

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Estudio hidrológico e hidrogeológico para estimar la profundidad de la
napa freática del Tajo Raúl Rojas UM Cerro SAC - 2023**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Geólogo

Autor:

Bach. Gian Harold JIMENEZ OSORIO

Asesor:

Mg. Luis Arturo LAZO PAGÁN

Cerro de Pasco - Perú – 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Estudio hidrológico e hidrogeológico para estimar la profundidad de la
napa freática del Tajo Raúl Rojas UM Cerro SAC – 2023**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Favio Máximo MENA OSORIO
PRESIDENTE

Dr. Jose Fermin HINOJOSA DE LA SOTA
MIEMBRO

Mg. Vidal Victor CALCINA COLQUI
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 037-2026-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Presentado por:

Bach. Gian Harold JIMENEZ OSORIO

Escuela de Formación Profesional:

Ingeniería Geológica

Tipo de trabajo:

Tesis

Título del trabajo:

"Estudio hidrológico e hidrogeológico para estimar la profundidad de la napa freática del Tajo Raúl Rojas UM Cerro SAC - 2023"

Asesor

Mg. Luis Arturo LAZO PAGÁN

Índice de Similitud

13 %

Calificativo:

APROBADO

Se adjunta el informe y el reporte de evaluación del software Turnitin Similarity.

Cerro de Pasco, 2 de julio del 2026



Firmado digitalmente por PALOMINO
ISIDRO Ruben Edgar FAU
20154605048 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 02.07.2026 08:52:12 -05:00

DEDICATORIA

A mi esposa, por ser mi principal fortaleza durante todo este proceso, brindándome su apoyo constante, comprensión y aliento para avanzar con determinación hasta alcanzar este objetivo. Juntos hemos afrontado cada desafío con esperanza y convicción, confiando siempre en que, con la guía de Dios, cada paso tendría su propósito y su recompensa, y a mis padres, cuyo ejemplo, sacrificio y dedicación han sido una base sólida en mi formación personal y profesional.

A mi asesor, por su contribución técnica en el desarrollo de esta investigación, aportando observaciones precisas y enfoques metodológicos que permitieron estructurar adecuadamente el estudio y optimizar la calidad de los resultados obtenidos.

A mis colegas, por su constante insistencia en la importancia de culminar este trabajo y alcanzar el grado profesional, recordándome que la titulación es un pilar esencial para el ejercicio pleno de nuestra labor.

AGRADECIMIENTO

A Dios Todopoderoso, por su infinita gracia, misericordia y dirección constante, fundamento esencial en cada etapa de mi vida académica y personal. Su guía ha sido decisiva para alcanzar este logro, concediéndome fortaleza en la adversidad y claridad en el camino a seguir.

A mis padres, cuyo esfuerzo incansable, sacrificio y amor incondicional han hecho posible mi formación profesional. Su dedicación, incluso en detrimento de su propio bienestar, ha forjado en mí el compromiso, la disciplina y la perseverancia necesarias para culminar con éxito este trabajo de investigación.

A la Compañía Minera Volcan S.A.A., por brindarme la oportunidad de acceder al Tajo Raúl Rojas y desarrollar actividades de campo que fueron clave para este estudio. El poder realizar mediciones, observaciones y registrar información directamente en el área de operaciones fue fundamental para lograr los resultados que aquí se presentan.

RESUMEN

El presente estudio titulado “Estudio hidrológico e hidrogeológico para estimar la profundidad de la napa freática del Tajo Raúl Rojas de la Unidad Minera Cerro S.A.C. – 2023”, se desarrolló en la región Pasco, Perú, con la finalidad de evaluar el comportamiento de la profundidad de la napa freática mediante el análisis de su variación espacial y temporal, considerando la influencia de los factores geológicos e hidrogeológicos en la estabilidad del tajo y en la dinámica del flujo subterráneo. Para el desarrollo de la investigación se utilizaron piezómetros, registros hidrogeológicos, equipos geofísicos, software MODFLOW y herramientas SIG, que permitieron realizar el análisis espacial y el modelamiento hidrogeológico del área de estudio. La metodología aplicada fue de tipo aplicada, con enfoque descriptivo-explicativo, realizando trabajos de campo, monitoreo de niveles freáticos, análisis geológico e hidrogeológico, interpretación geofísica y modelamiento numérico para evaluar el comportamiento de la napa freática. Los resultados obtenidos evidenciaron que la profundidad de la napa freática presenta variaciones entre 20 y 60 metros, influenciadas principalmente por la litología, el fracturamiento del macizo rocoso y la topografía, identificándose además zonas de recarga asociadas a sectores de mayor permeabilidad y una interacción directa entre aguas superficiales y subterráneas. Asimismo, se determinó que las labores mineras subterráneas influyen en las condiciones de drenaje y en la dinámica del flujo hídrico, generando variaciones en los niveles freáticos y posibles riesgos de inestabilidad geotécnica. Finalmente, la caracterización hidrogeológica permitió comprender el comportamiento de la napa freática y su relación con los factores geológicos e hidrogeológicos del área de estudio, contribuyendo a la identificación de zonas críticas y a la optimización de los sistemas de drenaje y monitoreo en la operación minera.

Palabras clave: napa freática, hidrogeología minera, balance hídrico, estabilidad geotécnica y modelamiento numérico.

ABSTRACT

The present study entitled “Hydrological and Hydrogeological Study to Estimate the Groundwater Table Depth in the Raúl Rojas Open Pit of Cerro S.A.C. Mining Unit – 2023” was carried out in the Pasco region, Peru, with the purpose of evaluating the behavior of groundwater table depth through the analysis of its spatial and temporal variation, considering the influence of geological and hydrogeological factors on pit stability and underground flow dynamics. For the development of the research, piezometers, hydrogeological records, geophysical equipment, MODFLOW software, and GIS tools were used, allowing spatial analysis and hydrogeological modeling of the study area. The applied methodology was of an applied type with a descriptive-explanatory approach, involving fieldwork, groundwater level monitoring, geological and hydrogeological analysis, geophysical interpretation, and numerical modeling to evaluate groundwater table behavior. The obtained results showed that the groundwater table depth presents variations between 20 and 60 meters, mainly influenced by lithology, rock mass fracturing, and topography, additionally identifying recharge zones associated with sectors of greater permeability and a direct interaction between surface water and groundwater. Likewise, it was determined that underground mining operations influence drainage conditions and groundwater flow dynamics, generating variations in groundwater levels and potential geotechnical instability risks. Finally, the hydrogeological characterization made it possible to understand the behavior of the groundwater table and its relationship with the geological and hydrogeological factors of the study area, contributing to the identification of critical zones and the optimization of drainage and monitoring systems in the mining operation.

Keywords: Groundwater table, mining hydrogeology, water balance, geotechnical stability, and numerical modeling.

INTRODUCCIÓN

El Tajo Raúl Rojas, ubicado en la Unidad Minera Cerro S.A.C., en la región Pasco – Perú, constituye una de las áreas de explotación minera a cielo abierto más relevantes del centro del país. En este contexto, la comprensión del comportamiento hidrogeológico del área resulta fundamental para garantizar la estabilidad geotécnica del tajo y la adecuada gestión de los recursos hídricos subterráneos.

La necesidad del presente estudio se sustenta en la limitada información existente sobre la profundidad y dinámica de la napa freática, cuya variabilidad puede generar riesgos asociados a infiltraciones no controladas, deslizamientos y posibles colapsos en las paredes del tajo, afectando la seguridad de las operaciones mineras. Asimismo, el conocimiento de estas condiciones permite optimizar el diseño de sistemas de drenaje y contribuir a la mitigación de impactos ambientales.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado, con alcance descriptivo–explicativo, integrando trabajo de campo, análisis de información histórica, evaluación geológica e hidrogeológica, interpretación geofísica y modelamiento numérico mediante el software MODFLOW, con el apoyo de herramientas de sistemas de información geográfica para el análisis espacial.

El estudio se estructura en cinco capítulos: el primero presenta el planteamiento del problema y los objetivos; el segundo desarrolla el marco teórico y antecedentes; el tercero describe la metodología; el cuarto expone los resultados y su análisis; y el quinto contiene las conclusiones y recomendaciones.

En este sentido, los resultados obtenidos permiten caracterizar la profundidad y comportamiento de la napa freática en el área de estudio, aportando información relevante para la identificación de zonas con potencial inestabilidad geotécnica y para la optimización de la gestión hidrogeológica en la operación minera.

ÍNDICE

	Página.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
INTRODUCCIÓN	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
CAPÍTULO I	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Identificación y determinación del problema.....	1
1.2. Delimitación de investigación.....	2
1.3. Formulación del problema.....	2
1.3.1. Problema general	2
1.3.2. Problemas específicos	2
1.4. Formulación de objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Justificación de investigación.....	3
1.6. Limitaciones de la investigación	4
CAPÍTULO II	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes de estudio	5
2.2. Bases teóricas – científicas.....	15
2.3. Definición de términos básicos	27
2.4. Formulación de hipótesis	29
2.4.1. Hipótesis general	29
2.4.2. Hipótesis específicas	29
2.5. Identificación de variables.....	30

2.6.	Definición operacional de variables e indicadores	30
CAPITULO III		32
3.	METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN.....	32
3.1.	Tipo de investigación.....	32
3.2.	Nivel de investigación.....	33
3.3.	Métodos de investigación	33
3.4.	Diseño de la investigación	34
3.5.	Población y muestra	34
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	35
3.7.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	36
3.8.	Tratamiento estadístico.....	38
3.9.	Orientación ética filosófica y epistémica.....	38
CAPÍTULO IV.....		39
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1.	Descripción del trabajo de campo	39
4.2.	Prueba de hipótesis.....	94
4.3.	Discusión de resultados	94
CONCLUSIONES		98
RECOMENDACIONES.....		100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		101
ANEXOS		102

ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1. Operacionalización de Variables	30
Tabla 2. Distancias de ubicación	41
Tabla 3. Evapotranspiración de referencia.....	46
Tabla 4. Área y perímetro de la microcuenca	47
Tabla 5. Investigaciones geofísicas realizadas y su ubicación	59
Tabla 6. Resistivímetro Syscal Pro y accesorios	61
Tabla 7. Resumen de inventario de filtraciones.....	67
Tabla 8. Inventario de Subestaciones de bombeo.....	67
Tabla 9. Inventarios de agua	70
Tabla 10. Unidades Hidrogeológicas.....	78
Tabla 11. Resultados del balance en el sector del Tajo Raúl.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 1. Ubicación de la UM Cerro De Pasco	40
Figura 2. Clasificación Climática	42
Figura 3. Zonas de Vida	43
Figura 4. Precipitación media mensual	44
Figura 5. Evaporación media mensual	45
Figura 6. Ubicación de Estaciones Meteorológicas.....	48
Figura 7. Mapa de Isoyetas	49
Figura 8. Mapa de Isotermas(método de interpolación Kriging).	50
Figura 9. Hidrografía Local.....	51
Figura 10. Geología del Área de Estudio	53
Figura 11. Sección Geológica A-A'.....	56
Figura 12. Sección Geológica B-B'.....	57
Figura 13. Investigaciones Geofísicas.....	60
Figura 14. Perfiles geoeléctricos en diferentes unidades geológicas	63
Figura 15. Investigaciones Directas – Sondajes (Piezómetros).....	64
Figura 16. Investigaciones Complementarias – Indirectas - SEV	65
Figura 17. Rango de resistividades	66
Figura 18. Ubicación de Fuentes de Agua Superficial y Subterránea	69
Figura 19. Mapa Hidrogeológico	72
Figura 20. Conductividad hidráulica vs profundidad de los medios no consolidados (Cuaternarios)	73
Figura 21. Conductividad hidráulica vs profundidad – Grupo Excélsior	74
Figura 22. Conductividad hidráulica vs profundidad – Volcánico Rumiallana, Dacita porfirítica, domo Tonalita.	75
Figura 23. Conductividad hidráulica vs profundidad para rocas sedimentarias de la Fm Chambará	76
Figura 24. Sección Hidrogeológica A-A'	81
Figura 25. Sección Hidrogeológica B-B'.....	82
Figura 26. Sector de Interés Pared Este – Tajo Raúl Rojas.....	84
Figura 27. Labores Subterráneas Pared Este – Tajo Raúl Rojas	85

Figura 28. Caracterización Hidrogeológico Pared Este – Tajo Raúl Rojas.....	86
Figura 29. Evolución de los flujos de la mina subterránea	87
Figura 30. Carga hidráulica y flujo subterráneo calculados en estado estacionario	90
Figura 31. Unidades hidrogeológicas superficiales utilizadas en el modelo numérico	90
Figura 32. Sección hidrogeológica-numérica A–A’ del modelo MODFLOW 6	91
Figura 33. Sección hidrogeológica-numérica B–B’ del modelo MODFLOW 6.7.0	92
Figura 34. Respuesta transitoria del modelo y forzantes mensuales de recarga	92
Figura 35. Vista tridimensional integrada del modelo hidrogeológico MODFLOW 6.7.0	93

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página.
Anexo 1. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Animón (2002 - 2008).....	103
Anexo 2. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Carhuacayan (1986- 2018)	104
Anexo 3. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Carhuamayo (1952 - 1994)	105
Anexo 4. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Cerro de Pasco (1975 - 2018).....	106
Anexo 5. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Huaraucaca (1996 - 2018).....	107
Anexo 6. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Huayllay (1957 - 1970).....	108
Anexo 7. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Hueghue (1965 - 2005).....	109
Anexo 8. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Junín (1969 - 2018)	110
Anexo 9. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Laguna Surasaca (1995 - 2018).....	111
Anexo 10. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Oyón (1987 - 2018).....	112
Anexo 11. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Picoy (1968 - 2015).....	113
Anexo 12. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Pirca (1992 - 2018).....	114
Anexo 13. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Santa Cruz (1983 - 2018).....	115
Anexo 14. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Shelby (1957 - 1992).....	116
Anexo 15. Evidencia de ejecución y control numérico del modelo modflow 6	117
Anexo 16. balance de masas del modelo	118
Anexo 17. Trazabilidad de la implementación numérica	119

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La Unidad Minera Cerro SAC se ubica en Cerro de Pasco, donde se encuentra el Tajo Raúl Rojas, una operación minera a cielo abierto que enfrenta desafíos significativos relacionados con la gestión del agua subterránea (Custodio y Llamas, 1996). La región es conocida por su geología compleja y su clima variable, lo que complica aún más la estimación y gestión de la napa freática (Hiscock, 2005). La minería en esta área ha sido una fuente importante de desarrollo económico, pero también ha traído consigo preocupaciones ambientales y de sostenibilidad que requieren una gestión cuidadosa y bien informada (Younger, 2002).

La operación minera en el Tajo Raúl Rojas se ve afectada por la presencia de aguas subterráneas, cuya profundidad y comportamiento varían debido a factores geológicos, climáticos y operacionales (Freeze & Cherry, 1979). Sin una comprensión precisa de la profundidad y dinámica de la napa freática, se corre el riesgo de enfrentar problemas como la inundación de los tajos, deslizamientos de tierras, y contaminación

de acuíferos (Domenico y Schwartz, 1998). Además, la interacción entre la minería y las aguas subterráneas puede tener impactos negativos en el medio ambiente y en las comunidades locales que dependen de estos recursos hídricos para su sustento (Younger, Banwart y Hedin, 2002).

1.2. Delimitación de investigación

La investigación se delimitó al estudio hidrológico e hidrogeológico del Tajo Raúl Rojas, ubicado en la Unidad Minera Cerro S.A.C., distrito de Simón Bolívar, provincia y región Cerro de Pasco, a 295 km al Este de la ciudad de Lima y a una altitud promedio de 4450 msnm.

El estudio se enfocó en estimar la profundidad de la napa freática y evaluar su comportamiento mediante el análisis de su variación espacial y temporal, considerando la influencia de los factores geológicos e hidrogeológicos en la estabilidad del tajo y en la dinámica del flujo subterráneo.

Temporalmente, la investigación corresponde al periodo de estudio del año 2023, durante el cual se realizaron los registros y evaluaciones hidrogeológicas del Tajo Raúl Rojas.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo se comporta la profundidad de la napa freática en el tajo Raúl Rojas, considerando su variación espacial y temporal, y de qué manera este comportamiento, influenciado por las características geológicas e hidrogeológicas, incide en la estabilidad del tajo y en la dinámica del flujo subterráneo?

1.3.2. Problemas específicos

- 1.- ¿En qué grado la variación de la profundidad de la napa freática influye en los riesgos de inestabilidad del tajo, considerando la presencia de zonas

críticas asociadas a niveles freáticos superficiales?

- 2.- ¿De qué manera los factores geológicos e hidrogeológicos, como la litología fracturada, la topografía y la recarga hídrica, influyen en la variación de la profundidad de la napa freática en el área de estudio?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de la profundidad de la napa freática en el tajo Raúl Rojas, mediante el análisis de su variación espacial y temporal, así como la influencia de los factores geológicos e hidrogeológicos, con la finalidad de analizar su incidencia en la estabilidad del tajo y en la dinámica del flujo subterráneo.

1.4.2. Objetivos específicos

- 1.- Analizar en qué grado la variación de la profundidad de la napa freática influye en los riesgos de inestabilidad del tajo, identificando zonas críticas asociadas a niveles freáticos superficiales.
- 2.- Evaluar la influencia de los factores geológicos e hidrogeológicos, como la litología fracturada, la topografía y la recarga hídrica, en la variación de la profundidad de la napa freática en el área de estudio.

1.5. Justificación de investigación

La justificación del estudio hidrológico e hidrogeológico para estimar la profundidad de la napa freática en el Tajo Raúl Rojas de UM Cerro SAC se fundamenta en la necesidad de conocer la profundidad de la napa freática, lo cual permitirá planificar las excavaciones y operaciones de manera segura, minimizando los riesgos de inundaciones y deslizamientos de tierra. Asimismo, contar con información precisa sobre la napa freática será esencial para diseñar medidas de control y drenaje que garanticen la estabilidad del tajo y la integridad estructural de las instalaciones mineras.

De acuerdo con Foster y Chilton (2003), una adecuada caracterización hidrogeológica en áreas de minería es clave para prevenir impactos negativos tanto en las operaciones como en el medio ambiente, especialmente en lo relacionado con el flujo subterráneo y su interacción con los tajos abiertos.

Importancia y alcances de la investigación

La importancia y los alcances de este estudio radican en su capacidad para proporcionar una base sólida de datos y conocimientos que permitan una gestión informada y sostenible de los recursos hídricos en el Tajo Raúl Rojas. La investigación no solo beneficiará las operaciones mineras en términos de seguridad y eficiencia, sino que también se enfocará en medir y analizar la profundidad de la napa freática en múltiples puntos del área de estudio, considerando variaciones espaciales y temporales, incluyendo cambios estacionales y operativos.

1.6. Limitaciones de la investigación

Las limitaciones que se presenta el proyecto de investigación son las siguientes:

Las interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales, así como otros factores hidrológicos, pueden agregar complejidad al análisis y la modelación del comportamiento de la napa freática.

Los modelos hidrogeológicos utilizados pueden tener limitaciones en cuanto a la precisión y la capacidad de representar adecuadamente todos los factores que influyen en la napa freática.

El presupuesto disponible para la investigación puede limitar el alcance y la profundidad del estudio, incluyendo la cantidad de puntos de monitoreo, la frecuencia de las mediciones y la utilización de tecnologías avanzadas

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Antecedentes Internacionales

- **Vargas M. (2016):** "Hydrogeological Characterization and Management in the Escondida Copper Mine." El artículo científico se llevó a cabo en la Mina Escondida, ubicada en el desierto de Atacama - Chile, es una de las minas de cobre más grandes del mundo. Enfrenta desafíos significativos relacionados con la gestión del agua en una región árida, cuyo objetivo fue evaluar la disponibilidad de agua subterránea, monitorear la profundidad de la napa freática y desarrollar estrategias de gestión sostenible del agua, haciendo uso de la siguiente metodología: Uso de piezómetros para monitoreo continuo, análisis de isótopos para determinar la recarga de acuíferos y modelación numérica para predecir el comportamiento de la napa freática. Obteniendo como resultado la identificación de la capacidad de recarga de acuíferos, implementación de sistemas de reutilización de agua y establecimiento de políticas de extracción sostenible. Relacionado al impacto

obtuvo la mejora en la gestión del agua, reducción de conflictos con comunidades locales y minimización del impacto ambiental.

- **Smith, J. (2018).** "Groundwater Resource Evaluation in the Pilbara Mining Region." En el presente artículo científico se realizó en la Región de Pilbara, Australia Occidental, donde se efectúa una intensa actividad minera, principalmente de hierro, ubicada en el oeste de Australia, caracterizada por un clima semiárido, con la finalidad de determinar la disponibilidad de agua subterránea para apoyar las operaciones mineras y evaluar los impactos de la extracción de agua sobre los ecosistemas locales. Utilizando la siguiente metodología: Perforación de pozos de monitoreo, uso de sensores remotos para análisis espacial, y modelación hidrogeológica integrada. Como resultado se obtuvo la creación de un modelo hidrogeológico detallado, desarrollo de planes de gestión del agua que incluyen restricciones de extracción en periodos críticos. Relacionado al impacto hizo una gestión optimizada del agua subterránea, balance entre las necesidades de la minería y la conservación ambiental, y reducción de riesgos asociados con la sobreexplotación.
- **García, R. (2017).** "Impact of Mining Activities on the Hydrogeology of the Rio Tinto Basin.", El artículo científico se efectuó en Río Tinto, Huelva, España, conocido por su alta contaminación debido a la minería histórica, presentando desafíos únicos para la gestión del agua. El objetivo fue evaluar el impacto de la minería sobre la calidad del agua subterránea y superficial, y desarrollar estrategias de remediación. Usando la siguiente metodología: Monitoreo de calidad del agua, análisis geofísico del subsuelo, y modelación de la dispersión de contaminantes. Como resultado se obtuvo mapas detallados de contaminación, identificación de fuentes de polución, y desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas

contaminadas, y reducción de la contaminación del agua, restauración parcial de los ecosistemas acuáticos y mejora en la salud pública local.

- **Johnson, L. (2015).** "Groundwater Management in the San Joaquin Valley." Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley. La tesis Doctoral se llevó a cabo en Valle de San Joaquín, California, Estados Unidos, es una región agrícola que enfrenta problemas de sobreexplotación de acuíferos y descenso de niveles freáticos. El objetivo fue evaluar la recarga y extracción de acuíferos, y desarrollar estrategias para la gestión sostenible del agua subterránea. Para ello ha utilizado la metodología de uso de datos históricos de niveles de agua, modelación hidrogeológica, y análisis de uso del suelo. Obteniendo como resultado la identificación de zonas críticas de sobreexplotación, implementación de programas de recarga artificial y promoción de prácticas agrícolas eficientes en el uso del agua. Relacionado al impacto ha mejorado la sostenibilidad del uso del agua subterránea, reducción de la subsidencia del suelo y mejor manejo de los recursos hídricos en tiempos de sequía.
- **Moyo, S. (2019).** "Groundwater Management and Acid Mine Drainage in the Witwatersrand Basin", El artículo científico se realizó en la Región de Witwatersrand, Sudáfrica, es una región con intensa actividad minera de oro, enfrentando desafíos de gestión de agua subterránea y contaminación. Con la finalidad de evaluar la profundidad y calidad de la napa freática, y desarrollar estrategias para la mitigación de la contaminación ácida de las minas. Usando la metodología: Instalación de redes de monitoreo, análisis químico de agua, y modelación de flujo y transporte de contaminantes. Dando como resultado la Identificación de áreas afectadas por drenaje ácido de minas, implementación de sistemas de tratamiento de agua, y desarrollo de políticas de manejo de residuos

mineros. Logrando mejorar en la calidad del agua subterránea, reducción de la contaminación y mitigación de riesgos para la salud humana y ambiental.

Antecedentes Nacionales

- **Huamán, P. (2015).** "Análisis hidrológico y modelación de la cuenca del Río Mantaro", EL artículo científico se llevo a cabo en la región Junín cuyo objetivo fue evaluar la disponibilidad y distribución temporal y espacial de los recursos hídricos en la cuenca del Río Mantaro. Para ello, se recopilaron datos históricos de precipitación, caudal y otros parámetros hidrológicos. Estos datos se utilizaron para calibrar y validar un modelo hidrológico que permite simular el comportamiento de la cuenca bajo diferentes escenarios climáticos y de uso del suelo. Los resultados del análisis hidrológico revelan patrones significativos de variabilidad estacional en el caudal del río, con picos de flujo durante la temporada de lluvias. La modelación hidrológica muestra que la cuenca es sensible a cambios en el uso del suelo y en las precipitaciones, lo que tiene implicaciones importantes para la gestión de los recursos hídricos y la planificación de infraestructura hidráulica. El estudio concluye con recomendaciones para mejorar la gestión del agua en la cuenca del Río Mantaro, incluyendo la implementación de medidas de conservación de agua, la planificación de reservas hídricas y la necesidad de monitoreo continuo para adaptar las estrategias de gestión a las condiciones cambiantes.
- **López, M. (2015).** "Estudio hidrogeológico de la mina Yanacocha y su influencia en las aguas subterráneas" La Tesis de Maestría se efectuó en la Universidad Nacional de Cajamarca, con la finalidad de caracterizar las condiciones hidrogeológicas de la mina Yanacocha, identificando las fuentes de recarga y descarga, así como los patrones de flujo de agua subterránea. Para ello, se realizó una recopilación exhaustiva de datos geológicos, hidrológicos y químicos,

complementada con campañas de monitoreo in situ y pruebas de bombeo. El análisis incluye la construcción de un modelo conceptual hidrogeológico que representa la interacción entre las actividades mineras y el sistema de aguas subterráneas. Este modelo se utilizó para simular escenarios de extracción de agua y evaluar los posibles impactos en el nivel de la napa freática y la calidad del agua subterránea. Los resultados muestran que la actividad minera en Yanacocha ha alterado significativamente los flujos naturales de agua subterránea, provocando un descenso en el nivel de la napa freática en algunas áreas y cambios en la calidad del agua debido a la infiltración de contaminantes. El estudio también identifica zonas críticas donde la extracción de agua debe ser gestionada cuidadosamente para evitar impactos adversos mayores. Concluyendo con una serie de recomendaciones para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la mina Yanacocha, enfatizando la necesidad de un monitoreo continuo y la implementación de medidas de mitigación para proteger las aguas subterráneas.

- **Quispe, M. (2017).** "Evaluación hidrogeológica de la mina Cerro Verde y sus efectos en la napa freática." Tesis de Maestría, Universidad Nacional de San Agustín, cuya finalidad es analizar los efectos de las actividades mineras en la napa freática de la zona circundante, incluye una caracterización detallada de las condiciones hidrogeológicas de la mina Cerro Verde, abarcando aspectos como la geología local, los sistemas de flujo de aguas subterráneas y la calidad del agua. Para llevar a cabo este análisis, se recopilieron datos de campo mediante la instalación de piezómetros, la realización de pruebas de bombeo y la toma de muestras de agua subterránea. Se desarrolló un modelo hidrogeológico conceptual que describe las interacciones entre las actividades mineras y el sistema de aguas subterráneas. Este modelo fue utilizado para simular diferentes escenarios de

explotación minera y evaluar sus impactos en la profundidad de la napa freática y en la calidad del agua subterránea. Los resultados del estudio revelan que las operaciones mineras en Cerro Verde han provocado un descenso significativo en el nivel de la napa freática en varias áreas adyacentes a la mina. Además, se detectaron cambios en la calidad del agua, incluyendo aumentos en la concentración de ciertos contaminantes debido a la infiltración de lixiviados mineros. La tesis concluye con una serie de recomendaciones para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la mina Cerro Verde. Entre las recomendaciones se incluyen la necesidad de implementar sistemas de monitoreo continuo, desarrollar estrategias de mitigación para reducir la contaminación del agua subterránea y establecer planes de manejo que consideren los efectos a largo plazo de la extracción minera.

- **Salinas, P. (2018).** "Estudio hidrogeológico y modelación de la napa freática en el proyecto minero Toromocho." Doctoral Dissertation, Pontificia Universidad Católica del Perú, ubicado en la región Junín con la finalidad de evaluar el comportamiento hidrogeológico del área de influencia del proyecto minero y desarrollar un modelo numérico para predecir los impactos de las actividades mineras en la napa freática. El estudio comenzó con una caracterización exhaustiva de las condiciones hidrogeológicas del área, incluyendo la geología, la hidrogeología y la calidad del agua subterránea. Se realizaron campañas de campo para recolectar datos, que incluyeron la instalación de piezómetros, pruebas de bombeo y muestreo de aguas subterráneas. Se desarrolló un modelo conceptual hidrogeológico que sirvió como base para la construcción de un modelo numérico utilizando software especializado. Este modelo numérico permitió simular el comportamiento de la napa freática bajo diferentes escenarios de explotación minera y condiciones climáticas. Los resultados de la modelación indicaron que las

actividades mineras en Toromocho tienen el potencial de afectar significativamente la profundidad de la napa freática, especialmente en áreas cercanas a las operaciones de extracción. Además, se identificaron posibles zonas de recarga y descarga, y se evaluaron los riesgos de contaminación del agua subterránea debido a infiltraciones de residuos mineros. La tesis concluye con recomendaciones para la gestión sostenible del recurso hídrico en el proyecto minero Toromocho. Entre las sugerencias se incluyen la implementación de sistemas de monitoreo continuo de la napa freática, el desarrollo de estrategias de manejo de aguas residuales y la aplicación de prácticas de extracción que minimicen los impactos negativos en el agua subterránea.

- **Ramírez, T. (2019).** "Gestión y modelación de aguas subterráneas en la mina Antamina." Doctoral Dissertation, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, con el objetivo de desarrollar un modelo hidrogeológico que permita comprender y gestionar adecuadamente los recursos hídricos subterráneos afectados por las actividades mineras. El trabajo comienza con una caracterización hidrogeológica detallada del área de estudio, incluyendo la geología, la hidrogeología y la calidad del agua subterránea. Se realizaron extensas campañas de campo para recopilar datos, que incluyeron la instalación de piezómetros, pruebas de bombeo y muestreo de aguas subterráneas. Utilizando estos datos, se desarrolló un modelo conceptual hidrogeológico que sirvió como base para la construcción de un modelo numérico tridimensional. Este modelo numérico permitió simular el comportamiento de las aguas subterráneas bajo diferentes escenarios de explotación minera y condiciones hidrológicas. Los resultados de la modelación indicaron que las actividades mineras en Antamina tienen un impacto significativo en los niveles de la napa freática y en la calidad del agua subterránea. Se identificaron zonas críticas de recarga y

descarga, así como áreas vulnerables a la contaminación por lixiviados mineros. Concluye con una serie de recomendaciones para la gestión sostenible de las aguas subterráneas en la mina Antamina. Entre las recomendaciones se incluyen la implementación de sistemas de monitoreo continuo, el desarrollo de estrategias de manejo de aguas residuales y la adopción de prácticas mineras que minimicen los impactos negativos sobre los recursos hídricos subterráneos.

