre 2.54 Ωm y 15 Ωm . La zona de resistividad media se desarrolla principalmente en superficie a lo largo de la sección, con un espesor promedio de hasta 10 m, profundizándose localmente en la zona alta del talud, con valores entre 15 Ωm y 140 Ωm .

Por su parte, la zona de alta resistividad se localiza hacia el tercio inferior de la sección, principalmente en la zona baja, a profundidades mayores a 30 m, con valores entre 140 Ωm y más de 800 Ωm , asociados a materiales más competentes y menos saturados.

Figura 20. Sección tomográfica N° 04



Fuente: Plan Meriss, 2021.

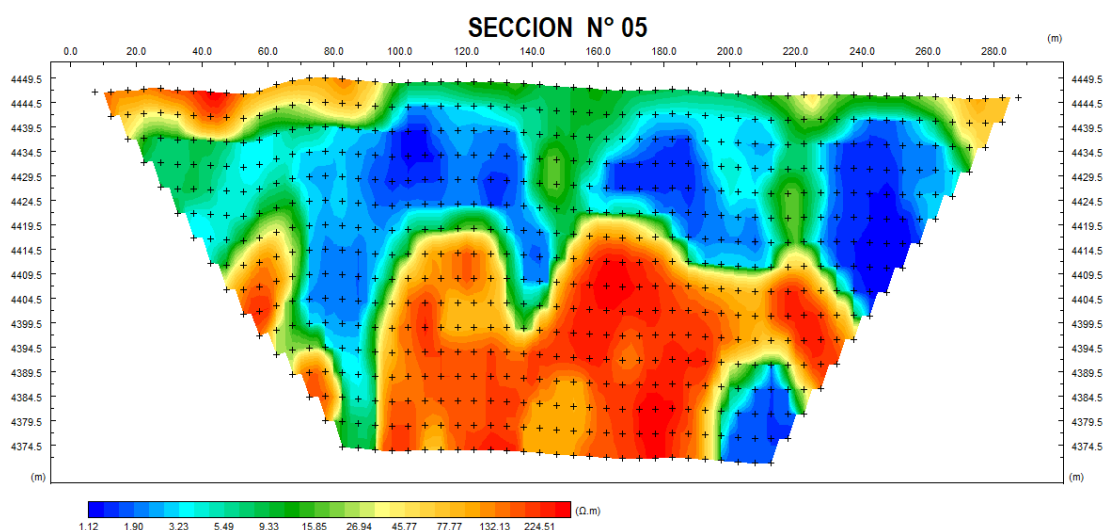
6.2.1.2.5 Sección 05

Se identifican resistividades que varían entre 1.12 Ωm y 230 Ωm , con un espesor promedio cercano a los 80 m.

La zona de muy baja resistividad se distribuye en gran parte de la sección a nivel subsuperficial, por debajo de los 10 m, presentando geometrías globulares en tres sectores que se profundizan hasta aproximadamente 30 m. Los valores oscilan entre 1.12 Ωm y 4 Ωm . La zona de resistividad media engloba estas áreas y actúa como transición hacia valores mayores, con resistividades entre 4 Ωm y 40 Ωm .

Por su parte, la zona de alta resistividad se ubica tanto en superficie, en los primeros 100 m de la sección con espesores de 5 a 10 m, como en profundidad en la zona central a partir de los 30 m, cubriendo gran parte del sector inferior. Presenta valores entre 40 Ωm y más de 230 Ωm .

Figura 21. Sección tomográfica N° 05



Fuente: Plan Meriss, 2021.

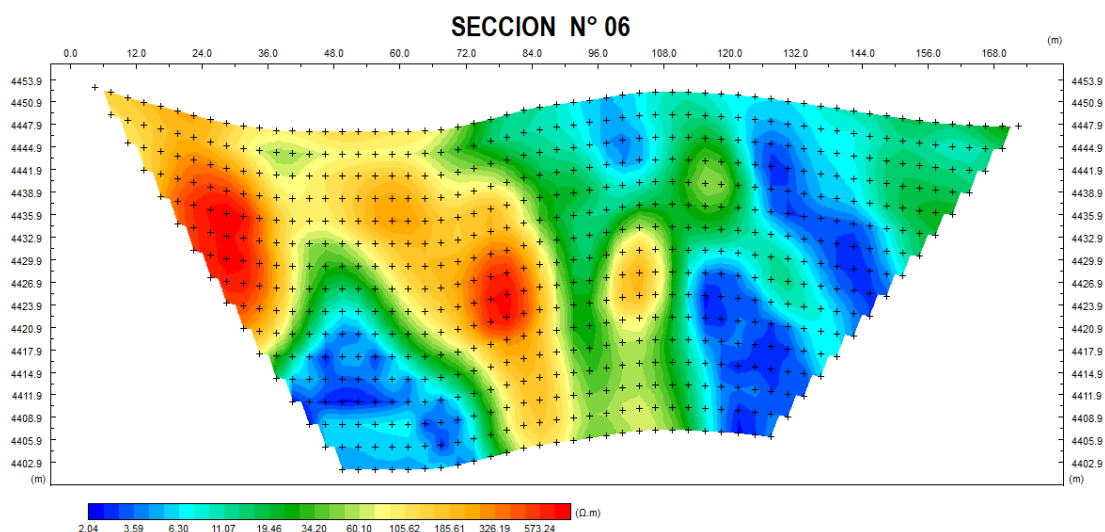
6.2.1.2.6 Sección 06

Se identifican resistividades que varían entre 2.04 Ωm y más de 580 Ωm , con un espesor promedio cercano a los 45 m.

La zona de baja resistividad se localiza en la parte media de la sección, aproximadamente hacia los 130 m de longitud, así como en el sector izquierdo, desarrollándose desde unos 3 m de profundidad y profundizando de forma elongada hasta cerca de los 25 m. Presenta valores entre 2.04 Ωm y 10 Ωm . La zona de resistividad media se distribuye desde la zona media hacia el extremo final de la sección, englobando a las zonas de baja resistividad y profundizando de manera similar, con valores entre 10 Ωm y 80 Ωm .

Por su parte, la zona de alta resistividad se ubica en el tramo inicial hasta la zona media de la sección, desde superficie hasta aproximadamente 25 m de profundidad, por debajo de la cual se identifican nuevamente zonas de baja resistividad. Presenta valores entre 80 Ωm y más de 580 Ωm .

Figura 22. Sección tomográfica N° 06



Fuente: Plan Meriss, 2021.

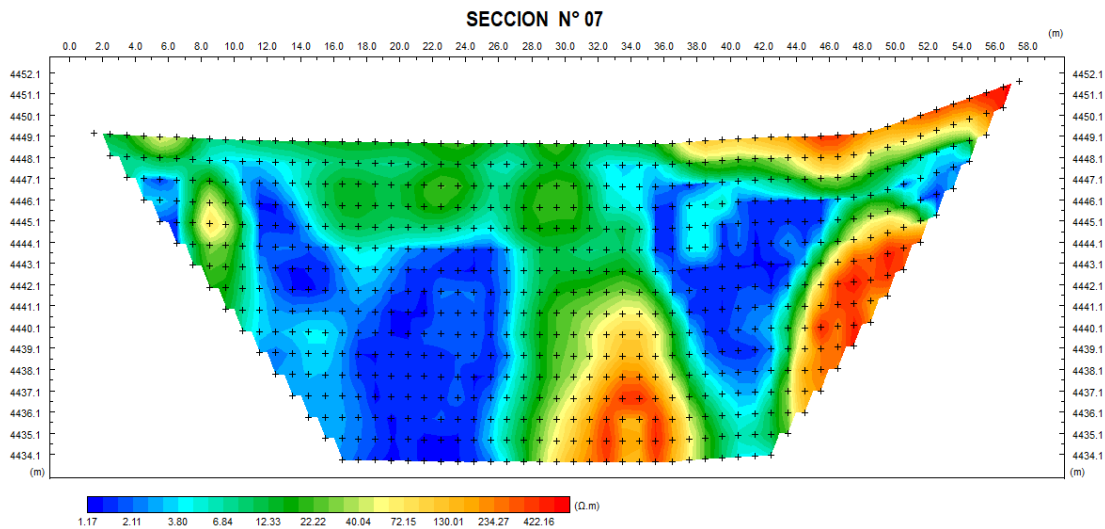
6.2.1.2.7 Sección 07

Se identifican resistividades que varían entre 1.17 Ωm y más de 425 Ωm , con un espesor promedio cercano a los 15 m.

La zona de baja resistividad se concentra desde el inicio hasta la parte media de la sección, así como hacia los 40 m de longitud, desarrollándose desde profundidades de aproximadamente 3 m en el tramo inicial y 6 m en la zona media, alcanzando mayores profundidades de forma amplia. Presenta valores entre 1.17 Ωm y 7 Ωm . La zona de resistividad media se distribuye en el sector inicial a medio, desde superficie hasta alrededor de 5 m de profundidad en promedio, con valores entre 7 Ωm y 40 Ωm .

Por su parte, la zona de alta resistividad se ubica hacia el extremo final de la sección (sector suroeste de la laguna), donde limita con el macizo rocoso, presentando un espesor cercano a 2 m entre los 40 m y 60 m de longitud. Los valores varían entre 40 Ωm y más de 425 Ωm , asociados a materiales más competentes.

Figura 23. Sección tomográfica N° 07



Fuente: Plan Meriss, 2021.

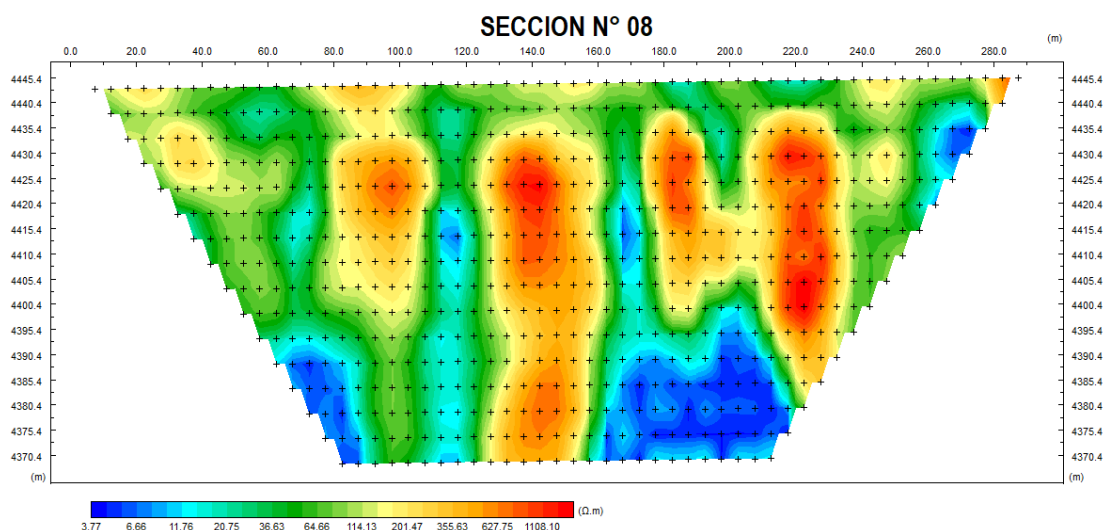
6.2.1.2.8 Sección 08

Se identifican resistividades que varían entre $3.77 \Omega m$ y valores superiores a $1100 \Omega m$, con un espesor promedio cercano a los 80 m.

La zona de baja resistividad se ubica por debajo de los 15 m hacia el extremo final de la sección, así como en los tramos inicial y medio a profundidades mayores a 50 m, ampliándose en profundidad. Presenta valores entre $3.77 \Omega m$ y $20 \Omega m$. La zona de resistividad media se desarrolla principalmente en superficie hasta los 15 m de profundidad, profundizándose localmente en los sectores donde se asocia con zonas de baja resistividad, con valores entre $20 \Omega m$ y $120 \Omega m$.

Por su parte, la zona de alta resistividad se extiende a lo largo de toda la sección, tanto en superficie con una potencia promedio de 5 m, como en profundidad a partir de los 15 m en sectores de geometría tabular y vertical que alcanzan hasta los 80 m. Presenta valores superiores a $120 \Omega m$.

Figura 24. Sección tomográfica N° 08



Fuente: Plan Meriss, 2021.

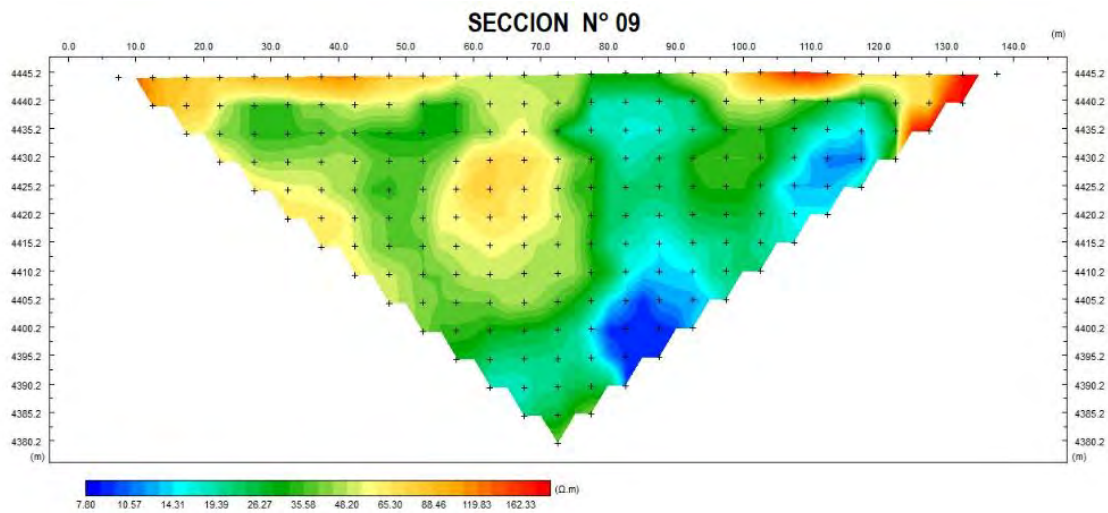
6.2.1.2.9 Sección 09

Se identifican resistividades que varían entre 7.80 Ωm y más de 165 Ωm , con un espesor promedio cercano a los 40 m.

La zona de baja resistividad se localiza aproximadamente a los 80 m desde el origen de la sección, a partir de unos 5 m de profundidad, y reaparece en profundidad cerca de los 40 m con geometría globular. Presenta valores entre 7.80 Ωm y 15 Ωm . La zona de resistividad media se distribuye por debajo de los 5 m en la mayor parte de la sección, alcanzando profundidades de hasta 40 m, con valores entre 15 Ωm y 50 Ωm .

Por su parte, el sector de alta resistividad se sitúa principalmente en la zona superficial a lo largo de toda la sección, con un espesor promedio de 10 m, incrementándose hacia el extremo final. Presenta valores entre 50 Ωm y más de 165 Ωm .

Figura 25. Sección tomográfica N° 09



Fuente: Plan Meriss, 2021.

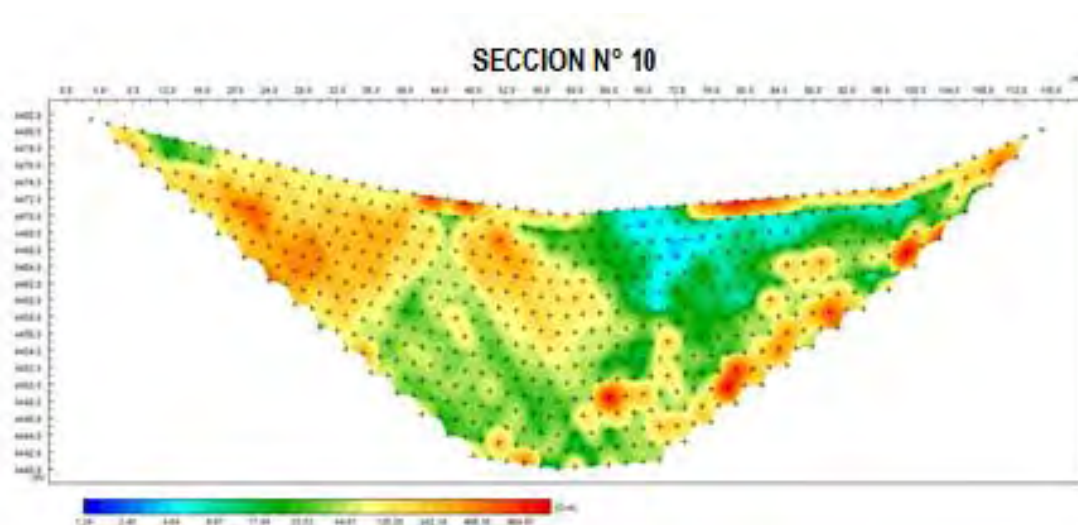
6.2.1.2.10 Sección 10

Se identifican resistividades que varían entre 1.24 Ωm y más de 904 Ωm , con un espesor promedio cercano a los 40 m.

La zona de baja resistividad se concentra en el sector izquierdo de la sección, correspondiente al estribo de la margen izquierda, con valores entre 1.24 Ωm y 80 Ωm . La zona de resistividad media se distribuye en este mismo sector desde superficie hasta aproximadamente 30 m de profundidad, con valores entre 80 Ωm y 240 Ωm .

Por su parte, la zona de alta resistividad se presenta a lo largo de la sección en superficie, con un espesor promedio de 15 m, siendo más amplia en el estribo izquierdo y extendiéndose hacia el estribo de la margen derecha en profundidad, de forma subparalela a la inclinación del talud rocoso. Presenta valores entre 240 Ωm y más de 904 Ωm .

Figura 26. Sección tomográfica N° 10



Fuente: Plan Meriss, 2021.

6.2.2 Descripción de unidades geológicas

Se ha procedido a describir las características geológicas que se consideran tienen incidencia en el comportamiento georesistivo del área, así como relacionar con el comportamiento hidrogeológico.

- Depósitos cuaternarios: Están constituidos por depósitos coluvio-aluviales y lacustres.
En el borde izquierdo de la laguna, correspondiente al estribo de la presa proyectada, se identifican depósitos aluviales de fondo.
En las laderas circundantes a la laguna se hallan depósitos eluvio-coluviales en espesores variables, pudiendo llegar a 3 m de espesor en algunos lugares de mayor altura.
En los bordes de la laguna se ha podido identificar depósitos lacustres, de pantano y turba que se halla interestratificadas con limos y arcillas lacustres.
El comportamiento geoelectrico de estos depósitos corresponden a estratos de gravas arenosas y gravas arcillosas con arenas limosas que se interestratifican groseramente, a veces sin una matriz consistente, estas tienen resistividades eléctrica altas y muy altas, se muestran generalmente en superficie como recubriendo a los depósitos de morrenas y volcánicos de tobas volcánicas con bombas y lapilli. Se les considera como de resistividad alta en las secciones tomográficas.
- Rocas fisuradas: Se considera rocas fracturadas a brechas volcánicas de flujo y también se presentan en estratos heterogéneos delgados y gruesos, pero con una estratificación no muy clara, siendo más bien en la mayoría de los casos difusa o irregular. Se presentan de colores amarillentos

a beige, son resistentes a la rotura, están asociados a aglomerados y tobas mezclados con aglomerados y algunas intercalaciones lenticulares de conglomerados.

En el área que corresponde a la laguna estas rocas afloran en la zona sur de la laguna y en la margen derecha del eje de presa a manera de estratos con alto grado de fracturamiento. Están constituidas por la formación Suratera en sus zonas lávicas constituidas por andesitas y dacitas de colores gris, verde oliva y marrón violáceo.

Las resistencias de estas rocas lávicas tienen resistencias entre 10 y 25 Mpa según los golpes de martillo, se encuentran bastante fracturadas o diaclasada en estratos entre 0.70 a 1.50m entre diastemas o niveles de tobas.

Figura 27. Afloramiento de rocas fracturadas en el área de estudio.



Fuente: Plan Meriss, 2021.

El comportamiento geoelectrico de estas rocas en general muestran signos mostrando resistividad eléctrica media a baja dada su carácter mineralógico y contenido de finos. Las resistividades se consideran como de resistividad media en la descripción tomográfica.

- Rocas sanas: Se ha considerado dentro de esta calidad a flujos lávicos, tobas y aglomerados volcánicos compactos con escaso o sin fracturamiento que pueda generar flujos de agua o rellenos de material fino con humedad.

El comportamiento geoelectrico de estas rocas presentan resistividades altas y están delimitadas en las secciones tomográficas generalmente con color rojo.

- Rocas volcánicas saturadas: Se trata de brechas, conglomerados, gravas con arenas y depósitos de tamiz que se hallan sin una matriz cohesiva, conformados por aglomerados permeables, pueden tener coloración gris, beige blanquecina o rosada. Presentan un grado de consolidación

relativamente alto y un fracturamiento desordenado. Las gravas con matriz arenosa se disponen en formas lenticulares. Son de naturaleza polimíctica y los fragmentos muestran tamaños heterogéneos.

El comportamiento geoeléctrico de estas rocas es muy heterogéneo. Sus resistividades son bajas a muy bajas, están delimitadas generalmente con un color azul en las secciones tomográficas. Estos materiales son bastante permeables por su disposición textural y estructural dentro de los depósitos volcánicos asociados depósitos cuaternarios.

6.2.3 *Interpretación de secciones tomográficas*

Para la interpretación de las secciones se han considerado los afloramientos presentes en las zonas donde se ejecutaron las líneas de ensayo. Asimismo, en las orillas de la laguna —área de mayor interés hidrogeológico— se realizaron perforaciones tipo auger hasta alcanzar el nivel freático, el cual constituye un parámetro clave para la interpretación y la corroboración de los valores de resistividad obtenidos. Bajo estas consideraciones, la descripción pone énfasis en la identificación de las zonas que presentan saturación en cada una de las secciones.

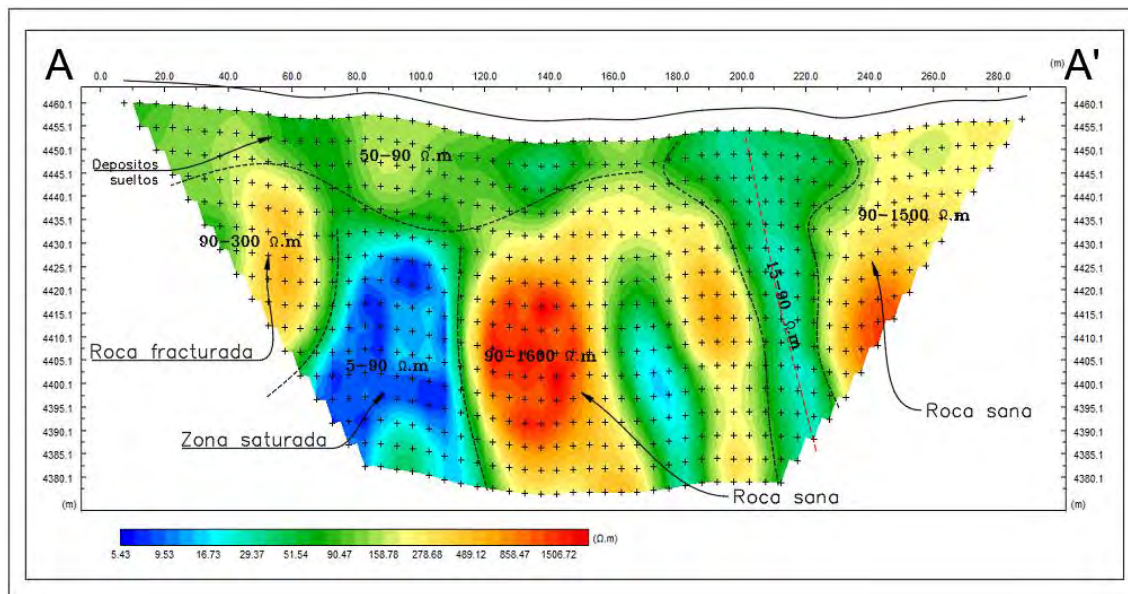
Por otro lado, con la finalidad de correlacionar las secciones de tomografía y facilitar su interpretación, estas se han agrupado en cuatro conjuntos: el primer grupo corresponde a las secciones ubicadas en el sector oriental de la laguna, con orientación noroeste–sureste (A–A', B–B' y C–C'); el segundo grupo incluye las secciones del sector norte (D–D' y E–E'); el tercer grupo comprende las secciones situadas en el extremo oeste (F–F' y G–G'); y finalmente, el cuarto grupo agrupa las secciones desarrolladas a lo largo del macizo rocoso de la Formación Suratera (H–H' e I–I')..