Antecedentes regionales

- **Pérez, R. (2015).** "Evaluación hidrogeológica de la cuenca del Río Huallaga y sus efectos en la disponibilidad de agua subterránea". El artículo científico tiene por finalidad de caracterizar las condiciones hidrogeológicas de la cuenca y analizar cómo las actividades humanas y naturales afectan la recarga y disponible. Para llevar a cabo la investigación, se realizaron diversas actividades de campo, incluyendo la instalación de piezómetros, pruebas de bombeo, y muestreo de agua subterránea. Estos datos se complementaron con información geológica. Los resultados del análisis mostraron que la cuenca del Río Huallaga presenta una variabilidad significativa en la disponibilidad de agua subterránea, influenciada tanto por factores naturales como por actividades antropogénicas
- **Medina, R. (2017).** "Caracterización hidrogeológica de la cuenca del Río Paucartambo y sus efectos en la disponibilidad de agua subterránea". El objetivo primordial del artículo científico es entender las condiciones hidrogeológicas de la cuenca y evaluar cómo estas afectan la disponibilidad. El estudio se basa en una serie de actividades de campo, que incluyen la instalación de piezómetros, pruebas de bombeo y muestreo de agua subterránea. Estos datos se integraron con información geológica y climática para desarrollar un modelo conceptual hidrogeológico. Los resultados indican que la cuenca del Río Paucartambo tiene

una estructura hidrogeológica compleja, con diversas formaciones acuíferas y niveles freáticos variables. Se identificaron las principales áreas de recarga y descarga de agua subterránea, y se analizaron las interacciones entre las aguas superficiales. El artículo concluye con la necesidad de implementar medidas de gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del Río Paucartambo. Se recomienda proteger las zonas de recarga, regular las extracciones de agua y realizar un monitoreo continuo.

- **Contreras, E. (2015).** "Evaluación hidrogeológica de la cuenca del Río Huallaga en la Región Pasco y sus implicaciones para la gestión de recursos hídricos". El objetivo primordial del artículo científico es caracterizar las condiciones hidrogeológicas. Para llevar a cabo la investigación, se realizaron diversas actividades de campo, incluyendo la instalación de piezómetros, pruebas de bombeo, y muestreo de agua subterránea. Estos datos se integraron con información geológica y climática para desarrollar un modelo conceptual hidrogeológico. Los resultados indican que la cuenca del Río Huallaga presenta una estructura hidrogeológica compleja con diversas formaciones acuíferas y niveles freáticos variables. Se identificaron las principales áreas de recarga y descarga de agua subterránea, y se analizaron las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas. El estudio también destacó la influencia de las actividades humanas, como la agricultura y la minería. Concluye con la necesidad de implementar una gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del Río Huallaga. Entre las recomendaciones propuestas se incluyen la protección de las áreas.
- **Villegas, A. (2016).** "Impacto de la actividad minera en las aguas subterráneas de Cerro de Pasco." La tesis de maestría tiene la finalidad de evaluar cómo las operaciones mineras afectan la calidad y cantidad de las aguas subterráneas. Para

llevar a cabo el estudio, se realizó una extensa recopilación de datos hidrogeológicos, incluyendo la instalación de piezómetros, pruebas de bombeo y análisis de muestras de agua subterránea. Además, se utilizaron datos históricos y estudios previos para establecer una línea base de las condiciones hidrogeológicas de la región antes del inicio de la actividad. Los resultados del estudio indican que la minería ha tenido un impacto significativo en las aguas subterráneas de Cerro de Pasco. Se identificaron cambios en la calidad del agua, incluyendo aumentos en la concentración de metales pesados y otros contaminantes. Concluye que es crucial implementar medidas de mitigación para reducir los impactos negativos de la minería en las aguas subterráneas. Entre las recomendaciones se incluyen la creación de sistemas de tratamiento de aguas residuales

- **Romero, L. (2018).** "Estudio hidrológico de la cuenca del Río Tingo en la Región Pasco". El objetivo primordial de la tesis de maestría es caracterizar las condiciones hidrológicas. Para llevar a cabo el estudio, se realizaron extensas actividades de campo que incluyeron la instalación de estaciones hidrométricas, monitoreo de caudales y análisis de calidad del agua. Estos datos se complementaron con información climática y geológica. Los resultados del estudio indican que la cuenca del Río Tingo presenta una gran variabilidad en sus flujos de agua, influenciada por factores climáticos estacionales y actividades humanas, como la agricultura y la minería. Se identificaron las principales fuentes de recarga y las áreas de descarga de agua superficial y subterránea. Además, se analizó la calidad del agua, encontrando variaciones significativas. La investigación concluye con la importancia de implementar una gestión integral de los recursos hídricos en la cuenca del Río Tingo. Entre las recomendaciones destacan la protección de las zonas de recarga, la regulación del uso del agua y el monitoreo continuo de los

flujos y la cálida.

2.2. Bases teóricas – científicas

Ciclo hidrológico:

- **Precipitación:** Proceso mediante el cual el agua en forma de vapor se condensa y cae a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve, granizo, etc. Es fundamental para la recarga de acuíferos.
- **Escorrentía:** Movimiento del agua sobre la superficie terrestre hacia los cuerpos de agua como ríos y lagos. La escorrentía puede ser superficial o subsuperficial.
- **Infiltración:** Proceso mediante el cual el agua de la superficie penetra en el suelo y pasa a formar parte de las aguas subterráneas.
- **Evapotranspiración:** Combinación de evaporación del agua desde el suelo y la transpiración de las plantas.

Balance hídrico

- **Entrada de agua:** Principalmente a través de la precipitación y la infiltración.
- **Salida de agua:** Evapotranspiración, escorrentía superficial y subsuperficial, y extracción de agua subterránea.

Geología de la zona de estudio

- **Formaciones geológicas:** Identificación y descripción de las diferentes formaciones geológicas presentes en el área de estudio, incluyendo sus propiedades litológicas.
- **Estructura geológica:** Estudio de la disposición estructural de las formaciones, incluyendo fallas, pliegues y otras estructuras que pueden influir en el flujo de agua subterránea.

Propiedades hidrogeológicas

- **Porosidad:** Medida de la capacidad de una formación geológica para almacenar

agua.

- **Permeabilidad:** Capacidad de una formación geológica para permitir el flujo de agua a través de ella.
- **Conductividad hidráulica:** Capacidad de un material geológico para transmitir agua bajo un gradiente hidráulico.

Interacción agua superficial y subterránea

Recarga y descarga de acuíferos

- **Zonas de recarga:** Áreas donde el agua de precipitación y de cuerpos de agua superficiales se infiltra en el suelo y recarga los acuíferos.
- **Zonas de descarga:** Áreas donde el agua subterránea aflora a la superficie, como manantiales, ríos y lagos.

Flujo de agua subterránea

- **Gradiente hidráulico:** Diferencia en el nivel del agua que impulsa el flujo de agua subterránea.
- **Dirección y velocidad del flujo:** Determinadas por el gradiente y la conductividad hidráulicos del material geológico.

Técnicas de campo y modelado

Métodos de campo:

- **Piezómetros:** Instalación de piezómetros para medir el nivel del agua subterránea y su variación temporal.
- **Pruebas de bombeo:** Realización de pruebas de bombeo para determinar la conductividad hidráulica y la transmisividad del acuífero.
- **Muestreo de agua:** Recolección de muestras de agua para análisis químico y de isótopos, lo cual ayuda a identificar fuentes de recarga y posibles contaminantes.

Modelado numérico:

- **Modelos conceptuales:** Desarrollo de un modelo conceptual del flujo de agua subterránea basado en la geología y la hidrogeología del área.
- **Modelos numéricos:** Uso de software especializado para simular el flujo de agua subterránea y predecir la respuesta del sistema acuífero a diferentes escenarios de recarga y extracción.

Impactos antropogénicos

Actividades mineras:

- **Extracción de agua:** Evaluación del impacto de la extracción de agua para actividades mineras en la disponibilidad de agua subterránea.
- **Contaminación:** Análisis de posibles fuentes de contaminación de las aguas subterráneas debido a la actividad minera, incluyendo metales pesados y productos químicos utilizados en el proceso de extracción.

Agricultura y urbanización:

- **Uso del suelo:** Impacto del uso del suelo en la recarga de acuíferos y en la calidad del agua subterránea.
- **Gestión de residuos:** Evaluación de cómo la gestión de residuos agrícolas y urbanos afecta la calidad del agua subterránea.

Principios y teorías aplicadas

Teoría de la conductividad hidráulica:

Ley de Darcy: Fórmula que describe el flujo de un fluido a través de un medio poroso, fundamental para el cálculo del flujo de agua subterránea.

La Ley de Darcy es una fórmula fundamental en hidrogeología utilizada para describir el flujo de agua a través de medios porosos. La ley fue formulada por Henry Darcy en 1856 y se aplica a flujos laminares en medios porosos, como los acuíferos.

Fórmula de la Ley de Darcy

La Ley de Darcy se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl} \quad Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl} \quad \text{Donde:}$$

- Q es el caudal del flujo de agua (volumen de agua por unidad de tiempo, por ejemplo, m^3/s).
- K es la conductividad hidráulica del medio poroso (una medida de la capacidad del medio para transmitir agua, por ejemplo, m/s).
- A es el área transversal del flujo (área perpendicular a la dirección del flujo, por ejemplo, m^2).
- $\frac{dh}{dl}$ es el gradiente hidráulico (la diferencia de carga hidráulica por unidad de longitud, adimensional).

Descomposición de los Términos

1. Caudal del flujo de agua (Q):

- Representa la cantidad de agua que fluye a través de una sección del medio poroso por unidad de tiempo.
- Comúnmente medido en unidades de volumen por tiempo, como metros cúbicos por segundo (m^3/s) o litros por segundo (L/s).

2. Conductividad hidráulica (K):

- Propiedad del medio poroso que indica su capacidad para permitir el paso del agua.
- Depende de las propiedades del medio (como la porosidad y la permeabilidad) y de las propiedades del fluido (como la viscosidad).
- La conductividad hidráulica se mide en unidades de velocidad, como metros por segundo (m/s).

3. Área transversal del flujo (A):

- Área a través de la cual fluye el agua.
- Es perpendicular a la dirección del flujo.
- Se mide en unidades de área, como metros cuadrados (m^2).

4. Gradiente hidráulico ($\frac{dh}{dl}$):

- Es la variación de la carga hidráulica (h) con respecto a la distancia (l).
- La carga hidráulica (h) es la suma de la altura piezométrica (altura de la columna de agua) y la presión del agua.
- El gradiente hidráulico es una cantidad adimensional y representa la fuerza impulsora del flujo del agua a través del medio poroso.

Interpretación física

La Ley de Darcy indica que el caudal del flujo de agua (Q) es directamente proporcional al área transversal (A) y al gradiente hidráulico ($\frac{dh}{dl}$), y está modulado por la conductividad hidráulica (K) del medio poroso. La relación es negativa porque el flujo ocurre en la dirección de disminución de la carga hidráulica (el agua fluye desde regiones de mayor carga a regiones de menor carga).

Aplicaciones de la Ley de Darcy

- **Determinación del caudal de agua subterránea:** Utilizada para calcular el flujo de agua subterránea en acuíferos.
- **Diseño de sistemas de captación de agua:** Ayuda en el diseño de pozos y sistemas de extracción de agua.
- **Evaluación de la contaminación:** Utilizada para modelar el transporte de contaminantes en acuíferos.
- **Estudios de recarga y descarga de acuíferos:** Fundamental en la evaluación de la recarga y descarga de acuíferos y en la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Ejemplo práctico

Supongamos que queremos calcular el caudal de agua subterránea que fluye a través de un acuífero con las siguientes características:

- Conductividad hidráulica (K) = 1×10^{-4} m/s
- Área transversal (A) = 10 m^2
- Gradiente hidráulico ($\frac{dh}{dl}$) = 0.01 Aplicando la Ley de Darcy:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl} \quad Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl}$$

$$Q = -(1 \times 10^{-4} \text{ m/s}) \cdot (10 \text{ m}^2) \cdot (0.01) \quad Q = -(1 \times 10^{-4} \text{ m/s}) \cdot (10 \text{ m}^2) \cdot (0.01) \quad Q = -1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \quad Q = -1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

El signo negativo indica la dirección del flujo, pero en términos de magnitud, el caudal es $1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Esta fórmula y su interpretación son esenciales para el estudio hidrológico e hidrogeológico y para estimar la profundidad de la napa freática en cualquier contexto hidrogeológico.

Teoría de la recarga y descarga de acuíferos:

Los acuíferos son formaciones geológicas que pueden almacenar y transmitir agua subterránea. La recarga y descarga de acuíferos son procesos fundamentales que controlan la disponibilidad y sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo.

Recarga de acuíferos:

- La recarga ocurre cuando el agua de precipitación, ríos, lagos u otras fuentes superficiales se infiltra en el suelo y llega a los acuíferos.
- Factores que influyen en la recarga incluyen la cantidad de precipitación, la permeabilidad del suelo y las condiciones geológicas.

Descarga de acuíferos:

- La descarga se produce cuando el agua subterránea aflora a la superficie a través de manantiales, ríos, lagos, o es extraída por pozos.
- Factores que afectan la descarga incluyen la gradiente y la conductividad hidráulica del acuífero.

Modelo de Theis

El modelo de Theis, también conocido como la solución de Theis o el método del pozo de Theis, es una solución matemática para describir la respuesta de un acuífero confinado a la extracción de agua mediante un pozo. Fue desarrollado por Charles Theis en 1935.

Fórmula del Modelo de Theis

- La ecuación de Theis se deriva de la ecuación de flujo de agua subterránea para un acuífero confinado y se expresa como:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{Donde:}$$

- s es el descenso del nivel del agua (drawdown) en el pozo de observación (m).
- Q es la tasa de extracción del pozo (m^3/s).
- T es la transmisividad del acuífero (m^2/s), definida como $T = Kb/b$, donde K es la conductividad hidráulica (m/s) y b es el espesor del acuífero (m).
- $W(u)$ es la función de pozo de Theis, también conocida como la integral de pozo de Theis.
- u es un parámetro adimensional definido como: $u = \frac{r^2 S}{4 T t}$

Donde:

- r es la distancia radial desde el centro del pozo de bombeo hasta el punto de observación (m).

- SSS es el coeficiente de almacenamiento del acuífero (adimensional).
- ttt es el tiempo desde el inicio del bombeo (s).

Función de pozo de Theis (W(u)W(u)W(u))

La función de pozo de Theis, $W(u)$, es una función matemática especial que se define como:

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \frac{u^5}{5 \cdot 5!} - \dots$$

Para valores pequeños de u , la función se aproxima a:

$$W(u) \approx -\ln(u)$$

Aplicaciones del Modelo de Theis

El modelo de Theis se utiliza principalmente para:

Pruebas de bombeo:

- Determinar la transmisividad (TTT) y el coeficiente de almacenamiento (SSS) del acuífero a partir de los datos de descenso del nivel del agua durante una prueba de bombeo.
- Comparar los datos observados de descenso con los valores teóricos calculados mediante la ecuación de Theis para ajustar los parámetros del acuífero.

Evaluación de recursos hídricos:

- Estimar la capacidad del acuífero para suministrar agua bajo diferentes tasas de extracción.
- Evaluar el impacto de la extracción de agua en los niveles de agua subterránea y en la sostenibilidad del acuífero.

Modelado hidrogeológico:

- Incorporar la respuesta de los acuíferos a la extracción de agua en modelos

hidrogeológicos regionales.

- Predecir los efectos de futuros desarrollos y cambios en la gestión del agua en los recursos subterráneos.

Ejemplo Práctico

Supongamos que se realiza una prueba de bombeo en un acuífero confinado con los siguientes datos:

- Tasa de extracción (Q) = $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$
- Distancia radial (r) = 100 m
- Tiempo desde el inicio del bombeo (t) = 86400 s (1 día)
- Transmisividad (T) = $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$
- Coeficiente de almacenamiento (S) = 0.0001 Primero, calculamos el valor de u :

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} = \frac{(100)^2 \cdot 0.0001}{4 \cdot 0.001 \cdot 86400} = \frac{1}{3456} \approx 0.000289$$

Luego, usando la aproximación $W(u) \approx -\ln(u)$ para pequeños u :

$$W(u) \approx -\ln(0.000289) \approx 8.145$$

Finalmente, calculamos el descenso (s):

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) = \frac{0.01}{4 \pi \cdot 0.001} \cdot 8.145 \approx 0.648 \text{ m}$$

El resultado indica un descenso de aproximadamente 6.48 metros en el nivel del

agua debido al bombeo, en el punto de observación a 100 metros del pozo de bombeo después de un día de extracción continua.

Balance hídrico de acuíferos:

El balance hídrico de un acuífero se basa en la ecuación fundamental de conservación de masa, que establece que el cambio en el almacenamiento de agua en un acuífero debe ser igual a la diferencia entre las entradas y salidas de agua. La fórmula general del balance hídrico es:

$$\Delta S = \text{Entrada} - \text{Salida}$$

Donde:

- ΔS es el cambio en el almacenamiento de agua en el acuífero.
- **Entrada** incluye todas las fuentes de agua que ingresan al acuífero.
- **Salida** incluye todas las formas en que el agua es retirada del acuífero.

Para un acuífero confinado o libre, el balance hídrico se puede desglosar en componentes específicos.

Componentes del balance hídrico

1. Entradas de agua (Recarga)

- **Precipitación directa:** Agua de lluvia o nieve que se infiltra directamente en el acuífero.
- **Infiltración desde superficies:** Agua que se infiltra desde ríos, lagos u otras fuentes superficiales.
- **Flujo lateral desde otros acuíferos:** Agua que llega al acuífero desde áreas adyacentes.
- **Regeneración artificial:** Agua que se infiltra en el acuífero a través de técnicas de recarga artificial, como pozos de infiltración.

2. Salidas de agua (Descarga)

- **Extracción de agua:** Agua retirada del acuífero mediante pozos para consumo, riego, o procesos industriales.
- **Descarga natural:** Agua que aflora a la superficie en forma de manantiales, ríos o lagos.
- **Evapotranspiración:** Agua que se evapora de la superficie del acuífero o es transpirada por la vegetación.
- **Flujo lateral desde el acuífero:** Agua que sale del acuífero hacia áreas adyacentes.

Pasos para aplicar el balance hídrico en el estudio de la profundidad de la napa freática

1. Definir el área de estudio

- Delimitar el área de influencia del acuífero del Tajo Raúl Rojas donde se realizará el balance hídrico.
- Recopilar datos hidrológicos y geohidrológicos
- **Datos de precipitación:** Medir o estimar la cantidad de precipitación en el área.
- **Datos de infiltración:** Evaluar las tasas de infiltración basadas en el tipo de suelo, cobertura vegetal y uso del suelo.
- **Datos de extracción:** Identificar y cuantificar las tasas de extracción de agua de pozos en la zona.
- **Datos de descarga natural:** Evaluar el flujo de agua en manantiales o ríos que descargan el acuífero.

2. Estimar la recarga del acuífero

- Utilizar datos de precipitación y tasas de infiltración para estimar la cantidad de agua que se infiltra en el acuífero. Esto puede incluir métodos directos (mediciones en el campo) e indirectos (modelos matemáticos).

3. Estimar la descarga del acuífero

- Calcular las tasas de extracción de agua a partir de pozos y considerar la descarga natural y evapotranspiración. Esto puede involucrar mediciones en campo y análisis de datos históricos.

4. Aplicar el balance hídrico

- Aplicar la ecuación de balance hídrico para determinar el cambio en el almacenamiento de agua en el acuífero.
- $\Delta S = \text{Recarga} - \text{Descarga}$
 $\Delta S = \text{Recarga} - \text{Descarga}$
- Si ΔS es positivo, el acuífero está ganando agua, lo que podría hacer que la napa freática suba.
- Si ΔS es negativo, el acuífero está perdiendo agua, lo que podría hacer que la napa freática baje.

5. Modelar la profundidad de la napa freática

- Usar el balance hídrico para ajustar los modelos hidrogeológicos y predecir cómo la napa freática podría responder a diferentes escenarios de recarga y extracción.
- Implementar modelos numéricos que incorporen la recarga, descarga, y cambios en el almacenamiento para predecir la profundidad de la napa freática en función de las condiciones actuales y futuras.

6. Monitorear y ajustar

- Realizar un monitoreo continuo de los niveles de agua subterránea y ajustar las estimaciones y modelos según sea necesario.

Ejemplo práctico

Supongamos que, en el Tajo Raúl Rojas:

- La precipitación anual es de 1000 mm.
- La tasa de infiltración es del 20% de la precipitación.
- La extracción anual de agua es de 0.5 m³/s.
- La descarga natural es de 0.3 m³/s.

Recarga anual estimada:

- Precipitación total = 1000 mm = 1 m
- Volumen infiltrado = 1 m * 20% = 0.2 m/año por metro cuadrado
- Si el área del acuífero es de 1 km² (1,000,000 m²), la recarga anual es:

$$\text{Recarga} = 0.2 \text{ m/año} \times 1,000,000 \text{ m}^2 = 200,000 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\text{Recarga} = 0.2 \text{ m/año} \times 1,000,000 \text{ m}^2 = 200,000 \text{ m}^3/\text{año}$$

Descarga total estimada:

- Extracción = 0.5 m³/s × 31,536,000 s/año = 15,768,000 m³/año
- Descarga natural = 0.3 m³/s × 31,536,000 s/año = 9,460,800 m³/año
- Total descarga = 15,768,000 + 9,460,800 = 25,228,800 m³/año

Balance hídrico:

$$\Delta S = \text{Recarga} - \text{Descarga}$$

$$\Delta S = 200,000 \text{ m}^3/\text{año} - 25,228,800 \text{ m}^3/\text{año} = -25,028,800 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\Delta S = -25,028,800 \text{ m}^3/\text{año}$$

En este ejemplo, el balance hídrico indica una pérdida neta de almacenamiento de agua, lo que podría resultar en una disminución de la napa freática.

2.3. Definición de términos básicos

1. Acuífero

Un acuífero es una formación geológica que puede almacenar y transmitir agua subterránea. Los acuíferos pueden ser confinados (cubiertos por una capa impermeable) o no confinados (donde el agua subterránea está en contacto directo con la atmósfera a través de poros en el suelo).

2. Napa Freática

La napa freática es la superficie superior del agua subterránea en un acuífero no confinado. La profundidad de la napa freática varía con la recarga y descarga de agua en el acuífero.

3. Recarga de acuíferos

La recarga es el proceso mediante el cual el agua se infiltra desde la superficie y se añade al acuífero. Esto puede ocurrir por la infiltración de precipitaciones, ríos, lagos y otras fuentes.

4. Descarga de acuíferos

La descarga es el proceso por el cual el agua sale del acuífero hacia la superficie terrestre a través de manantiales, ríos o mediante extracción artificial por pozos.

5. Conductividad hidráulica (K)

La conductividad hidráulica es una medida de la capacidad de un material geológico para transmitir agua. Depende de la porosidad y la permeabilidad del material. Se expresa en unidades de longitud por tiempo (e.g., m/s).

6. Transmisividad (T)

La transmisividad es la tasa a la cual el agua se transmite a través de un acuífero por unidad de ancho bajo un gradiente hidráulico unitario. Se define como la conductividad hidráulica multiplicada por el espesor saturado del acuífero ($T = K * b$).

7. Coeficiente de almacenamiento (S)

El coeficiente de almacenamiento es la fracción del volumen de agua almacenada o liberada por unidad de superficie del acuífero por unidad de cambio en la cabeza hidráulica. En acuíferos confinados, suele ser muy pequeño, mientras que, en acuíferos no confinados, se aproxima a la porosidad efectiva.

8. Gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico es la variación de la cabeza hidráulica (nivel del agua) por unidad de distancia en una dirección específica. Se utiliza para determinar la dirección y la velocidad del flujo subterráneo.

9. Cabeza hidráulica

La cabeza hidráulica es una medida del potencial de energía del agua en un punto específico y se compone de la altura del agua sobre una referencia (e.g., el nivel del mar) más la presión del agua en ese punto.

10. Porosidad

La porosidad es la proporción del volumen total de un material que está ocupada por espacios vacíos (poros). La porosidad efectiva es la parte de la porosidad total que contribuye al flujo de agua.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La profundidad de la napa freática en el Tajo Raúl Rojas está significativamente influenciada por los patrones de recarga y descarga de agua subterránea, las características geológicas del acuífero y la actividad minera, mostrando variaciones espaciales y temporales que pueden ser modeladas para una gestión sostenible de los recursos hídricos.

2.4.2. Hipótesis específicas

- a) La disminución en la profundidad de la napa freática incrementa el riesgo de inestabilidad en el tajo, aumentando la probabilidad de deslizamientos de tierra y colapsos.
- b) La variación en la composición del subsuelo, la estructura geológica y las tasas de recarga de acuíferos influye significativamente en la profundidad y variaciones de la napa freática en el área del Tajo Raúl Rojas.

2.5. Identificación de variables

Variable independiente

Estudio hidrológico e hidrogeológico.

Variable dependiente

Estimar la profundidad de la napa freática del Tajo Raúl Rojas UM Cerro SAC.

Variables intervinientes

- Composición del suelo.
- Estructura geológica.
- Recarga de acuíferos.
- Condiciones hidrogeológicas.

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Tabla 1. Operacionalización de Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Estimar la profundidad de la napa freática (Variable	Nivel de saturación de agua subterránea en el suelo o roca, por debajo del cual el espacio	Medición directa de la profundidad respecto a un punto de referencia superficial.	- Variación espacial - Variación temporal	- Profundidad media de la napa (m) - Fluctuación estacional (m)	- Piezómetros - Perforaciones - Lecturas in situ

dependiente)				- Nivel freático	
Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
	poroso está completamente lleno de agua.			máximo y mínimo (m)	
Estudio hidrológico e hidrogeológico (Variable independiente)	Características físicas y dinámicas del subsuelo y de los acuíferos que controlan el flujo y almacenamiento de agua subterránea.	Análisis de litología, estructuras geológicas y parámetros hidrogeológicos.	- Geología del subsuelo - Recarga de acuíferos - Permeabilidad y porosidad	- Tipo de roca - Porosidad efectiva (%) - Permeabilidad (m/s) - Tasa de recarga (mm/año)	- Mapeo geológico - Ensayos de bombeo - Modelos numéricos
Factores climáticos (Variable interviniente)	Condiciones meteorológicas que afectan el ciclo hidrológico y la recarga de acuíferos.	Recolección de datos climáticos de estaciones meteorológicas.	- Precipitación - Evapotranspiración	- Tasa de precipitación (mm/mes) - Tasa de evapotranspiración (mm/mes)	- Estaciones meteorológicas - Datos históricos

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

El estudio se enmarca en una investigación aplicada, con enfoque descriptivo–explicativo.

- Aplicada: Porque busca solucionar un problema específico y práctico relacionado con la gestión de recursos hídricos en una mina.
- Descriptiva: Porque caracteriza las condiciones hidrogeológicas del área de estudio
- Explicativa: Porque analiza la relación entre los factores geológicos e hidrológicos y la profundidad de la napa freática.

Para tomar en cuenta el tipo de investigación tenemos la teoría de Hernández, et al. (2014, p.92) donde formula en forma literal “Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis”. De la misma forma tomamos en cuenta la teoría formulada por Lozada que a la letra dice que “La investigación aplicada se centra en la resolución de problemas en un contexto

determinado, es decir, busca la aplicación o utilización de conocimientos, desde una o varias áreas especializadas, con el propósito de implementarlos de forma práctica para satisfacer necesidades concretas, proporcionando una solución a problemas del sector social o productivo”. (Lozada, 2014, p. 35).

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo-explicativo.

Es descriptivo porque caracteriza las condiciones hidrogeológicas del área de estudio.

Es explicativo porque analiza la relación entre los factores geológicos e hidrológicos y la profundidad de la napa freática.

3.3. Métodos de investigación

Para el desarrollo de la investigación se realizaron trabajos de campo, monitoreo de niveles freáticos, análisis geológico e hidrogeológico, interpretación geofísica y modelamiento hidrogeológico.

Asimismo, se emplearon las siguientes técnicas para el desarrollo del estudio:

- Monitoreo hidrológico e hidrogeológico, mediante el seguimiento periódico del nivel freático mediante piezómetros y el análisis de parámetros físico-químicos de las aguas subterráneas.
- Sondeo eléctrico vertical (SEV), utilizado para conocer la resistividad eléctrica del subsuelo e inferir la profundidad del nivel freático y las capas litológicas.
- Pruebas de bombeo, aplicadas para evaluar la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y la transmisividad del acuífero.
- Análisis espacial con SIG, utilizando datos geoespaciales para elaborar mapas temáticos de isoprofundidad del nivel freático, geología local, zonas de recarga y descarga.

- Modelamiento hidrogeológico numérico, mediante el uso de MODFLOW para simular el comportamiento del acuífero en distintos escenarios de recarga y extracción.

3.4. Diseño de la investigación

Diseño de investigación es: No experimental, transversal y correlacional.

- No Experimental: No se manipulan las variables independientes, sino que se observan tal como ocurren naturalmente.
- Transversal: Los datos se recopilan en un solo punto en el tiempo.
- Correlacional: Se busca determinar la relación entre variables geológicas e hidrológicas y la profundidad de la napa freática.

3.5. Población y muestra

La población del presente estudio está conformada por el conjunto de elementos hidrogeológicos e hidrológicos localizados en el área geográfica del Tajo Raúl Rojas, perteneciente a la Unidad Minera Cerro S.A.C., los cuales incluyen pozos de monitoreo, puntos de muestreo de aguas subterráneas y estaciones de monitoreo hidrometeorológico, permitiendo abordar de manera integral el comportamiento del sistema acuífero en función de las condiciones espaciales y temporales de la zona de estudio (Custodio & Llamas, 2001; Fetter, 2001). Esta delimitación geográfica favorece una caracterización precisa del entorno físico que condiciona la dinámica de la napa freática (Freeze & Cherry, 1979).

La muestra es de tipo no probabilística y se encuentra cuantificada, estando conformada por 6 pozos de monitoreo, 12 puntos de muestreo de aguas subterráneas y 1 estación de monitoreo hidrometeorológico, seleccionados mediante un muestreo estratificado según las unidades geológicas e hidrogeológicas representativas del área de estudio. Esta selección permite obtener información confiable y técnicamente

representativa para el análisis y modelamiento hidrogeológico del área de estudio (Anderson et al., 2015; Hernández Sampieri et al., 2014; Bear, 1979).

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas

- 1.- Monitoreo hidrológico e hidrogeológico:** Se realizó el seguimiento periódico del nivel freático mediante piezómetros, así como el análisis de parámetros físico-químicos de las aguas subterráneas. Esta técnica permite identificar variaciones temporales y espaciales en el comportamiento del acuífero (Custodio & Llamas, 2001; Fetter, 2001).
- 2.- Sondeo eléctrico vertical (SEV):** Técnica geofísica utilizada para conocer la resistividad eléctrica del subsuelo, lo que permite inferir la profundidad del nivel freático y las capas litológicas (Telford et al., 1990).
- 3.- Pruebas de bombeo:** Se aplicaron en pozos seleccionados para evaluar la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y la transmisividad del acuífero (Kruseman & de Ridder, 1994).
- 4.- Análisis espacial con SIG (Sistema de Información Geográfica):** Se utilizaron datos geoespaciales para elaborar mapas temáticos de isoprofundidad del nivel freático, geología local, zonas de recarga y descarga (Burrough & McDonnell, 1998).
- 5.- Modelamiento hidrogeológico numérico:** Con el uso de software especializado como MODFLOW, se simuló el comportamiento del acuífero en distintos escenarios de recarga y extracción (Anderson et al., 2015).

Instrumentos

- Piezómetros **manuales y automáticos** (para medición de nivel freático).
- **GPS diferencial** (para georreferenciación de puntos de muestreo).

- **Equipos multiparamétricos de agua** (pH, conductividad, temperatura).
- **Estación total y drones** (para topografía y mapeo superficial).
- **Software MODFLOW, ArcGIS y Surfer** (para modelamiento y representación gráfica).
- **Fichas de campo y diarios de registro** (para control sistemático de observaciones).

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Implementación del modelo hidrogeológico numérico mediante MODFLOW 6

Como parte del procesamiento hidrogeológico se implementó un modelo numérico tridimensional del sistema de flujo subterráneo del Tajo Raúl Rojas mediante MODFLOW 6 versión 6.7.0, con apoyo de Python y FloPy. La implementación integró el modelo conceptual hidrogeológico, la geometría del tajo, las unidades hidrogeológicas, la Falla Cerro de Pasco, las labores mineras, el balance hídrico y los parámetros hidráulicos considerados en la investigación. Mediante la simulación en régimen estacionario y transitorio se evaluó la distribución espacial y temporal de las cargas hidráulicas y la respuesta del sistema subterráneo frente a las condiciones hidrogeológicas representadas, complementando la interpretación de la profundidad y el comportamiento de la napa freática en el área de estudio.

El dominio fue discretizado horizontalmente mediante celdas de 50×50 m y verticalmente en ocho capas numéricas, definidas para representar la distribución tridimensional del sistema hidrogeológico y sus variaciones con la profundidad. Las propiedades hidráulicas fueron asignadas de acuerdo con las unidades hidrogeológicas A2, B2, C1 y C2 descritas en la investigación. Asimismo, la Falla Cerro de Pasco se incorporó al modelo como una zona de mayor conductividad hidráulica, en concordancia con su comportamiento hidrogeológico conceptual como estructura

preferencial para el flujo subterráneo.

Las condiciones de contorno incluyeron una condición general de carga (GHB) para representar la conexión hidráulica regional y drenajes (DRN) para representar el efecto de descarga asociado a las labores mineras subterráneas. La recarga al sistema de flujo subterráneo se incorporó mediante el paquete de recarga RCHA de MODFLOW 6. El balance hídrico desarrollado para el área de estudio determinó un aporte medio de 37.8 L/s. Este resultado fue integrado posteriormente en la formulación numérica junto con las propiedades hidráulicas, las condiciones de contorno y los elementos de drenaje, permitiendo evaluar la respuesta del sistema de flujo subterráneo y la distribución de la carga hidráulica en el dominio modelado.

Se ejecutó primero una simulación estacionaria y, posteriormente, una simulación transitoria de doce periodos mensuales inicializada con la solución tridimensional del estado estacionario. La variación temporal utilizó la serie mensual del balance hídrico de la tesis: 63.1, 62.2, 65.1, 36.1, 16.9, 10.1, 7.2, 10.6, 25.5, 46.8, 50.1 y 59.3 L/s de enero a diciembre, respectivamente. Los términos de almacenamiento se incorporaron mediante el paquete STO.

Antes de la interpretación de los resultados se verificó la consistencia de la geometría del modelo, las propiedades hidráulicas, las condiciones de contorno y los parámetros incorporados. Cada simulación fue sometida a controles de convergencia y estabilidad numérica, verificándose la terminación normal de MODFLOW 6, la consistencia de las cargas hidráulicas calculadas y el cierre satisfactorio del balance de masas. Estos controles permitieron comprobar la coherencia numérica de las simulaciones antes del análisis e interpretación hidrogeológica de los resultados.

La evidencia geofísica del SEV-17, que no registró agua hasta aproximadamente 80 m de investigación, se utilizó únicamente como control

hidrogeológico local. Este valor no se impuso como condición seca global ni se consideró un resultado generado por MODFLOW. La profundidad calculada por el modelo se obtuvo a partir de la relación entre la superficie topográfica y la carga hidráulica de la primera celda realmente saturada.

3.8. Tratamiento estadístico

Se emplearon técnicas de estadística descriptiva para caracterizar el comportamiento del nivel freático, incluyendo medidas como promedio y variación. Los resultados fueron representados mediante tablas y gráficos (histogramas y diagramas de caja), con el fin de visualizar la distribución de los datos y su variabilidad. Asimismo, se aplicó análisis de correlación para evaluar la relación entre las variables hidrogeológicas y la profundidad de la napa freática, complementando el análisis con modelamiento hidrogeológico para la interpretación del comportamiento del sistema acuífero.

3.9. Orientación ética filosófica y epistémica

La investigación se desarrolló respetando principios éticos relacionados con la protección del medio ambiente, la seguridad operativa y el respeto a las comunidades involucradas, garantizando el uso responsable de la información y su aplicación en beneficio de la gestión sostenible de los recursos hídricos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

Ubicación

El estudio hidrológicos e hidrogeológicos del Tajo Raúl Rojas, se desarrolló en la UM Cerro ubicado en el distrito Simón Bolívar de la provincia y Región Cerro de Pasco, a 295 km al Este de la ciudad de Lima, en la meseta de los andes con una altitud promedio de 4450 msnm. Es importante precisar que los valores de profundidad entre 20 y 60 m corresponden a condiciones locales del área evaluada, mientras que la ausencia de saturación hasta aproximadamente 80 m se asocia a zonas con influencia directa de drenaje subterráneo, principalmente debido a la conexión con labores mineras profundas.

Figura 1: Ubicación del Proyecto

Accesibilidad

Para llegar a la zona de estudio, se utiliza la Carretera Central que cubre la ruta:

Figura 1. Ubicación de la UM Cerro De Pasco

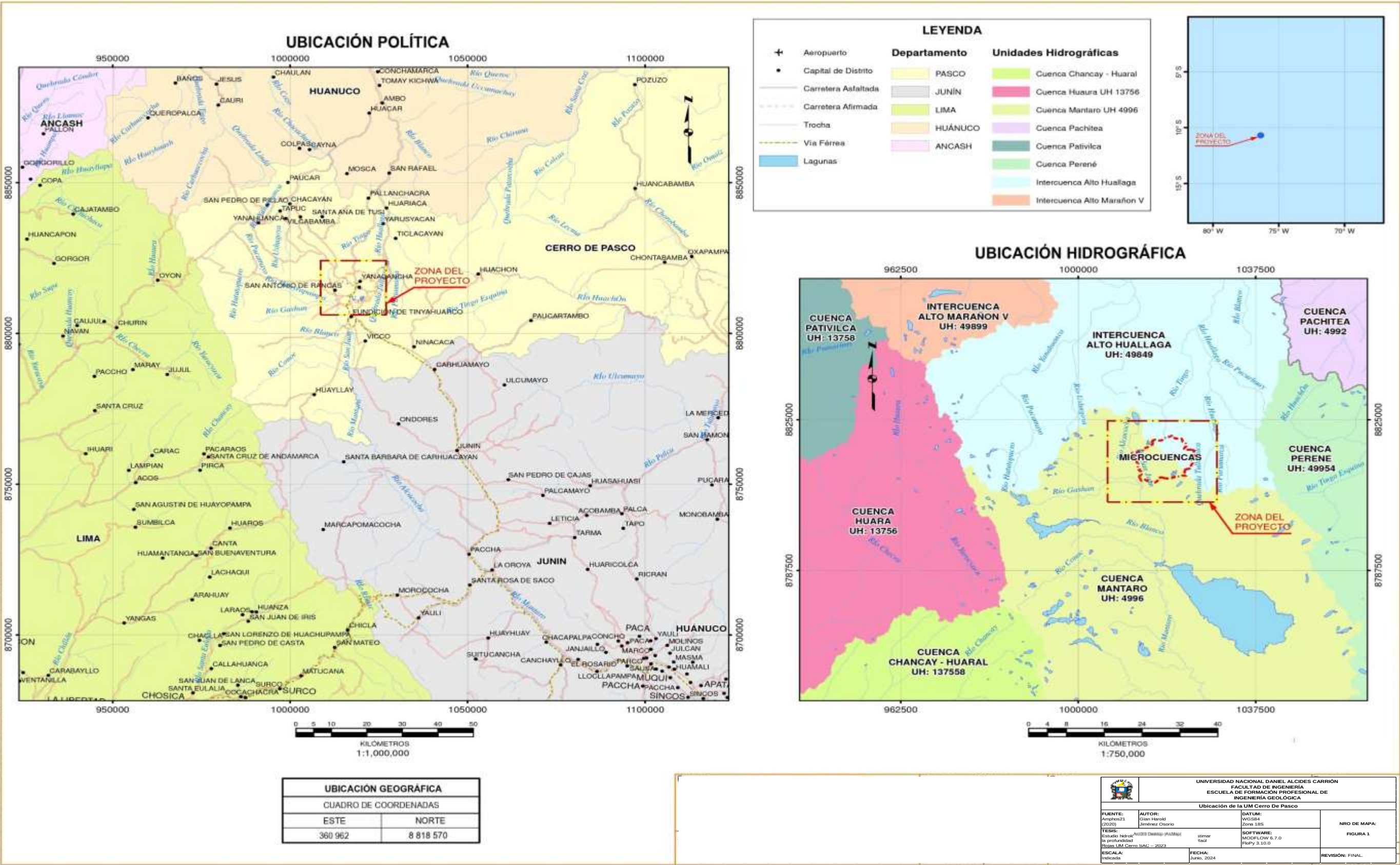


Tabla 2. Distancias de ubicación

Tramo	Distancia	Tiempo	Estado
- Carretera Central: Lima -Oroya- Cerro de Pasco	306 Km.	8 horas	Vía asfaltada
- Carretera : Lima -Canta-Cerro de Pasco	270 km.	6 horas	Vía asfaltada-afirmada

Nota: Diferentes vías de acceso al proyecto

Parámetros climáticos:

Para la caracterización climática del área de estudio se analizó la data meteorológica registrada en la estación local (controlada por EA Cerro) y en las estaciones regionales (controladas por SENAMHI) cercanas al área de estudio. El análisis y tratamiento desarrollado sobre la información meteorológica se presenta en el memorando técnico de actualización climática (472_18-MET-004_Rev.C) desarrollado por Amphos 21 en mayo del 2019 y adjunto en el Anexo A. En este documento se presenta las características de las principales variables meteorológicas para este estudio. Ver Figura

Clasificación climática. y Figura 3 Zonas de vida.

Precipitación

De la evaluación presentada por Amphos 21 (Anexo A), para la caracterización de la precipitación (mensual, anual y máxima en 24 horas) se usó la data registrada en la estación Cerro de Pasco.

Precipitación mensual y anual

La caracterización de la precipitación mensual y anual se desarrolló en base a la data de la estación Cerro de Pasco, ver data en el Anexo A. Con base en esta data se tiene que la precipitación media anual es de 940 mm y la distribución temporal de la precipitación mensual se presenta en la Figura 2. De donde se observa que la precipitación del área de estudio presenta una marcada estacionalidad, la temporada húmeda se presenta

Figura 2. Clasificación Climática

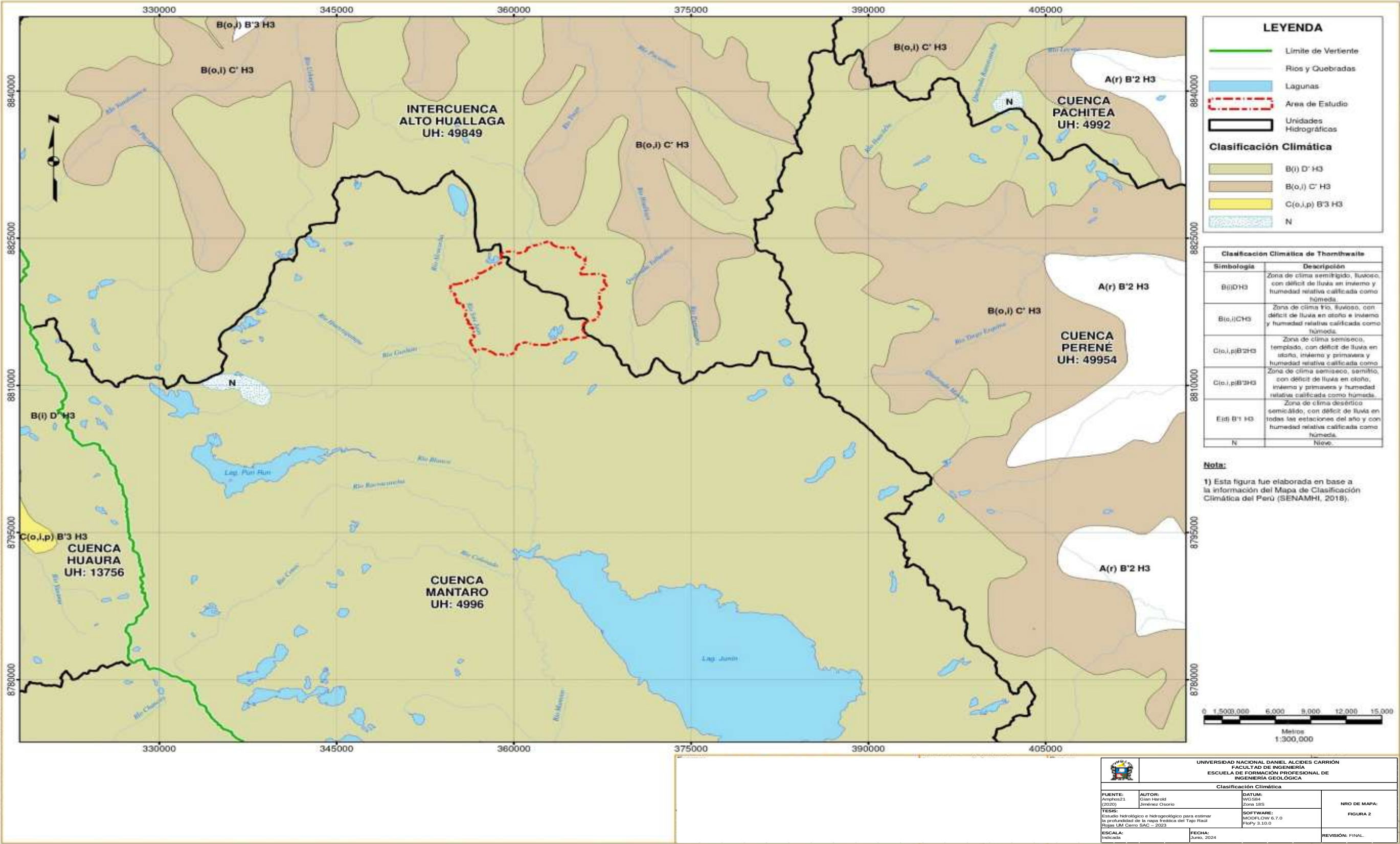
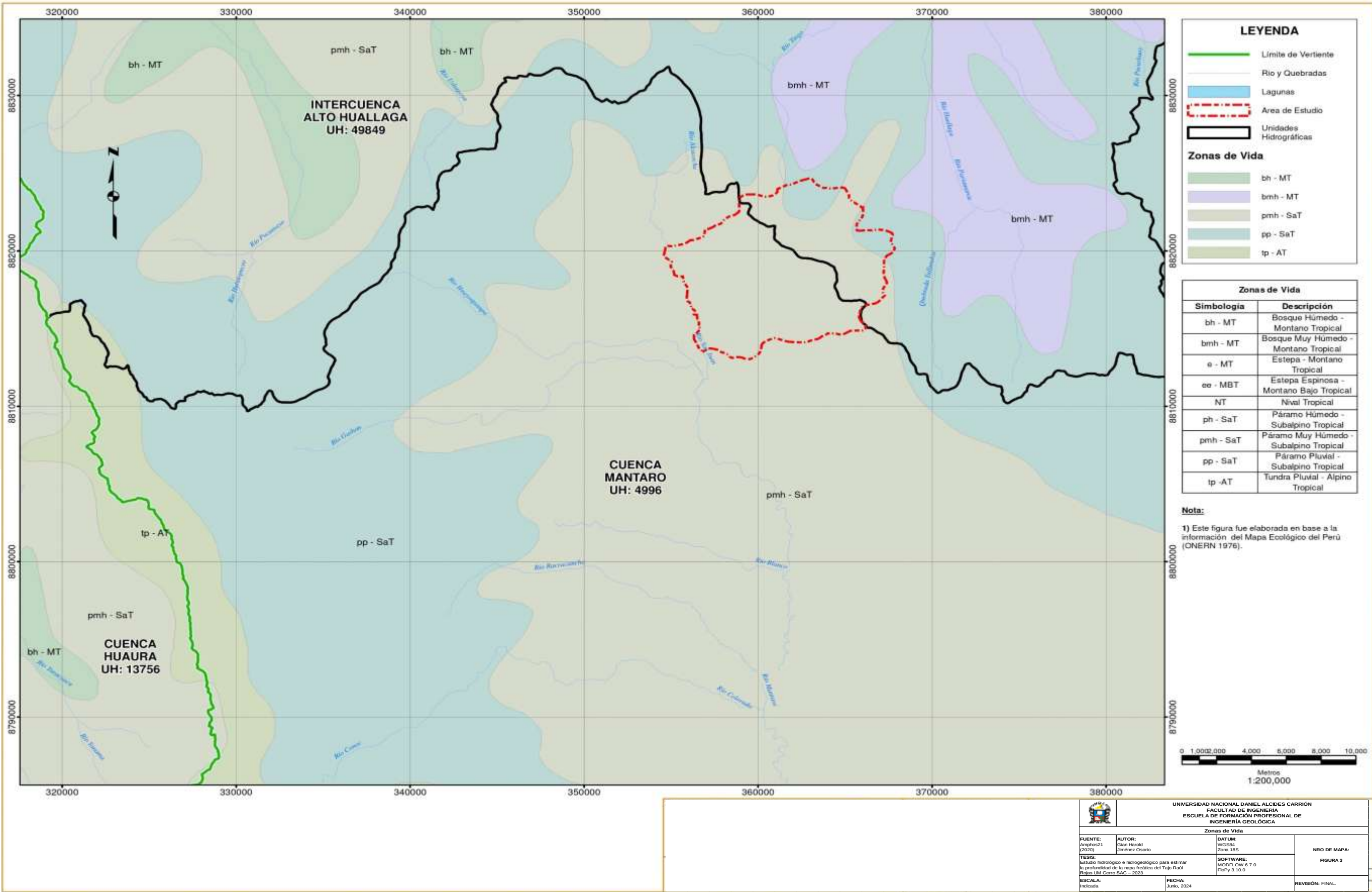
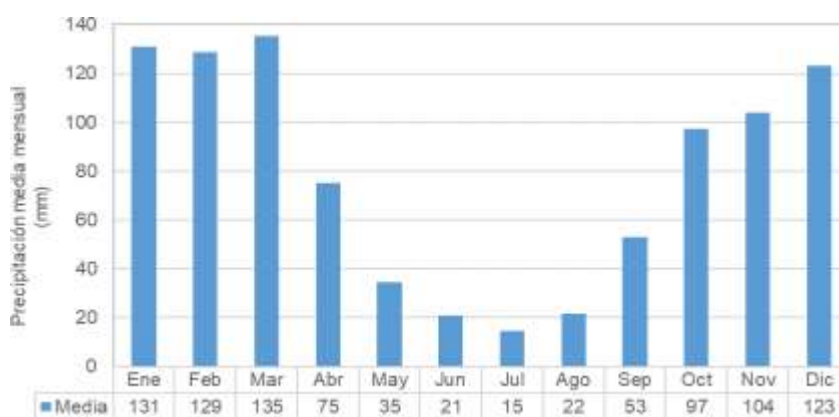


Figura 3. Zonas de Vida



de diciembre a marzo durante la cual se presenta el 55% de la precipitación total anual; una temporada seca de junio a agosto durante la cual se presenta solo el 6% de la precipitación total anual; la temporada de transición húmeda-seca en abril y la temporada de transición seca-húmeda de setiembre a noviembre, entre ambas temporadas se presenta el 39% de la precipitación anual.

Figura 4. Precipitación media mensual



Fuente: Estación Cerro de Pasco.

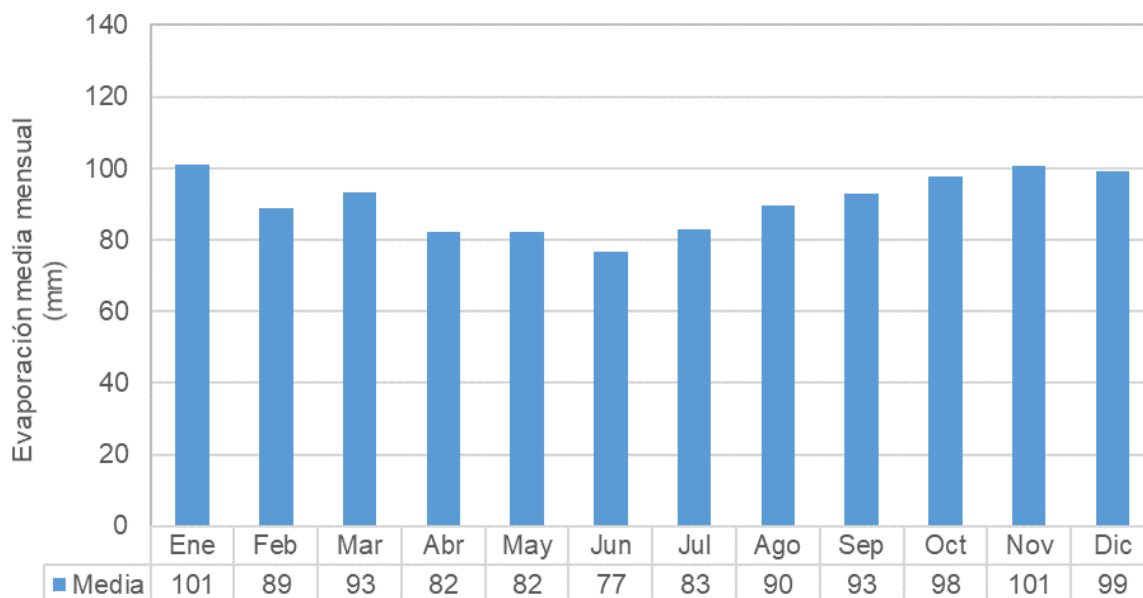
La data inicial utilizada para la elaboración de la Figura 4 proviene de registros históricos de precipitación diaria correspondientes a la Estación Meteorológica Cerro de Pasco, los cuales se encuentran consignados en los anexos del presente estudio. Estos datos fueron organizados y sometidos a un proceso de revisión y depuración, tras lo cual se efectuó la agregación mensual y el cálculo del promedio multianual. El resultado de este procesamiento permitió obtener la precipitación media mensual representada gráficamente, empleada para el análisis climático del área de estudio.

Evaporación y evapotranspiración

Para la caracterización de la evaporación mensual y anual del área de estudio se usó la data de la estación Upamayo. Con base en esta data se tiene que la evaporación media anual es de 1087 mm y su distribución mensual se presenta en la Figura 3. De donde se observa que la evaporación varía entre 77 mm (junio) y 101 mm (enero), presentándose con mayor intensidad durante la temporada húmeda y con menor

intensidad durante la temporada seca, es decir presenta un comportamiento similar al de la precipitación.

Figura 5. Evaporación media mensual



Fuente: Estación Upamayo.

Luego, la evapotranspiración de referencia (ET_o) para el área de estudio fue estimada por el método del tanque evaporímetro (Allen et al., 2006), aplicando a la evaporación un coeficiente del tanque evaporímetro (K_p) igual a 0.8, considerando un tanque evaporímetro clase A, situado en suelo desnudo, humedad relativa alta (82%) y velocidad del viento baja (1.5 m/s). Obteniendo así una evapotranspiración de referencia anual de 870 mm, en la Tabla 3. se presenta su distribución mensual.

La Figura 5 se elaboró a partir de información histórica de evaporación registrada en la Estación Meteorológica Cerro de Pasco, la cual constituye la base primaria del análisis presentado. Dichos registros fueron sistematizados y evaluados para garantizar su coherencia, tras lo cual se efectuó su integración a escala mensual y el cálculo de valores promedio representativos. Este procedimiento permitió caracterizar el comportamiento medio mensual de la evaporación en el área de estudio.

Tabla 3. *Evapotranspiración de referencia*

Mes	Evaporación de tanque mensual (mm)	Evapotranspiración de referencia ETo (mm)
Enero	101	81
Febrero	89	71
Marzo	93	75
Abril	82	66
Mayo	82	66
Junio	77	61
Julio	83	66
Agosto	90	72
Setiembre	93	74
Octubre	98	78
Noviembre	101	81
Diciembre	99	79
Anual	1087	870

Fuente: Elaboración propia

Los valores consignados en la Tabla 3 se calcularon a partir de la información obtenida durante el trabajo de campo y de los registros complementarios disponibles para el área de estudio. Inicialmente, los datos fueron organizados por variable y revisados para identificar posibles inconsistencias. Posteriormente, se aplicó el procedimiento de cálculo correspondiente a cada parámetro, considerando los criterios técnicos definidos en la metodología del estudio. Finalmente, los resultados obtenidos fueron sistematizados y consolidados, permitiendo su presentación en forma tabular como valores representativos para el análisis hidrogeológico.

Hidrografía

A nivel regional, el Tajo Raúl Rojas se ubica en la cuenca hidrográfica del Mantaro (UH: 4996) de acuerdo con la codificación de la metodología Pfafstetter¹, perteneciente a la vertiente del Pacífico.

Topográficamente, el área de estudio se ubica cerca a los límites de vertiente de aguas del Pacífico y Atlántico. A nivel local, el tajo Raúl Rojas se encuentra sobre la microcuenca del río Ragre (Qda. Quiulacocha), esta microcuenca vierte sus aguas al río San Juan el cual pertenece a la cuenca del río Mantaro, tal como se muestra en la Figura

El área y el perímetro de las dos microcuencas se muestran en la Tabla 4.

La hidrografía e hidrología detallada de todo el ámbito de la UM Cerro se describe en el ITE- 003, emitido por Amphos 21 (2020). Ver figura 6, 7 y 8

Tabla 4. Área y perímetro de la microcuenca

Microcuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)
Río Ragre	17.55	19.0

Fuente: Elaboración propia.

La información presentada en la Tabla 4 corresponde específicamente a la microcuenca del río Ragre, la cual ha sido considerada como la unidad hidrográfica de análisis en el presente estudio. Dicha microcuenca se localiza dentro del área de estudio, tal como se aprecia en los planos de ubicación y delimitación hidrográfica desarrollados en la investigación, y constituye el ámbito espacial al que se refieren los datos consignados en la tabla.