6.2.3.1.1 *Secciones tomográficas*

Secciones Noroeste-Sureste (Zona oriental de la laguna)

- **Sección A–A':** La zona saturada se encuentra a 15 m debajo de la laguna entre 10 y 15 m aguas abajo del eje propuesto, tal como se observa en la sección.

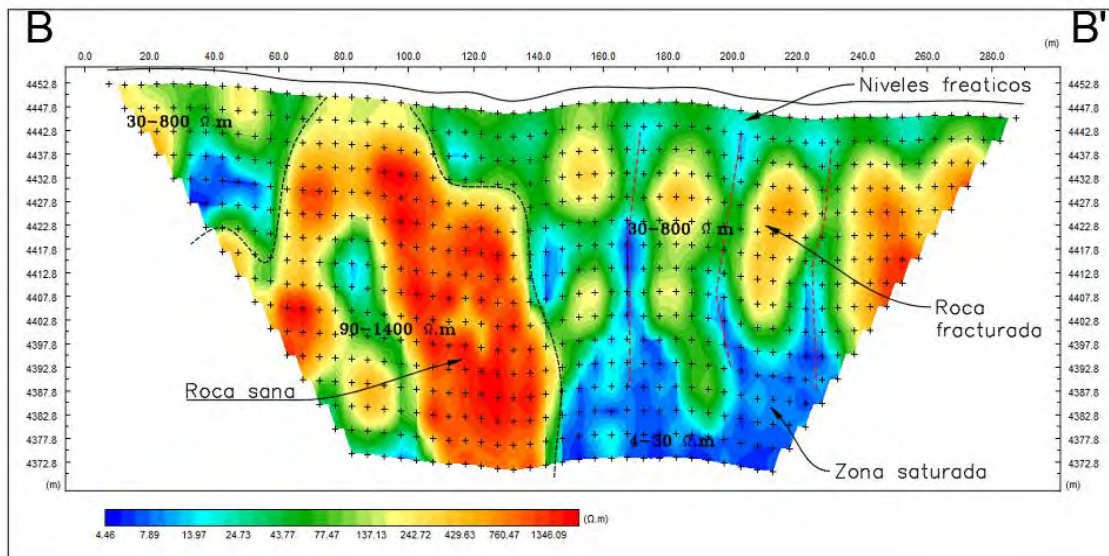
Figura 28. Sección A-A' – Zona saturada de forma cóncava a 15m debajo del nivel del espejo de agua de la laguna



Fuente: Plan Meriss, 2021.

- Sección B-B': Esta sección se halla a 8 m encima del nivel de agua de la laguna y es paralela a la sección A-A', lo que implicaría que existe un alineamiento de rocas saturadas en noreste a suroeste, ya que en la sección A-A' se halla el nivel de saturación a 100 m del inicio de la sección y en esta se muestra a 40 m y entre 12 y 15m debajo del nivel del nivel de agua de la laguna. Los niveles freáticos han sido corroborados con las perforaciones de auger realizadas en los pozos 7 y 8 que se encuentran a 2.40 m de la superficie y que se observan a 160 m 200 y 240 m de la sección profundizando hacia un único acuífero aparentemente.

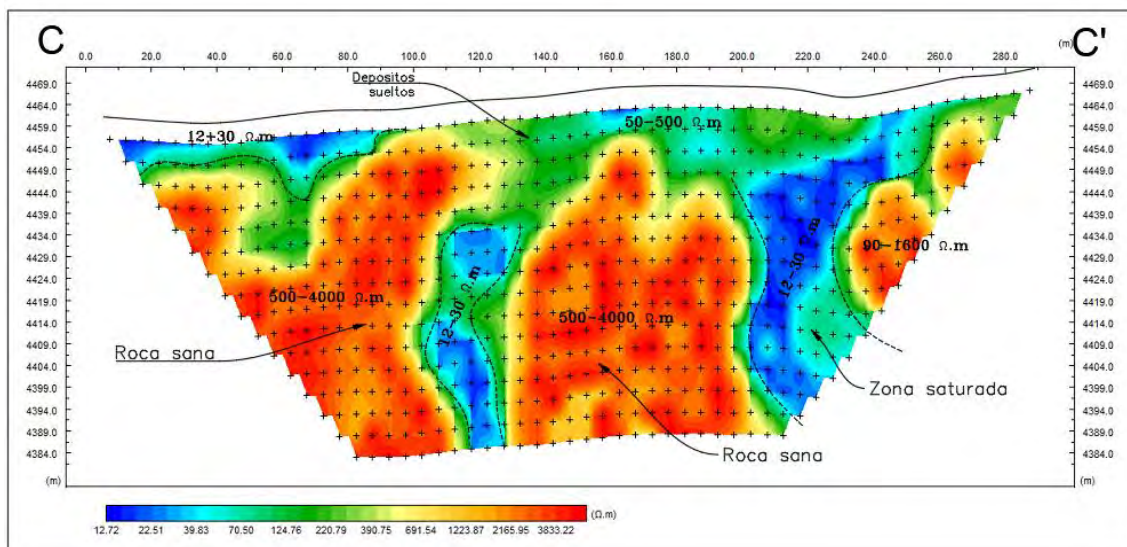
Figura 29. Sección B-B': Rocas saturadas debajo de 15m y a 40 m del inicio de la sección. Hacia los 160 m, 200 y 240 m se corrobora niveles freáticos que aparentemente tienen conexión



Fuente: Plan Meriss, 2021.

- Sección C-C': Esta sección que se traslapa con la sección D-D' hay una zona húmeda sin mucha saturación debajo de los 4 m de la superficie entre los 20 y 80m de la sección pero que se halla a la altura del nivel de agua de la laguna que se encuentra a 4449 msnm, así mismo a los 240m se observa otra zona húmeda que se halla encima del nivel de la laguna y que se incrementa al nivel del espejo de agua.

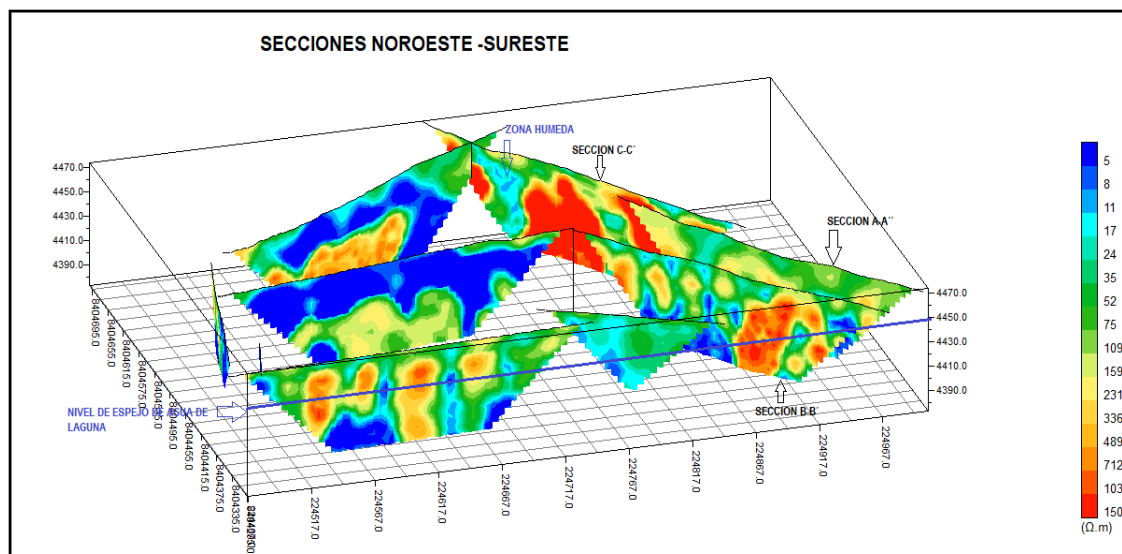
Figura 30. Sección C-C': Zonas húmedas que se observan por encima del nivel de agua de la laguna



Fuente: Plan Meriss, 2021.

Modelo hidrogeológico: Se muestran las secciones A-A', B-B' y C-C' en el que se puede observar el comportamiento hidrogeológico en 3D, los que han sido descritos en cada sección y se evidencia dos acuíferos delimitados por una zona de rocas impermeables que se hallan próximos al eje de la presa propuesta.

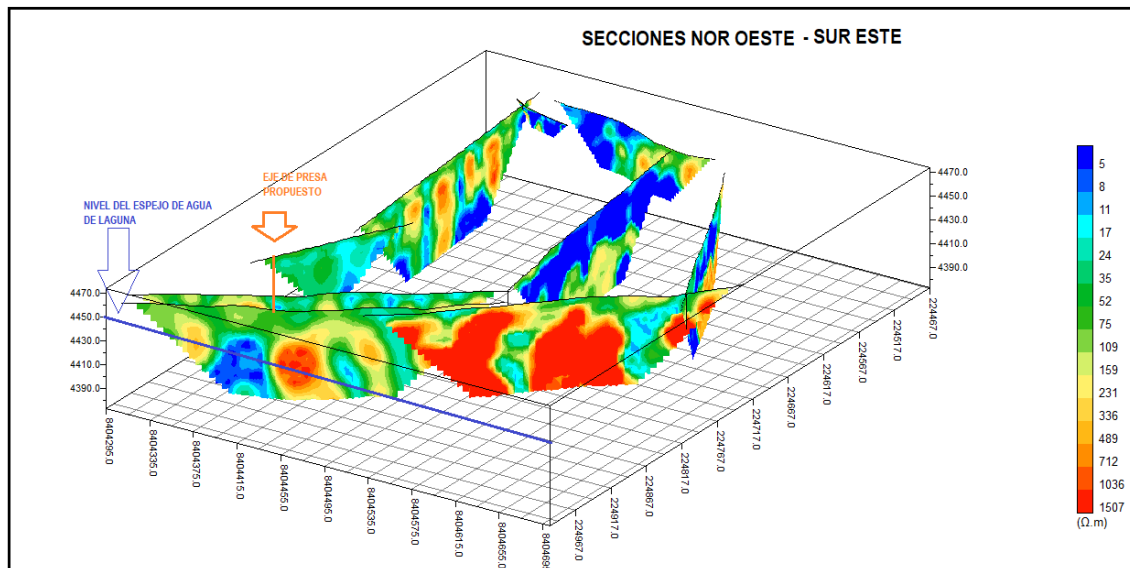
Figura 31. Secciones noroeste-sureste



Fuente: Plan Meriss, 2021.

Girando la perspectiva de las secciones se puede observar los tres macizos rocosos, la zona alta que aparece en la morfología contiene una zona con rocas húmedas, aunque no saturadas, que posiblemente se sature en temporadas de precipitación.

Figura 32. Observación de macizos rocosos y zona de rocas húmeda

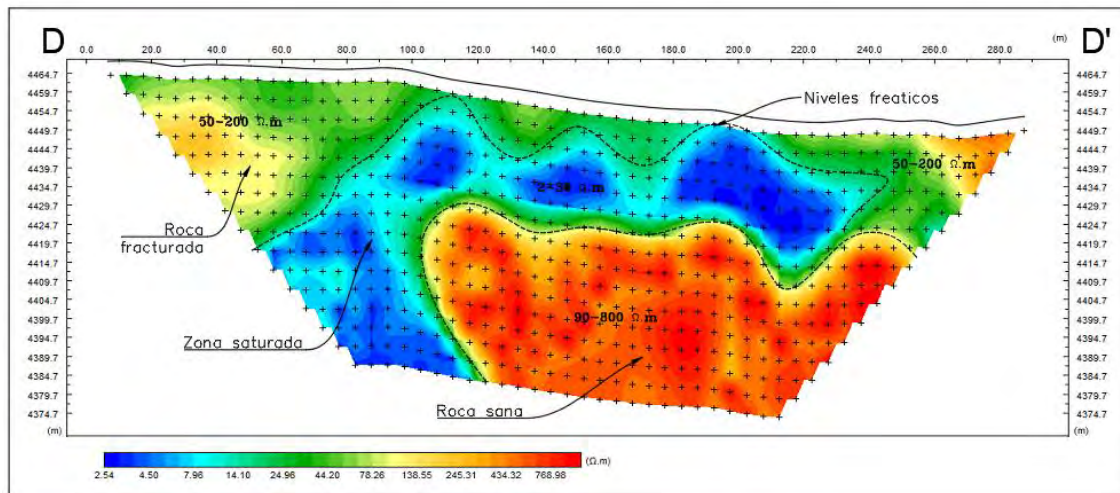


Fuente: Plan Meriss, 2021.

Secciones Este-Oeste (Norte de la laguna)

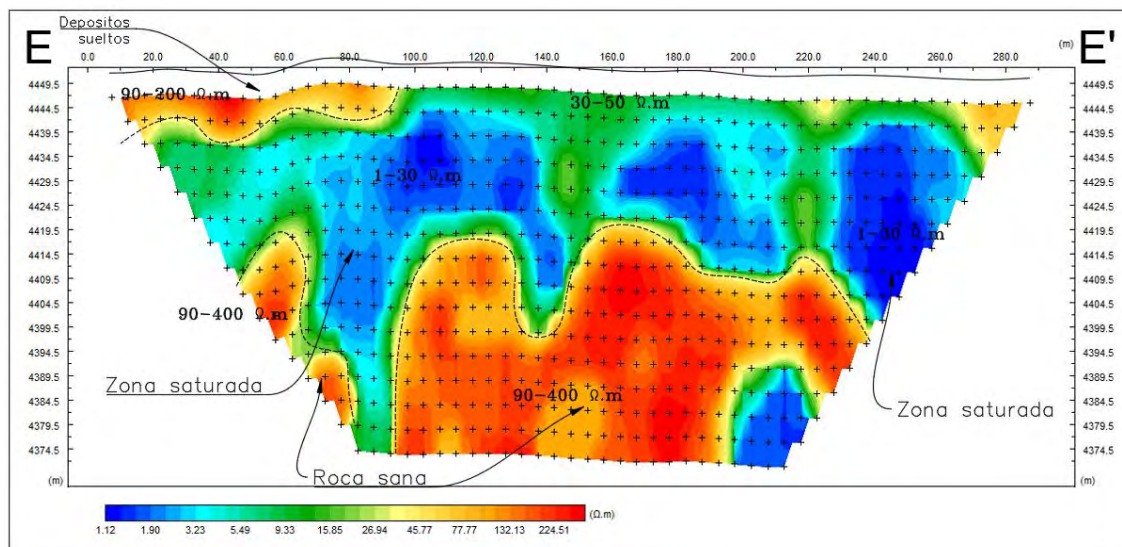
- Secciones D-D' y E-E': En estas secciones se puede observar zonas saturadas, con una aparente continuidad, que tienen una dirección de noreste-suroeste, es decir en dirección de la laguna, ya que los niveles de saturación inician a altura de la laguna y en la sección E-E' se hallan debajo de la laguna, tal como se podrá apreciar en la siguiente sección E-E', lo que implica que existe un nivel de gradiente hidráulico de casi 5 m de diferencia entre ambas secciones que tienen 50 m de separación en promedio, lo que equivale a un 10% de gradiente hidráulico.

Figura 33. Sección D-D': Zonas saturadas casi al nivel de la laguna 100 m de la orilla de la laguna y a 50 m de la orilla están por debajo de 5 m



Fuente: Plan Meriss, 2021.

Figura 34. Sección E-E': La saturación de agua se halla debajo de 5 m del espejo de agua a 50 m de la orilla de la laguna



Fuente: Plan Meriss, 2021.

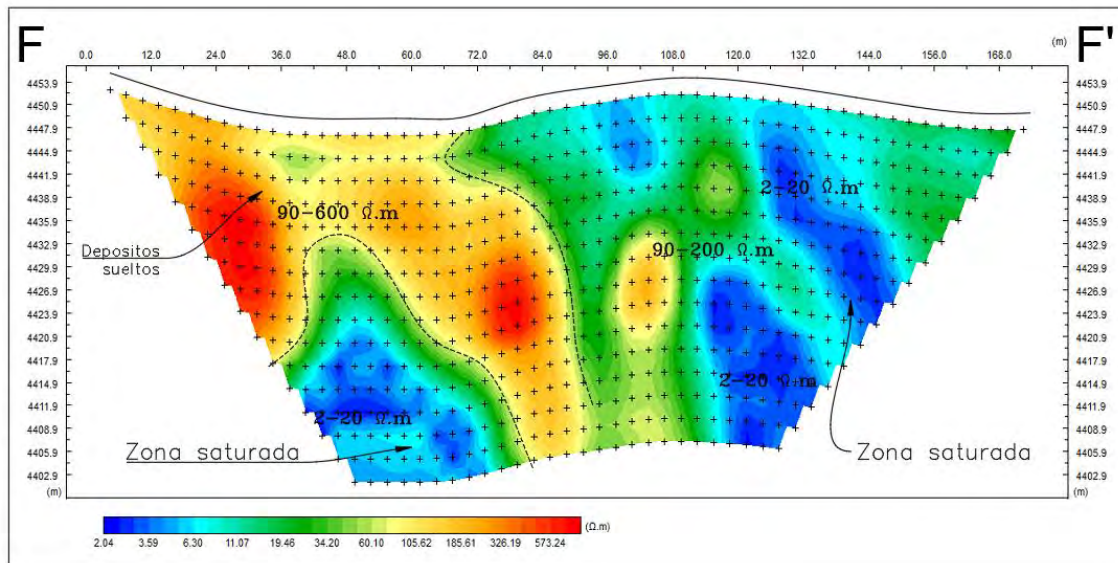
Modelo hidrogeológico: La zona noreste hacia el suroeste existe una continuidad morfológica de los niveles de saturación, tal como se puede apreciar en el siguiente modelo hidrogeológico, mostrando la sección D-D' y la Sección E-E' paralelas y con continuidad de una zona insaturada al

Por otro lado, en las perforaciones de auger, se ha encontrado un nivel de agua a los 3 m de profundidad en promedio en los pozos 14 al 18.

Secciones Norte-Sur

-
- 66

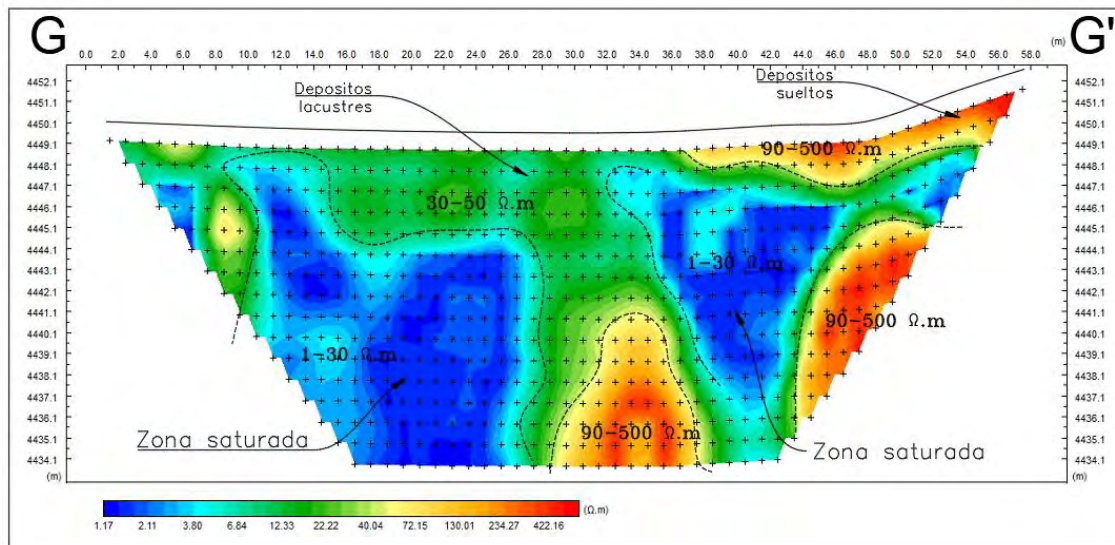
Figura 36. Sección F-F' - Zonas con saturación en la zona norte y sur a 30 m debajo del espejo de agua y otra zona más al sur a 4m debajo del nivel de la laguna



Fuente: Plan Meriss, 2021.

- **Sección G-G':** Esta sección es corta y el nivel de profundidad de observación es a 1 m de profundidad, por lo que se puede observar que hay dos zonas con saturación a 3 m debajo del nivel del espejo de la laguna que luego profundizan, tal como se observa en la Figura 37.

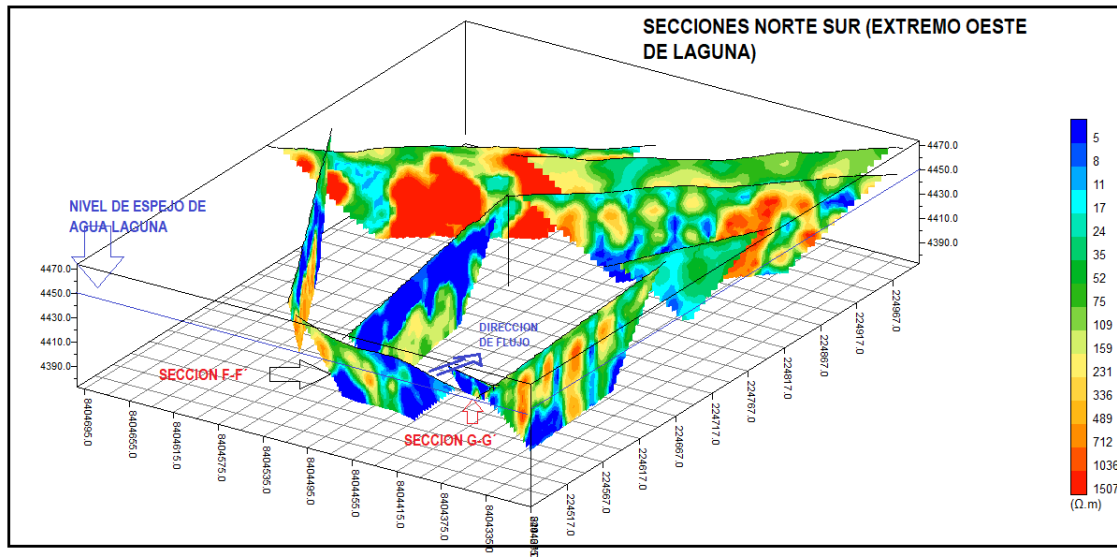
Figura 37. Sección G-G': Zona de saturación en dos sectores a 3 m debajo del nivel de agua de la laguna



Fuente: Plan Meriss, 2021.