Figura 6. Ubicación de Estaciones Meteorológicas

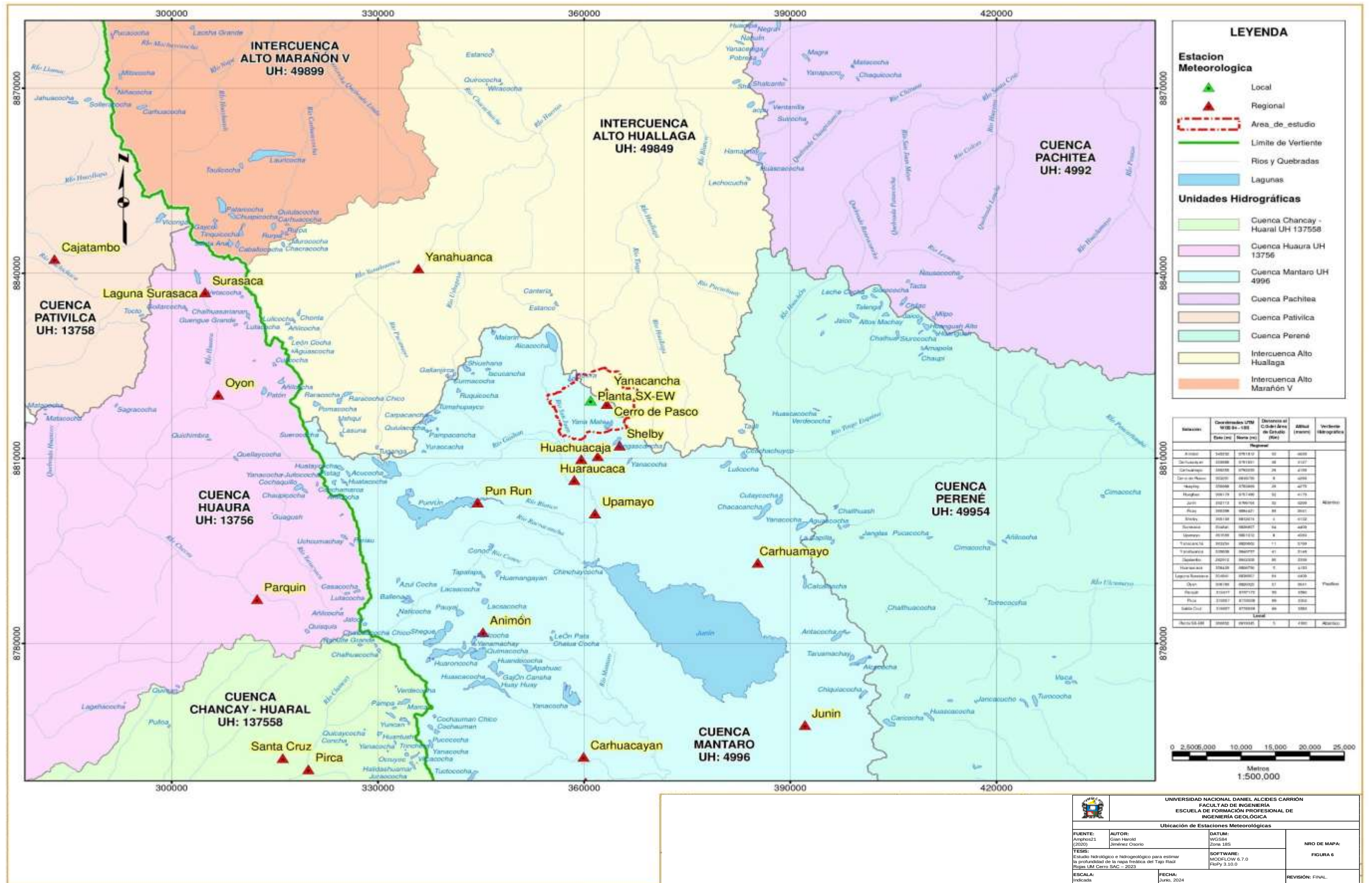


Figura 7. Mapa de Isoyetas

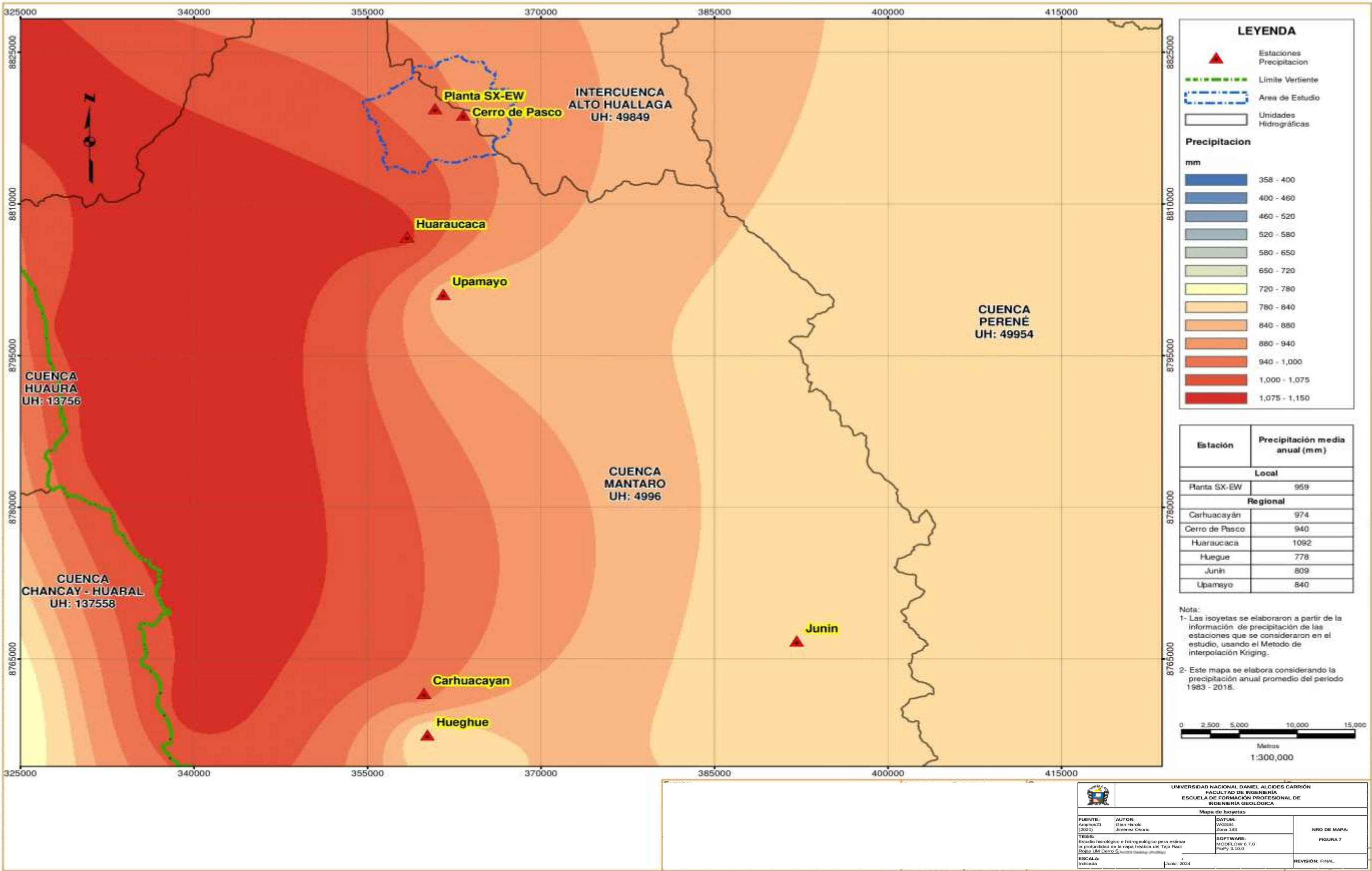


Figura 8. Mapa de Isotermas(método de interpolación Kriging).

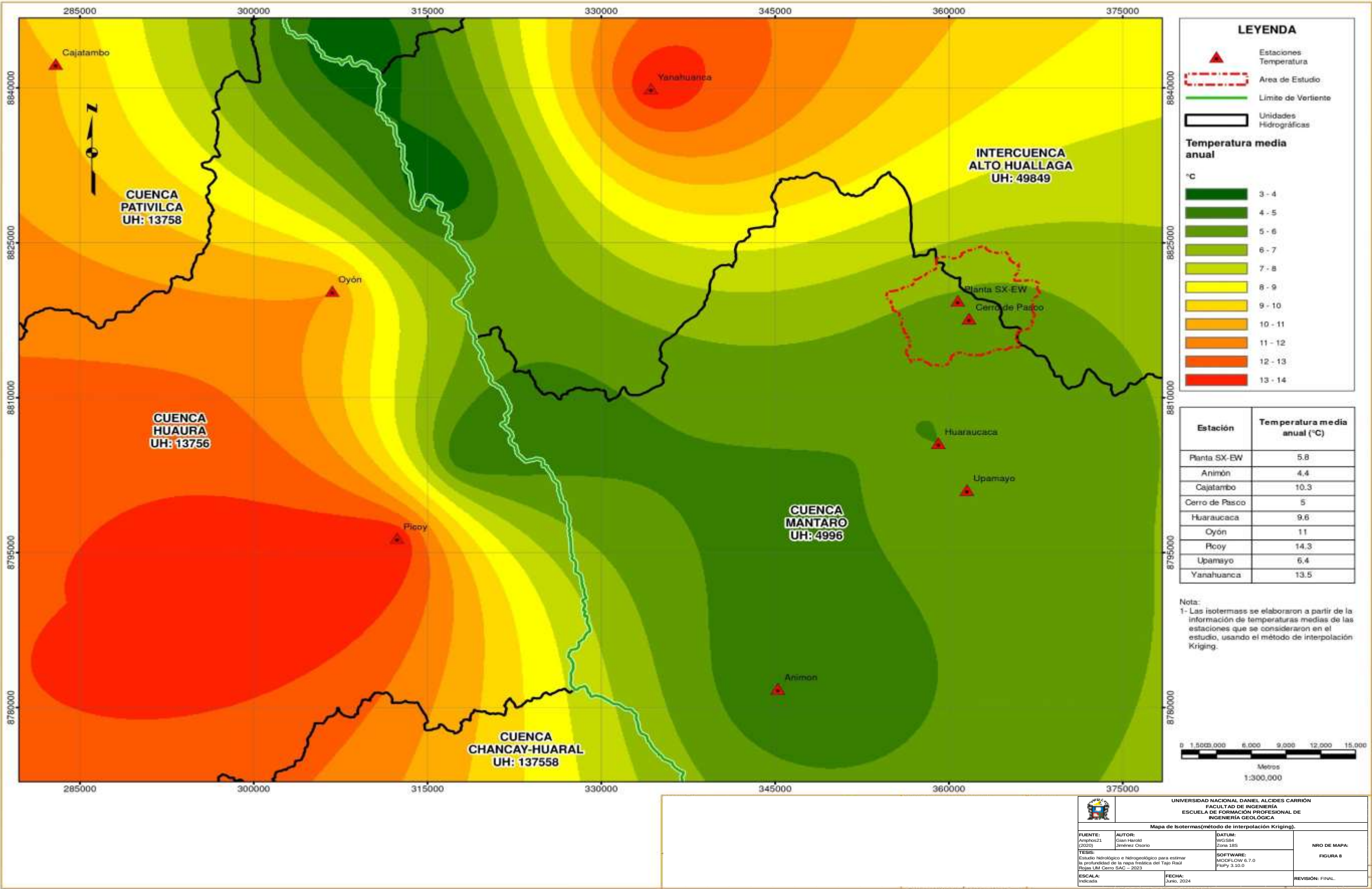
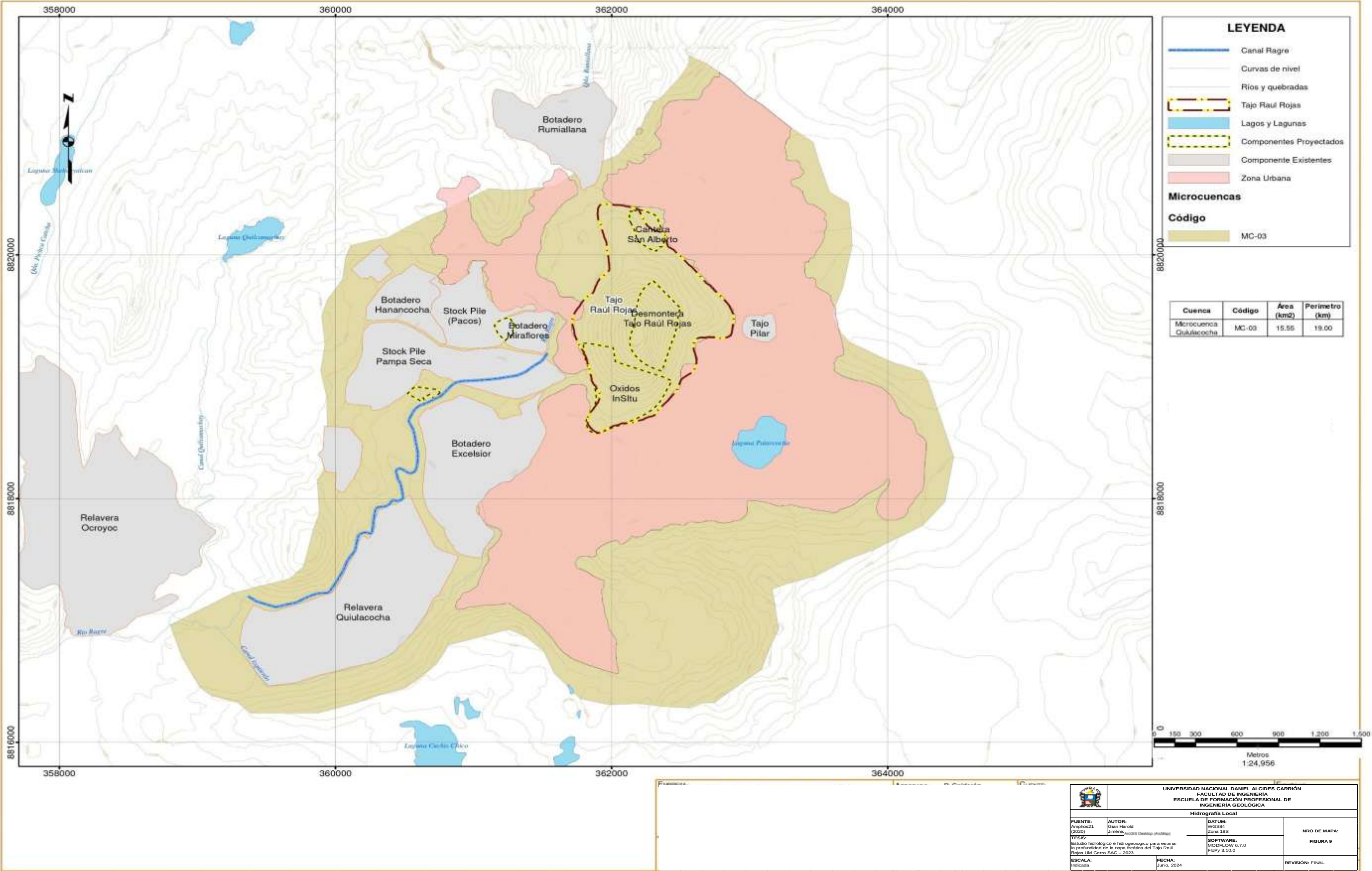


Figura 9. Hidrografía Local



Marco Geológico

Geología Local

Las principales unidades litológicas del área comprenden la presencia de rocas metamórficas filitas y pizarras del grupo Excelsior del Silúrico/ Devónico, Calizas del triásico superior y rocas volcánicas, estas se encuentran intruidas por rocas plutónicas, las cuales trajeron consigo la mineralización del sector, asociadas con una chimenea de explosión que atraviesa la formación Excelsior. A consecuencia de ello se pueden observar rocas volcánicas Rumiallana y los Pórfidos de Cuarzo Monzonita. La Figura 10 muestra la geología del sector de interés.

A continuación, se describen las principales formaciones o grupos geológicos presentes en el dominio de interés:

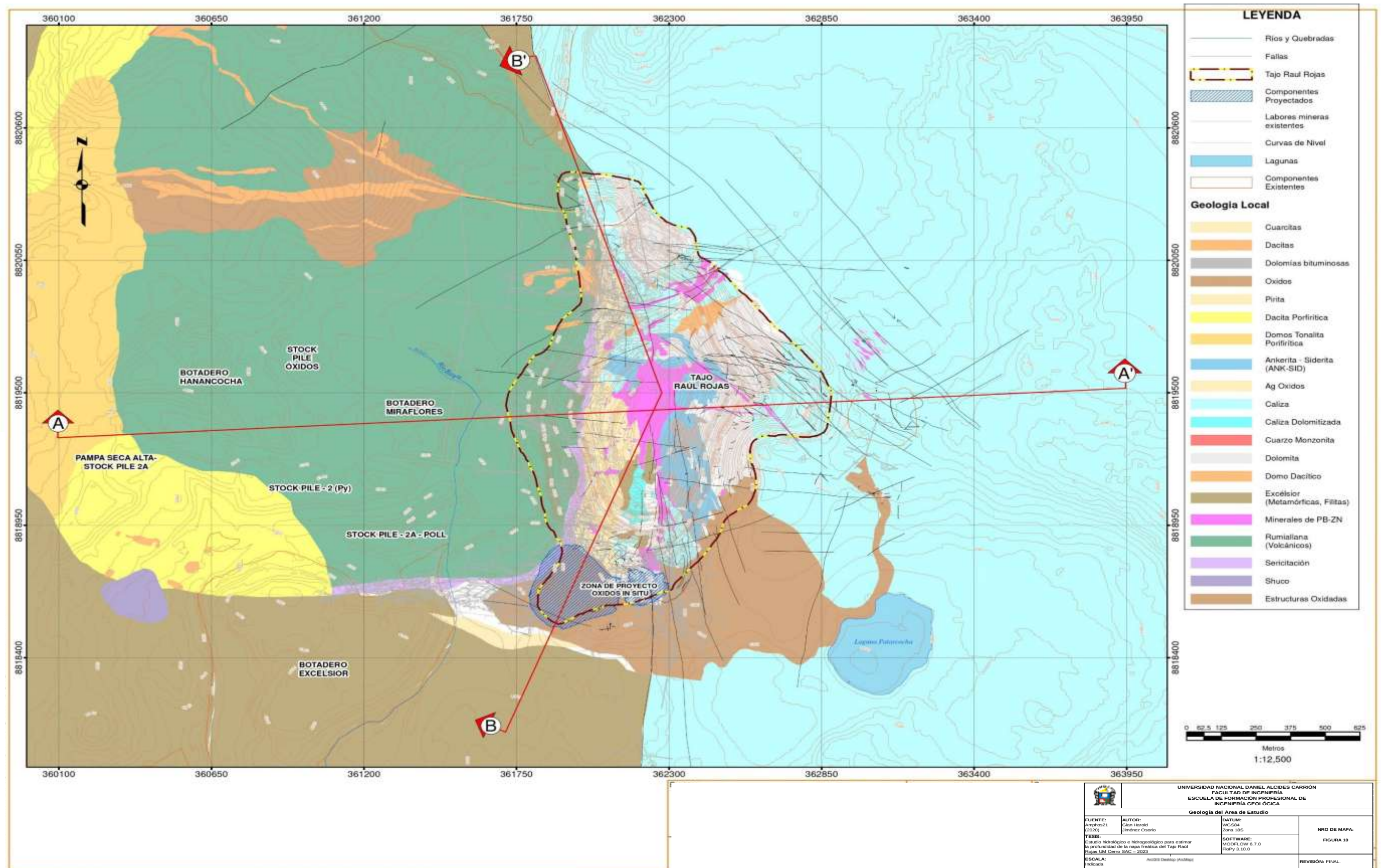
Grupo Excelsior

Rocas correspondientes al Paleozoico Inferior. Se componen de pizarras grises y filitas de color verde con micas y foliación notoria, con intercalación de areniscas en delgadas capas y lutitas negras pizarrosas, con abundantes venillas de cuarzo. Se caracterizan por sus afloramientos plegados, fallados y fracturados y por ser rocas poco consistentes, mostrando colinas suaves onduladas. Estos estratos se observan en las partes altas de Cerro de Pasco con dirección N-S.

Grupo Pucará

Litológicamente corresponden a la formación Chambará, la cual se compone de calizas silicificada con nódulos de Chert y calcarenitas de color gris oscuro a blanco amarillento, estas se encuentran estratificadas con dirección NE y en el sector Este del tajo Raúl Rojas.

Figura 10. Geología del Área de Estudio



- **Formación Chambará**

En la zona de estudio, la formación Chambará aflora al este de la falla Cerro de Pasco (Dominios Nororiental y Oriental), extendiéndose desde el sur de Carhuamayo hasta el norte del Tingo. Constituida por calizas blancas, calizas arenosas y areniscas calcáreas, intercaladas con limoarcillitas, estratos de medianos a gruesos. La formación Chambará por lo general, se encuentra concordantemente sobre las secuencias terrígenas continentales del Grupo Mitu, o discordantemente sobre los volcánicos del grupo Ambo, y por debajo de la secuencia calcárea y pelíticas de la formación Aramachay, posiblemente está ligada a procesos kársticos.

Depósitos Cuaternarios

Son aquellos depósitos generados por una erosión glaciaria moderada, por una superficie peneplanizada y emergida, que constituyen suelos no consolidados con distribución irregular en el área, son acumulaciones de procesos glaciares, y aluviales, provenientes de eventos geodinámicos externos.

- **Depósitos Fluvioglaciares**

Son depósitos clásticos no consolidados de origen glaciario, acumulados a consecuencia de la interacción coetánea de procesos de erosión glacial, y fluvial. Están constituidos por gravas, arenas y limos algo consolidados con cierta homogeneidad horizontal, clastos sub redondeados a sub angulosos, los fragmentos son de composición variable dependiendo del lugar de procedencia, encontrándose en gran parte dentro del límite de estudio.

Rocas Volcánicas

- **Volcánico Rumiallana**

Es una secuencia de rocas vulcanoclásticas, aglomerados, constituido por fragmentos angulosos y sub angulosos de caliza, filita, chert, y roca ígnea porfirítica fuertemente alterada. Se presenta finamente estratificado con

algunos canales de estratificación cruzada, algunas veces masivo. Se presentan en la parte norte del área de estudio.

En el contacto de estas rocas se encuentran un cuerpo masivo de pirita granular, asociados a menas de cobre, cuyo lixiviado se puede observar en el Nivel 1200 de la mina subterránea, y también es el responsable de la generación de aguas ácidas, atribuido a la oxidación de la pirita y minerales asociados.

Rocas Intrusivas

En la zona de estudio se presentan dos tipos de actividad ígnea terciaria, la más antigua correspondiente a una fase explosiva, está representada por el aglomerado Rumiallana, el cual ocupa la mayor parte de la chimenea volcánica de Cerro de Pasco. La segunda fase corresponde a la intrusión de masas irregulares.

Dacita

Consiste en rocas ígneas porfiríticas de color violeta a gris, estos están compuestos principalmente por minerales máficos y/o oscuros como biotita y hornblenda, su composición puede variar de dacita a riodacita.

Pórfido de Cuarzo Monzonita

Compuesta por rocas intrusivas y diques que instruyeron a las distintas formaciones precedentes, están asociadas principalmente a la mineralización del área, se les asocia a dos tiempos una pre -mineral y otra post mineral, estos se ubican en el sector del tajo y que son los formadores de la mineralización del área. Ver figura 11 y 12.

Geología Estructural

La secuencia sedimentaria del Mesozoico reposa sobre el Geoanticlinal del Maraón, frecuentemente depositada en dos cuencas; al Este de Cerro de Pasco y al Oeste del Lago de Junín (Chinchaycocha).

Figura 11. Sección Geológica A-A'

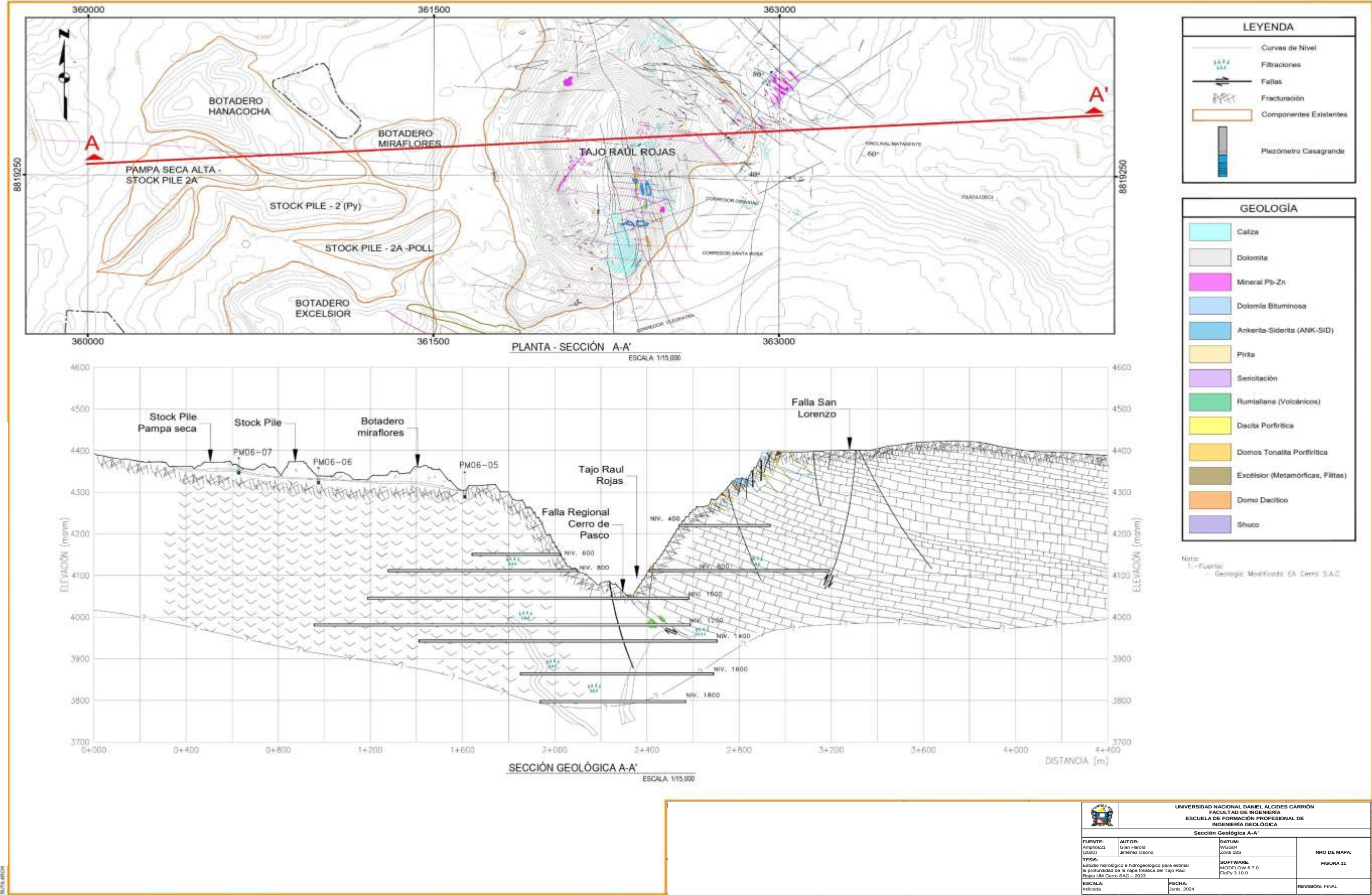
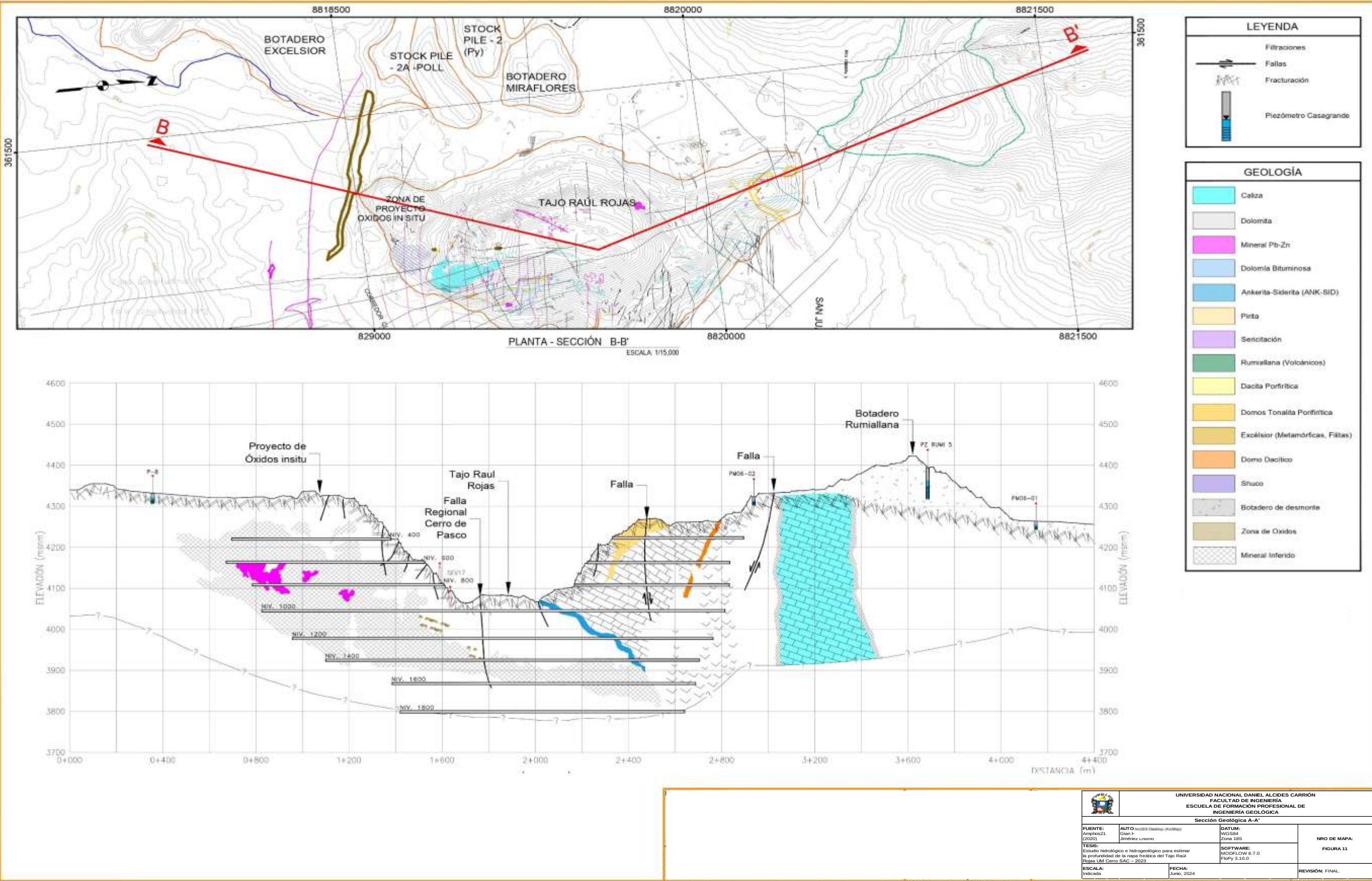


Figura 12. Sección Geológica B-B'



Jenks, W. (1951) demostró que la cuenca de sedimentación triásica de Cerro de Pasco fue controlada por movimientos de las fallas longitudinales, el bloque hundido de esta falla al Este y los estratos sedimentarios fueron depositados en una zona negativa, producida por el movimiento de falla, el área positiva en el lado Oeste de la falla fue controlada por una secuencia delgada, limitando una faja angosta marcada por pizarras y filitas del grupo Excelsior y al oeste por calizas del grupo Pucará.

Falla longitudinal de Cerro de Pasco

Estructura geológica con dirección N-S mostrando sus mejores afloramientos en el Tajo Raúl Rojas en la mina Cerro de Pasco y en la carretera antigua Cerro de Pasco – Yanamate. Al este la falla longitudinal presenta rumbos de N10° - 15°W, y con buzamientos de 60 a 65°E, es la que actuó como un control estructural, haciendo que el bloque hundido se encuentre al Este de la Falla y los estratos sedimentarios fueran depositados en una zona negativa producida por el movimiento de falla. El área positiva en el lado Oeste de la falla fue controlada por una secuencia delgada, limitando una faja angosta marcada por pizarras y filitas del grupo Excelsior.

En las Figura 5, Figura 6 y Figura 7 se muestran la geología del área de estudio con sus respectivas secciones geológicas.

Prospección geofísica

Con el objetivo de complementar el entendimiento hidrogeológico de las formaciones geológicas (macizos rocosos) presentes en el ámbito de estudio y evaluar su comportamiento e interacción con el agua subterránea, se llevaron a cabo métodos indirectos de caracterización física del medio, conformada principalmente por investigaciones geofísicas dentro del tajo Raúl Rojas.

Estas evaluaciones permiten estimar de manera aproximada el espesor fracturado en los macizos rocosos, siendo estos sectores por donde circula con relativa

facilidad el agua subterránea. Además, permitieron evaluar la presencia de horizontes y sectores saturados

La Tabla 5 y la Figura 13 muestran la ubicación de la investigación geofísica realizada.

Tabla 5. Investigaciones geofísicas realizadas y su ubicación

Tipo de Ensayo	Código	Profundidad (m)	Ubicación	Realizado por:
SEV's	SEV-03	80	Botadero Rumillana/Tajo Raúl Rojas	Amphos 21/Geoscience 2018
	SEV-04	80	Botadero Rumillana/Tajo Raúl Rojas	Amphos 21/Geoscience 2018
	SEV-09	80	Botadero Miraflores/Tajo Raul Rojas	Amphos 21/Geoscience 2018
	SEV-10	80	Botadero Miraflores/Tajo Raul Rojas	Amphos 21/Geoscience 2018
	SEV-17	80	Tajo Raúl Rojas	Amphos 21/Geoscience 2018

Fuente: Elaboración propia.

Métodos geofísicos utilizados

Para el ensayo de Resistividad Eléctrica, se aplicó el método de Sondaje Eléctrico Vertical (SEV), aplicando la configuración Schlumberger que es muy práctico y permite determinar las diferentes capas geoelectricas están en función a sus valores de resistividad y profundidad en 1D.

Por las condiciones de terreno fue necesario el uso de electrodos metálicos impolarizables, para conseguir disminuir la resistencia de contacto y obtener buenas corrientes para lecturas confiables.

Equipo geofísico utilizado

El equipo utilizado para realizar los trabajos de SEV's fue un Resistivímetro Syscal Pro, es un equipo de última generación que posee un sistema de adquisición de datos que es almacenada y procesada por una computadora. Ver Tabla 06.

Figura 13. Investigaciones Geofísicas

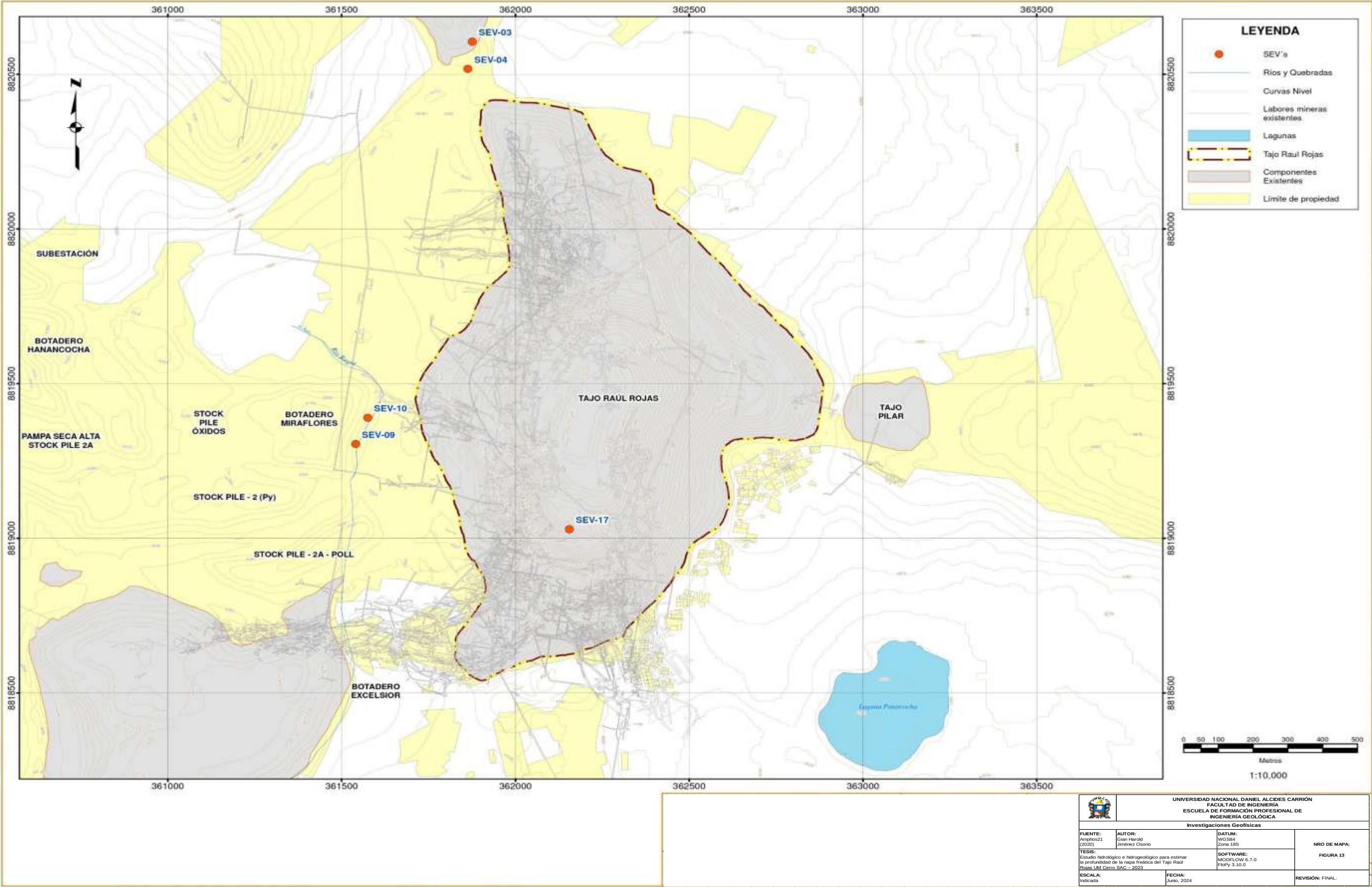


Tabla 6. Resistivímetro Syscal Pro y accesorios

04	Cables de Corriente # 14	Roll	
16	Electrodos de Acero	Unid.	
02	Combas de 2 Kg	Unid.	
01	Batería 12 Vol.	Roll	
02	Radios de Comunicación	Unid.	
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MEDIDA	EQUIPO
01	Resistivímetro Syscal Pro	Unid.	
02	Cables de Potencial	Roll	

Fuente: Elaboración propia.

Programas informáticos utilizados

Para el desarrollo de los trabajos expuestos en este Informe se han requerido las siguientes aplicaciones informáticas:

- El sistema ProsysII es un programa que permite descargar, Procesar y exportar los datos de resistividad y carga de los medidores de resistividad IRIS Instruments (SYSCAL) y receptores IP (ELREC).
- RES2DINV, paquete desarrollado por Geotomo Software.
- RES1D, paquete desarrollado por Geotomo Software.
- WinSev, paquete desarrollado por Geotomo Software.
- Geosoft Oasis Montaj 7.0
- Office 2016 ® de Microsoft.

El método de exploración eléctrica de corriente continua estudia, por medio de mediciones en la superficie, la distribución de la propiedad de resistividad en el subsuelo.

Resultados

Es bien conocido que el análisis de los registros de resistividad para llegar a la interpretación física útil en el análisis geotécnico no es un proceso sencillo ni sus

resultados son unívocos. La elaboración del modelo matemático y su interpretación en términos de características de los materiales implica un conocimiento previo de la geología de la zona en la que se hacen los registros eléctricos y puede requerir la integración de un número amplio de lecturas para eliminar ambigüedades.

A continuación, se presenta los resultados del ensayo de SEV's, representada en perfiles de resistividades en función de la profundidad, analizada para cada estación donde se ejecutaron los ensayos.

- Los SEV's sobre rocas del volcánico Rumiallana, presentaron sus primeros metros depósito de minas y deposito fluvioglaciario, los mismos que se describen a continuación.
- Los SEV's 3 y 4, ubicados entre el botadero Rumiallana y Tajo Raúl Rojas, se estima que sus primeros 10 metros corresponden a un material de desmonte, seguido de roca volcánica altamente fracturada su primeros metros, las resistividades obtenidas durante la investigación fueron medias para el material de desmonte y bajas para la roca volcánica fracturada, según la información obtenía e interpretada se estima que el nivel de agua se encuentra a una profundidad de 2 a 4 metros, toda esta información fue contrastada con el piezómetro AMP19-02.
- El SEV 17, ubicado en uno de los bancos del Tajo Raúl Rojas, sus primeros metros registra baja resistividad, producto del fuerte fracturamiento (alto grado de fracturación) asociado con los procesos de minado del Tajo Raúl Rojas, para luego disminuir en fracturas y volverse más compacta a profundidad, registrando resistividades muy altas.

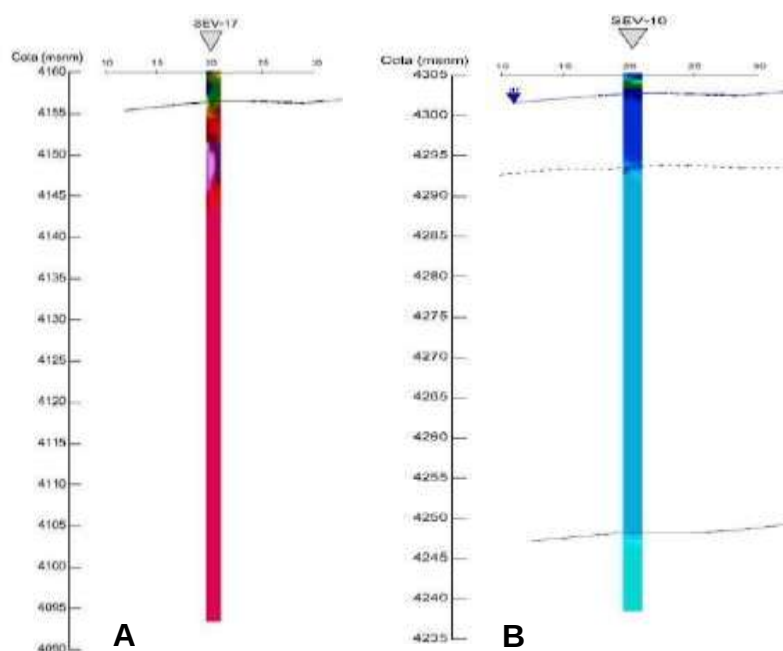
La profundidad investigada (80 m), no se registra nivel de agua, debió a la construcción de labores subterráneas inferiores las cuales drenan de manera progresiva dicho sector. Ver Figura 15 y 16.

Perfiles geoelectricos

La prospección geoelectrica es establecer la conformación del subsuelo mediante la ubicación espacial de las capas resistivas (perfil geoelectrico) para posteriormente transformar el perfil geoelectrico en otro, que represente los caracteres geológicos.

Los perfiles geoelectricos se construyen con la base de la información de las diversas pulsaciones de corriente (proceso que se realiza en campo) y en gabinete se verifica y se obtiene una base de datos final de acuerdo con los patrones de respuesta. Dicha calificación se hace para dejar aquellos datos dudosos o anómalos. Salvo pequeños matices, el flujo de tratamiento ha sido el mismo para todos los perfiles. A continuación, se muestran los perfiles geoelectricos interpretados:

Figura 14. *Perfiles geoelectricos en diferentes unidades geológicas*



Fuente: Pulsaciones de corriente

Figura 15. Investigaciones Directas – Sondajes (Piezómetros)

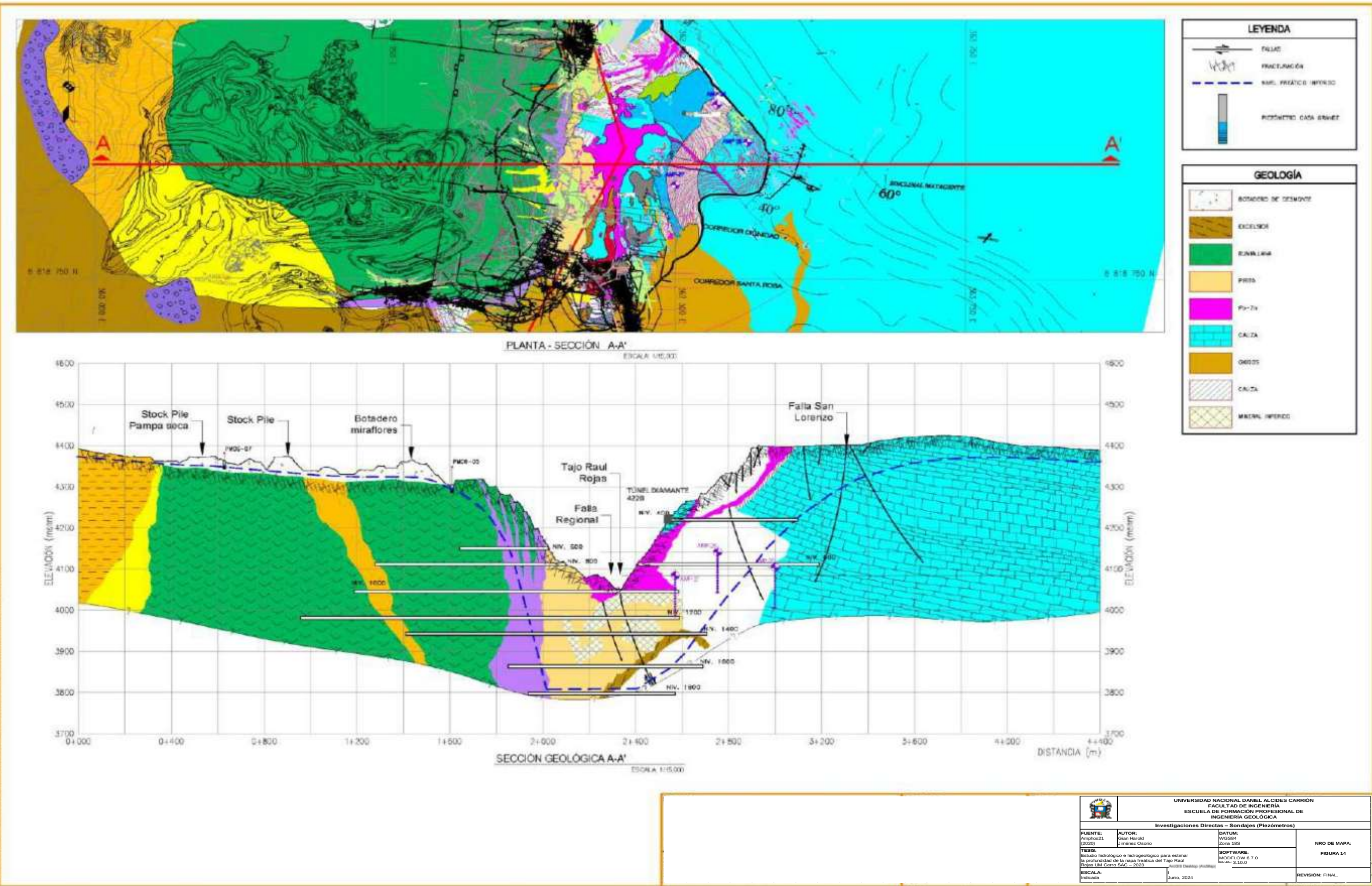
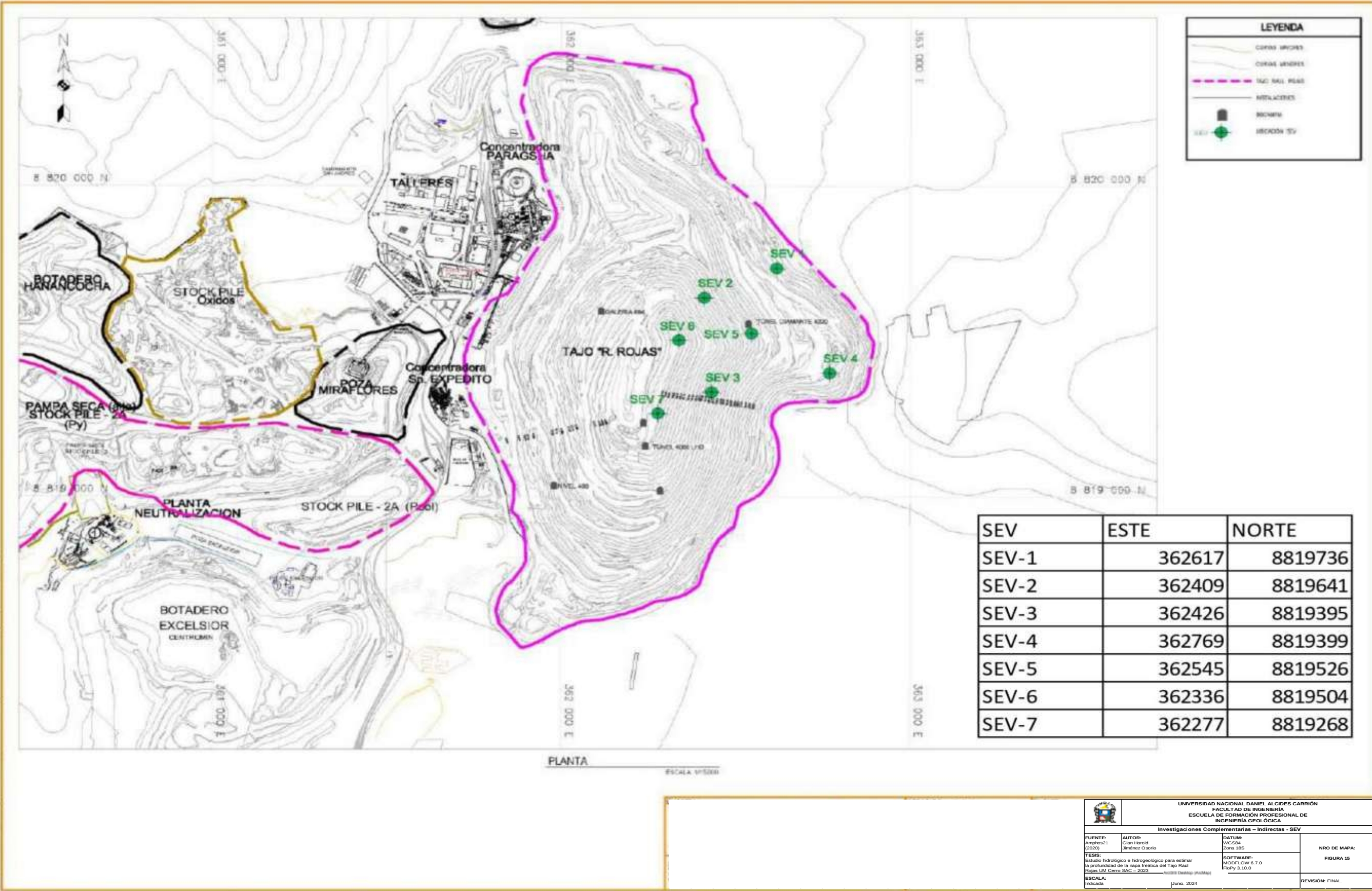


Figura 16. Investigaciones Complementarias – Indirectas - SEV



En la figura 16 (Figura A), se muestra un perfil geoeléctrico característico sobre el tajo Raúl Rojas, donde se puede observar que hasta la profundidad investigada no se intercepta nivel de agua, influenciado por la mina subterránea, figura B, muestra el perfil geoeléctrico de material no consolidado en sus primeros metros seguido de roca volcánica a profundidad, donde sí se puede observar la intercepción del nivel freático.

Caracterización geofísica del área investigada

- **Resistividades eléctricas del horizonte saturado:** de los sondeos eléctricos verticales emplazados sobre depósitos aluviales, fluvio-glaciares, rocas volcánicas, intrusivas.

La información obtenida fue contratada con algunos piezómetros instalados cerca de los puntos de investigación geofísica. Presentando resistividades que van desde los 15.00 Ωm .

Figura 17. Rango de resistividades



Fuente: Clasificación de resistividades

Contexto Hidrogeológico

Afloramientos

Los afloramientos en superficie vienen a ser uno de los principales rasgos hidrogeológicos para tener en cuenta en superficie. Durante los trabajos de campo, específicamente correspondiente al mapeo hidrogeológico realizado en el sector del tajo Raúl Rojas en noviembre 2018 (etapa de transición seca a húmeda), se pudo observar que el tajo se comporta como un macizo rocoso prácticamente seco y las escasas filtraciones que existen son producto directamente de las precipitaciones. Estas aguas son captadas por pozas de sedimentación y cuyo rebose es conducido por gravedad hacia el fondo del tajo para que continúe el proceso de infiltración hacia las labores de

la mina subterránea. Estas filtraciones son captadas en el interior de las labores subterráneas, para luego ser bombeadas hacia a superficie de manera conjunta con todo el drenaje de la mina, hacia la planta de tratamiento de aguas acidas.

Durante el inventario de las filtraciones en el tajo Raúl Rojas se identificaron sectores donde se generan las filtraciones producto de las precipitaciones presentes en esta temporada. La Tabla 7 y Tabla 8, muestran la ubicación y los parámetros fisicoquímicos de los puntos en donde se identificaron filtraciones y subestaciones de bombeo.

Tabla 7. Resumen de inventario de filtraciones

Id.	Código	Coordenadas UTM WGS 84			Parámetros Físico Químicos					Q: (L/S)	Descripción
		Este	Norte	Cota	pH	CE (uS/cm)	TDS (ppm)	ORP (mV)	T (°C)		
1	FIT-01	362216	8819160	4101	5.9	>4000	>2000	134	13.3	0.03	Sector norte, poza de sedimentación
2	FIT-02	362295	8818983	4133	3.01	>4000	>2000	277	9.3	0.10	Parte baja del Tajo

Fuente: Elaboración propia.

Además, se pudo identificar dos pozas (subestación de bombeo) cuyas aguas son bombeadas directamente hacia la planta de neutralización, una de estas pozas se ubica en la rampa Chasqui (Sub estación de bombeo 5.5), y la otra poza se ubica en la primera rampa del tajo.

Tabla 8. Inventario de Subestaciones de bombeo

Id	Código	Coordenadas UTM WGS 84			Parámetros Fisicoquímicos					Descripción
		Este	Norte	Cota (msnm)	pH	CE (uS/cm)	TDS (ppm)	ORP (mV)	T (°C)	
1	SE 1	362152	8820129	4236	2.96	>4000	>2000	423	12.5	Rampa Chasqui
2	SE 2	361835	8819505	4268	3.77	>4000	>2000	392	17.5	Rampa 1

Fuente: Elaboración propia.

Inventario de fuentes de Agua

Con el objetivo de establecer el funcionamiento hidrodinámico del sector de interés, se elaboró un inventario de fuentes de agua próximo al sector del tajo Raúl Rojas. Como resultados de este inventario se identificaron un canal de desvío (río Ragre) , 01 laguna y 08 piezómetros incluyendo los últimos instalados por Amphos 21 en la campaña de Septiembre – noviembre 2019.

Con respecto a la laguna Patarcocha, que se encuentra ubicada al este del Tajo, no presenta descargas, por lo general su espejo de agua se mantiene estable, lo cual da a entender que no está influenciada por el sistema subterránea de la mina Cerro de Pasco, lo cual permite establecer la hipótesis de que la laguna se encontraría desconectada del sistema de flujo subterráneo. Actualmente no se dispone de piezómetros en el entorno de la laguna para verificar dicho comportamiento.

La Tabla 9 y Figura 18 muestran la ubicación del inventario de fuentes de agua superficial y subterránea identificadas en el sector del tajo Raúl Rojas.

Figura 18. Ubicación de Fuentes de Agua Superficial y Subterránea

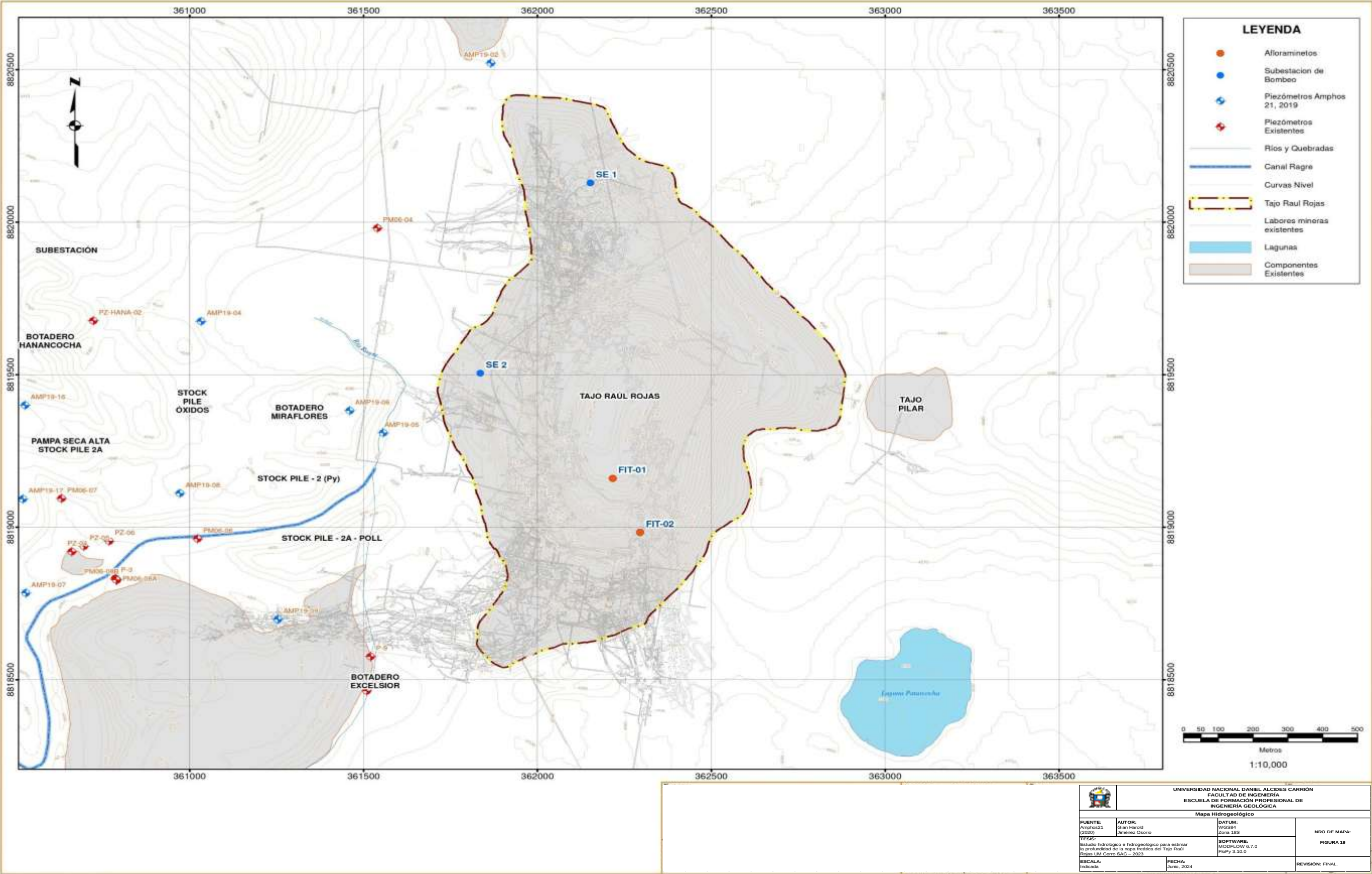


Tabla 9. Inventarios de agua

ID	Código	Inventariado por	Tipo de fuente	Coordenadas UTM WGS 84		Cota (msn m)	Prof. (m)	Caudal (l/s)
				Este	Norte			
1	Laguna Patacocha	Amphos 21-2019	Agua Sup.	363,077	8,818,299	4,340	-	NR
2	Río Ragre (qda. Quiulacocha)	Amphos 21-2019	Agua Sup.	357,378	8,816,524	4,215	-	359
1	P-8	Hidroenergía 2008	Agua Sub.	361,509	8,818,464	4,319	5.82	NR
2	P-9	Hidroenergía 2008	Agua Sub.	361,520	8,818,576	4,314	8.93	NR
3	AMP19-02	Amphos 21	Agua Sub.	361,866	8,820,522	4,325	11.54	NR
4	AMP19-04	Amphos 21	Agua Sub.	361,082	8,819,675	4,328	4.34	NR
5	AMP19-05	Amphos 21	Agua Sub.	361,557	8,819,309	4,308	5.96	NR
6	AMP19-06	Amphos 21	Agua Sub.	361,446	8,819,371	4,352	64.53	NR
7	AMP19-09	Amphos 21	Agua Sub.	361,290	8,818,700	4,309	39.49	NR
8	AMP19-22	Amphos 21	Agua Sub.	362,193	8,817,968	4,350	19.57	NR

NR: No Registra Caudal

Fuente: Elaboración propia.

Propiedades hidráulicas

La información relacionada con los parámetros hidráulicos del macizo rocoso y de los materiales cuaternarios ha sido obtenida de las investigaciones hidrogeológicas antecedentes y de información hidrogeológica generada por Amphos 21, el Anexo B se presenta el resumen de todos los ensayos hidráulicos desarrollados la UM Cerro de Pasco.

En total se dispone de 216 pruebas hidráulicas.

Para la determinación de la conductividad hidráulica se emplearon diferentes soluciones analíticas tales como Theis (1935), Cooper-Jacob (1946), Papadopoulos-Cooper (1967), entre otros.