Modelo hidrogeológico: En este grupo de secciones se puede evidenciar que entre la sección F-F' y la Sección G-G' existe una morfología similar del comportamiento de saturación, es decir dos zonas separadas por un macizo rocoso impermeable o seco. Por otro lado, en la sección F-F' el nivel de saturación está casi al nivel de la laguna es decir a 4449m msnm y en la sección G-G' se halla entre 3 y 4 m de profundidad, estando separados entre ambas secciones 22 m, implica que existe un gradiente hidráulico entre 12% y 14% por lo que se puede decir que existe un flujo hacia la laguna, tal como se observa en la Figura 38.

Figura 38. Secciones Norte-Sur (Extremo oeste de la laguna)

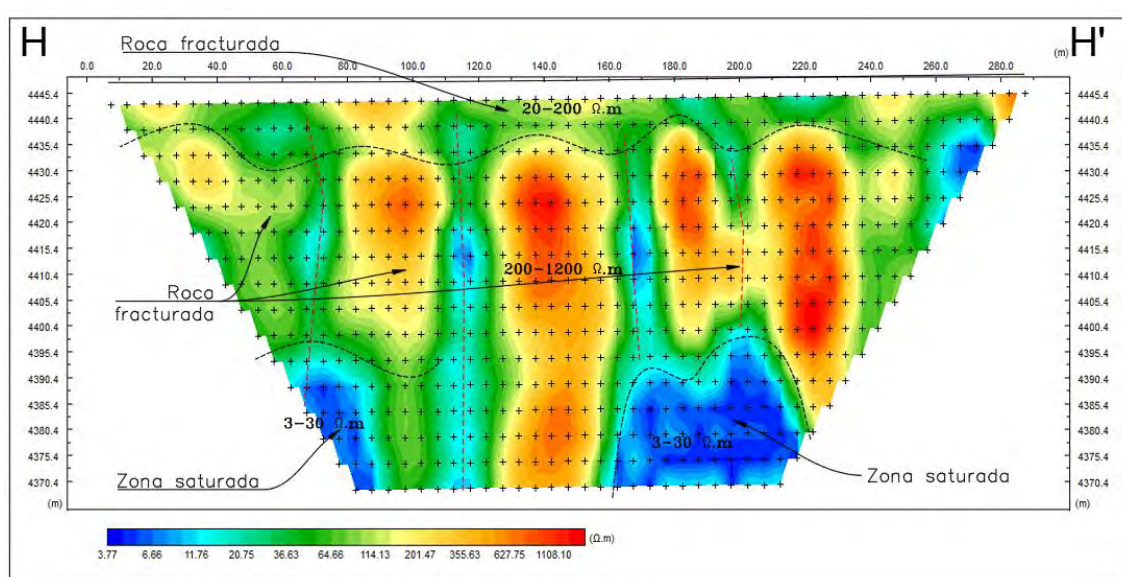


Fuente: Plan Meriss, 2021.

Secciones Oeste-Este

- Sección H-H': Esta sección muestra zonas saturadas muy por debajo del nivel del espejo de agua, específicamente a 30 m aparentemente asociado a dos fallas geológicas que en profundidad hacia los 55 m se hacen más perceptibles.

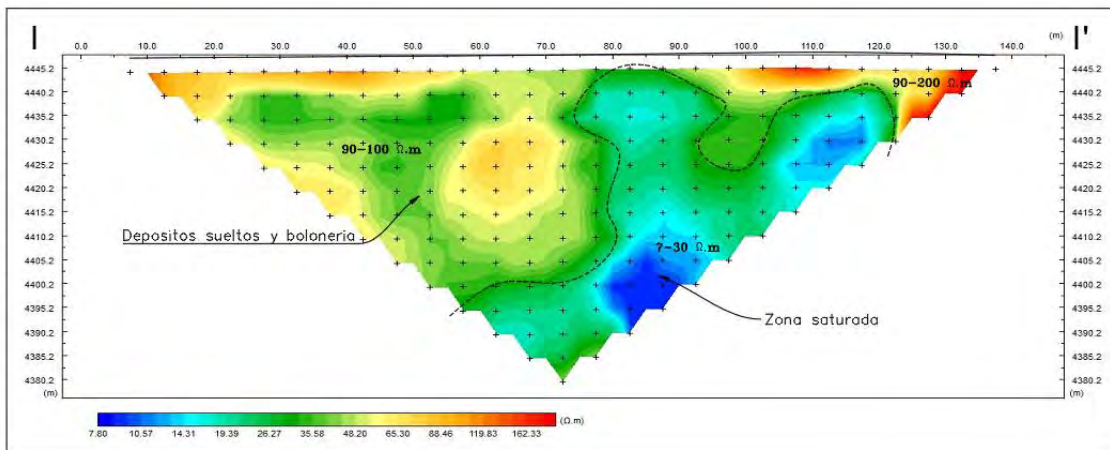
Figura 39. Sección H-H': Zona saturadas a 30 m escasamente perceptibles y a 55m con mayor claridad y amplitud



Fuente: Plan Meriss, 2021.

- Sección I-I': En esta sección la zona saturada se halla a 35 m debajo del nivel de agua de la laguna, pero con menor grado de fracturamiento que las zonas de la sección G-G' y hacia el eje de presa se presenta un nivel impermeable hasta los 15 m debajo del nivel del espejo de agua.

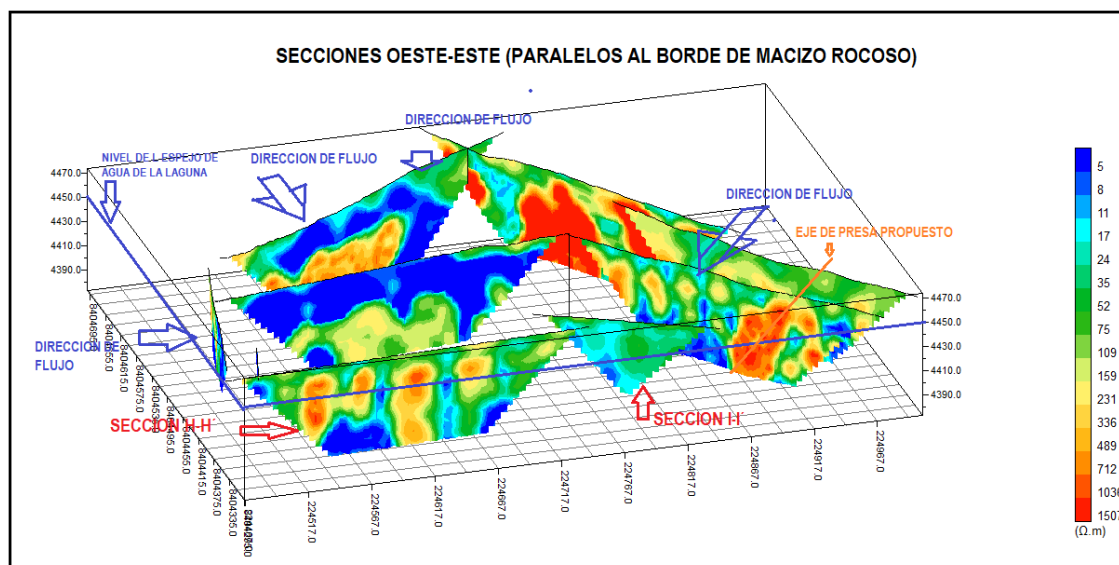
Figura 40. Sección I-I': zona saturada a 35 m debajo del nivel de agua de la laguna



Fuente: Plan Meriss, 2021.

Modelo hidrogeológico: En estas secciones, la profundidad de saturación se ubica por debajo de los 30 m y se encuentra asociada a fallas geológicas, las cuales presentan zonas de roca fracturada con anchos entre 1 m y 2 m. Estas estructuras se ensanchan en profundidad y tienden a unirse, formando una geometría tipo cono con dimensiones aproximadas de 20 a 30 m.

Figura 41. Secciones Oeste-este (Paralelos al borde de macizo rocoso)



Fuente: Plan Meriss, 2021.

6.2.3.1.2 Discusión

De la interpretación de las secciones se concluye la presencia de al menos cuatro zonas saturadas, cuyas direcciones están asociadas a elementos morfoestructurales y a gradientes hidráulicos, lo que sugiere la existencia de acuíferos que alimentan la laguna.

Asimismo, se identifican flujos de menor magnitud dirigidos hacia el sur, a profundidades entre 30 m y 50 m, los cuales se originan en zonas de fallas cercanas al nivel del espejo de agua y se amplían progresivamente en profundidad.

En conjunto, las direcciones de flujo evidencian al menos cuatro acuíferos, cuyas recargas provienen de macizos rocosos volcánicos fracturados (Ver Mapa 09 –Dirección de flujo).

6.3 SONDAJES ELÉCTRICOS VERTICALES

El estudio fue desarrollado mediante seis sondajes eléctrico verticales en la zona de embalse.

6.3.1 Resultados de sondajes de zona de embalse

En la zona de embalse se ejecutaron seis sondajes eléctricos distribuidos alrededor de la laguna, cuyo objetivo fue conocer la litología del subsuelo y su permeabilidad de los materiales en términos cualitativos. En el Mapa 08 – Ubicación de ensayos geofísicos se muestra la ubicación de los sondajes eléctricos verticales.

Tabla 7. Coordenadas UTM de sondajes eléctricos verticales ejecutados

SONDAJE	ESTE	NORTE	Primera alternativa
SEV-1P	224054	8404445	Laguna
SEV-2P	224739	8404536	Laguna
SEV-3P	224560	8404526	Laguna
SEV-4P	224575	8404447	Laguna
SEV-5P	224485	8404370	Laguna
SEV-6P	224625	8404383	Laguna

Fuente: Plan Meriss, 2021.

6.3.2 Resultados de sondajes eléctricos

Tabla 8. Sondaje 1P

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	1.0	340	Depósito aluvial en estado húmedo
2	5.0	11	Depósito arcilloso con arena fina de baja permeabilidad a impermeable
3	20	25	Depósito limo-arcillo-arenoso de baja permeabilidad
4	>50	8	Roba toba y/o roca sedimentaria

Fuente: Plan Meriss, 2021.

Tabla 9. Sondaje 2P

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	1.0	667	Depósito aluvial en estado húmedo
2	2.0	22	Depósito arcilloso con arena fina de baja permeabilidad
3	11	79	Substrato rocoso
4	>50	13	Probable roca toba

Fuente: Plan Meriss, 2021.

6.3.3 Resultados de zona de embalse

La litología del subsuelo en la zona de embalse está constituida en superficie de una capa de un metro de espesor compuesto de materiales de grano fino, seguido de otra capa con resistividad baja

entre 3 y 11 ohm-m correspondiente a material arcilloso. Su espesor varía entre 3.0m y 7.0m. Por debajo de ese depósito se observa otro depósito con resistividades entre 16 y 25 ohm-m relacionado a material arcillo-limo-arenoso de permeabilidad baja y con saturación de agua subterránea. En contacto con esa formación se encontraría el substrato rocoso cuya profundidad es variable, en los sondeos SEV-2P y SEV-6P se encontraría a menor profundidad (6.0m aproximadamente.).

6.3.4 *Análisis y comentarios de ensayos geoelectricos*

En la zona de embalse se indica que la litología del subsuelo en la zona de embalse está constituida en superficie de una capa de un metro de espesor compuesto de material es de grano fino, seguido de otra capa con resistividad baja entre 3 y 11 ohm-m correspondiente a material arcilloso. Su espesor varía entre 3.0m y 7.0m. Por debajo de ese depósito se observa otro depósito con resistividades entre 16 y 25 ohm-m relacionado a material arcillo-limo-arenoso de permeabilidad baja y con saturación de agua subterránea.

En general, los estudios geoelectricos precisan que existe niveles de suelos saturados de depósitos heterogéneos, con presencia de suelos limo-arenosos que tienen baja permeabilidad y que constituyen los suelos entre los niveles freáticos, que son materiales que aun teniendo baja permeabilidad soportan al nivel freático existente.

Substrato Rocos: En esta estructura se ha identificado dos horizontes geoelectricos; uno resistivo relacionado a roca andesita y el conductivo asociado a roca toba y/o roca sedimentaria.

7.1 GENERALIDADES

La caracterización hidrogeológica depende de factores como la hidrología, litología, estructuras geológicas y la composición química de las aguas, los cuales permiten establecer parámetros de evaluación orientados a comprender el comportamiento hidrogeológico del sistema. Este comportamiento está controlado por las condiciones geológicas y litológicas, que influyen directamente en la dinámica hidráulica, así como en la configuración de los flujos subterráneos y la geometría del acuífero. En este sentido, el presente capítulo permite definir las principales características hidrogeológicas del área de estudio.

Para la identificación y caracterización de las unidades hidrogeológicas, se deben considerar factores litológicos, así como parámetros geotécnicos como la densidad y la permeabilidad, además de parámetros fisicoquímicos del agua, tales como el pH, la conductividad eléctrica, entre otros.

7.2 PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

7.2.1 *Permeabilidad en rocas volcánicas*

La unidad de muestreo corresponde al área circundante a la laguna, donde se realizaron mediciones de sistemas de fracturas en el macizo rocoso de la Formación Suratera, el cual aflora al sur de la laguna. En esta unidad se establecieron seis (06) estaciones microtectónicas (EMT), distribuidas desde el extremo oeste hasta la zona del eje en cuatro sectores, y dos adicionales en el sector norte de la laguna.

El factor de permeabilidad en las zonas superficiales de estudio es fundamental para la evaluación hidrogeológica, ya que permite estimar los procesos de entrada y salida de los acuíferos, así como la velocidad de flujo del agua, contribuyendo además a la determinación del tipo de acuífero.

Si bien las mediciones directas a través de perforaciones constituyen el método más confiable, también es posible estimar de forma indirecta los parámetros de permeabilidad. En este caso, se procedió a su determinación a partir del estudio de las estructuras lineales del macizo rocoso, considerando la separación, la abertura y la cantidad de sistemas de fracturas identificados en las estaciones microtectónicas. Estos parámetros fueron empleados para el cálculo de la permeabilidad siguiendo el método propuesto por Terzaghi y Peck.

Para ello, se estimaron los valores promedio de separación y abertura de los sistemas de fracturas. En la zona sur de la laguna se consideraron cuatro EMT y tres sistemas de fracturamiento,

mientras que, en la zona norte, donde se registraron dos EMT, se realizó el promedio correspondiente. Los valores obtenidos se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 10. Coeficiente de permeabilidad indirecta de tres familias promedio de cuatro EMT para la zona sur de la laguna Condorccota

Condición del macizo	Sistemas	Espaciamiento	K Matriz	u	pa*seg
Abertura (m)	C 1	0.005	1.00E-09	1.00E-09	1.00E-06
Abertura (m)	C 2	0.004	g=	9.81	m/s2
Abertura (m)	C 3	0.005	v=	1.00E-02	m2/s
Prom esp.		0.005	12v*b	5.40E-02	
Separación (m)	S 1	0.3	g*e3	9.97E-07	
Separación (m)	S 2	0.5	k=	1.85E-05	
Separación (m)	S 3	0.7			cm/s
Prom Sep		0.450			

Fuente: Plan Meriss, 2021.

Tabla 11. Coeficiente de permeabilidad indirecta para dos familias de la zona norte de la laguna Condorccota

Condición del macizo	Sistemas	Espaciamiento	K Matriz	u	pa*seg
Abertura (m)	C 1	0.04	1.00E+03	1.00E+03	1.00E-03
Abertura (m)	C 2	0.04	g=	9.81	m/s2
			v=	1.00E-02	ms/s
Prom esp.		0.02	12 v*b	1.15E-01	
Separación (m)	S 1	0.1	g*e3	7.85E-05	
Separación (m)	S 2	1.8	k=	6.85E-04	
					cm/s
Prom Sep		0.955			

Fuente: Plan Meriss, 2021.

Los coeficientes de permeabilidad de la tabla superior están en el rango de 1.85E-05cm/s a 6.85E-04 cm/s, considerados como permeables y semipermeable, según Terzaghi y Peck se hallan en el límite de drenaje pobre a bueno.

7.2.2 Permeabilidad en suelos cuaternarios

Para la evaluación de la permeabilidad en los suelos cuaternarios se han considerado los resultados obtenidos en base a los ensayos de permeabilidad realizados en las excavaciones distribuidas a lo largo del eje proyectado de la presa. Los resultados obtenidos y ubicación de los ensayos ejecutados se describen en detalle en el ítem 5.4.

7.3 INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA

Se identificaron dos manantiales que se encuentran en el interior de la laguna, lo que imposibilita su medición de caudal, pero si es posible evidenciar las surgencias que es en realidad un manantial interno tal como se puede observar en la Figura 42.

Figura 42. Manantiales de la laguna cuyos acuíferos alimentadores sugieren el origen del suroeste de la cuenca



Observando en mapas satelitales es posible identificar las zonas oscuras y el alineamiento de los manantes en el sector norte y en el extremo sur oeste donde se corrobora los sugerido en las secciones de tomografía eléctrica.

Figura 43. Imagen satelital de la disposición de las manantiales dentro de la laguna



Nota: Google Earth. Ubicación: San Andrés de Checca, Canas – Cusco. Fecha de consulta: 17 de julio de 2025.

7.3.1 Perforaciones manuales con Auger

Se ejecutaron 18 perforaciones con Auger en los alrededores de la laguna, ubicando los mismos en zonas que sugerían ocurrencia de flujos de agua en base a las evidencias de lo observado en los manantiales y considerando que las zonas de recarga debían ubicarse en los macizos rocosos del norte de laguna.

Las 18 perforaciones han sido agrupadas en seis lugares en el que se han diseñado tres en cada uno de los sectores en forma triangular, de modo que se podía encontrar diferencias de nivel y determinar el gradiente hidráulico en caso hubiera inconvenientes con el registro de tomografía, pero como se tienen resultados claros estos sirven para corroborar los resultados a escala mayor. La ubicación de estas perforaciones se visualiza en el Mapa 10 –Ubicación de perforaciones manuales de Auger.

7.3.2 Perforaciones

- Perforaciones del sureste y noreste de la laguna, entre el eje proyectado y la zona media (correspondientes a las perforaciones 1 al 9), presentan un suelo de cobertura de aproximadamente 0.30 a 0.40 m de espesor. Por debajo de este se identifican arcillas limosas y arenas de color amarillo

con presencia de raíces. Subyacente a este nivel se encuentran turbas negras con abundante materia orgánica y alto grado de saturación, asociadas a lodos de tipo pantanoso. Finalmente, en niveles más profundos se presentan arcillas grises con presencia de cantos de gravilla, generalmente vinculadas al nivel freático, el cual se ubica entre 1.60 m y 1.80 m de profundidad desde la superficie.

Figura 44. Pozos de la zona noreste de la laguna con vista del nivel freático y ascenso lento



Fuente: Plan Meriss, 2021.

- Los pozos de la zona norte, corresponden a las perforaciones 10 al 15, presentan un comportamiento diferente en cuanto a su disposición estratigráfica. En los pozos ubicados en el sector norte, donde se emplazan los manantiales, se identifica un suelo de cobertura vegetal de aproximadamente 0.30 m de espesor, seguido por un nivel de gravas angulosas de 0.50 m. Por debajo de este se encuentran limos arenosos con presencia de raíces y fango, siendo en este estrato donde se ubica el nivel freático, registrado entre 1.20 m y 1.40 m de profundidad. Cabe señalar que, luego de aproximadamente 5 minutos, el nivel freático ascendió hasta 0.40 m desde la superficie, lo que evidencia una alta permeabilidad y transmisividad del medio; en función del diámetro del pozo, se estima un coeficiente de permeabilidad del orden de 1.0×10^{-3} cm/s. Por otro lado, en los pozos 13, 14 y 15 se observa una variación en la estratigrafía respecto al sector noreste. Se presenta un nivel superficial de suelo orgánico marrón de aproximadamente 0.40 m, seguido por un estrato de limo arcilloso de color blanco con un espesor similar. Subyacente a este se encuentra una capa de arcilla amarilla con un espesor promedio de 1.4 m, seguida por un nivel de fango negro con raíces, altamente saturado. Finalmente, el nivel freático se asocia a un estrato de arena limosa, ubicándose entre los 2.90 m y 3.00 m de profundidad.

Figura 45. Pozos de la zona norte de la laguna con el ascenso rápido del nivel freático



Fuente: Plan Meriss, 2021.

- Los pozos de la zona suroeste, no llegaron al nivel freático, debido a la fuerte resistencia de los suelos limo arenosos de color blanco, que se constituyen como tufos volcánicos compactados.

Figura 46. Registros estratigráficos con comportamiento estratigráfico diferentes por sectores



Fuente: Plan Meriss, 2021.

7.3.3 *Análisis de caudales*

Los manantiales se encuentran emplazados en el interior de la laguna, lo cual imposibilita tener un cálculo preciso de los caudales generados, sin embargo, los aforos de la salida de la laguna en periodos de estiaje son los mejores resultados del caudal real de alimentación de los acuíferos.

7.3.4 *Tipos de acuíferos*

En base a la interpretación de las secciones de tomografía eléctrica, corroborada con la evidencia de manantiales y las perforaciones manuales ejecutadas con Auger, se caracteriza a los acuíferos que alimentan la laguna como acuíferos fisurados en rocas volcánicas.

Los flujos subterráneos han sido parcialmente captados por procesos de acumulación de materiales provenientes de las zonas adyacentes, generando rellenos en los bordes de la laguna que han avanzado progresivamente hacia la zona central. Este proceso ha dado lugar a la deposición de materiales lacustres, con espesores de hasta 3 m en el sector norte y aproximadamente 2.40 m en el sector noreste.

7.4 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

El concepto de unidad hidrogeológica de origina a partir de la necesidad de clasificar materiales litológicos que presentan comportamientos hidráulicos semejantes. Cabe mencionar que, para facilitar la clasificación de las UH, cada vez que la conductividad hidráulica promedio sean similares a las conductividades hidráulicas mínimas y máximas son diferentes, se prioriza la formación geológica para clasificarla como una UH.

La tabla 12 presenta la clasificación de las unidades hidrogeológicas, con las respectivas referencias de las unidades geológicas y parámetros hidráulicos de K y S asignados.

Los límites de las unidades hidrogeológicas o también denominado hidrounidades, han sido definidos sobre la base de elementos geológicos reconocidos a nivel local, en consecuencia, las hidrounidades se encuentran conectadas hidráulicamente.

Tabla 12. Unidades hidrogeológicas

Unidad hidrogeológica	Descripción litológica	Unidades geológicas	Tipo de acuífero	Coeficiente de almacenamiento	Conductividad Hidráulica		
					Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
UH Detrítica 1	Depósito gravo arcilloso a arcilla arenosa	Depósito aluvial	Acuífero libre no consolidado	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4}$ (0.001)	3.38×10^{-5}	3.38×10^{-5}	3.4×10^{-6}
UH Detrítica 2	Escombros con matriz clasificada, con cementante gravo arcilloso	Depósito eluvio-coluvial	Acuífero libre no consolidado	0.509×10^{-5}	7.55×10^{-5}	7.55×10^{-5}	1×10^{-6}
UH Detrítica 3	Limo inorgánico con lentes de arenas y gravas	Depósito lacustre	Acuitardo no consolidado	0.596×10^{-5}	1×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-8}
UH Volcánica	Depósitos volcánicos andesíticos	Formación Suratera	Acuífero fisurado	1.85×10^{-5}	5×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-6}

La distribución de unidades hidrogeológicas en el área de estudio se visualiza en el Mapa 12 - Unidades hidrogeológicas.

7.5 HIDROQUÍMICA

Esta herramienta permite establecer correlaciones entre los aspectos geoquímicos del agua subterránea y su vínculo con los suelos y rocas, para lo cual se utilizan análisis químicos del agua y su posterior interpretación.