Para el análisis de los parámetros hidráulicos en cada formación geológica se

dispone de la siguiente información:

- 180 pruebas hidráulicas ejecutadas en estudios antecedentes:
 - 161 pruebas de Lefranc constante.
 - 19 pruebas Lugeon realizadas durante la perforación
- De las investigaciones realizadas por Amphos 21 en el marco del presente estudio, se detalla 36 pruebas:
 - 20 pruebas Lugeon realizados durante la perforación.
 - 10 pruebas de Slug realizado en piezómetros.
 - 06 pruebas de bombeo de bajo caudal realizado en piezómetros.

Conductividad hidráulica

Para la determinación de la conductividad hidráulica de las diferentes unidades litológicas presentes en la zona, se ha agrupado toda la información disponible por cada litología. Los resultados se describen a continuación:

Los valores de conductividad hidráulica para los materiales que conforman los depósitos cuaternarios (depósito aluvial, morrénicos y fluvioglacial) se encuentra en el orden de $1.0E-02$ m/d a $1.0E+01$ m/d. Este amplio rango de la conductividad obedece a la composición heterogénea de este depósito (alternancia de tramos permeables como arena y grava y tramos impermeables como por ejemplo limos y arcillas).

En la Figura 19 se muestra la representación gráfica de los valores de conductividad versus la profundidad. Los valores más bajos son representados por los materiales más finos (arcilla y limos). En términos generales el rango de permeabilidad no disminuye considerablemente a profundidad.

Figura 19. Mapa Hidrogeológico

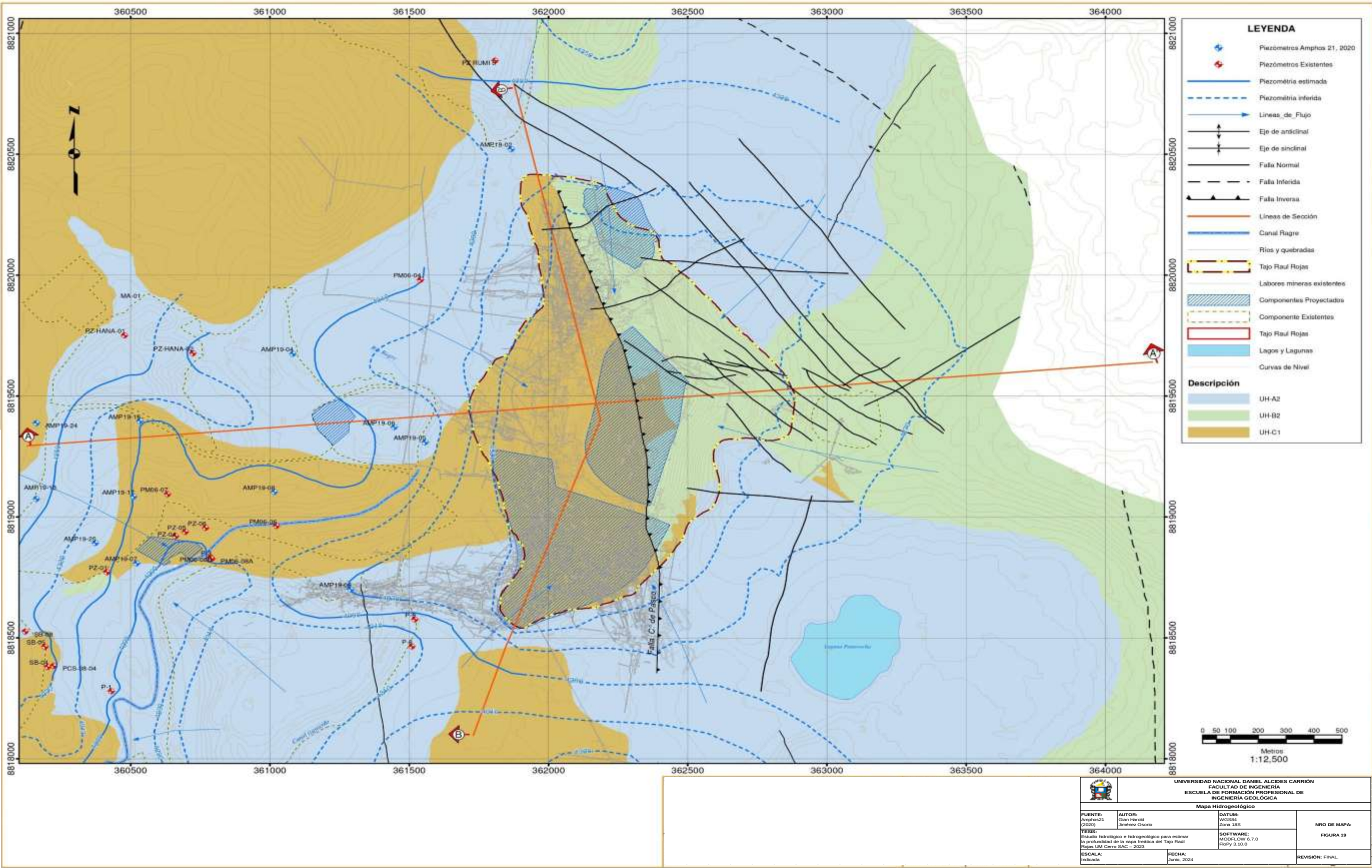
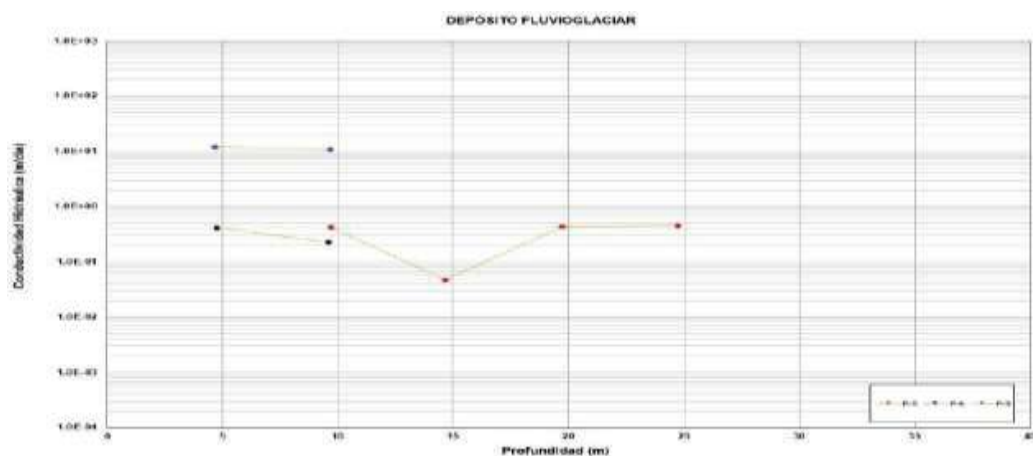


Figura 20. Conductividad hidráulica vs profundidad de los medios no consolidados (Cuaternarios)

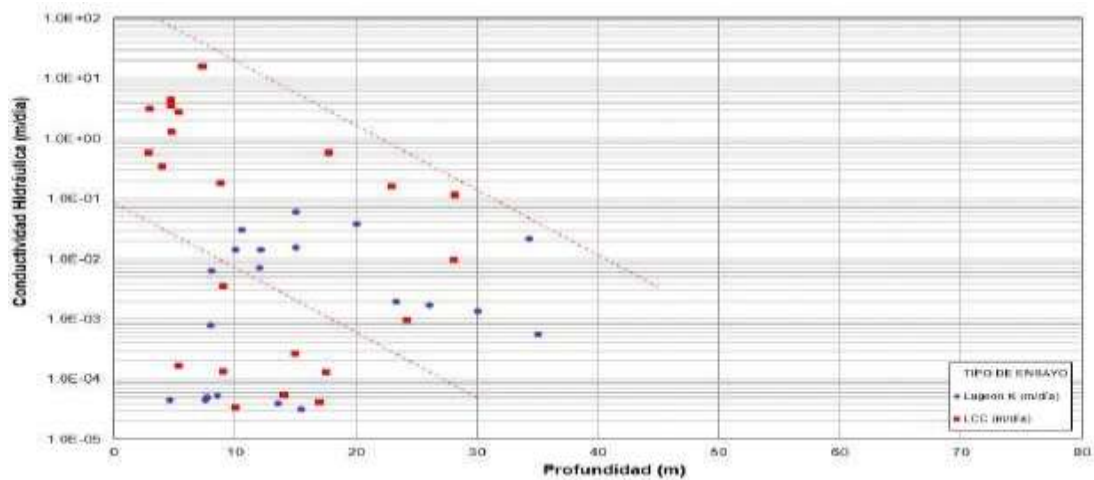


Fuente: Valores de conductibilidad.

Las formaciones geológicas que principalmente afloran en el sitio y en la cual se cuentan con registros de ensayos hidráulicos son: el grupo Excélsior, volcánico Rumiallana, los intrusivos dacita porfirítica y la formación Shuco. La descripción de los rangos de conductividad hidráulica estimados para formación se describe a continuación:

El Grupo Excélsior constituida de pizarras grises y filitas de color verde con micas y foliación notoria, con intercalación de areniscas en delgadas capas y lutitas negras pizarrosas. Los ensayos realizados en estos materiales llegan hasta la profundidad de 70 metros y muestran un amplio rango de conductividad hidráulica. Aparentemente, existe una correlación entre la permeabilidad y la profundidad en los primeros 70 m (profundidad a la que se dispone de información). Sin embargo, existe un conjunto de datos con menor permeabilidad que sale de esta correlación y que no es consistente con descripciones litológicas de dichos ensayos, aunque no se encontró disponible el logueos de dichos taladros ni interpretación de los ensayos hidráulicos ejecutados en los mismos. En la Figura 11 se evidencia lo descrito.

Figura 21. Conductividad hidráulica vs profundidad – Grupo Excelsior

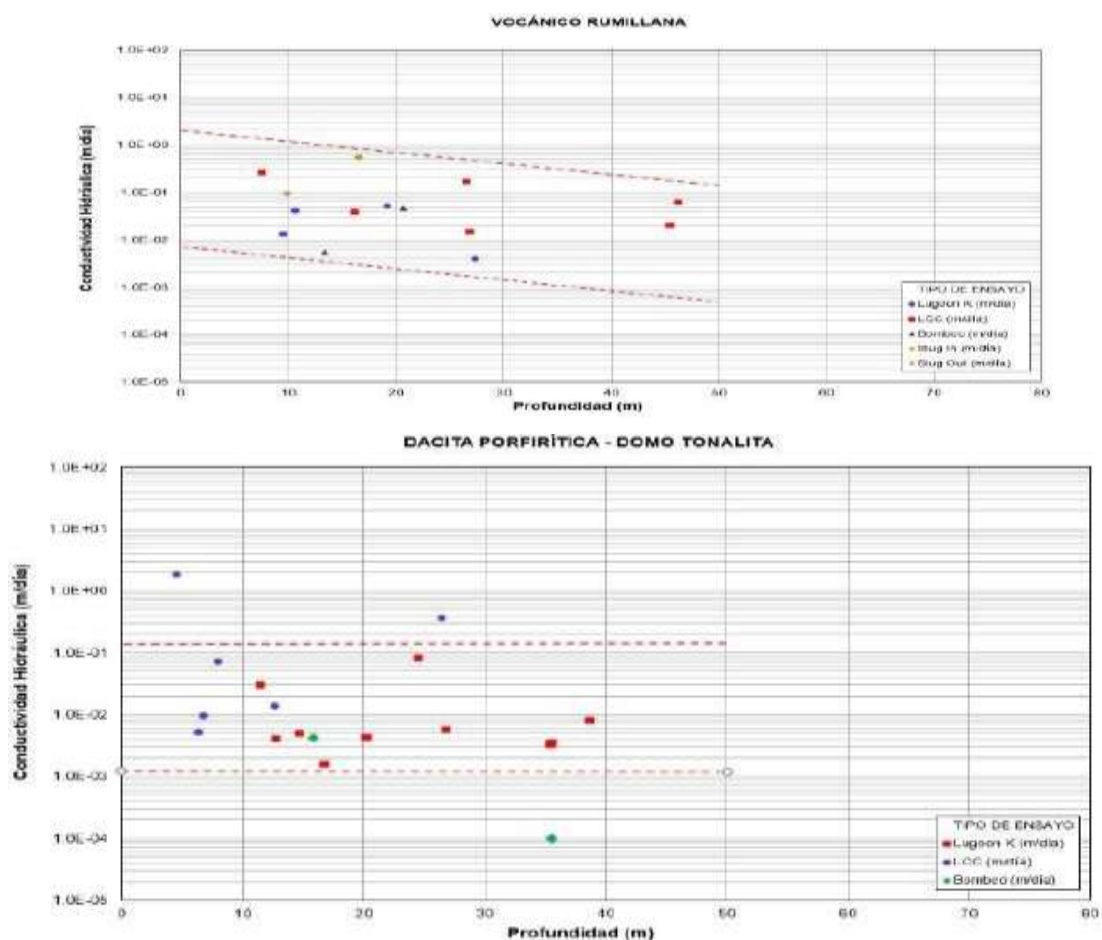


Fuente: Valores de conductibilidad.

Volcánico Rumiallana, constituido por fragmentos angulosos y subangulosos de caliza, filitas, chert y roca ígnea porfirítica altamente alterado, posee una ligera tendencia a disminuir los valores de permeabilidad a medida que incrementa la profundidad, los ensayos alcanzaron los 50 metros de profundidad y muestran un rango de conductividad entre $1.0E-04$ y $1.0E-01$ m/d. Cabe mencionar que los primeros metros de roca presenta un amplio rango de conductividad lo cual estaría ligado a una mayor ocurrencia de fracturas conductivas.

Dacita Porfirítica, muestran una fina estratificación donde no muestra evidencia de deformación, constituido por cuarzo feldespato con variable cantidad de biotita, hornblenda, epidota, y calcita como material cementante. En esta unidad litológica se realizaron pruebas hasta los 40 metros de profundidad y no se observa una clara tendencia a la disminución de la conductividad hidráulica a medida que incrementa la profundidad, los valores de conductividad hidráulica asociada a este material están en el orden de $1.0E-03$ y $1.0E-01$ m/d. En la Figura 12 muestra la correlación de la conductividad hidráulica y la profundidad del volcánico Rumillana, Dacita porfirítica y domo tonalita.

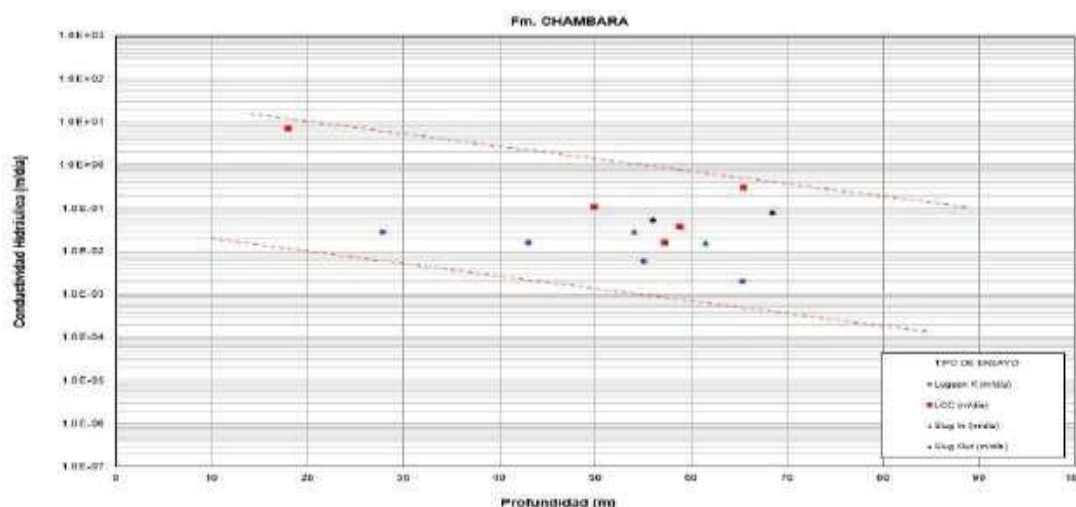
Figura 22. Conductividad hidráulica vs profundidad – Volcánico Rumiallana, Dacita porfírica, domo Tonalita.



Fuente: Valores de conductibilidad.

Chambará superior, constituida por calizas blancas, calizas arenosas y areniscas calcáreas, intercaladas con limoarcillitas, presentando estratos de medianos a gruesos, las pruebas hidráulicas interpretadas en esta litología abarcan una profundidad de 70 metros y muestra una disminución de valores de la conductividad hidráulica a mayor profundidad. Los valores se encuentran en el rango de 1.0E-03 a 1.0E+00 m/día. Ver Figura 13.

Figura 23. Conductividad hidráulica vs profundidad para rocas sedimentarias de la Fm Chambará



Fuente: Valores de conductibilidad.

En términos generales los ensayos hidráulicos realizados en las formaciones geológicas ubicadas en el sector oeste del ámbito de estudio (limitados por la falla Cerro de Pasco), los cuales alcanzaron una profundidad de 80 metros, indican que no existe una clara tendencia de la disminución de la conductividad hidráulica con respecto a la profundidad. Sin embargo, se observa un amplio rango de variabilidad de la conductividad hidráulica en los primeros 10 metros, este comportamiento está posiblemente asociado a un mayor grado de fracturación en superficie, a consecuencia de la meteorización y alteración de la roca.

Por otro lado, el sector Este del ámbito de estudio (limitado por la falla Cerro de Pasco), en el cual afloran litologías principalmente sedimentarias, se observa un amplio rango de variabilidad de la conductividad hidráulica, lo cual estaría relacionado con su alto grado de fracturación. Los ensayos hidráulicos realizados en dicho sector alcanzaron los 70 metros, con base en estos resultados se puede inferir que la conductividad hidráulica de las rocas sedimentarias presentes en este sector, presentan una ligera tendencia a la disminución con respecto al incremento de su profundidad. Asimismo, sobre estas rocas sedimentarias con un relativo alto grado de fracturación,

el agua subterránea podría moverse con una relativa facilidad hasta los 150 metros aproximadamente, dicha profundidad fue establecida por Amphos 21 con base en la experiencia sobre este tipo de formaciones geológicas. Además, amerita mencionar que el sector Este del Tajo Raúl Rojas es el sector con una menor caracterización hidrogeológica y en consecuencia menor presencia de piezómetros de observación y ensayos hidráulicos.

Unidades hidrogeológicas

De acuerdo con lo descrito anteriormente, se definieron unidades hidrogeológicas en el área de estudio mediante la agrupación de diferentes litologías que comparten características hidráulicas similares a diferente profundidad, en términos de conductividad hidráulica. Los comportamientos hidráulicos a profundidad están ligados estrechamente a la ocurrencia de fracturas y al relleno de estas (arcilla, limo, etc), por lo general en zonas donde el macizo rocoso es muy fracturado se espera que los valores de conductividad hidráulica sean altos (permeables) y en roca competentes (escasas fracturas) se espera que los valores de conductividad hidráulica sean mínimas, ya que el flujo estaría limitado a la permeabilidad de la matriz.

Conceptualmente se entiende que la ocurrencia de fracturas en un macizo rocoso es mayor en los primeros metros debido a los procesos de meteorización químicos y físicos de la roca, y se espera que a mayor profundidad la roca sea poco fracturada, salvo que la zona de estudio haya sido sometida a diferentes eventos tectónicos, la cual generó que las rocas estén completamente fracturadas. De acuerdo con lo descrito anteriormente, se espera que los valores de la conductividad hidráulica para el macizo rocoso a profundidades mayores a los 80 metros están en el orden entre $1.0E-04$ y $1.0E-09$ m/día. En la Tabla 10 se presenta las unidades hidrogeológicas definidas en el área de estudio a partir de la caracterización hidráulica de los materiales

y siguiendo la guía de estándares para elaboración de mapas hidrogeológicos desarrollado por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH, 1995).

Tabla 10. Unidades Hidrogeológicas

Unidad hidrogeológica UH	Descripción litológica	Unidades geológicas	Conductividad hidráulica		Tipología
			m/d	m/s	
A: Sedimentos con flujo esencialmente intergranular					
A2	Sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvioglaciario, morrenas.	Depósitos Cuaternarios.	entre 1.0E-02 a 1.0E+01	Entre 1.0E-06 a 1.0E-04	Acuífero moderadamente productivo
B: Macizos rocosos con flujo esencialmente a través de fracturas					
B2	Macizo rocoso de moderado a ligeramente fracturado de extensión regional, conformados por rocas sedimentarias	Fm. Cambara Superior (0 a 80 m)	Entre 1.0E-02 y 1.0E-01	Entre 1.0E-07 y 1.0E-06	Acuífero fisurado moderadamente productivo
C. Sedimentos y Macizo rocoso con limitado a ningún recurso de agua subterránea					
C1	Macizos rocosos con bajo grado de fracturamiento conformados por rocas Volcánicas e intrusivas y sedimentarias	Dacita Porfírica, Domo Tonalita, Excelsior, Volcánico Rumiallana (0 a 70 m)	Entre 1.0E-04 y 1.0E-02	Entre 1.0E-07 y 1.0E-09	Acuitardo Fracturado Poco Productivo
		Fm. Cambara Sup. (80 a 120 m)			
C2	Macizos rocosos de muy bajo a nulo grado de fracturamiento conformados por rocas Volcánicas e intrusivas y sedimentarias	Rocas por debajo de los 70 m de profundidad	Menores a 1.0E-04	Menores a 1.0E-09	Acuífugo no productivo
		Fm. Cambara Sup. (mayor a 120 m)			

Fuente: Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH, 1995).

Unidad hidrogeológica (A)

A2: Unidad conformada por los materiales que componen los depósitos morrénicos y fluvio-glaciares. Los valores de conductividad hidráulica de esta unidad

son muy dispersos y están generalmente en el orden de $1.0E-02$ a $1.0E+01$ m/día. Los valores más bajos de conductividad hidráulica representan a los materiales compuestos principalmente por limos- arcillas, por otro lado, los valores altos representan a los materiales compuestos por arena y grava principalmente. El comportamiento hidráulico de este depósito es de un acuífero propiamente dicho, favoreciendo a la recarga, acumulación y transporte del flujo subterráneo.

Unidad hidrogeológica (B)

B2: Unidad conformada principalmente por los primeros metros de roca de la Formación Chambará (80 metros). Los valores de conductividad hidráulica para esta unidad están en el orden de $1.0E-02$ a $1.0E-01$ m/día y están asociados a la moderada ocurrencia de fracturas conectadas hidráulicamente en este horizonte. Cabe mencionar que las rocas que comprenden esta unidad tienen diferente composición litológica, sin embargo, bajo un análisis hidrogeológico estas presentan un comportamiento hidráulico similar.

Unidad hidrogeológica (C)

Está constituido por dos subunidades que fueron discretizadas en función a sus comportamientos hidráulicos:

C1: Esta subunidad está constituida por rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas, se caracteriza por presentar un menor número de fracturas interconectadas hidráulicamente. Este comportamiento es bastante representativo para los primeros metros del grupo Excelsior, volcánico Rumillana y rocas intrusivas. Sin embargo, para las rocas sedimentarias, como la Formación Chambará, este comportamiento hidráulico se da a mayor profundidad. El rango de conductividades hidráulicas en la que se encuentran estos materiales es de $1.0E-04$ y $1.0E-02$ m/día.

C2: Unidad constituida por rocas sedimentarias, intrusivas y volcánicas. Esta

subunidad se caracteriza por tener los horizontes más profundos y presentar un bajo o nulo grado de fracturación, fracturas que podrían no estar íntegramente conectadas, proporcionando valores muy bajos de conductividad hidráulica. Los valores estimados de las conductividades hidráulicas se encontrarían por debajo de $1.0\text{E}-04$ m/d. Esta unidad representaría el basamento rocoso de muy baja permeabilidad y a grandes profundidades.

La Figura 10, muestra el mapa hidrogeológico del sector de interés, y las Figura 24 y Figura 25 muestran las secciones hidrogeológicas para el sector de interés. En ellas se observa el comportamiento de la superficie freática inferida.

Modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico

La presente sección describe los argumentos que dan soporte a la conceptualización o entendimiento del comportamiento hidrodinámico del Tajo abierto Raúl Rojas. Dicho entendimiento fue realizado sobre la base del reconocimiento en campo de las principales características geológicas, estructurales, hidrológicas a nivel del tajo y su entorno.

Los ensayos hidráulicos realizados en las diferentes formaciones litológicas y a diferentes profundidades permitieron definir que los valores de la conductividad hidráulica, en términos generales, tienden a disminuir con la profundidad, presentando un alto fracturamiento en los primeros metros, producto del de la extracción del mineral durante su operación,

Hidrodinámicamente el tajo Raúl Rojas es considerado un tajo seco dado que no intercepta al sistema de flujo subterráneo, producto de la depresión del constante bombeo en las labores inferiores de la mina subterránea ubicado bajo el tajo Raúl Rojas, haciendo que el nivel freático forme un cono de abatimiento en este sector. Durante la época de lluvia, la escorrentía superficial generada en las paredes del tajo es captada por cunetas

Figura 24. Sección Hidrogeológica A-A'

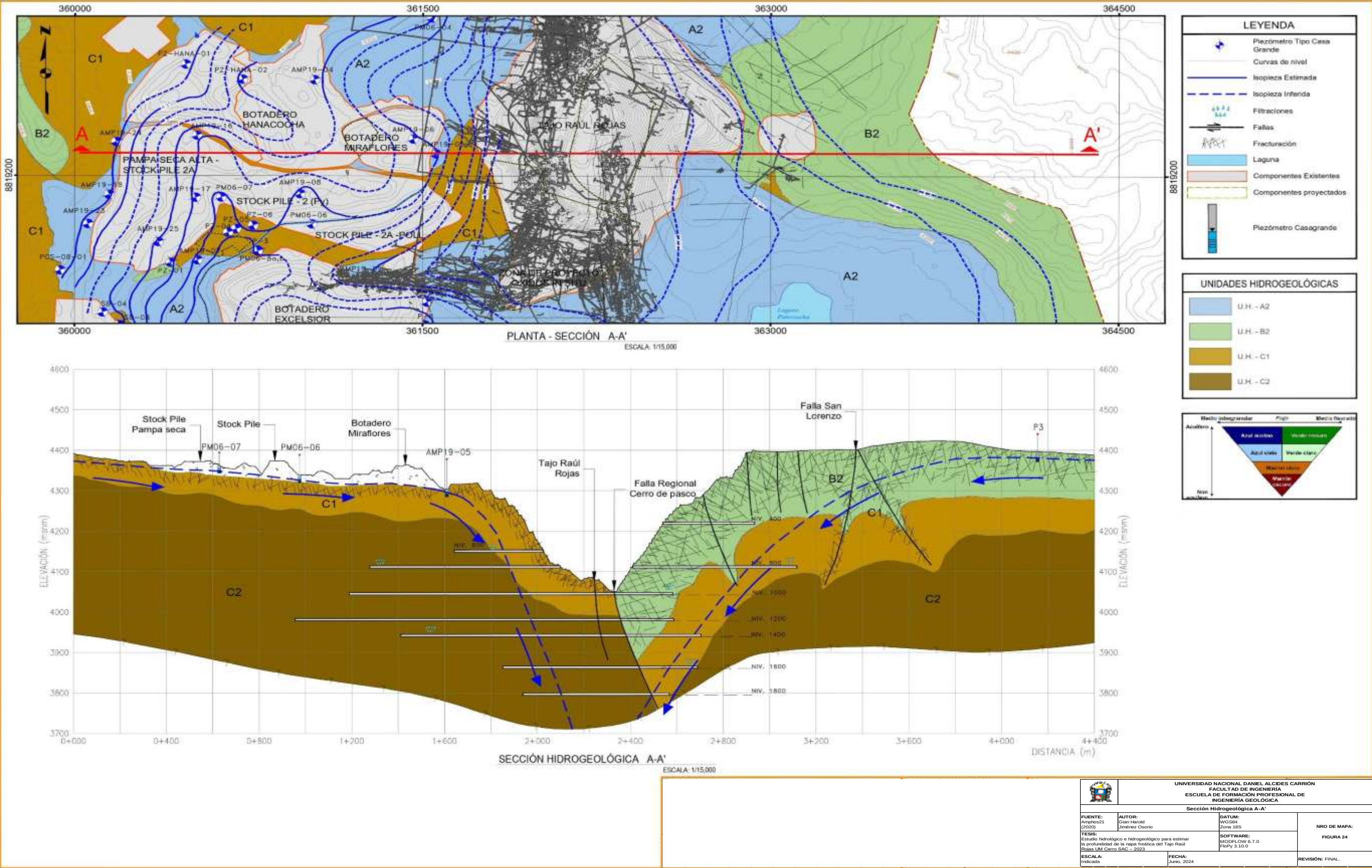
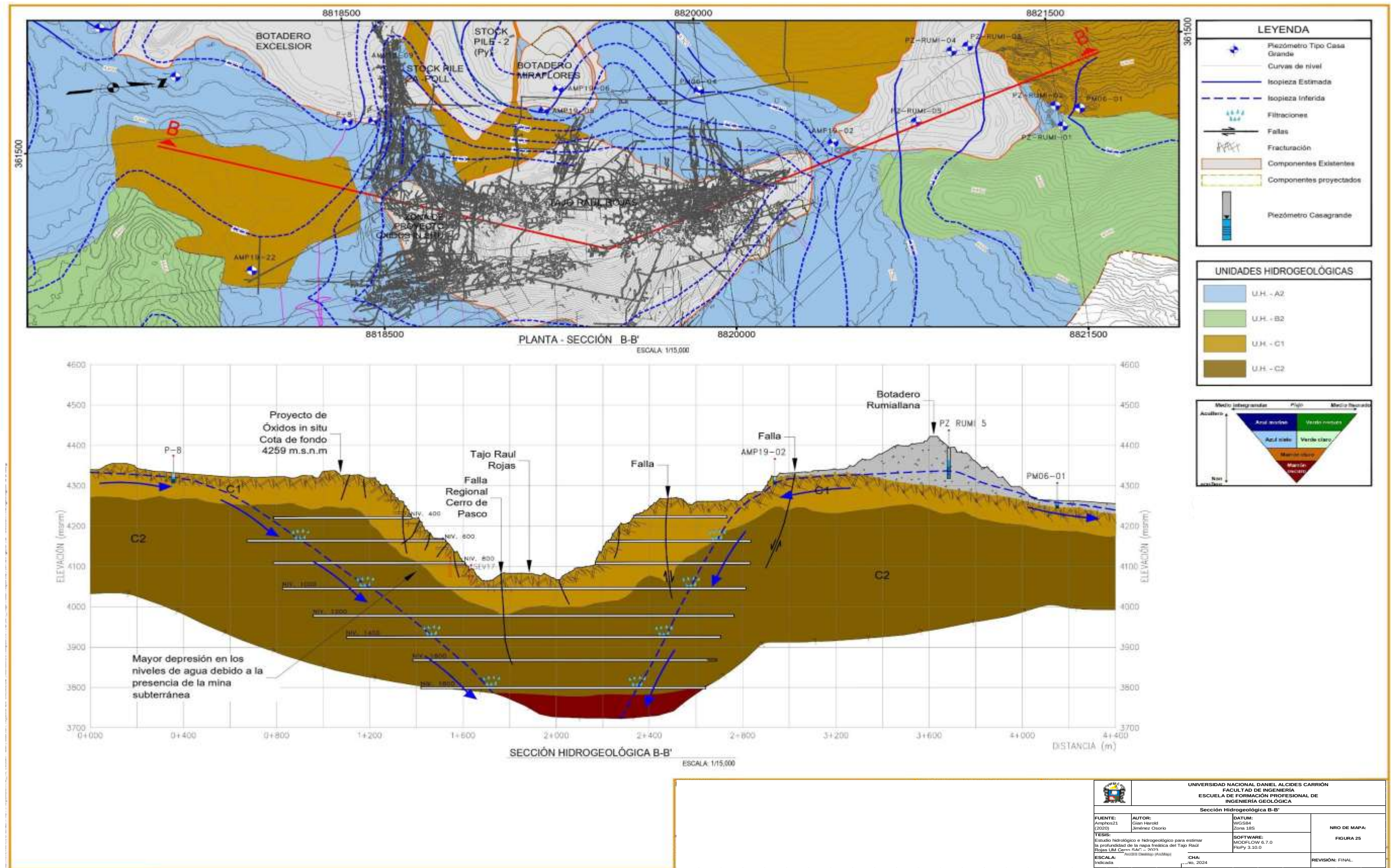


Figura 25. Sección Hidrogeológica B-B'



impermeabilizadas y conducidas hacia dos pozas ubicadas en la primera rampa y en la rampa Chasqui del Tajo, para luego ser bombeadas hacia la planta de neutralización. Ver figura 26, 27 y 28

El flujo que no es captado por las cunetas va hacia el fondo del tajo y se infiltra al sistema de flujo subterráneo. Los flujos provenientes de la infiltración en el tajo son captados a través de las labores mineras y bombeados a superficie para ser conducidos a la planta neutralizadora.