7.5.1 Estaciones de muestreo de aguas

Se ha realizado la obtención de seis muestras de agua, que han sido obtenidos de las perforaciones y del manantial del sector norte de la laguna los que se han remitido para el análisis respectivo al laboratorio, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 13. Resultados de análisis de agua Condorccota

Código	Ubicación	pH	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Dureza (ppm Ca CO ₃)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros	Sulfatos (ppm)	HCO ₃ 390100 (ppm)	Sales solubles
M1	Calicata eje	7.5	637	250	80	12	99	60	190	420
M2	Pozo 7	7.7	585	300	100	13	99	34	280	390
M3	Pozo 10	6.9	530	250	80	11	99	90	160	350
M4	Pozo 14	7.9	711	350	120	18	137	30	320	474
M5	Manante norte	7.6	652	350	120	16	112	29	350	435
M6	Entrada laguna	7.1	608	250	80	11	86.9	60	190	405

Fuente: Plan Meriss, 2021.

La ubicación de las muestras hidroquímicas ejecutadas se visualiza en el Mapa 11 – Ubicación de muestreo hidroquímico.

7.5.2 *Análisis de parámetros fisicoquímicos*

7.5.2.1 Análisis de pH

El valor del pH determina el grado de acidez o alcalinidad del agua, considerando aguas neutras aquellas con valores entre 6.5 y 8.5, aguas ácidas las que presentan valores inferiores a 6.5 y aguas básicas las que superan 8.5.

En el área de estudio, tenemos aguas neutras a ligeramente ácidas, debido a las reacciones químicas del agua termal con el granito presente en la zona, generando algunos precipitados.

7.5.2.2 Análisis de conductividad eléctrica

Para la conductividad eléctrica, que refleja el contenido de sales disueltas en el agua, y en comparación con los valores de referencia establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental del DS 004-2017-MINAM, se observa lo siguiente:

Los valores de conductividad eléctrica no superan los 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, presentándose como ligeramente bajos.

7.5.3 *Análisis de las facies hidroquímicas*

En la evaluación de las predominancias químicas se utilizaron diagramas hidroquímicos interpretativos, en los cuales se procesaron los datos obtenidos en laboratorio. Estos diagramas permiten

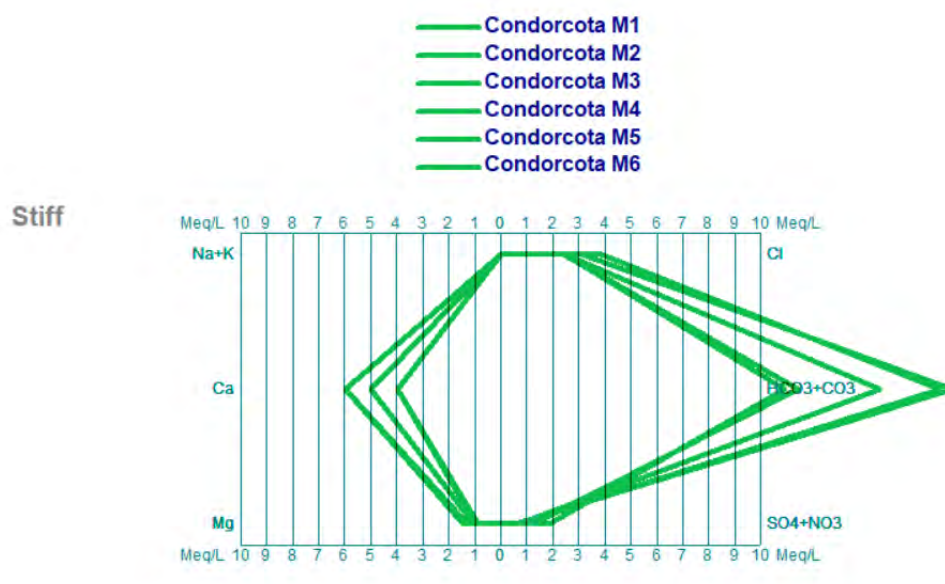
representar los valores y la predominancia de los principales elementos químicos, mediante los diagramas de Stiff y Shoeller-Berkaloff.

7.5.3.1 Diagramas de Stiff

En los diagramas de Stiff se evaluaron las concentraciones de los principales componentes iónicos, tanto cationes (Ca, Mg, Na y K) como aniones (bicarbonatos, sulfatos y cloruros). Estos diagramas sintetizan las principales características químicas del agua, permitiendo su clasificación.

En la ilustración observamos que las muestras en general pertenecen a aguas magnésicas y ligeramente carbonatadas.

Figura 47. Diagrama de Stiff para las Muestras evaluadas en Condorcota

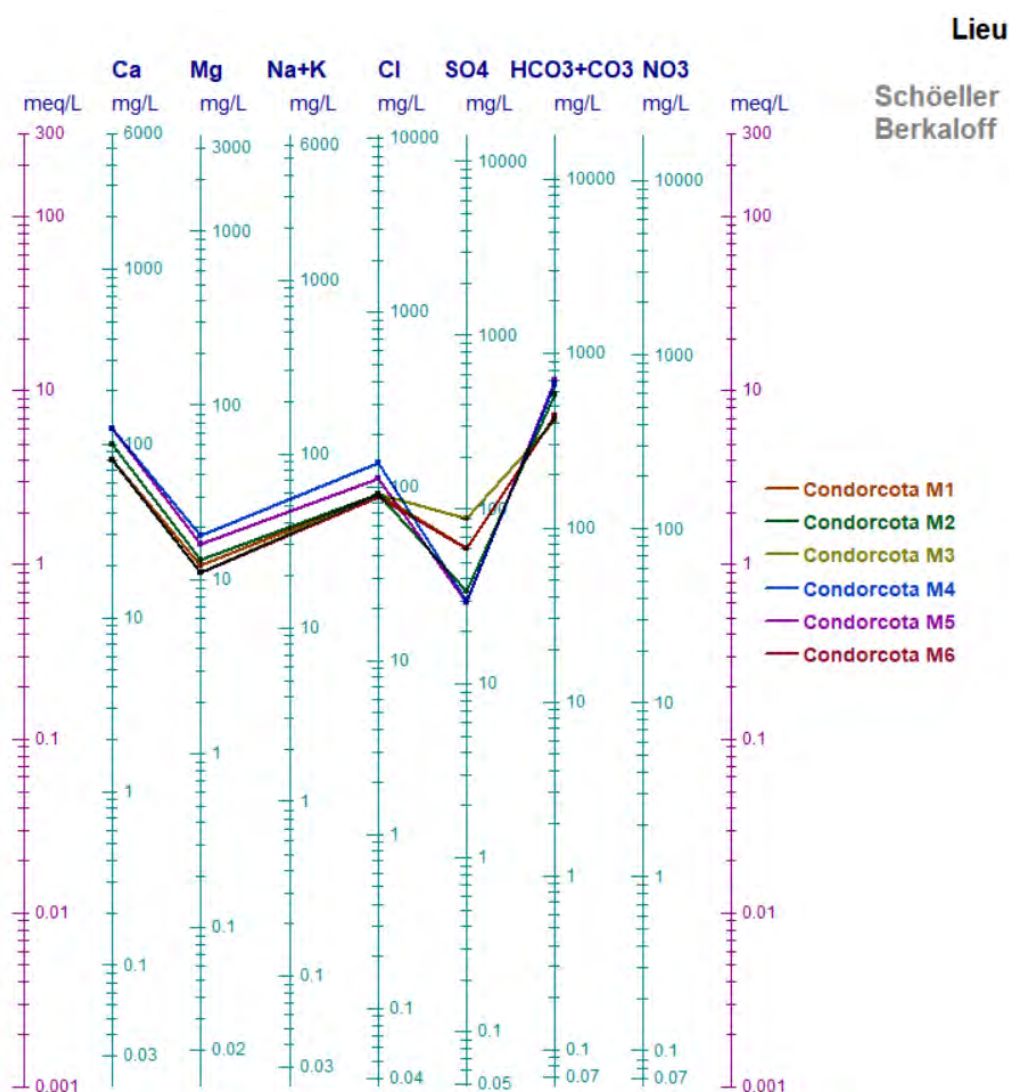


Fuente: Plan Meriss, 2021.

7.5.3.2 Diagramas de Schoeller – Berkaloff

El diagrama de Shoeller Berkaloff, para las muestras obtenidas, son indicadores de aguas tipo cloruradas sódica-cálcica. El ion cloruro es un indicador común de flujos de agua de recorrido subterráneo, debido a la percolación a mayores profundidades, favorecida por fallas regionales y sistemas de fracturas abiertas e interconectadas presentes en las rocas volcánicas, que permiten la circulación hacia niveles más profundos del subsuelo, donde ocurre la concentración de sales y minerales.

Figura 48. Diagrama de Schoeller-Berkaloff de los resultados en las muestras de agua Condorcota

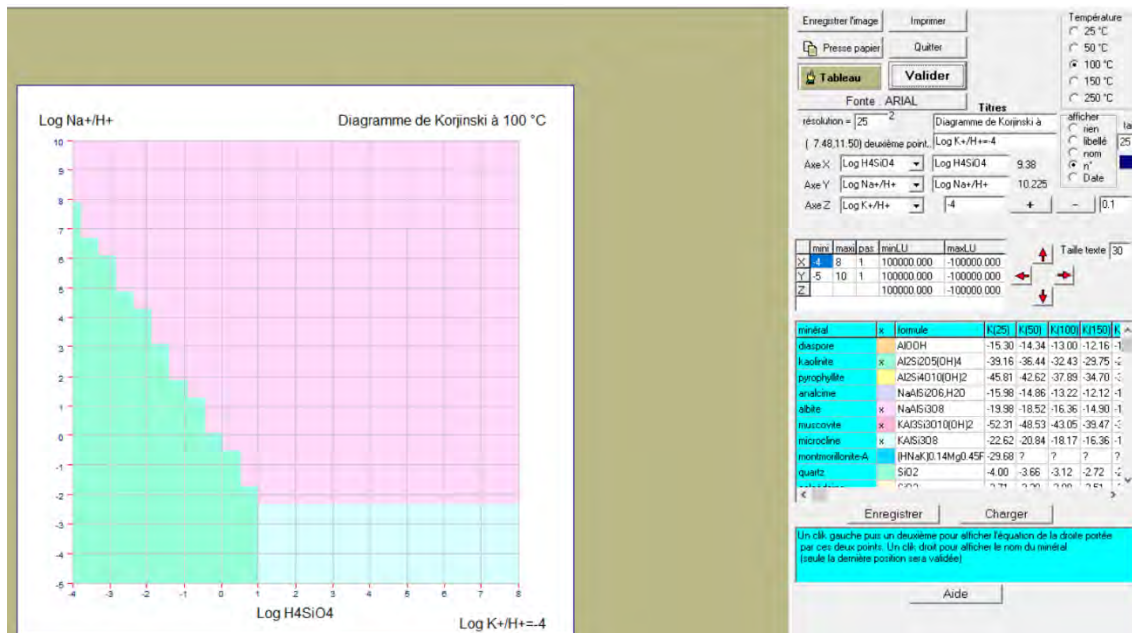


Fuente: Plan Meriss, 2021.

7.5.3.3 Diagramas de Korjinski

El diagrama de Korjinski, para las muestras obtenidas, son indicadores de aguas con contenido de micas tipo muscovita y microclinas seguida de contenido de silicatos, lo que implica que estos son el resultado de la disolución de los minerales componentes de las riolitas y rio dacitas de las rocas volcánicas, lo cual corrobora que las aguas de la laguna son de aguas subterráneas.

Figura 49. Resultado de muestras de pozo y manante en el diagrama de Korjinski mostrando presencia de micas y silicatos



Fuente: Plan Meriss, 2021.

7.6 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El flujo del agua subterránea en el área de estudio y su entorno es de mayor carga a menor carga hidráulica, facilitado por la permeabilidad de los depósitos detríticos y el fracturamiento de las rocas volcánicas, que conforman distintas unidades hidrogeológicas.

Los niveles de agua observados en las calicatas y perforaciones han demostrado la presencia de niveles de agua someros, los cuales se encuentran conectados a través de los depósitos aluviales, eluvio coluviales y roca fracturada.

El movimiento del agua subterránea se rige en base a la carga hidráulica observada y representada en general por la superficie freática somera; de este modo se configura el medio saturado por debajo de la napa.

- El medio saturado poco profundo corresponde a los depósitos aluviales y eluvio coluviales detríticos. La unidad hidrogeológica detrítica 1 representada por suelos distribuidos en toda el área de estudio, presenta una capa superficial delgada compuesta por sedimentos mal clasificados, con clastos subangulosos y escombros con matriz clasificada como grava graduada en cementante gravo arcilloso.

- La unidad hidrogeológica detrítica 2 está representada por suelos distribuidos en los márgenes de la laguna, presenta una capa superficial delgada compuesta por depósitos arcillo limosos plásticos de baja permeabilidad.
- Esta unidad está constituida por depósitos piroclásticos y flujos de lava de composición andesítica, dacítica, traquiandesítica y riodacítica, los cuales presentan un alto grado de fracturamiento. Dicho fracturamiento favorece la porosidad secundaria, permitiendo el almacenamiento y flujo del agua subterránea. No obstante, el espesor efectivo del acuífero asociado a esta unidad es desconocido en el área de estudio.
- Los manantiales ubicados en los sectores suroeste y norte de la laguna presentan flujo constante, se asume que el caudal de los manantiales proviene del medio subterráneo profundo, así como, de medios someros evidenciando en la calidad y las características fisicoquímicas.

7.6.1 *Balance hídrico subterráneo*

El balance hídrico subterráneo busca encontrar el equilibrio entre el ingreso y salida de flujo de agua, el cual es posible medir durante el periodo de estiaje del año. Para ello, se ha considerado como flujo de entrada a la recarga por precipitación anual respecto a los flujos de descarga propiciado por los manantiales y quebrada que interactúan con la laguna.

Para el cálculo del balance hídrico subterráneo se ha tomado en cuenta los siguientes factores y asunciones:

- El área de control para el balance hídrico subterráneo corresponde al área de estudio hidrogeológico medido en 277,849 m², donde se asume que la precipitación es homogénea en toda el área.
- El balance hídrico ha sido desarrollado para un rango anual, considerando la estimación de recarga total de 808 mm/año para el total del área de estudio.
- En cuanto a los manantiales asociados a la laguna, debido a que ambos puntos se encuentran sumergidos dentro del espejo de agua, no es posible medir directamente sus caudales en campo. Por esta razón, su aporte ha sido estimado indirectamente a partir del comportamiento hidrológico observado de la laguna. La estabilidad del nivel lagunar a lo largo del año, incluso durante el periodo de estiaje, sugiere la existencia de un flujo de recarga subterránea constante que compensa las pérdidas por descarga superficial hacia la quebrada y por evaporación. En consecuencia, se ha considerado razonable asignar un caudal estimado de 68 L/s para el conjunto de los manantiales. Este valor representa un aporte moderado y coherente con las condiciones hidrogeológicas del entorno, sustentado en la continuidad del flujo subterráneo y en la relación de equilibrio dinámico observada entre la recarga por precipitación, la descarga natural y el nivel estable de la laguna.

Los resultados del balance hídrico conceptual del área de control de la microcuenca se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Balance hídrico subterráneo

Componente	Caudal (l/s)	Volumen m ³ /año
<u>Entradas</u>		
Recarga neta por precipitaciones	7.12	224564.8
Manantiales (Recarga estimada)	68	2144720
<u>Salidas</u>		
Quebrada	75	2365500
Excedente hídrico (Ingresos – Salidas)	0.12	3784.32

7.6.2 Sección hidrogeológica A-A'

Esta sección se muestra en el Mapa 13-A – Sección hidrogeológica A-A'. Posee una dirección compuesta de W-E con longitud de 969m y presenta condiciones hidrogeológicas a lo largo de la laguna. La sección abarca desde la parte alta de la microcuenca, pasando por los manantiales y termina en la parte alta del sector este de la microcuenca. Los niveles de agua representativos para esta sección son referenciados mediante la perforación manual de Auger C8 y las líneas de tomografía eléctrica.

La ruta de flujo está influenciada por la carga hidráulica, seguidamente este flujo continuo hasta alcanzar el cuerpo de agua aflorante en superficie. El movimiento vertical ascendente del agua subterránea es generado por la presión del acuífero confinado en profundidad de la Formación Suratera y comunicado a través de las fracturas, produce la formación de manantiales cerca del contacto de la Formación Suratera y los depósitos lacustres; así como también propicia niveles de agua surgentes y cercanos a la superficie.

7.6.3 Sección hidrogeológica B-B'

Esta sección se muestra en el Mapa 13-B – Sección hidrogeológica B-B'. Posee una dirección compuesta de N-S con longitud de 320m y presenta condiciones hidrogeológicas cortando a la laguna. La sección abarca desde la parte alta de la microcuenca, pasando por la laguna y termina en la parte alta del sector este de la microcuenca. Los niveles de agua representativos para esta sección son referenciados mediante las líneas de tomografía eléctrica.

La ruta de flujo está influenciada por la carga hidráulica, seguidamente este flujo continuo hasta alcanzar el cuerpo de agua aflorante en superficie. El movimiento del agua subterránea es generado por la presión del acuífero confinado en profundidad de la Formación Suratera y comunicado a través de las fracturas. De igual forma, se observa la pérdida de agua por filtración interpretado a partir del análisis de líneas tomográficas.

7.7 MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO

El modelo numérico construido representa de forma matemática el comportamiento del sistema definido en el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, es decir, reproduce los niveles de agua subterránea, así como los flujos de entrada y salida del medio subterráneo.

7.7.1 *Construcción de modelo*

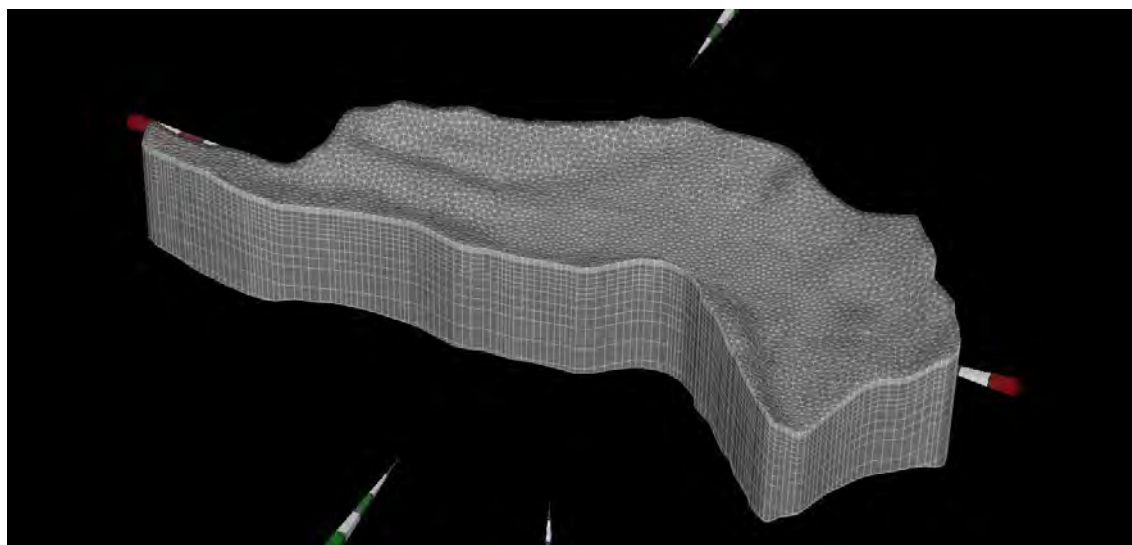
La construcción y desarrollo del modelo numérico hidrogeológico del flujo subterráneo se realizó con la finalidad de representar adecuadamente las condiciones hidrogeológicas definidas en el modelo conceptual.

7.7.2 *Discretización horizontal*

La discretización horizontal del modelo numérico se realizó mediante una malla de elementos finitos, la cual permitió representar de manera precisa la geometría y los límites del área de estudio. Esta malla está compuesta por elementos triangulares irregulares, lo que facilita una mejor adaptación a las variaciones topográficas, contornos naturales del área de estudio y los límites hidrogeológicos definidos en campo.

Se consideró una mayor densidad de elementos en la zona de la laguna y su entorno inmediato, con el objetivo de incrementar la resolución numérica en las zonas de mayor interés hidrogeológico y de intercambio entre el agua superficial y subterránea. En las zonas periféricas del modelo se utilizaron elementos de mayor tamaño, optimizando así el tiempo de cálculo sin afectar la precisión global del modelo.

Figura 50. Malla del modelo numérico hidrogeológico del área de estudio



7.7.3 Discretización vertical

En sentido vertical, el modelo ha sido discretizado en 18 capas activas, con mayor detalle en las zonas de interés, de manera similar a la discretización horizontal.

De esta forma, se han definido los niveles correspondientes a las distintas fases de profundización, hasta alcanzar una profundidad suficiente que evite la influencia de los flujos por el contorno del modelo, llegando a los 79 m de profundidad.

La superficie superior del dominio (capa 1) representa la topografía del área de estudio. La información topográfica ha sido elaborada a partir del siguiente detalle:

- Topografía a detalle (curvas de 1m en el entorno del área de estudio).
- Cartografía 1:50 000 procedente de las hojas adquiridas del Instituto Nacional Geográfico (IGN).

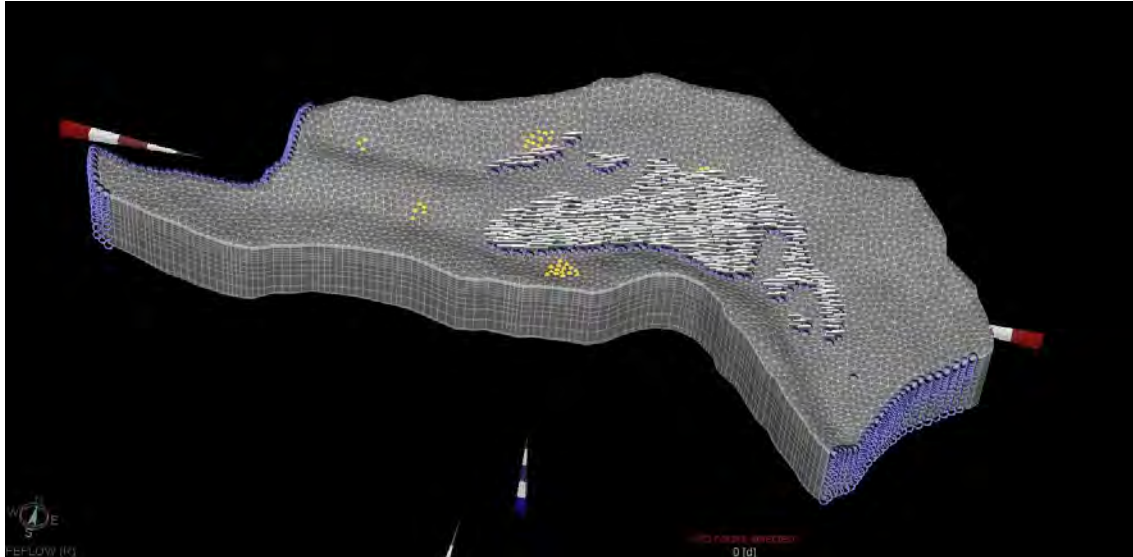
7.7.4 Condiciones de borde

Para modelar la dinámica hidrogeológica de un sistema de agua subterránea mediante un enfoque ampliamente utilizado, se han establecido los límites del dominio en función de barreras naturales del medio, como divisorias de aguas superficiales, quebradas, entre otros.

La representación de los parámetros hidrogeológicos está en concordancia a la dinámica del sistema definido en el modelo conceptual. Se asignó condiciones de borde impuesta y calculadas. La recarga, se asignó como condición de borde impuesta y para representar la quebrada. Las principales condiciones de borde o de frontera empleadas en el modelo numérico se muestran en la Figura 51. Estas

condiciones de contorno comúnmente utilizados incluyen la descarga de la quebrada y el aporte de los manantiales a la laguna.

Figura 51. Condiciones de borde



7.7.5 Conductividad hidráulica (K)

Se ha considerado información obtenida a nivel puntual. Estos datos provienen principalmente del parámetro de conductividad hidráulica de acuerdo con los resultados de ensayos hidráulicos disponibles. Estos ensayos son útiles porque proporcionan una medición directa de la permeabilidad de los materiales, pero su naturaleza puntual implica que solo reflejan las condiciones locales del terreno, sin capturar variaciones a mayor escala.

La Tabla 15 muestra los rangos de conductividad hidráulica, que fueron a partir de análisis estadísticos de los datos de ensayos.

Tabla 15. Conductividad hidráulica observada

UH	Unidad hidrogeológica	Unidad geológica	Tipo de acuífero	Conductividad Hidráulica (m/s)		
				Kx	Ky	Kz
I	UH Detrítica 1	Depósito aluvial	Acuífero libre no consolidado	3.38×10^{-5}	3.38×10^{-5}	3.4×10^{-6}
II	UH Detrítica 2	Depósito eluvio-coluvial	Acuífero libre no consolidado	7.55×10^{-5}	7.55×10^{-5}	1×10^{-6}
III	UH Detrítica 3	Depósito lacustre	Acuitardo no consolidado	1×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-8}
IV	UH Volcánica	Formación Suratera	Acuífero fisurado	5×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-6}

7.7.6 Trayectoria de partículas

Para el análisis de trayectoria de partículas, se consideraron los sectores topográficamente más elevados del área de estudio en los distintos *slices* del modelo, con la finalidad de visualizar la dirección del flujo subterráneo que aporta a la laguna, así como la trayectoria del flujo asociado a las pérdidas hidráulicas hacia el sector sur provenientes de la misma.

La interpretación de dichas trayectorias se presenta en el Mapa 14 – Mapa de hidroisohipsas simuladas, donde se evidencia la convergencia del flujo subterráneo hacia la laguna y, posteriormente, la continuidad del flujo en dirección sur, lo que sustenta la existencia de pérdidas por infiltración desde el cuerpo lagunar hacia el sistema hidrogeológico circundante.

7.7.7 Resultado de simulaciones

El modelo hidrogeológico numérico ha logrado representar las condiciones hidrogeológicas del área de estudio, principalmente en el sector de la laguna.

El resultado del proceso de calibración de la carga hidráulica, conductividades hidráulicas y flujo se refleja en las hidroisohipsas simuladas (Mapa 14- Mapa de hidroisohipsas simuladas). Estas muestran ubicación y dirección de los flujos.

Es importante señalar que el modelo de flujo subterráneo constituye una herramienta de cálculo que presenta un cierto nivel de incertidumbre, el cual se origina, entre otros aspectos, por la simplificación del sistema hidrogeológico, la variabilidad del nivel freático y las limitaciones propias de las técnicas de medición empleadas en campo, utilizadas como base para su calibración.

CAPÍTULO VIII DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el comportamiento hidrogeológico de la laguna está condicionado por la interacción entre las unidades geológicas presentes en la cuenca. Los depósitos lacustres presentan características de baja permeabilidad que favorecen la retención local de agua; sin embargo, los depósitos aluviales y eluvio-coluviales, así como las zonas fracturadas de la Formación Suratera, constituyen medios favorables para la infiltración y circulación de agua subterránea.

La información geofísica permitió corroborar la heterogeneidad del subsuelo, identificándose materiales con diferentes propiedades hidrogeológicas. Estas condiciones son consistentes con la presencia de zonas permeables que facilitan el movimiento del agua a través del subsuelo.

Por otro lado, los resultados hidroquímicos obtenidos mediante los diagramas de Stiff, Schoeller-Berkaloff y Korzhinski muestran similitudes composicionales entre las muestras analizadas, indicando una evolución química asociada a la interacción agua-roca. Estas características sugieren que las aguas presentes en la laguna y en las fuentes evaluadas poseen un origen predominantemente subterráneo y forman parte de un mismo sistema hidrogeológico.

La integración de la información geológica, geofísica, hidrogeológica e hidroquímica permitió definir un modelo conceptual en el que la laguna se encuentra hidráulicamente vinculada al flujo subterráneo regional. En consecuencia, las características geológicas e hidrogeológicas de la cuenca constituyen factores determinantes en la dinámica hídrica del sistema y deben ser consideradas en la evaluación de su potencial de almacenamiento de agua.

CAPÍTULO IX ANÁLISIS DE VIABILIDAD

Este capítulo presenta el análisis e interpretación de los datos obtenidos durante el estudio hidrogeológico de la laguna Condorccota, ubicada en el distrito de San Andrés de Checca, provincia de Canas, Cusco. Los resultados se derivan de la caracterización morfoestructural y geológica, geotecnia, prospección geofísica e hidrogeología, integrados para evaluar la viabilidad del represamiento. La síntesis final considera ventajas, limitaciones y conclusiones preliminares, relacionándolas con los objetivos del proyecto y estudios similares.

9.1 Caracterización Morfoestructural y Geológica

El área presenta un relieve glaciar y fluvio-glaciar, con depósitos lacustre que conforman un vaso natural favorable para la retención de agua. La litología dominante corresponde a rocas andesíticas relativamente competentes de la Formación Suratera, cubiertas por sedimentos cuaternarios de baja permeabilidad que actúan como sello natural. Se identificaron fracturas y fallas locales (NE-SO, NO-SE), sin evidencias de actividad reciente, muchas selladas parcialmente por material arcilloso.

La morfología glaciar y los depósitos impermeables ofrecen condiciones favorables para el almacenamiento de agua, formando un vaso natural estable. Sin embargo, las discontinuidades tectónicas representan riesgos de percolación, mitigables con control en zonas puntuales de fracturamiento.

La configuración del circo glaciar, combinada con el sellado parcial de fallas, sugiere una estabilidad adecuada, similar a estudios en valles glaciares como Huisillopunku (Gutierrez Quispe & Quispe Lacuta, 2022), donde ajustes geotécnicos aseguraron viabilidad.

9.2 Geotecnia

Los ensayos de permeabilidad (método carga variable) indicaron coeficientes entre $1.94\text{E-}05$ cm/s y $3.08\text{E-}03$ cm/s, clasificando los materiales como de baja a semipermeables. Estratigráficamente, un basamento andesítico competente soporta sedimentos cuaternarios de morrena y arcillas lacustres, reforzando la retención hídrica. No se hallaron deslizamientos ni fallamientos recientes, aunque se detectaron sectores de permeabilidad media que sugieren heterogeneidad.

Los depósitos arcillosos y limosos del vaso favorecen la estanqueidad, aptos para represamiento, pero las heterogeneidades locales requieren medidas de impermeabilización. El basamento andesítico es estable, aunque necesita refuerzos en áreas permeables.

La clasificación de Terzaghi y Peck (1967) valida la impermeabilidad de las arcillas, con riesgos localizados gestionables.

9.3 Prospección Geofísica

Los perfiles de tomografía eléctrica mostraron tres rangos de resistividad: baja ($1.12\text{-}25\ \Omega\cdot\text{m}$) en depósitos arcillosos y limosos saturados (impermeables), media ($25\text{-}240\ \Omega\cdot\text{m}$) en suelos heterogéneos con permeabilidad intermedia, y alta ($>240\ \Omega\cdot\text{m}$) en rocas andesíticas compactas que forman el basamento. La sísmica de refracción corroboró un basamento fracturado pero competente. Se confirmaron acuíferos fisurados en los flancos norte y oeste, potenciales vías de pérdida lateral.

El centro impermeable del vaso soporta la retención de agua, pero los flancos acuíferos incrementan el riesgo de filtraciones laterales, requiriendo medidas de control.

Los perfiles 2D validan acuíferos y barreras, coherentes con Alvarado (2022) en páramos andinos. López (2023) en Ccorao-Mandorani también identificó acuíferos fisurados con tomografía eléctrica, corroborando los flancos saturados de Condorccota.

9.4 Hidrogeología

Los ensayos de permeabilidad en suelos y roca arrojaron valores entre $1.85\text{E-}05\ \text{cm/s}$ y $6.85\text{E-}04\ \text{cm/s}$, indicando baja a moderada permeabilidad. Se registraron niveles freáticos someros ($1.2\text{-}3.0\ \text{m}$) y flujos subterráneos N-S que garantizan recarga constante. El análisis hidroquímico reveló aguas de facies magnésica clorurada sódico-cálcica, con pH neutro a ligeramente alcalino y sólidos disueltos en rangos aceptables, aptas para riego y consumo humano con tratamiento básico.

La recarga constante y la calidad hídrica respaldan el potencial de aprovechamiento, asegurando sostenibilidad del recurso.

Complementariamente, los resultados del modelo hidrogeológico conceptual y numérico corroboran la existencia de un flujo subterráneo activo y sostenido, mostrando que la laguna y su entorno forman parte de una zona de recarga y tránsito hidráulico, con gradientes que favorecen la circulación permanente del agua subterránea hacia sectores aguas abajo. El modelo evidencia que una fracción importante del agua almacenada tendería a infiltrarse y alimentar el flujo subterráneo regional, debido a la permeabilidad del sustrato y a la existencia de niveles freáticos someros, lo cual condiciona la eficiencia del represamiento. Este comportamiento es consistente con los principios de modelación de flujo subterráneo y balance hídrico en medios heterogéneo.

9.5 Análisis conjunto

El análisis conjunto de los parámetros geológicos, hidrogeológicos y geomorfológicos indica que la laguna Condorccota no presenta condiciones naturales favorables para la construcción de una presa de almacenamiento.

- Los depósitos lacustres y eluvio-coluviales poseen una permeabilidad media a alta, lo que ocasionaría pérdidas por filtración si no se implementan medidas de sellado o impermeabilización artificial.
- Las rocas volcánicas fracturadas del entorno, aunque de menor permeabilidad matricial, constituyen vías potenciales de drenaje subterráneo, incrementando el riesgo de fugas del embalse.
- Los manantiales internos aportan estabilidad al nivel de la laguna, pero su descarga está equilibrada con la salida natural hacia la quebrada, sin acumulación neta.

Por tanto, para hacer viable el represamiento sería imprescindible impermeabilizar el fondo y las márgenes de la laguna, mediante materiales geosintéticos o revestimientos de arcilla compactada, lo que incrementaría considerablemente los costos constructivos y operativos del proyecto.

En consecuencia, desde el enfoque hidrogeológico y técnico, la construcción de una presa en la laguna Condorccota no resulta viable sin una intervención mayor de impermeabilización, lo que desvirtúa su viabilidad económica y ambiental en el contexto actual del proyecto.

Como alternativa técnicamente más factible, se plantea la implementación de reservorios nocturnos aguas abajo del área de estudio, destinados al almacenamiento temporal del caudal proveniente de la fuente hídrica durante horas de baja demanda, para su posterior distribución en horario diurno. Esta alternativa permitiría optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico disponible, reducir las pérdidas operativas asociadas al manejo del agua y evitar la necesidad de una intervención estructural mayor sobre la laguna, representando una solución más viable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

CONCLUSIONES

1. La integración de los resultados geológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos y de balance hídrico permitió determinar que la laguna Condorccota presenta condiciones hidrogeológicas desfavorables para el represamiento en su estado natural, debido principalmente a las pérdidas de agua por filtración a través del fondo y los márgenes del vaso lacustre. No obstante, desde el punto de vista técnico, el represamiento podría ser viable mediante la implementación de sistemas de impermeabilización que reduzcan significativamente dichas pérdidas.
2. Se determinó que la laguna Condorccota posee una superficie de 277 849 m² y mantiene una notable estabilidad de su nivel de agua durante el año, producto del equilibrio entre los aportes y las descargas naturales del sistema. Asimismo, la evaluación de la calidad del agua indica características adecuadas para riego y consumo humano con tratamiento básico, mientras que el análisis hidroquímico evidencia que las aguas presentan un origen predominantemente subterráneo.
3. La caracterización geológica permitió identificar depósitos aluviales, eluvio-coluviales y lacustres, así como rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Suratera. Estas unidades presentan una limitada capacidad de impermeabilización natural debido a la presencia de materiales semipermeables y al intenso fracturamiento observado en las rocas volcánicas, condiciones que favorecen la infiltración y el desarrollo de flujo subterráneo en el área de estudio.
4. El balance hídrico anual evidenció que la laguna funciona bajo un régimen de equilibrio dinámico, con una recarga efectiva por precipitación de aproximadamente 7,12 L/s, aportes de manantiales cercanos a 68 L/s y descargas naturales del orden de 75 L/s. Este comportamiento explica la estabilidad del nivel de agua observada en la laguna y confirma que su permanencia depende principalmente del aporte continuo de aguas subterráneas.
5. Los análisis geomorfológicos, geotécnicos e hidrogeológicos, corroborados mediante modelamiento numérico, indican que las pérdidas por filtración superarían la capacidad de retención esperada en un escenario de represamiento, comprometiendo la eficiencia del almacenamiento hídrico.
6. Se identificaron dos manantiales subacuáticos que constituyen la principal fuente de recarga de la laguna y contribuyen a la estabilidad de su nivel; sin embargo, su aporte se encuentra compensado por las descargas naturales del sistema, sin generar un incremento significativo del volumen almacenado.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que, previo a la implementación de cualquier alternativa de almacenamiento hídrico en el área de estudio, se desarrolle una evaluación técnico-económica comparativa entre la impermeabilización del vaso de la laguna y la construcción de reservorios nocturnos aguas abajo, a fin de determinar la alternativa más eficiente y sostenible en términos de costos, operación y mantenimiento.
2. Se recomienda complementar la presente investigación con estudios de ingeniería a nivel definitivo, orientados al diseño hidráulico y estructural de la alternativa seleccionada, considerando criterios de capacidad de almacenamiento, condiciones geotécnicas del terreno, control de pérdidas por filtración y manejo operativo del recurso hídrico para fines de riego.

BIBLIOGRAFÍA

- American Psychological Association. (2020). Publication manual of the American psychological association 2020. *American Psychological Association*.
- American Public Health Association. (1926). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 6). American Public Health Association.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
- Hellokitty. (2024, 3 enero). Geofísica aplicada a la Hidrogeología | Métodos TEM y T.E | AQUIST.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*.
- Clark, I. D., & Fritz, P. (2013). *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC press.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). Hidrología subterránea 2ª ed. *Barcelona*: Omega DL.
- De Riego, A. T. D. D. (2007). Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Mala: Estudio hidrológico.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1997). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & sons.
- Drever, J.I. (1997) The Geochemistry of Natural Water: Surface and Groundwater Environments. 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- Fetter, C. W., & Kreamer, D. (2021). *Applied hydrogeology*. Waveland Press.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Utilities, Municipal Authorities, and Environment Agencies*. Washington, DC: World Bank.
- Freeze R. A., Cherry J. A., . (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.
- Heath, R. C. (1998). *Basic ground-water hydrology* (Vol. 2220). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hiscock, K. M., & Bense, V. F. (2015). *Hydrogeology: principles and practice* (Second edition). John Wiley & Sons, Inc.
- De Riego, A. T. D. D. (2003). Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río San Juan: Estudio hidrológico.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration* (Vol. 4). John Wiley & Sons.
- Mendivil Echevarría, S., & Dávila Manrique, D. (1994). Geología de los cuadrángulos de Cuzco y Livitaca. Hojas: 28-sy 29-s-[Boletín A 52].

- Ponce, V. M. (2020). Uso y sostenibilidad del agua subterránea. San Diego State University. https://pon.sdsu.edu/uso_y_sostenibilidad_del_agua_subterranea.html
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Sharma, P. V. (1997). *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge university press.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
- THAUVIN, J. (1985). Conceptos básicos en Hidrogeología. *In Curso de Hidrogeología aplicada. 18. Area I: Conceptos basicos en Hidrogeología*.
- T Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons.
- Torres, D., et al. (2010). Mapa geológico del cuadrángulo de Livitaca, escala 1:50 000, Hoja 29-s Cuadrante II. INGEMMET.
- Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability.
- Winter, T. C. (2000). *Ground water and surface water: a single resource*. Diane Publishing.

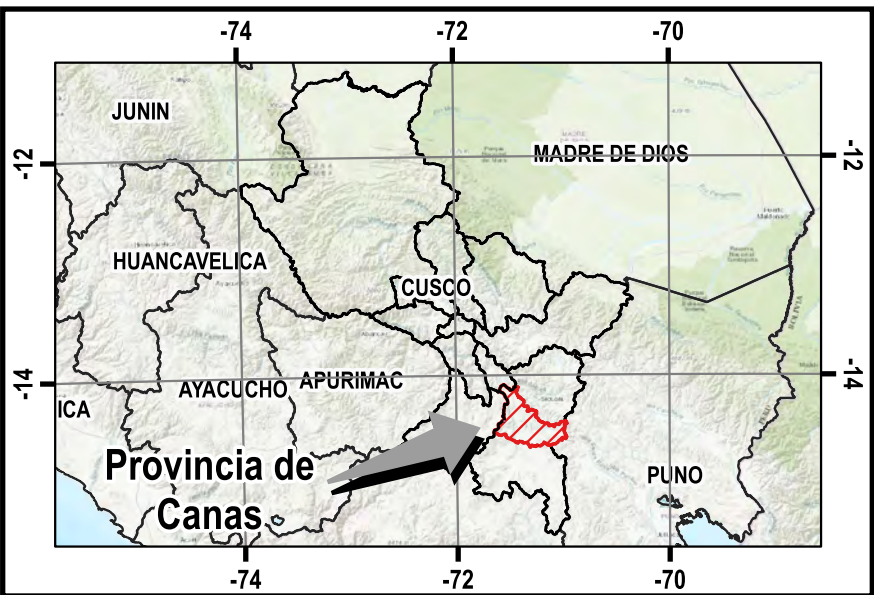
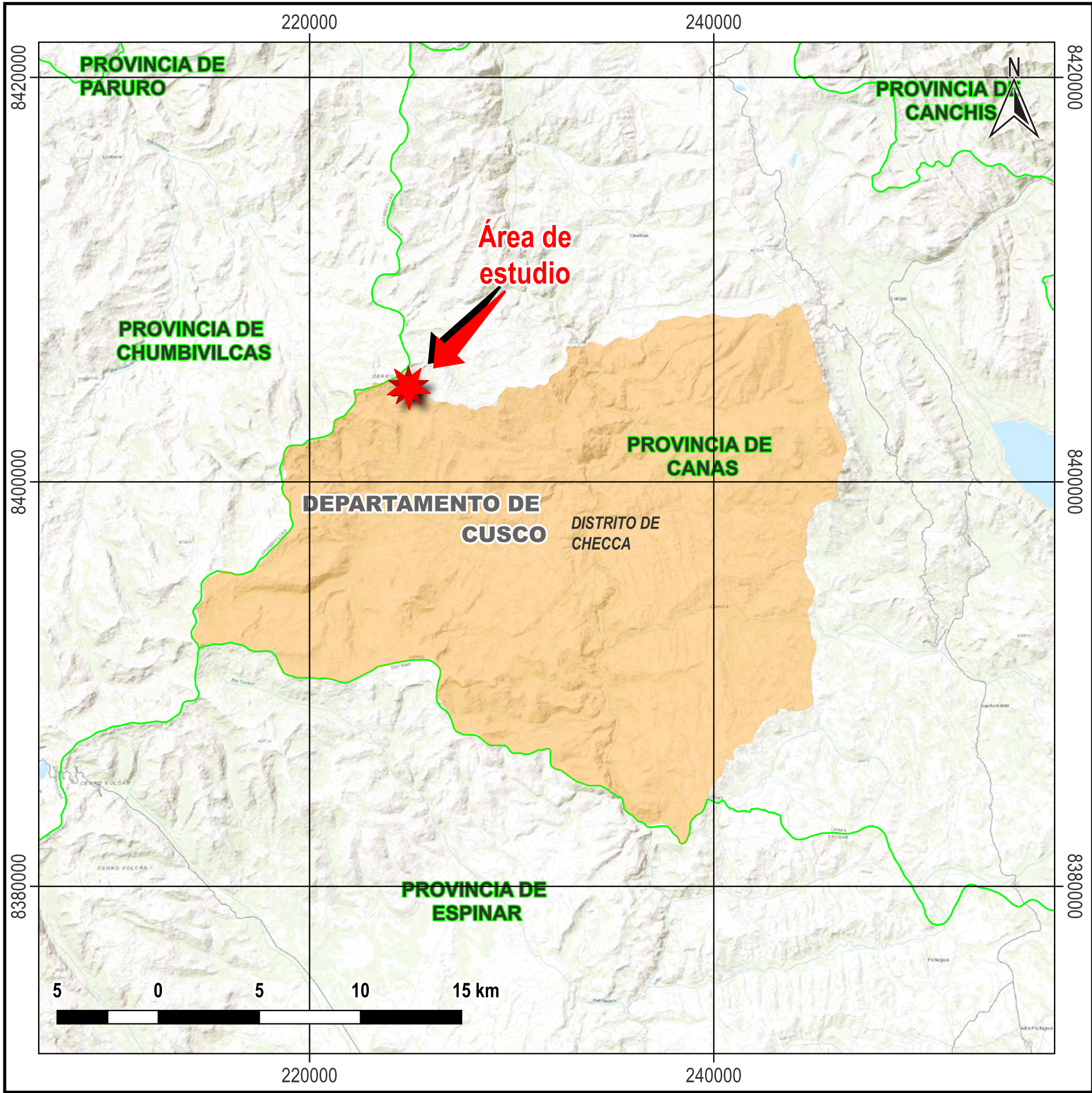
ANEXOS