Por otro lado, el macizo rocoso (rocas sedimentarias de la formación Chambará) que afloran en el sector este del tajo Raúl Rojas, lo constituyen rocas generalmente de moderada a alta permeabilidad, haciendo que el nivel freático en este sector se encuentre más tendido en comparación al sector W, donde las rocas del grupo Excélsior, volcánicas e intruidas, se comportan como medios de baja permeabilidad debido a los procesos de meteorización química de la roca, presentando niveles de agua con comportamiento más somero o superficial. Ambas unidades geológicas se encuentran dividida por la Falla Cerro de Pasco la cual presenta comportamiento hidráulico de estructura drenante, influenciando de manera directa la morfología de la superficie piezométrica, esta falla representa una vía preferente para el movimiento del flujo subterráneo, motivo por el cual conduce todas las aguas que interaccionan con esta y son conducidas hacia la mina subterránea.

El tajo abierto Raúl Rojas tiene una extensión de 123.84 Ha y una profundidad aproximada de 500 metros. Este tiene un régimen hidrológico superficial no teniendo interacción con el régimen de flujo subterráneo. Los procesos que se dan en las paredes del tajo están asociados principalmente por infiltración y escorrentía con escasa evaporación debido a la baja capacidad de retención del medio. Asimismo, se destaca que

Figura 26. Sector de Interés Pared Este – Tajo Raúl Rojas

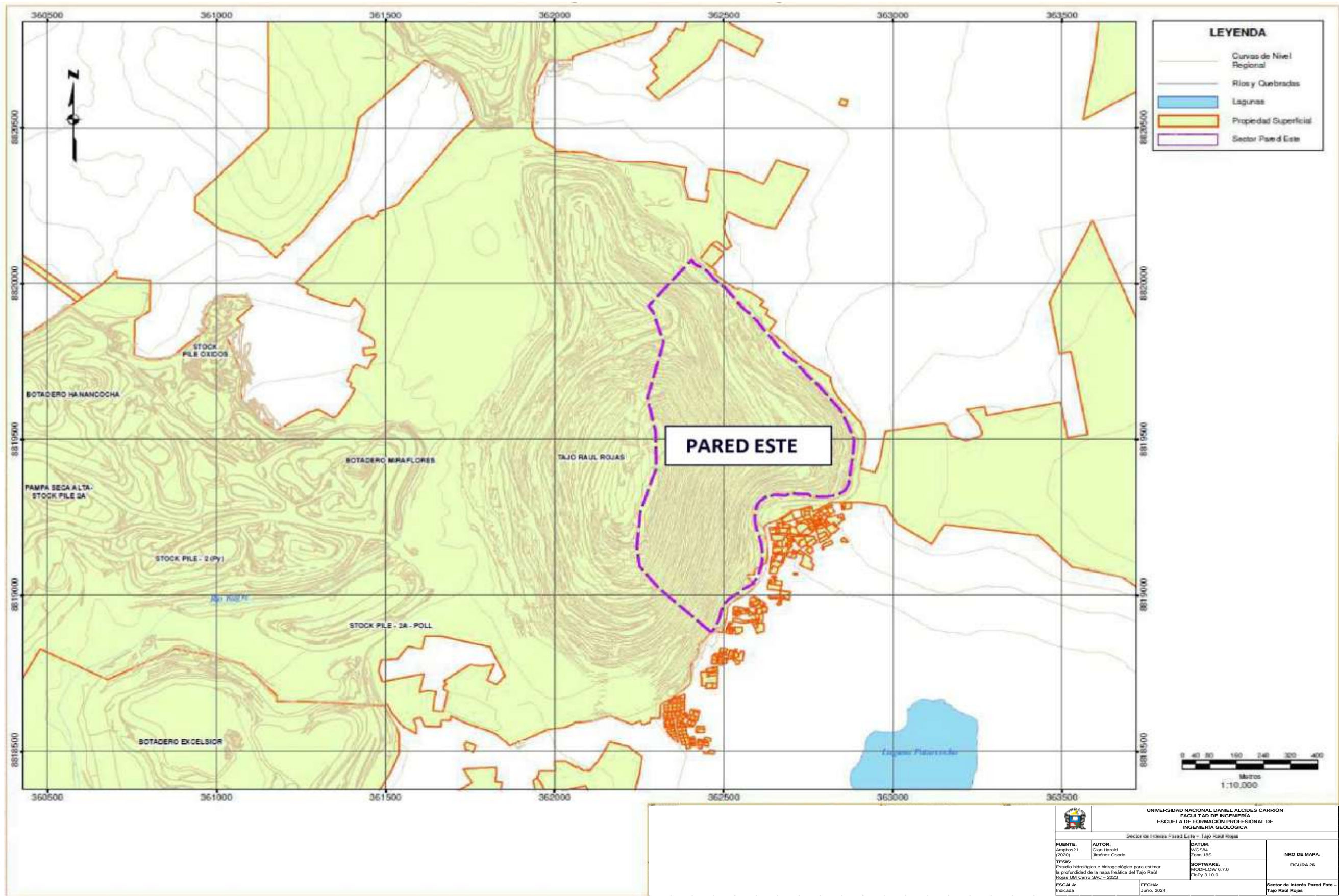


Figura 27. Labores Subterráneas Pared Este – Tajo Raúl Rojas

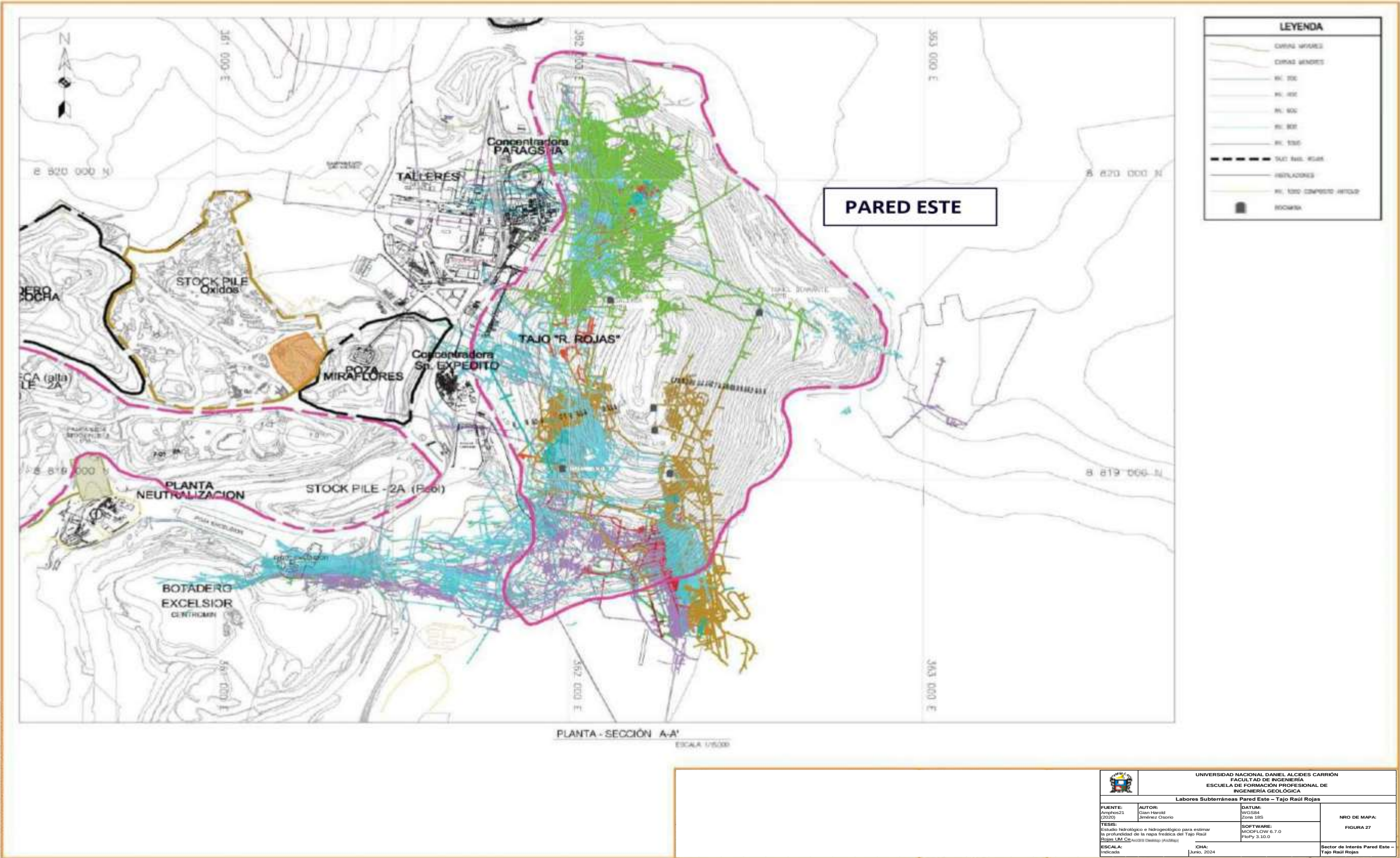
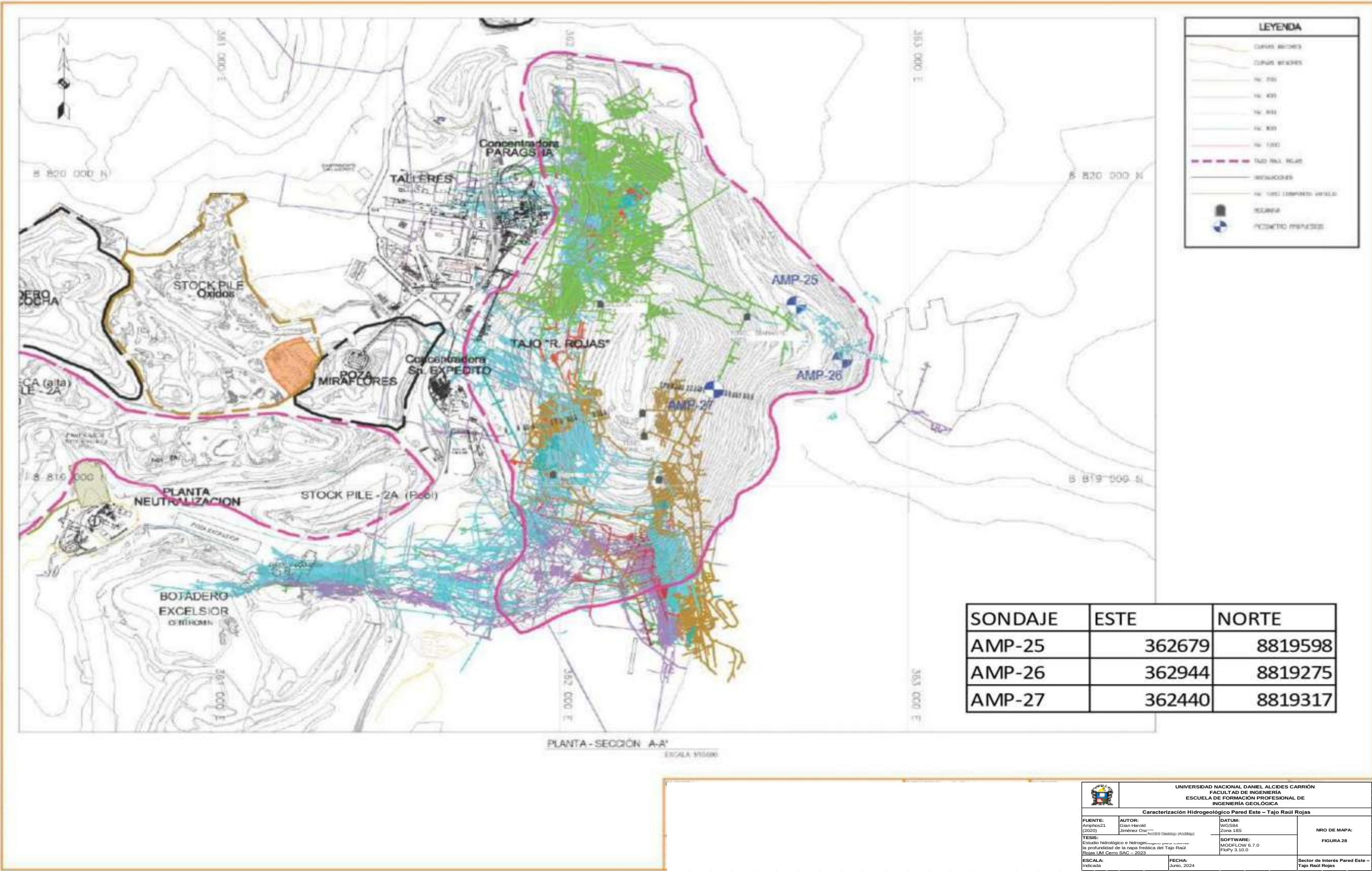


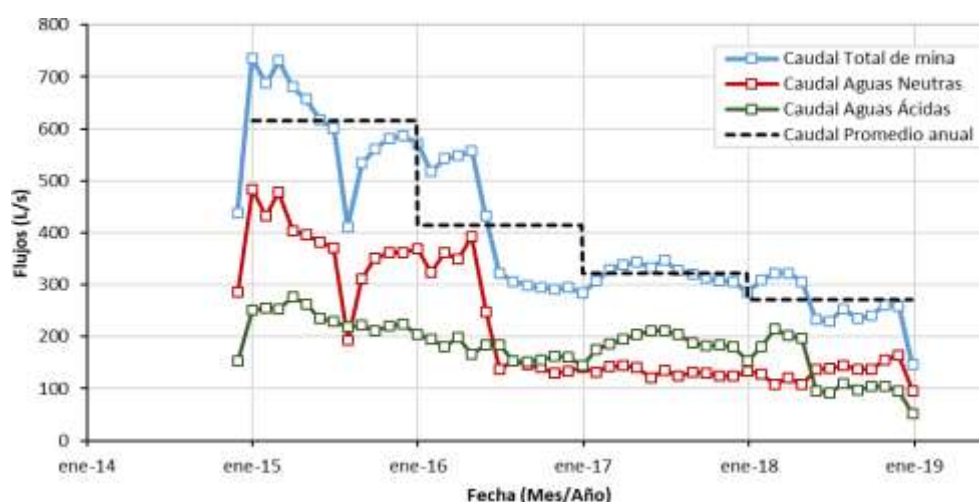
Figura 28. Caracterización Hidrogeológica Pared Este – Tajo Raúl Rojas



los procesos de escorrentía se presentan principalmente por aquellos sectores en los que la superficie del terreno presenta materiales más compactos pero las aguas terminan infiltrando hacia el subsuelo formando parte de la recarga de agua hacia las labores subterráneas que se encuentran por debajo.

La mina subterránea, ubicada específicamente por debajo del tajo Raúl Rojas, en la actualidad alcanza un flujo de drenaje promedio anual de 296 L/s, estos flujos están conformados por 02 grupos, diferenciados entre sí por su comportamiento químico (aguas neutras y ácidas). Sobre la base de lo manifestado por UM Cerro, la mayor cantidad de agua de drenaje de mina proviene de los niveles que interaccionan con los macizos rocosos sedimentarios, lo cual resulta coherente con el comportamiento hidráulico que presentan estos materiales, los cuales presentan un grado moderado de fracturación y en consecuencia una permeabilidad moderada a alta, asociada con la porosidad secundaria del medio. La Figura 14 muestra la evolución de los flujos de drenaje de la mina subterránea.

Figura 29. Evolución de los flujos de la mina subterránea



Fuente. Elaboración propia

La Figura 29 muestra la evolución de los flujos de la mina subterránea durante el año de estudio 2023, período en el cual se realizaron los registros y evaluaciones hidrogeológicas del Tajo Raúl Rojas.

Balance hídrico del Tajo Raúl Rojas

Para cuantificar los procesos descritos líneas arriba, se procedió a desarrollar el balance hídrico para para el Tajo.

La metodología empleada para el tajo Raúl es más simplificada ya que no incluye los dos volúmenes de control establecidos para representar los procesos de almacenamiento y transferencia. Para este caso se ha establecido la infiltración a partir de la separación de la precipitación mediante el método de la curva número.

La Tabla 11 presentan los resultados del balance para este componente. Asimismo, el Anexo B presenta el detalle de los balances realizados.

Tabla 11. Resultados del balance en el sector del Tajo Raúl

Componente	Flujo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tajo Raúl Rojas	Escorrentía superficial	43.0	42.1	44.8	19.0	4.6	1.2	0.3	1.4	10.5	28.1	31.1	39.5
	Escorrentía superficial que infiltra	43.0	42.1	44.8	19.0	4.6	1.2	0.3	1.4	10.5	28.1	31.1	39.5
	Infiltración	20.1	20.1	20.3	17.2	12.3	8.9	6.9	9.2	15.0	18.6	19.0	19.8
	Evaporación Real	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Recarga Subterránea	63.1	62.2	65.1	36.1	16.9	10.1	7.2	10.6	25.5	46.8	50.1	59.3

Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados del balance de aguas para el sector del tajo Raúl Rojas, se puede establecer que el aporte al sistema de flujo subterráneo es en promedio 37.8 L/s al año. Este flujo está conformado por infiltración generada a través del macizo rocoso y por la infiltración de las aguas provenientes de la escorrentía superficial. Amerita mencionar, que las aguas provenientes de la escorrentía superficial son colectadas y conducidas a través de cunetas, hasta el fondo del tajo para su posterior descarga e infiltración hacia el interior de la mina.

El flujo de aporte al sistema subterráneo profundo que proviene del sector del tajo representa el 13% del caudal total de drenaje de la mina.

Resultados del modelo numérico MODFLOW 6

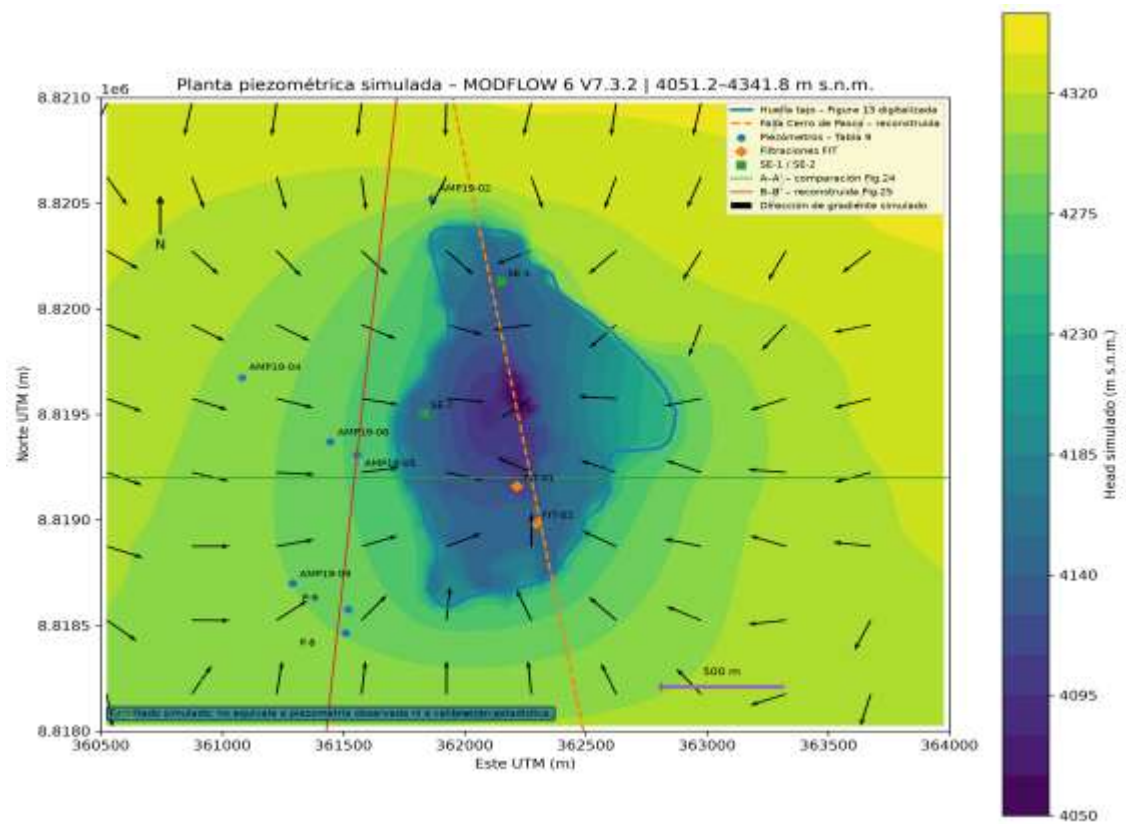
La corrida final del modelo numerico alcanzó terminación normal tanto en el estado estacionario como en los doce periodos de la simulación transitoria. El pre-check reportó 0 errores y 0 advertencias. En el estado estacionario, las cargas hidráulicas calculadas en el dominio activo variaron entre 4051.185 y 4341.793 m s.n.m., con una mediana de 4305.531 m s.n.m. En el último periodo transitorio los valores fueron 4051.205, 4305.531 y 4341.793 m s.n.m. para el mínimo, mediana y máximo, respectivamente.

Parámetro / resultado	Modelo final V7.3.2
Software de cálculo	MODFLOW 6.7.0 + FloPy
Discretización horizontal	50 × 50 m
Capas numéricas	8
Unidades hidrogeológicas	A2 / B2 / C1 / C2
Condiciones principales	RCHA, GHB, DRN y STO
Estado estacionario	Normal termination
Estado transitorio	12 periodos; Normal termination
Head estacionario min / med / max	4051.185 / 4305.531 / 4341.793 m s.n.m.
Head transitorio final min / med / max	4051.205 / 4305.531 / 4341.793 m s.n.m.

El balance de masas estacionario presentó RCHA = 1351.0172 m³/d, DRN = -1522.0693 m³/d y GHB = 171.0521 m³/d, con un residual de -1.54×10^{-7} m³/d. En el transitorio, los residuales mensuales permanecieron en magnitudes numéricamente despreciables; el residual relativo máximo de los doce periodos fue del orden de 2.37×10^{-8} %, lo que confirma el cierre numérico de las ecuaciones de flujo.

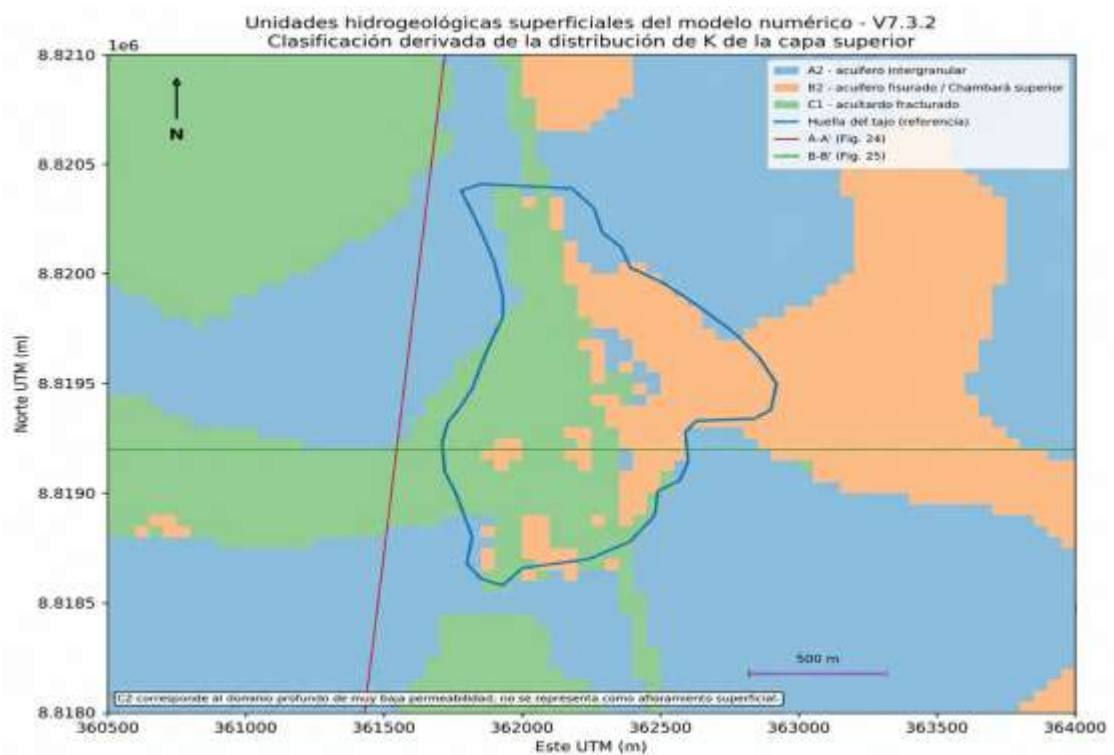
La distribución piezométrica resultante reproduce un gradiente hidráulico condicionado por la heterogeneidad de las unidades hidrogeológicas, la zona conductiva asociada a la Falla Cerro de Pasco, la conexión regional representada mediante GHB y la descarga equivalente de las labores mediante DRN. En el sector del tajo, el control de la primera celda saturada muestra una condición predominantemente drenada y evita interpretar como superficie freática una celda activa que se encuentre numéricamente seca.