Tabla 1. Operacionalización de variables

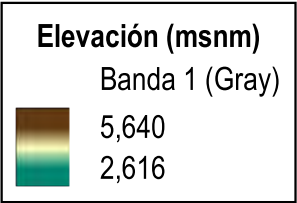
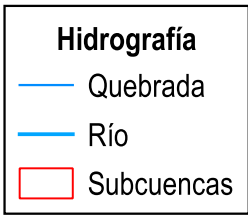
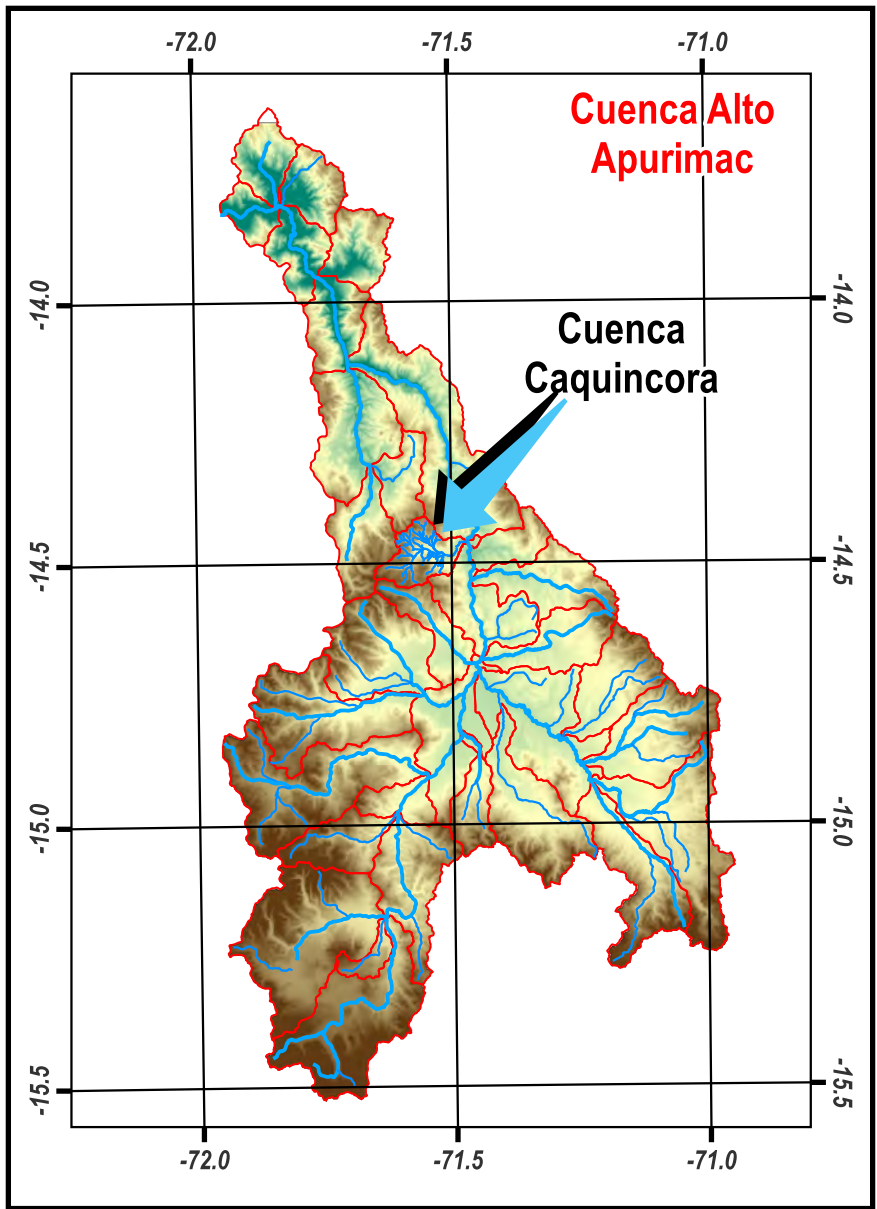
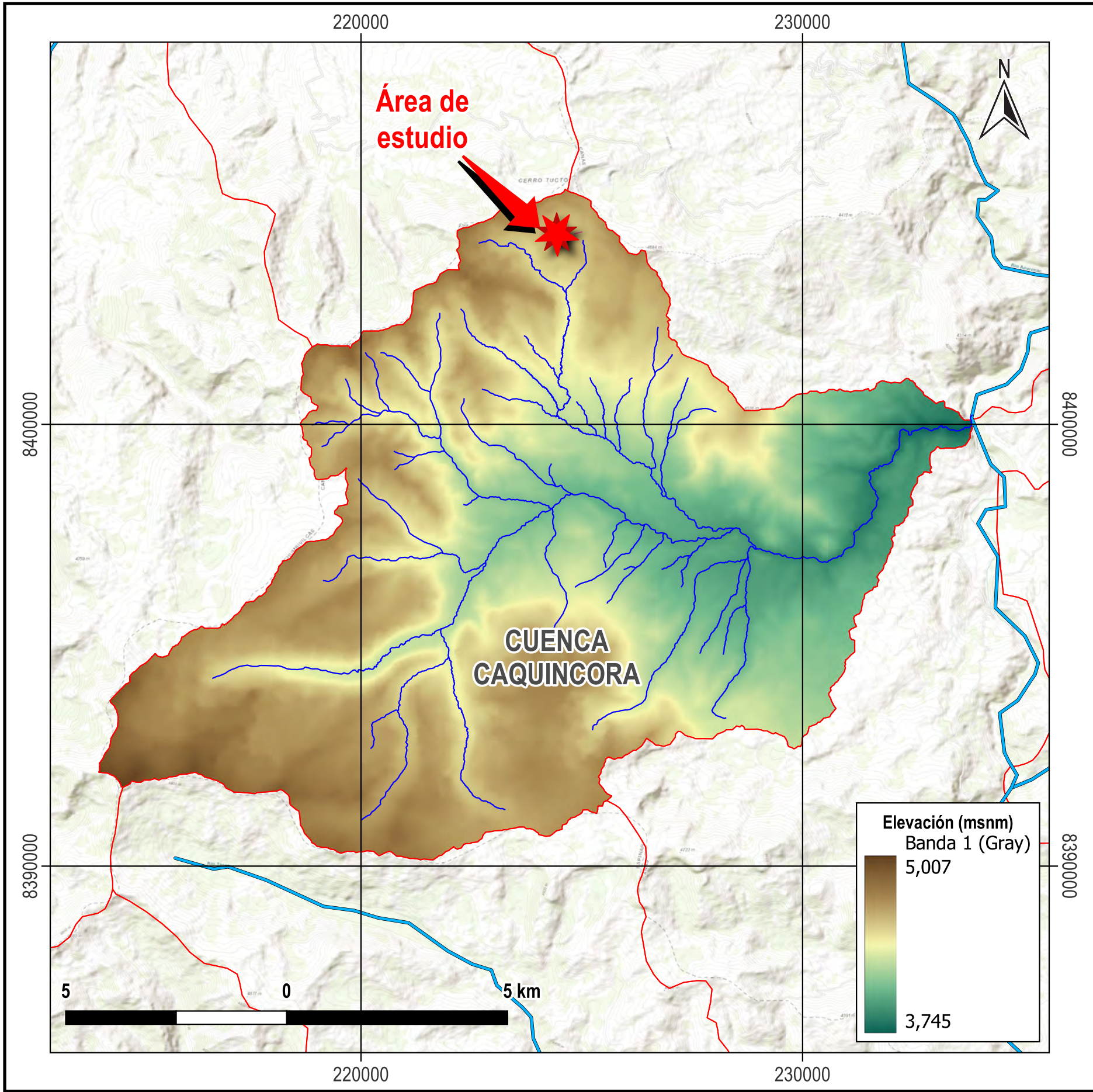
Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
VI Características hidrogeológicas	Las características hidrogeológicas se refieren a las propiedades y comportamientos de los acuíferos y formaciones geológicas en relación con la distribución, movimiento y calidad del agua subterránea (Madonia et al, 2021).	Se evaluarán mediante el análisis de la hidrogeología, geología, hidrología y geomorfología de la región de estudio, utilizando técnicas de clasificación, pruebas y mediciones específicas para cada dimensión.	Hidrogeología	- Clasificación de acuíferos - Hidrogeoquímica - Propiedades de acuíferos
			Geología	- Litología - Geología estructural - Geofísica - Geotecnia
			Hidrología	- Caudal de afluentes y efluentes - Balance hídrico - Nivel freático - Calidad del agua
			Geomorfología	- Morfogénesis - Morfografía - Morfodinámica - Morfoestructuras
VD Viabilidad del proyecto de represamiento	La viabilidad del proyecto de represamiento se refiere a la posibilidad de implementar y operar un proyecto de embalse considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos.	Se determinará evaluando las condiciones técnicas mediante análisis geotécnicos y la capacidad de almacenamiento de agua, entre otros.	Viabilidad técnica	- Condiciones geotécnicas - Capacidad de almacenamiento - Factibilidad constructiva

Tabla 2. Matriz de consistencia

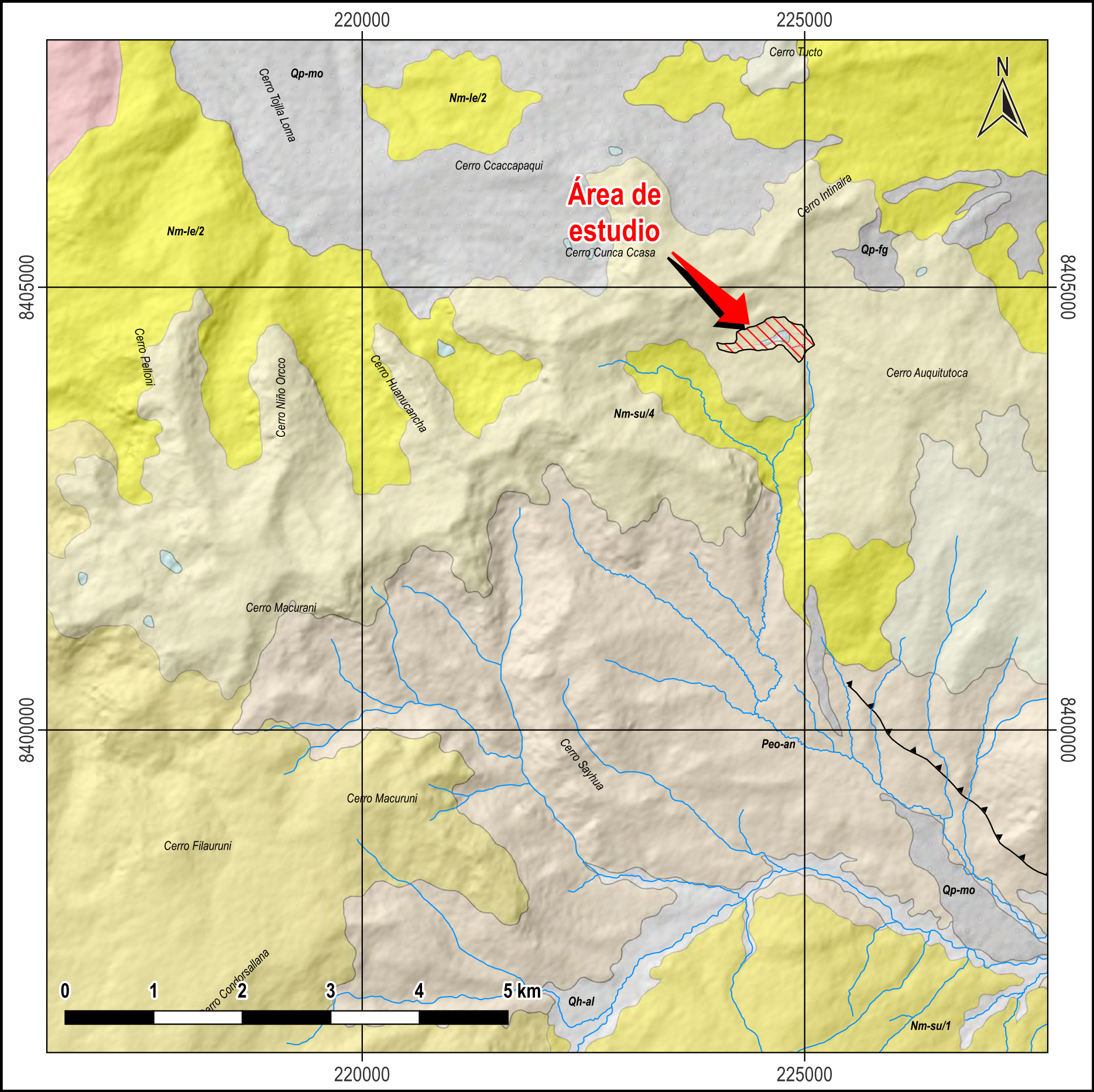
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA
¿Cómo influyen las características hidrogeológicas de la laguna Condorccota y su área de influencia, en la viabilidad del proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas -Cusco, 2024?	Determinar las características hidrogeológicas de la laguna Condorccota y su área de influencia afectan la viabilidad del proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024.	Las características hidrogeológicas del área de influencia de la laguna Condorccota en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024 tienen un impacto significativo en la viabilidad de un proyecto de represamiento en la zona, determinando tanto las oportunidades como las limitaciones técnicas y ambientales para su implementación.	Enfoque: Mixto Nivel: Descriptivo Diseño: No experimental, transversal Población: Todas las unidades hidrogeológicas en el área de influencia de la represa Condorccota
-¿Cómo influyen la clasificación y las propiedades de la laguna Condorccota en la disponibilidad de agua para el proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas-Cusco, 2024? -¿De qué manera afectan las características geológicas y la distribución de las unidades litoestratigráficas de la laguna Condorccota la estabilidad y capacidad de almacenamiento necesarias para el proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024? -¿Cómo influyen la hidrología de la laguna en la capacidad de almacenamiento del proyecto de represamiento en la laguna Condorccota, San Andrés de Checca, Canas – Cusco? -¿De qué forma impacta la geomorfología de la laguna Condorccota en las condiciones geotécnicas del proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024?	-Analizar cómo la clasificación y las propiedades de la laguna Condorccota influyen en la disponibilidad de agua para el proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024. -Determinar cómo las características geológicas y la distribución de las unidades litoestratigráficas de la laguna Condorccota impactan la estabilidad y capacidad de almacenamiento necesarias para el proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024. -Evaluar cómo la hidrología de la laguna Condorccota influye en la capacidad de almacenamiento del proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco. -Analizar cómo la geomorfología de la laguna Condorccota impacta las condiciones geotécnicas del proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024.	-La clasificación y las propiedades de la laguna Condorccota afectan de manera significativa la disponibilidad de agua para el proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024. -Las características geológicas y la distribución espacial de las unidades litoestratigráficas tienen un impacto directo en la estabilidad y capacidad de almacenamiento del proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024. -La hidrología de la laguna Condorccota influye en la capacidad de almacenamiento del proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024. -La geomorfología de la laguna Condorccota tiene un impacto significativo en las condiciones geotécnicas del proyecto de represamiento en San Andrés de Checca, Canas – Cusco, 2024.	

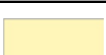
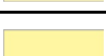
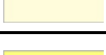


 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA 		
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024		
TÍTULO: MAPA DE UBICACIÓN POLÍTICA		
DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA		
Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur	FECHA: Abril, 2026	MAPA: 01



 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024		
TÍTULO: MAPA DE UBICACIÓN HIDROGRÁFICA		
DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA		
Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur	FECHA: Abril, 2026	MAPA: 02



ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA	INTRUSIVOS Y/O DOMOS VOLCÁNICOS	SIMBOLO	
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Laguna			
			Depósito aluvial		Qh-al	
		Pleistoceno	Depósito fluvioglaciár		Qp-fg	
			Depósito morrénico		Qp-mo	
	Neógeno	Plioceno		Centro volcánico Llallahua	Np-lla	
				Alteracion hidrotermal	Ah	
				Centro volcánico Suratera - Evento 4	Nm-su/4	
				Centro volcánico Suratera - Evento 3	Nm-su/3	
				Centro volcánico Suratera - Evento 1	Nm-su/1	
		Mioceno	Formación Livitaca		Nm-li	
				Centro volcánico Leque Leque	Nm-le/2	
	Paleógeno	Eoceno	Formación Anta		Peo-an	
				Intrusivo diorítico	Pe-di	

SIMBOLOGÍA

Hidrografía

Área de estudio

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Fallas

Falla inversa

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024

TÍTULO:

MAPA DE GEOLOGÍA REGIONAL

DIBUJADO:

Z. ARQUE & E. PEÑA

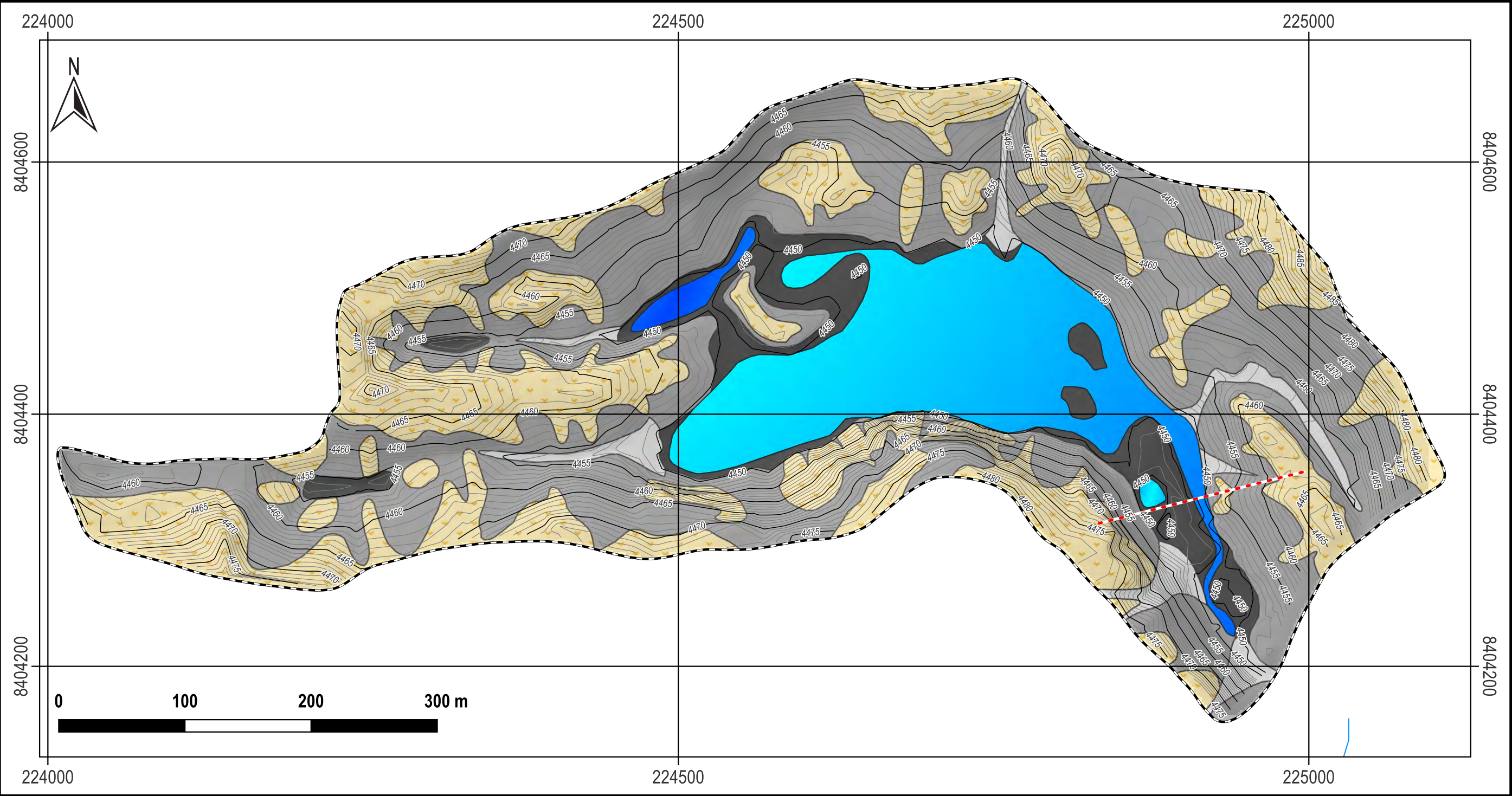
Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur

FECHA:

Abril, 2026

MAPA:

03



ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	SECCIÓN	SÍMBOLO
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Depósito aluvial	Qr-al	
			Depósito eluvio-coluvial	Qr-el-col	
			Depósito lacustre	Qr-la	
	Neógeno	Plioceno	Formación Suratera	Np-su/3	

SIMBOLOGÍA

Área de estudio

Laguna

Eje de la presa proyectada

Topografía

Curva principal

Curva secundaria

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE
REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024

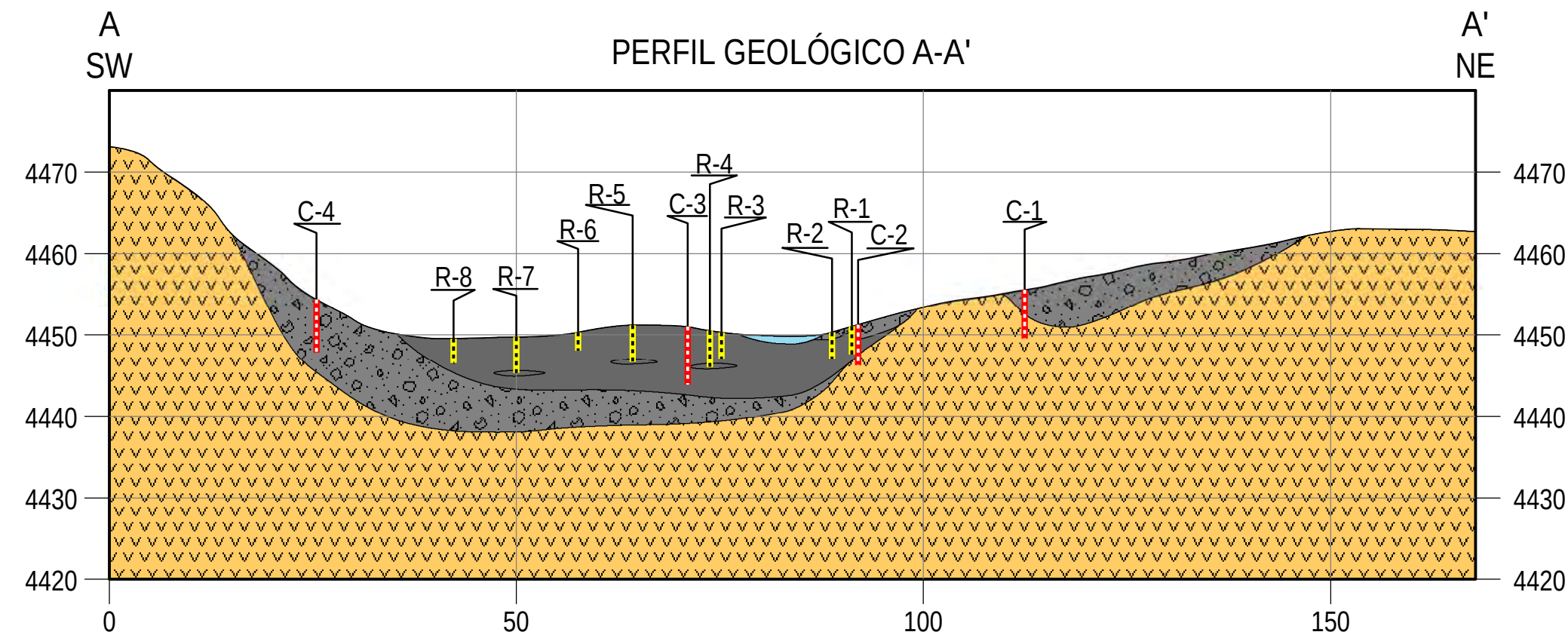
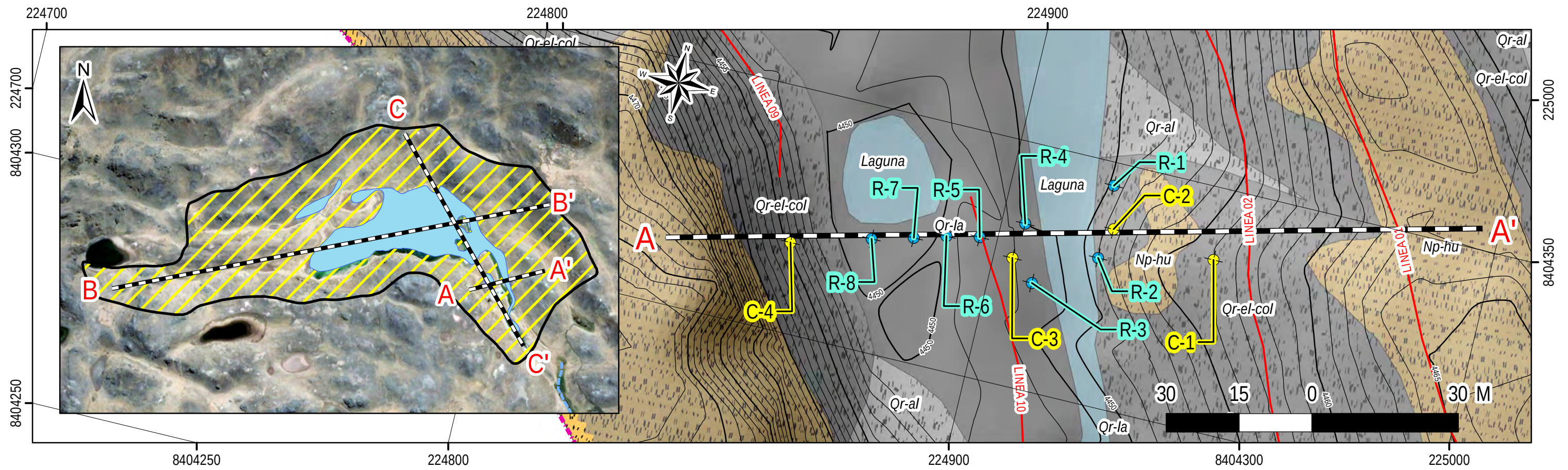
TÍTULO: MAPA DE GEOLOGÍA LOCAL

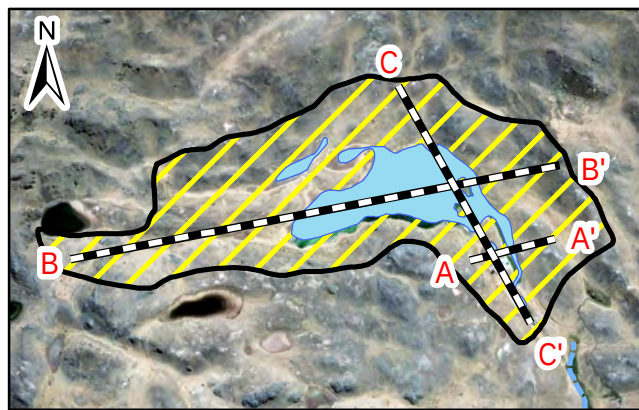
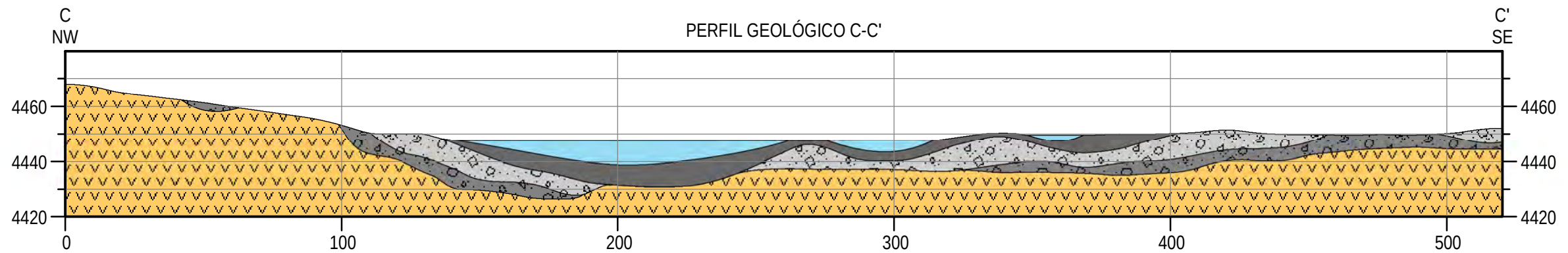
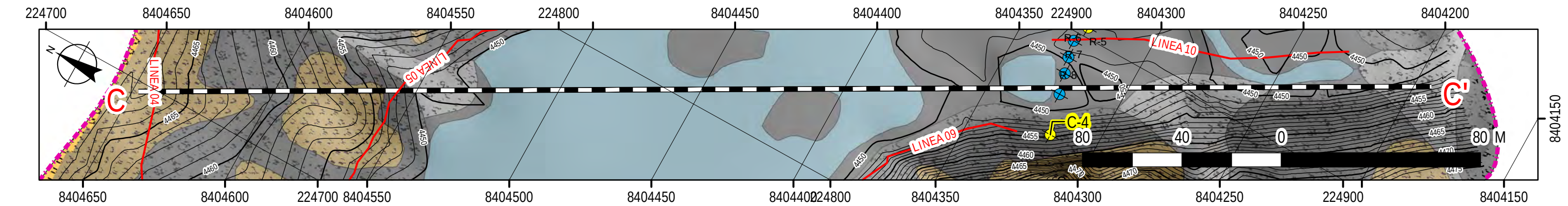
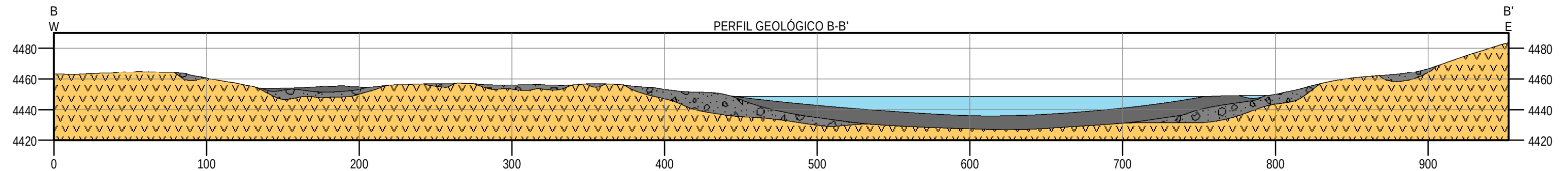
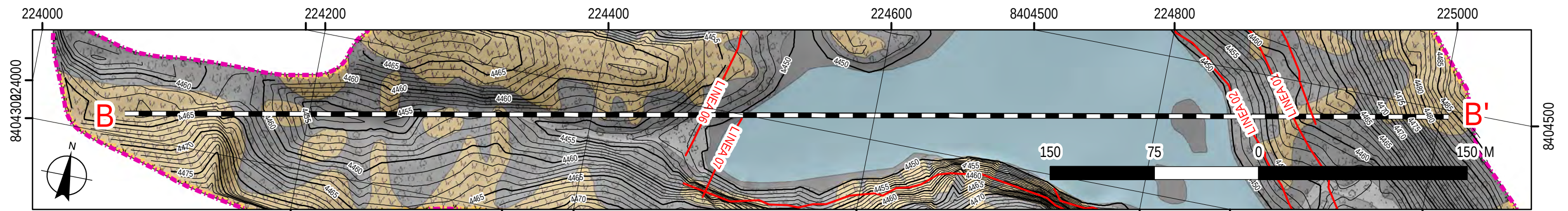
DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA

Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur

FECHA: Abril, 2026

MAPA: 04

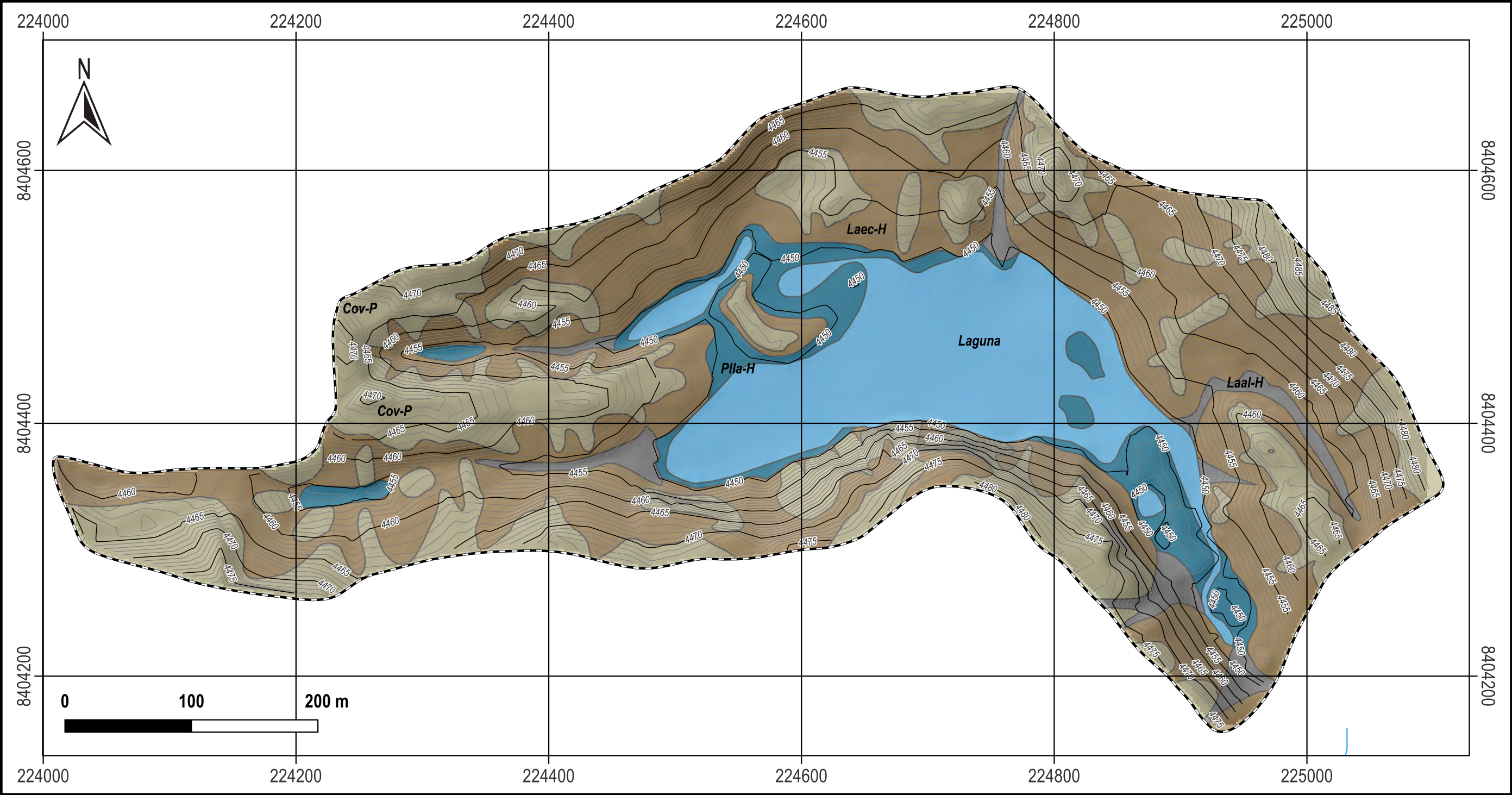




ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	SECCIÓN	SÍMBOLO
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Depósito aluvial	Qr-al	
			Depósito eluvio-coluvial	Qr-el-col	
			Depósito lacustre	Qr-la	
	Neógeno	Plioceno	Formación Suratera	Np-su/3	

SIMBOLOGÍA	
	Área de estudio
	Ensayos PDL
	Calicatas
	Lineas tomograficas
	Perfil geológico
	Curva de nivel principal
	Curva de nivel secundaria
	Calicata
	PDL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDRCCOTA CON ENFOQUE EN PROYECTO DE REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS – CUSCO		
TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA B-B' Y C-C'		
DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA		
Proyección: UTM Datum: WGS 1984 - Zona 19 Sur	FECHA: Abril, 2026	MAPA: 04B



Unidad geológica	Relieve	Geomorfología	Código	Símbolo
Laguna	Laguna	Laguna	Laguna	
Depósito aluvial	Ladera	Ladera aluvial del Holoceno	Qh-al-a	
Depósito eluvio-coluvial	Ladera	Ladera eluvio-coluvial del Holoceno	Qh-elco-a	
Depósito lacustre	Planicie	Planicie lacustre del Holoceno	Qh-la-a	
Formación Suratera	Colina	Colina volcánica del Plioceno	Np-hu-b	

SIMBOLOGÍA

Hidrografía

Topografía

Curva principal

Curva secundaria

Área de estudio

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE
REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024

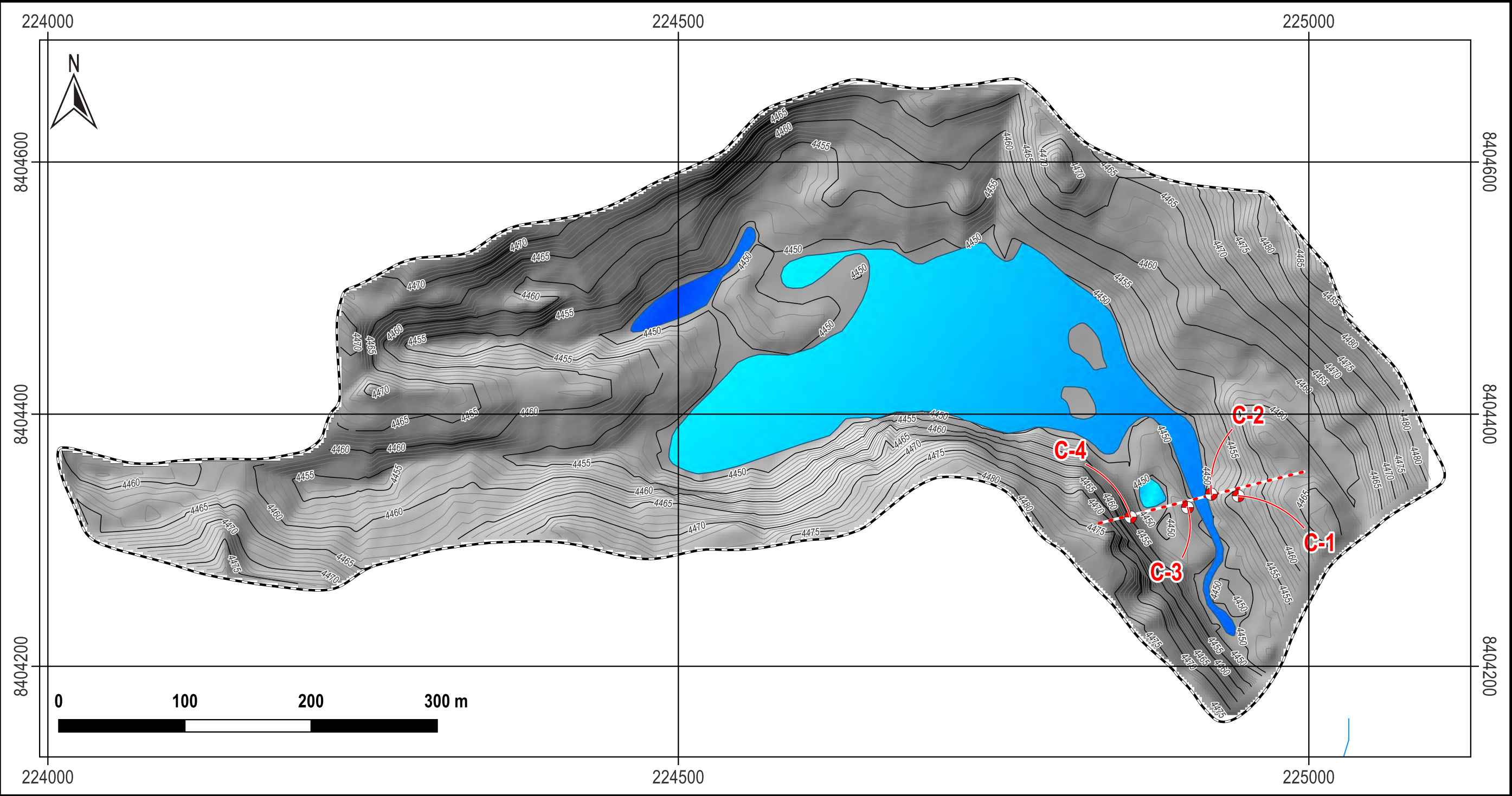
TÍTULO: MAPA GEOMORFOLÓGICO

DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA

Proyección: UTM Datum WGS 1984 -
Zona 19 Sur

FECHA: Abril, 2026

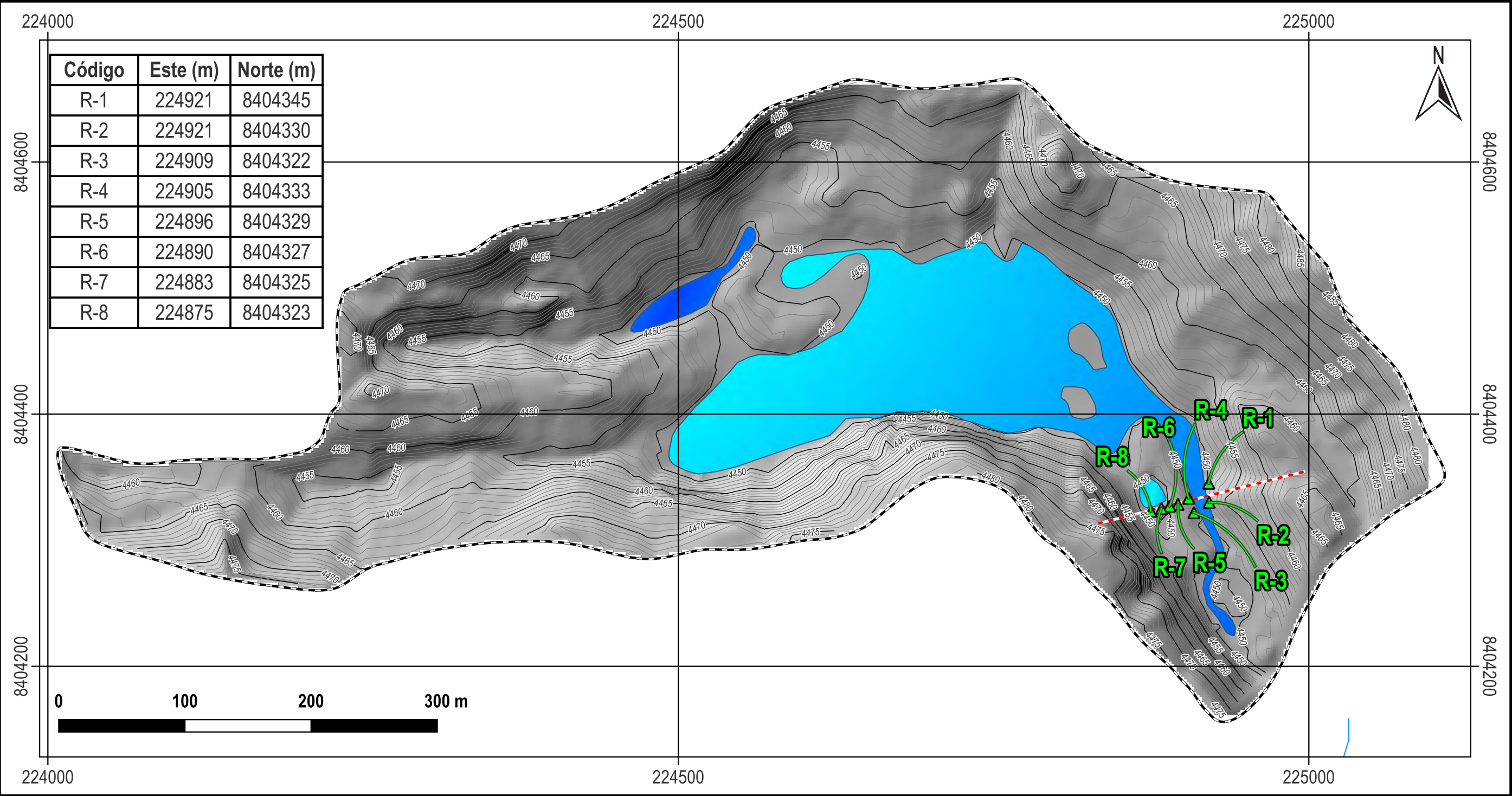
MAPA: 05



Código	Profundidad (m)	Este (m)	Norte (m)
C-1	6	224944	8404335
C-2	5	224923	8404337
C-3	7.1	224904	8404326
C-4	6.5	224859	8404318

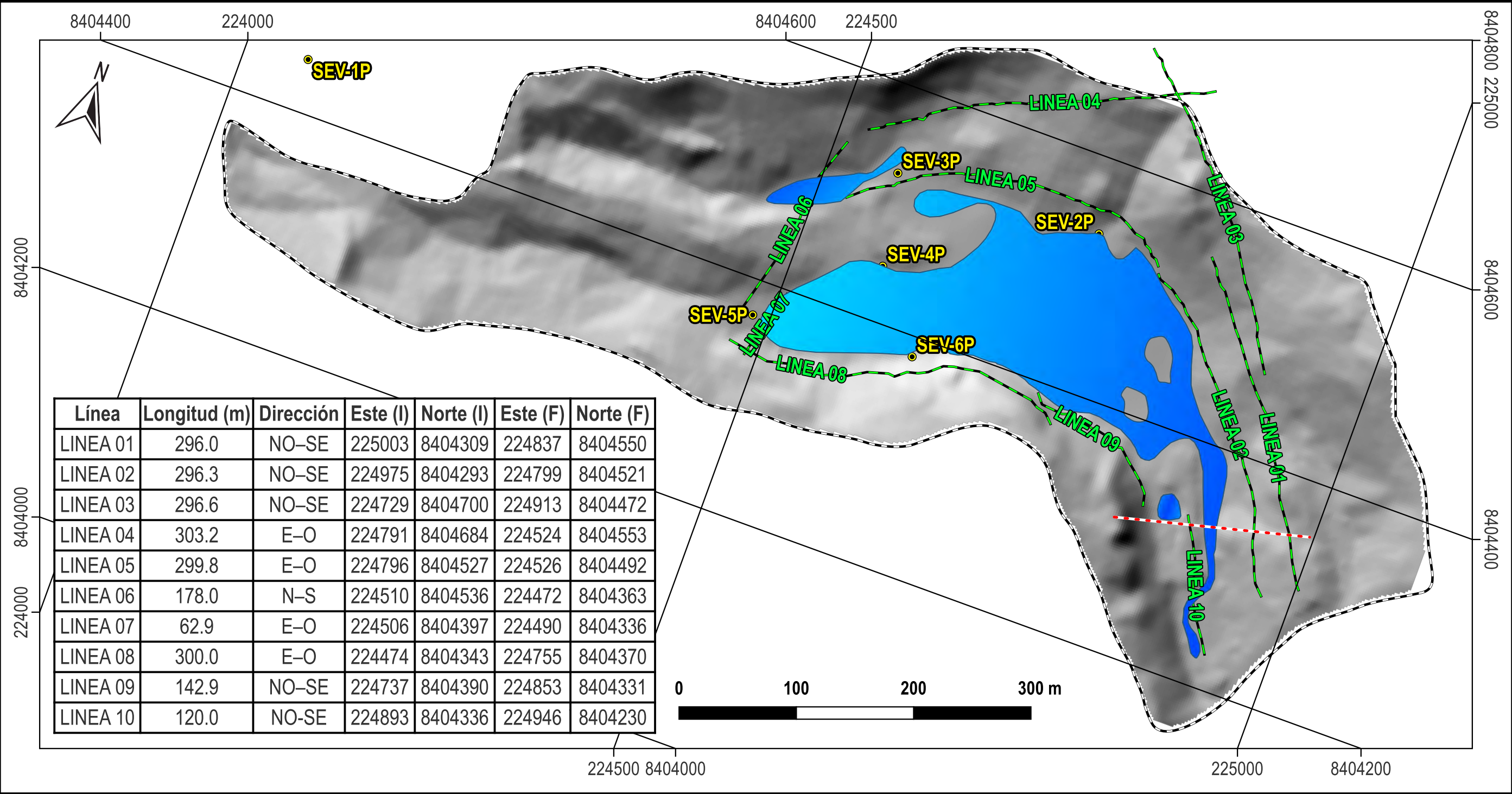
SIMBOLOGÍA	
	Área de estudio
	Excavaciones
	Hidrografía
	Laguna
	Eje de la presa proyectada
Topografía	
	Curva principal
	Curva secundaria

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024		
TÍTULO: MAPA DE UBICACIÓN DE EXCAVACIONES		
DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA		
Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur	FECHA: Abril, 2026	MAPA: 06



SIMBOLOGÍA	
	Área de estudio
	Ensayos de resistencia insitu (PDL)
	Hidrografía
	Laguna
	Eje de la presa proyectada
Topografía	
	Curva principal
	Curva secundaria

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024		
TÍTULO: MAPA DE UBICACIÓN DE ENSAYOS DE RESISTENCIA INSITU (PDL)		
DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA		
Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur	FECHA: Abril, 2026	MAPA: 07



SONDAJE	ESTE	NORTE
SEV-1P	224054	8404445
SEV-2P	224739	8404536
SEV-3P	224560	8404526
SEV-4P	224575	8404447
SEV-5P	224485	8404370
SEV-6P	224625	8404383

SIMBOLOGÍA

- Área de estudio
- Sondajes eléctricos verticales
- Líneas de tomografía eléctrica
- Eje de la presa proyectada



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE
REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024

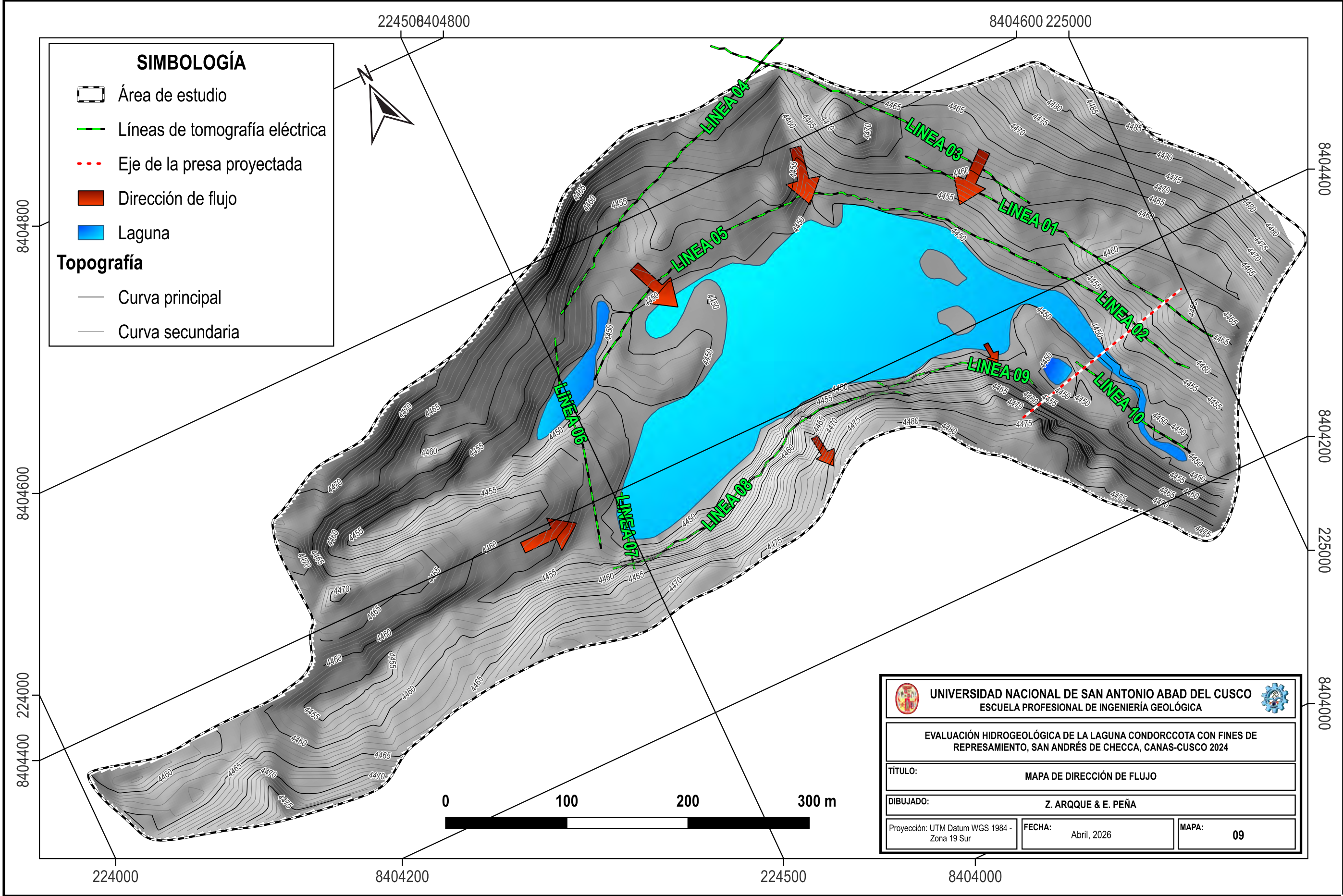
TÍTULO: MAPA DE UBICACIÓN DE ENSAYOS GEOFÍSICOS

DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA

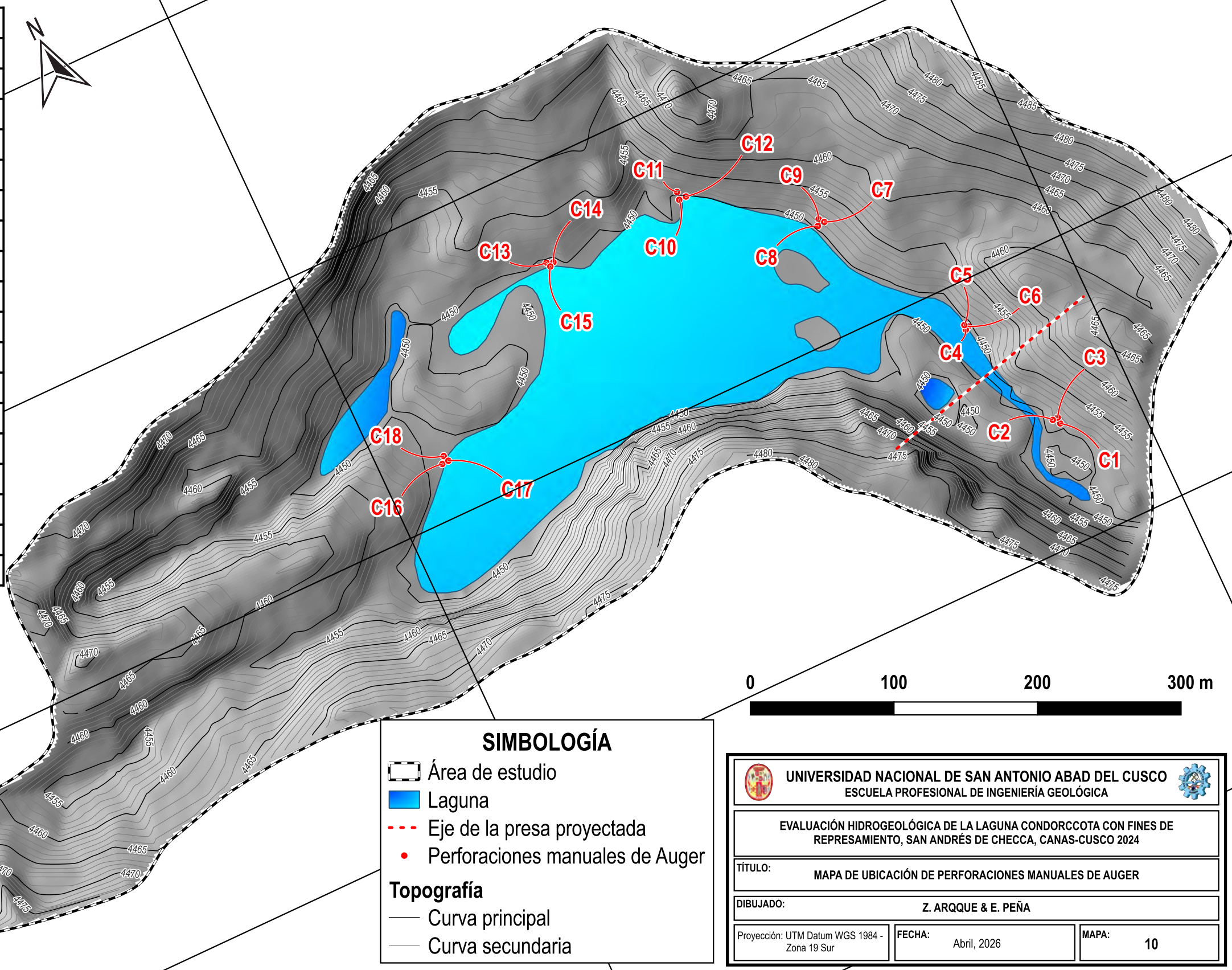
Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur

FECHA: Abril, 2026

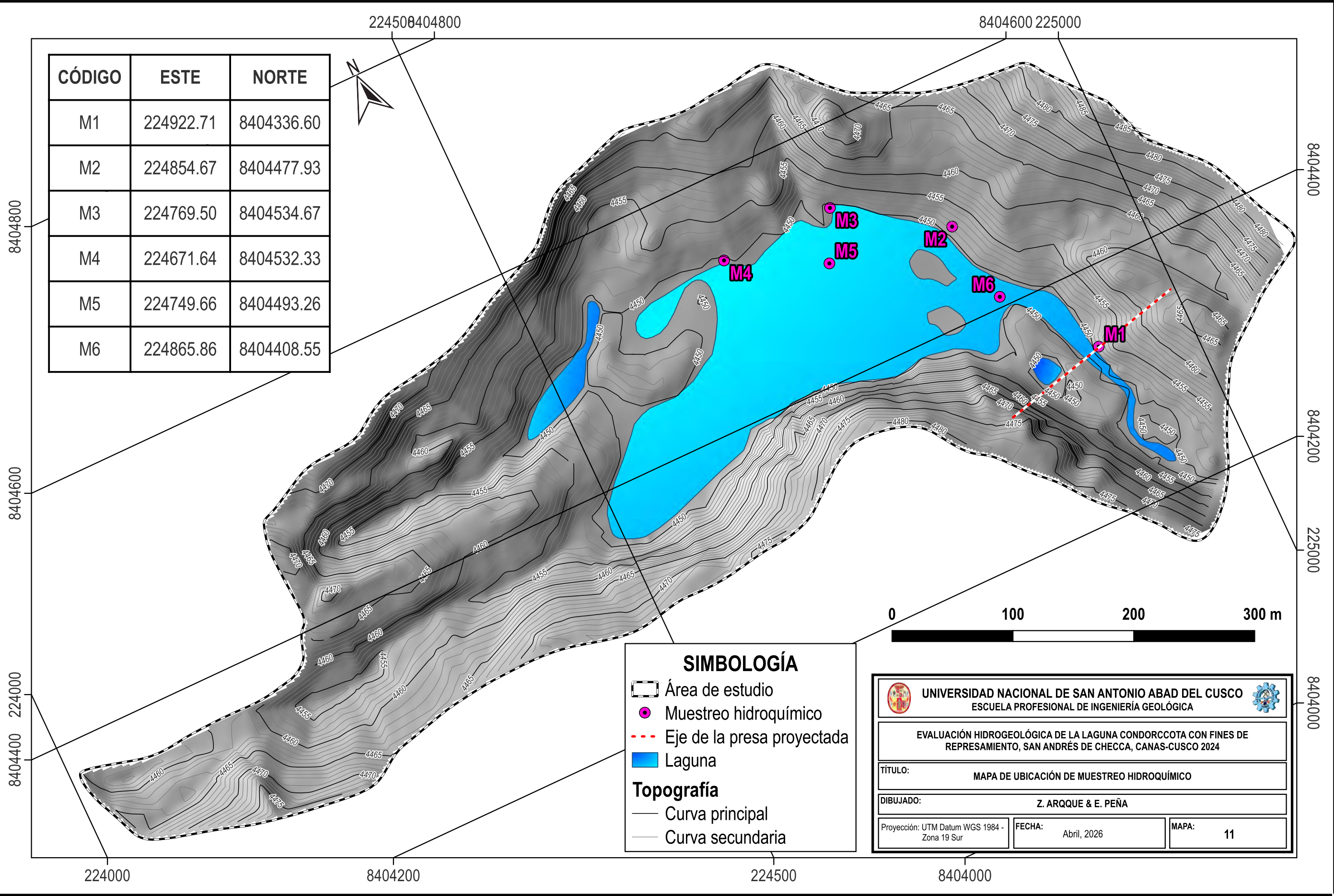
MAPA: 08



Código	Este	Norte
C1	224944	8404281
C2	224941	8404286
C3	224945	8404286
C4	224912	8404368
C5	224913	8404372
C6	224915	8404370
C7	224855	8404478
C8	224849	8404477
C9	224852	8404481
C10	224769	8404535
C11	224770	8404540
C12	224775	8404535
C13	224667	8404534
C14	224672	8404532
C15	224668	8404531
C16	224542	8404438
C17	224547	8404438
C18	224545	8404442



CÓDIGO	ESTE	NORTE
M1	224922.71	8404336.60
M2	224854.67	8404477.93
M3	224769.50	8404534.67
M4	224671.64	8404532.33
M5	224749.66	8404493.26
M6	224865.86	8404408.55



SIMBOLOGÍA

Área de estudio

Muestreo hidroquímico

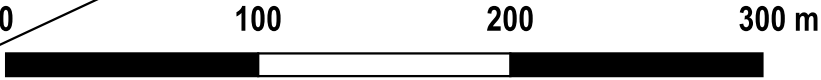
Eje de la presa proyectada

Laguna

Topografía

Curva principal

Curva secundaria



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE
REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024

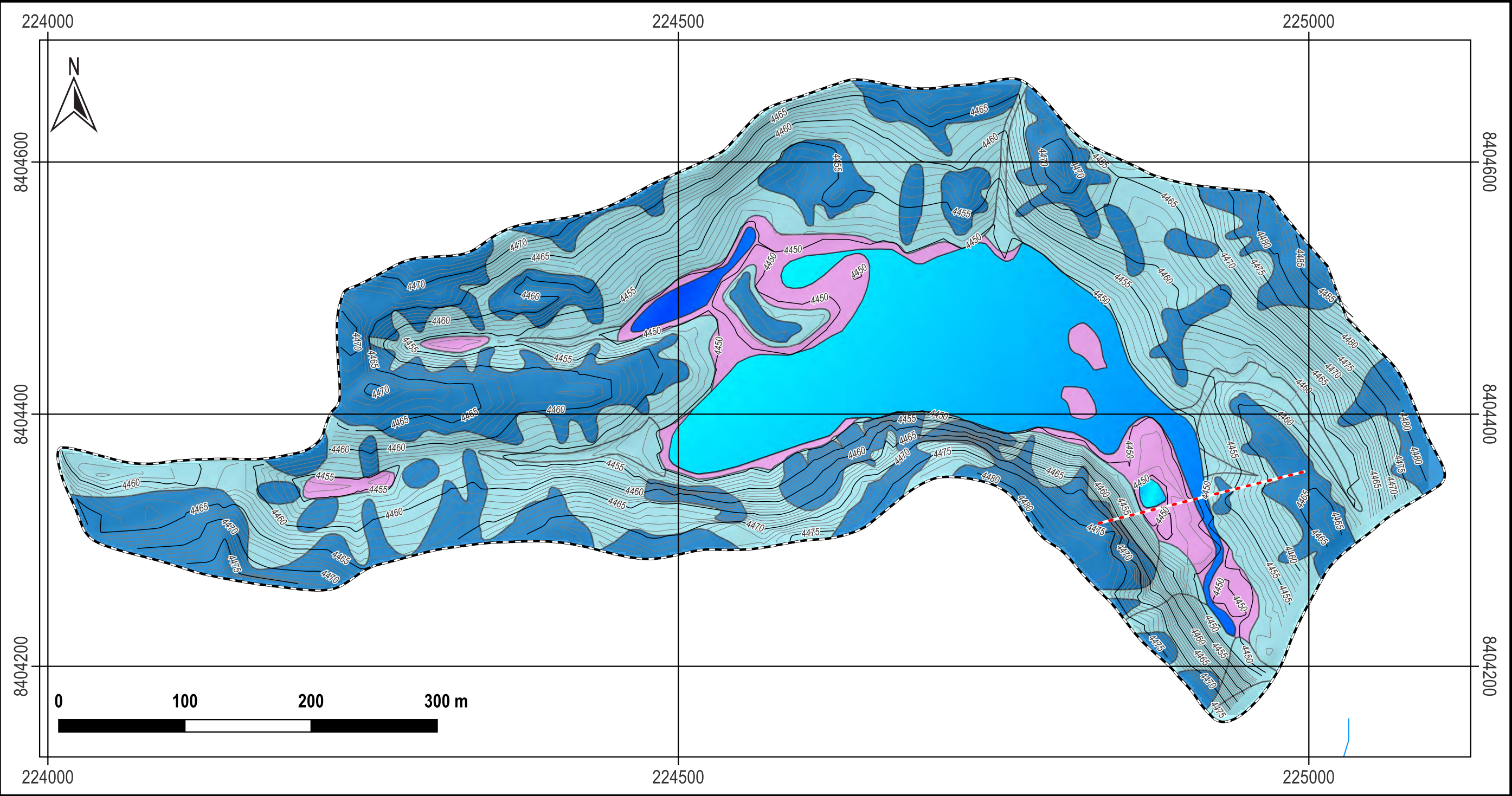
TÍTULO:
MAPA DE UBICACIÓN DE MUESTREO HIDROQUÍMICO

DIBUJADO:
Z. ARQUE & E. PEÑA

Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur

FECHA:
Abril, 2026

MAPA:
11



LEYENDA

Unidades hidrogeológicas

- Acuífero libre no consolidado
- Acuitardo no consolidado
- Acuífero fisurado

SIMBOLOGÍA

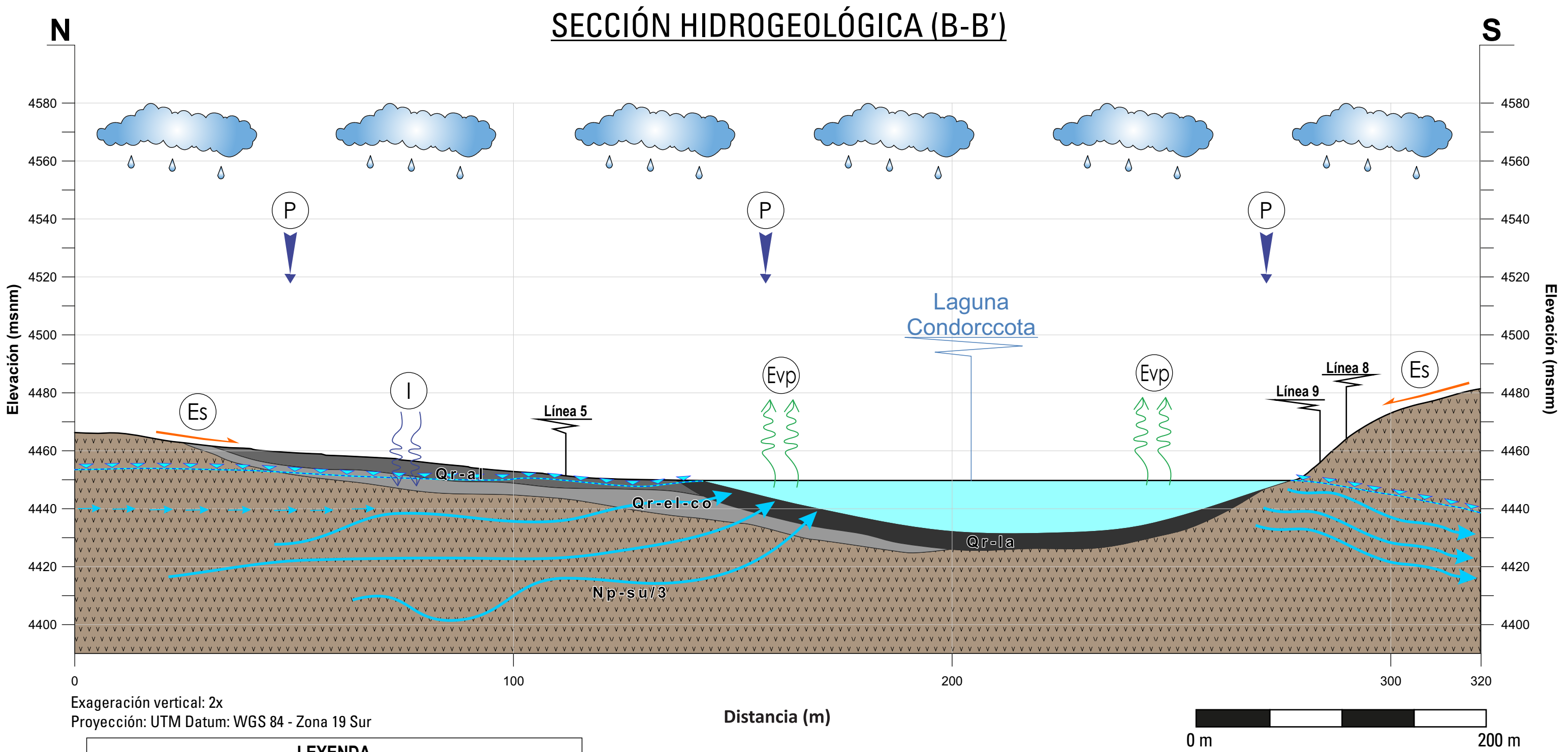
Área de estudio	Topografía
Laguna	Curva principal
Hidrografía	Curva secundaria

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024		
TÍTULO: MAPA DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS		
DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA		
Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur	FECHA: Abril, 2026	MAPA: 12

W

SIMBOLOGÍA			
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Nivel freático interpretado		Precipitación
	Dirección de flujo		
	Perforaciones manuales de Auger		Escorrentía
	Nivel freático		
	Evaporación		Infiltración

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA 		
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE REPRESAMIENTO, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024		
TÍTULO: SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA A-A'		
DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA		
Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur	FECHA: Abril, 2026	MAPA: 13-A



LEYENDA		
SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA
	Depósito aluvial Sedimentos mal clasificados, con clastos subangulosos de rocas piroclásticas.	Acuífero libre no consolidado
	Depósito eluvio coluvial Escombros con matriz clasificada como grava graduada en cementante gravo arcilloso	Acuífero libre no consolidado
	Depósito lacustre Depósitos arcillo limosos plásticos	Acuitardo no consolidado
	Formación Suratera Depósitos piroclásticos, andesíticos, dacíticos, traquiandesíticos y riolíticos.	Acuífero fisurado

SIMBOLOGÍA			
SIMBOLO	DESCRIPCIÓN	SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Nivel freático interpretado		Precipitación
	Dirección de flujo		Escorrentía
	Perforaciones manuales de Auger		Infiltración
	Nivel freático		Evaporación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA CONDORCCOTA CON FINES DE REPRESENTACIÓN, SAN ANDRÉS DE CHECCA, CANAS-CUSCO 2024		
TÍTULO: SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA B-B'		
DIBUJADO: Z. ARQUE & E. PEÑA		
Proyección: UTM Datum WGS 1984 - Zona 19 Sur	FECHA: Abril, 2026	MAPA: 13-B