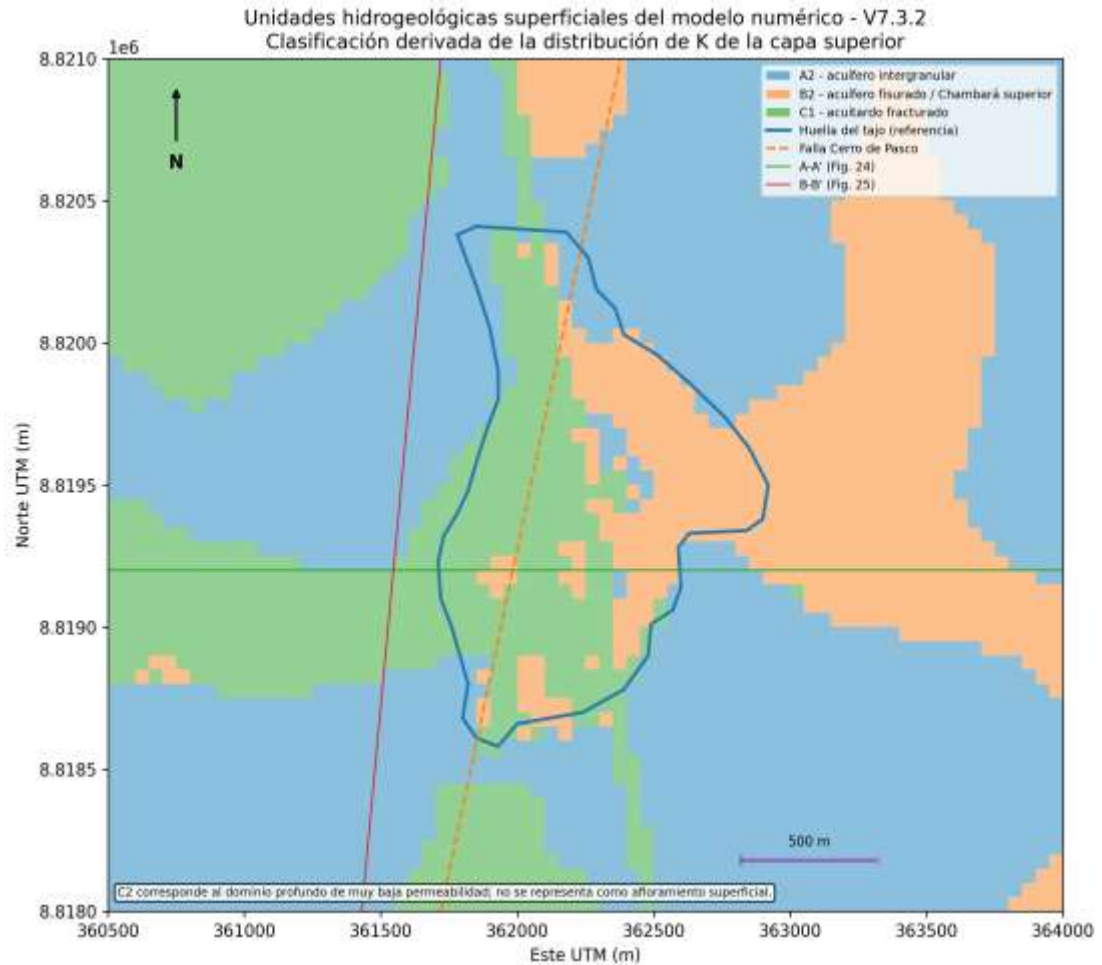
Figura 30. Carga hidráulica y flujo subterráneo calculados en estado estacionario



Fuente: Elaboración propia a partir de la corrida MODFLOW 6.7.0

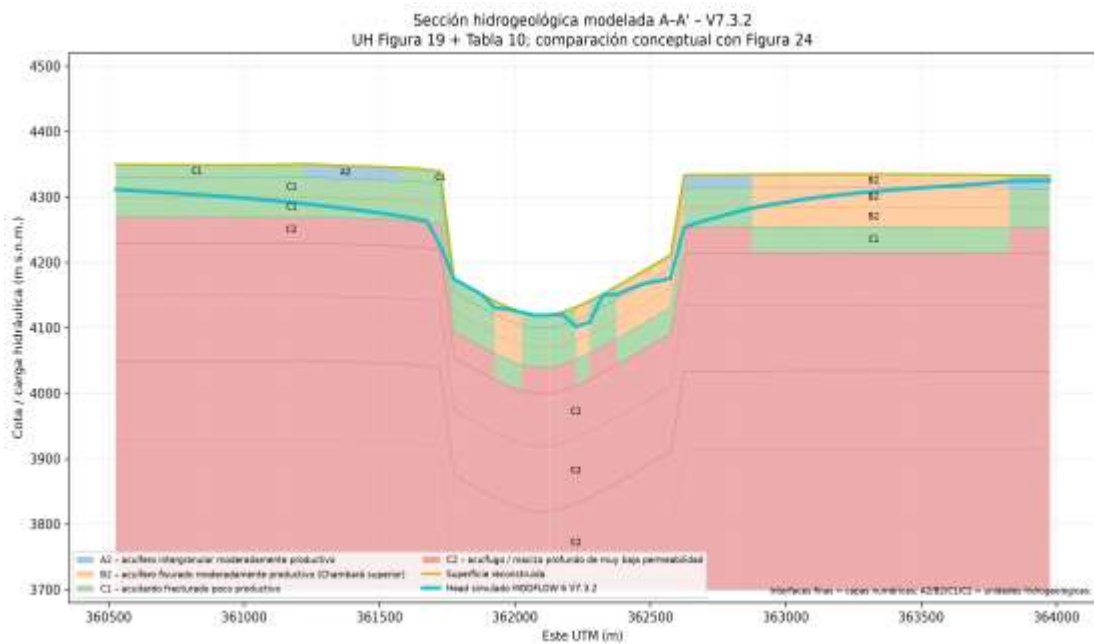
Figura 31. Unidades hidrogeológicas superficiales utilizadas en el modelo numérico





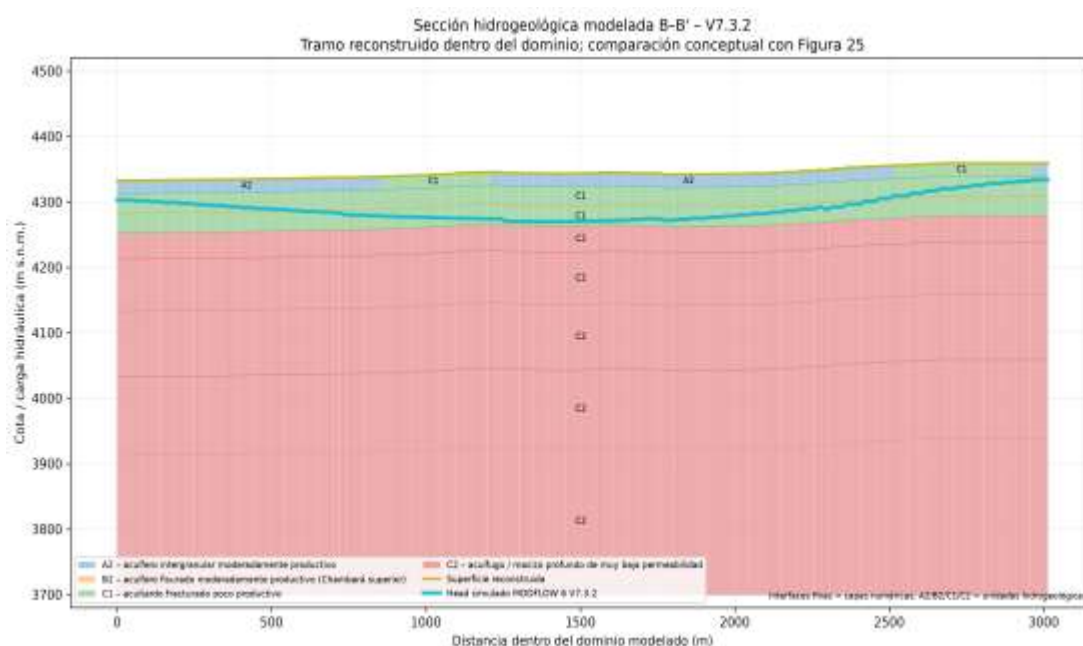
Fuente: Elaboración propia a partir de la corrida MODFLOW 6.7.0

Figura 32. Sección hidrogeológica-numérica A–A' del modelo MODFLOW 6



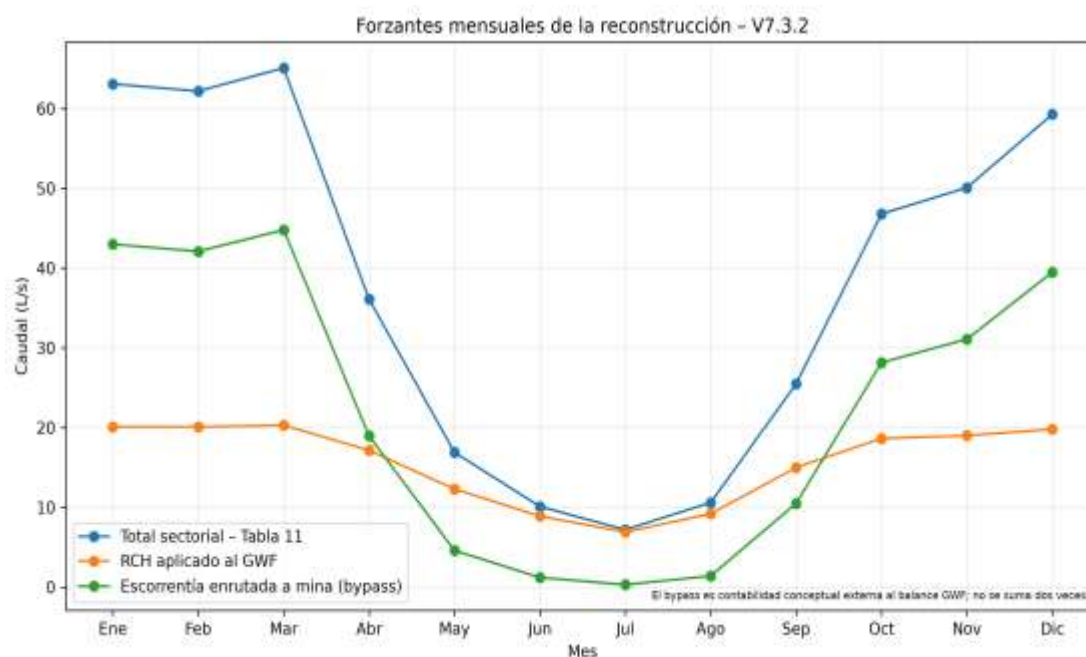
Fuente: Elaboración propia a partir de la corrida MODFLOW 6.7.0

Figura 33. Sección hidrogeológica-numérica B–B' del modelo MODFLOW 6.7.0



Fuente: Elaboración propia a partir de la corrida MODFLOW 6.7.0

Figura 34. Respuesta transitoria del modelo y forzantes mensuales de recarga



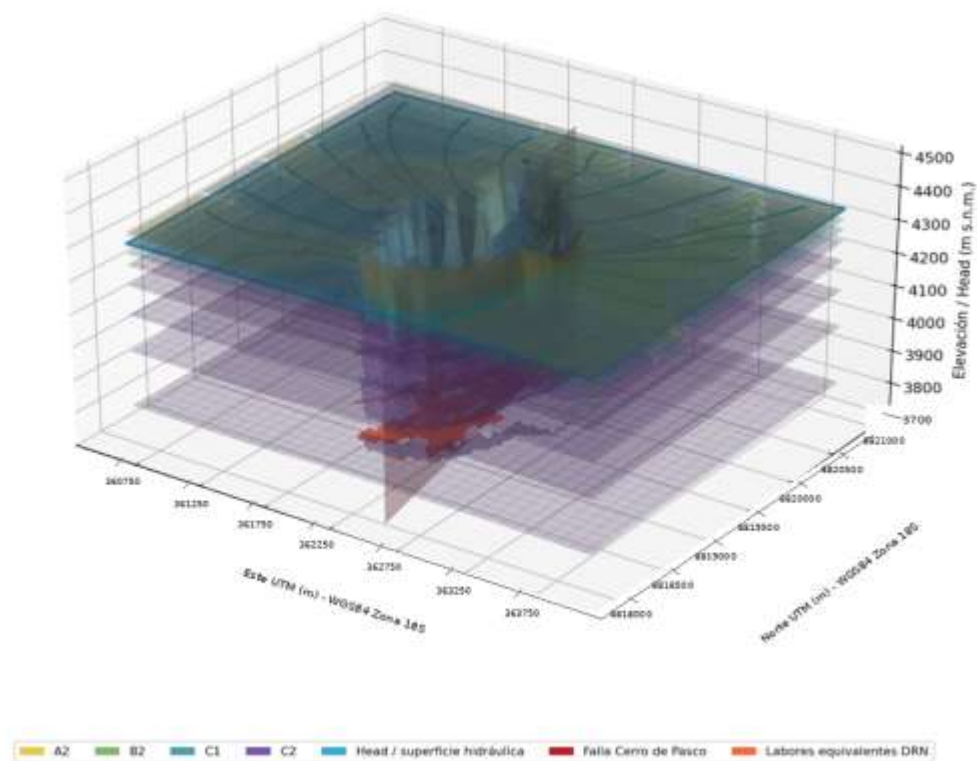
Fuente: Elaboración propia a partir de la corrida MODFLOW 6.7.0

La serie transitoria fue inicializada desde la solución estacionaria, por lo que la variación mensual representa la respuesta del sistema a los cambios de forzante y almacenamiento, sin introducir un desequilibrio artificial por condiciones iniciales incompatibles. Los mayores aportes del balance hídrico se concentran en enero, febrero,

marzo y diciembre, mientras que los menores corresponden a junio, julio y agosto. La respuesta de carga es amortiguada por el almacenamiento y por las condiciones de descarga del sistema minero.

El modelamiento numérico incorporó el aporte medio sectorial de 37.8 L/s determinado para el área de estudio, distribuyéndolo de acuerdo con la configuración hidrogeológica y las condiciones de drenaje representadas en el dominio. Los resultados obtenidos permitieron reproducir la respuesta del sistema de flujo subterráneo, la distribución de las cargas hidráulicas y el efecto del drenaje asociado a las labores mineras, manteniendo la consistencia con el balance hídrico establecido para el sector.

Figura 35. Vista tridimensional integrada del modelo hidrogeológico MODFLOW 6.7.0



Fuente: Elaboración propia a partir de la corrida MODFLOW 6.7.0 y de la geometría del modelo.

La vista tridimensional integra en una sola representación la topografía y huella del tajo, las unidades hidrogeológicas A2, B2, C1 y C2, las ocho capas numéricas, la zona conductiva asociada a la Falla Cerro de Pasco, los corredores equivalentes de

labores mineras representados mediante DRN, la condición regional GHB, la recarga RCHA, los puntos de control hidrogeológico y la superficie de carga hidráulica calculada. La simulación numérica permitió evaluar de manera integrada la respuesta del sistema frente al aporte hídrico medio sectorial de 37.8 L/s, reproduciendo su distribución entre la recarga efectiva del medio subterráneo y el drenaje asociado al sistema de mina. Los resultados muestran la influencia conjunta de las propiedades hidráulicas, la configuración estratificada del dominio y las condiciones de drenaje sobre la distribución de cargas y el comportamiento del flujo subterráneo. El caudal de 296 L/s corresponde al drenaje total de mina considerado como referencia del sistema hidrogeológico general y no representa una extracción local impuesta al dominio numérico.

4.2. Prueba de hipótesis

Hipótesis general

- **H0 (Hipótesis nula):** La profundidad de la napa freática en el Tajo Raúl Rojas no presenta variaciones significativas espaciales o temporales durante el periodo de estudio.
- **H1 (Hipótesis alternativa):** La profundidad de la napa freática en el Tajo Raúl Rojas presenta variaciones significativas espaciales o temporales durante el periodo de estudio.

Aceptando la hipótesis alterna.

4.3. Discusión de resultados

Profundidad de la napa freática y su relación con la estabilidad del tajo

Los resultados obtenidos evidencian que la dinámica del flujo subterráneo en el área de estudio está controlada principalmente por la litología, el grado de fracturamiento del macizo rocoso y la presencia de estructuras geológicas. Estos

resultados concuerdan con el comportamiento típico de sistemas hidrogeológicos en ambientes mineros, donde la permeabilidad secundaria asociada a fracturas y fallas condiciona la infiltración y circulación del agua subterránea. Asimismo, la ausencia de saturación en profundidad se relaciona con la influencia de las labores subterráneas, las cuales actúan como sistemas de drenaje que modifican el régimen natural del acuífero.

La evidencia geofísica e hidrogeológica muestra que el sector evaluado presenta un comportamiento predominantemente drenado. El SEV-17 no registró agua hasta aproximadamente 80 m de investigación; este dato constituye una observación local y no debe extrapolarse a toda la huella del tajo. La simulación MODFLOW 6 es coherente con la existencia de descarga hacia labores profundas, aunque la ausencia de una red de observaciones piezométricas suficiente impide utilizar el modelo como una calibración cuantitativa de la superficie freática.

Desde el punto de vista geotécnico, la relevancia hidrogeológica se concentra en los sectores donde la carga hidráulica puede aproximarse a la superficie o generar condiciones localmente presurizadas. Por ello, los resultados numéricos se interpretan como soporte para identificar tendencias de flujo y zonas que requieren control piezométrico, y no como sustituto de la instrumentación geotécnica.

Factores geológicos e hidrológicos que influyen en la dinámica de la napa freática

De acuerdo con el **Objetivo Específico 2**, se determinó que las variaciones de la napa freática están controladas principalmente por:

- **Composición del subsuelo:** Las áreas con mayor permeabilidad (ej. gravas o arenas) presentan fluctuaciones más rápidas en respuesta a la recarga hídrica, mientras que las zonas con arcillas o rocas compactas muestran una respuesta más lenta.

- **Estructura geológica:** Las fracturas y fallas identificadas actúan como conductos preferenciales para el flujo subterráneo, generando anomalías locales en la profundidad de la napa freática (ej. sectores con niveles inesperadamente altos).
- **Recarga de acuíferos:** la serie mensual de la tesis presenta una marcada estacionalidad, con mayores aportes durante el periodo húmedo y mínimos entre junio y agosto. La simulación transitoria reproduce una respuesta amortiguada de las cargas hidráulicas frente a esta variación, condicionada por el almacenamiento, la heterogeneidad hidráulica y la descarga representada por las labores mineras.

La comparación entre el modelo conceptual y la corrida numérica indica que la distribución de cargas no depende únicamente de la recarga, sino también de los contrastes de conductividad entre A2, B2, C1 y C2, de la conectividad estructural asociada a la Falla Cerro de Pasco y de las condiciones de descarga hacia las labores. Esta respuesta es consistente con el funcionamiento hidrodinámico planteado en la investigación.

Implicancias para la gestión sostenible del recurso hídrico

- El estudio proporciona evidencia clave para:
- **Mitigación de riesgos:** La identificación de zonas con alta probabilidad de saturación permite priorizar áreas para drenaje o monitoreo en tiempo real, reduciendo el riesgo de inestabilidad.
- **Planificación minera:** Los datos de variación temporal sugieren que las operaciones en sectores críticos deberían ajustarse a periodos de menor nivel freático (ej. estación seca).
- **Sostenibilidad hídrica:** La delimitación de zonas de recarga y flujo subterráneo contribuye a estrategias de gestión que eviten el agotamiento del acuífero, alineándose con estándares internacionales (ej. ICMM, 2022).

La determinación de la profundidad del nivel freático mediante métodos geofísicos corresponde a una interpretación indirecta basada en contrastes de resistividad, por lo que los resultados deben ser considerados como una aproximación del comportamiento hidrogeológico del subsuelo.

El modelo MODFLOW 6.7.0 complementa esta interpretación al resolver numéricamente la distribución de carga y los términos de flujo bajo un conjunto explícito de condiciones de borde. Sin embargo, la concordancia conceptual no debe confundirse con calibración: la Falla Cerro de Pasco, la anisotropía vertical, los parámetros de almacenamiento, la conductancia de los DRN y la condición regional GHB conservan incertidumbre. En consecuencia, el principal valor del modelo final es demostrar de manera reproducible cómo la recarga, la heterogeneidad hidrogeológica y el drenaje minero interactúan para controlar las cargas hidráulicas y la dirección del flujo subterráneo.

CONCLUSIONES

- Se determinó que la profundidad de la napa freática en el tajo Raúl Rojas está controlada por la interacción entre la litología, la estructura geológica y la conectividad hidráulica del macizo rocoso, presentando variaciones espaciales asociadas a zonas de mayor permeabilidad y fracturamiento.
- Se determinó que el sector evaluado presenta una condición predominantemente drenada, sin evidencias de saturación hasta aproximadamente los 80 m desde el fondo del tajo, debido a la interconexión con labores subterráneas que actúan como vías de descarga hídrica, reduciendo la presión de poros en el macizo.
- Se comprobó que las características geológicas del área, particularmente la presencia de formaciones sedimentarias y rocas intrusivas separadas por estructuras como la Falla Cerro de Pasco, condicionan el comportamiento del flujo subterráneo, generando diferencias en la permeabilidad y en la distribución del nivel freático entre sectores.
- El balance hídrico permitió estimar una recarga promedio de 37.8 L/s al sistema subterráneo, lo que evidencia la influencia de la hidrogeología regional en el flujo de agua dentro del tajo y su relación con los sistemas de drenaje de la mina.
- La simulación ejecutada con MODFLOW 6.7.0 confirmó la viabilidad del modelo conceptual bajo las condiciones representadas. La simulación estacionaria y los doce periodos transitorios finalizaron normalmente y presentaron balances de masas cerrados. En el estado estacionario, las cargas hidráulicas del dominio activo variaron entre 4051.185 y 4341.793 m s.n.m. La respuesta numérica muestra que la distribución de cargas y el flujo subterráneo están controlados conjuntamente por la recarga, los contrastes de conductividad de las unidades hidrogeológicas, la Falla Cerro de Pasco, la conexión hidráulica regional y la descarga equivalente hacia las labores mineras. Estos resultados corresponden a una implementación numérica reproducible y conceptualmente

condicionada, no a una calibración estadística.

- Se concluyó que la interacción entre la litología carbonatada y el flujo hídrico favorece la predominancia de aguas neutras, lo cual refleja la influencia de la permeabilidad y la conectividad hidráulica en la dinámica del sistema acuífero.
- En ese sentido, la hipótesis planteada es aceptada, dado que los resultados evidencian una relación directa entre las condiciones geológicas, hidrogeológicas y la profundidad de la napa freática en el área de estudio.

RECOMENDACIONES

Con base en el análisis presentado y en las conclusiones descritas previamente se recomienda lo siguiente:

- Implementar la instalación de piezómetros adicionales en el sector Este de la UM Cerro de Pasco y en las labores subterráneas existentes, priorizando los macizos rocosos sedimentarios, con la finalidad de mejorar la caracterización hidrogeológica y fortalecer la evaluación de las condiciones geotécnicas de la pared Este del tajo.
- Gestionar los permisos administrativos y las coordinaciones con las comunidades para garantizar el acceso a las zonas propuestas de investigación, cuyas ubicaciones se detallan en el Anexo C, con el fin de asegurar la ejecución de los estudios complementarios.
- Continuar con el monitoreo sistemático de los flujos provenientes de la mina, con la finalidad de evaluar su comportamiento y variaciones en el tiempo, y fortalecer la gestión del agua subterránea en el área de estudio.
- Evaluar la posible presencia de procesos kársticos asociados a los macizos rocosos sedimentarios, principalmente en rocas carbonatadas del sector Este del tajo, con el fin de identificar zonas de alta permeabilidad que puedan influir en el flujo subterráneo.
- Optimizar el manejo de los canales de colección de agua de precipitación, con la finalidad de cuantificar adecuadamente la proporción de agua que infiltra y la que escurre hacia el fondo del tajo, y su posterior aporte al sistema subterráneo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brunet Moret, Y., 1979. Homogenización de la precipitación, Cuadernos Hidrológicos Vol. XVI, nº 3 y 4, p. 147-170.
- Chen, (1983). ASCE, ISSN 0733-9429/83/0012-1603/\$01.00. Paper No. 18441.
- Chow, (1994). Hidrología Aplicada. McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A. ENFEN, (2012). Índice Costero El Niño (ICEN), series de tiempo descargadas de: <http://www.met.igp.gob.pe/datos/icen.txt>
- Hirsch, Robert M., et al. "Statistical analysis of hydrologic data." Handbook of hydrology. (1992): 17-1.
- IILA-SENAMHI-UNI, (1983). Convenio de cooperación técnica Instituto italo-latino americano – Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – Universidad Nacional de Ingeniería (IILA-SENAMHI-UNI). Estudio de la Hidrología del Perú. Lima, Perú.
- Instituto Geofísico del Perú. Índice de monitoreo del clima. Índices E y C descargadas de: <http://www.met.igp.gob.pe/variabclim/indices.html>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. Índice de Oscilación del Sur, series de tiempo descargada de: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>
- OMM, (1994). Guía de Prácticas Hidrológicas (quinta edición) – Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. Organización Meteorológica Mundial (OMM). OMM-Nº 168.
- ONERN, (1976). Mapa ecológico del Perú – Guía Explicativa. Lima, Perú.
- ONERN, (1980). Inventario y evaluación nacional de aguas superficiales. Lima, Perú. Salas, Jose D. "Analysis and modeling of hydrologic time series." Handbook of hydrology 19 (1993): 1-72
- Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., and Dewitte, B. (2011), ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, Geophys. Res. Lett., 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364.
- THORNTHWAITE, C. W., «An approach toward a rational classification of climate». The Geographical Review, val. 38, 1948, págs. 55-94.
- Vauchel, P. (2009). HYDRACCES 4.5. Software para manejo y procesamiento de información hidrometeorológica. www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.

ANEXOS

Anexo 1. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Animón (2002 - 2008)

Estación: Meteorológica
 Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 345232
 Norte (m): 8781812
 Altitud (msnm): 4260

Dpto : Pasco
 Prov : Pasco
 Dist : Huayllay

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2002	100.0	99.0	176.0	87.5	49.0	25.0	0.0	9.5	4.1	24.2	143.7	114.8	832.8
2003	91.5	172.4	161.0	96.4	35.1	0.0	0.0	22.3	23.4	32.4	40.6	182.8	857.9
2004	65.5	228.1	130.2	64.7	20.2	34.0	13.4	28.4	51.9	122.2	86.0	212.9	1057.5
2005	106.3	162.5	167.0	63.4	8.0	0.0	5.0	28.0	0.0	104.4	0.0	87.8	732.4
2006	161.0	109.2	146.4	118.2	5.4	19.8	10.0	36.4	70.0	62.8	112.8	117.2	969.2
2007	0.0	108.8	84.2	0.0	0.0	0.0	13.8	14.0	70.0	134.4	115.6	0.0	540.8
2008	122.0	110.2	72.6	35.8	5.4	2.0	2.4	16.0	22.2	133.2	64.2	22.2	608.2
N° de Datos	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Curtois	1.7	0.2	-1.2	0.1	-0.3	-1.6	-2.1	-1.1	-2.0	-2.0	-0.5	-1.0	-1.1
3 ^{er} Cuartil	114.2	167.5	164.0	92.0	27.7	22.4	11.7	28.2	61.0	127.7	114.2	150.0	914
Mediana	100.0	110.2	146.4	64.7	8.0	2.0	5.0	22.3	23.4	104.4	86.0	114.8	833
1 ^{er} Cuartil	78.5	109.0	107.2	49.6	5.4	0.0	1.2	15.0	13.2	47.6	52.4	55.0	670
Máximo	161.0	228.1	176.0	118.2	49.0	34.0	13.8	36.4	70.0	134.4	143.7	212.9	1057.5
Promedio	92.3	141.5	133.9	66.6	17.6	11.5	6.4	22.1	34.5	87.7	80.4	105.4	799.8
Mínimo	0.0	99.0	72.6	0.0	0.0	0.0	0.0	9.5	0.0	24.2	0.0	0.0	540.8
Desv. Est.	50.2	47.9	40.8	39.6	18.3	14.4	6.0	9.5	29.5	47.3	49.4	77.6	186.1
Coef. Asi.	-0.8	1.1	-0.8	-0.6	1.0	0.7	0.2	0.2	0.2	-0.4	-0.5	0.0	-0.1
Coef. Var.	0.5	0.3	0.3	0.6	1.0	1.2	0.9	0.4	0.9	0.5	0.6	0.7	0.2

Fuente:

2002-2008: Capítulo III - Descripción de la Línea Base - Modificación del estudio de impacto ambiental Mina Alpacar (Geoservice,

x.x 2011) Valor dudoso.

Anexo 2. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Carhuacayan (1986- 2018)

Estación: Meteorológica
Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 359888
Norte (m): 8761602
Altitud (msnm): 4127

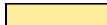
Dpto : Junín
Prov : Yauli
Dist : Santa Bárbara de Carhuacayan

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1986	164.7	187.2	150.9	163.0	28.8	0.0	10.2	24.6	72.4	27.0	35.7	197.4	1061.9
1987	140.2	154.9	166.9	63.6	37.7	32.9	45.0	20.5	14.4	57.6	86.3	90.7	910.7
1988	204.1	95.6	85.7	63.1	36.1	4.3	0.0	0.0	0.0	84.9	58.6	0.0	632.4
1989	172.7	191.1	94.8	48.4	14.5	4.4	2.5	0.0	2.5	18.8	34.1	26.3	610.1
1990	63.2	39.8	47.2	13.8	40.6	31.4	22.5	11.6	87.1	60.4	48.8	51.1	517.5
1991	60.9	57.5	228.1	40.0	16.4	25.0	2.5	0.0	86.4	76.0	96.1	72.7	761.6
1992	15.9	97.9	174.1	43.0	4.5	24.0	3.6	0.0	0.0	164.0	69.0	49.0	645.0
1993	141.2	203.9	145.2	111.4	21.4	4.8	1.8	14.1	83.1	117.2	201.6	178.8	1224.5
1994	225.5	80.0	120.5	150.6	20.2	8.1	15.7	12.6	7.7	85.4	163.7	65.1	955.1
1995	96.4	129.5	159.0	107.1	29.9	0.0	0.0	3.8	31.3	121.0	79.9	125.0	882.9
1996	101.1	105.9	128.7	110.5	45.0	2.7	0.9	8.4	9.2	42.4	59.8	102.7	717.3
1997	119.3	242.6	98.1	61.5	5.9	8.3	6.5	0.0	45.5	28.1	90.6	115.2	821.6
1998	110.0	160.5	127.2	68.9	26.6	2.5	0.0	0.0	94.1	95.6	41.0	98.7	825.1
1999	153.5	220.1	156.3	146.3	55.5	15.8	37.0	2.4	79.9	82.9	69.6	79.5	1098.8
2000	261.6	171.6	167.3	71.5	60.3	2.0	25.0	26.6	17.7	146.0	73.5	133.7	1156.8
2001	207.1	121.9	212.7	61.6	39.2	8.1	13.4	5.8	97.0	88.9	94.0	127.0	1076.7
2002	76.8		192.5	131.4	27.0	29.5	17.5	14.2	56.4		157.2	154.8	857.3
2003	118.7	114.9	187.2	90.9	52.1	15.4	0.0	16.8	49.4	52.7	49.3	143.8	891.2
2004	52.7	138.4	78.8	28.8	69.8	19.7	11.7	66.6	47.1	133.2	76.5	168.9	892.2
2005	90.8	102.1	138.7	67.0	42.5	0.6	0.0	23.9	17.0	101.3	56.9	104.6	745.4
2006	193.5	108.6	168.3		13.3	22.7	4.0	25.7	60.4	121.1	100.5	249.6	1067.7
2007	125.7	150.6	262.1	97.7	43.9	0.0	0.0	3.8	20.8	122.8	59.3	134.1	1020.8
2008	135.3	90.8	123.8	45.1	2.4	5.9	1.0	7.8	37.5	142.7	38.2	105.7	736.2
2009	164.0	146.0	252.1	77.3	56.5	3.3	8.9	22.3	26.7	106.5	146.3	90.2	1100.1
2010	178.1	162.3	143.7	52.1	14.9	4.7	3.2	9.0	19.2	80.4	96.0	157.1	920.7
2011	97.5	224.0	140.3	91.3	59.7	0.0	22.8	13.2	65.4	38.6	124.3	221.9	1099.0
2012	128.9		92.3	154.4	42.0	3.8	8.5	7.2	105.8	74.7	93.5	154.2	865.3
2013	150.3	155.4	206.2	83.3	40.0	23.0	19.2	31.6	45.1	87.2	63.3	122.1	1026.7
2014	204.4	161.6	161.2	72.1	75.5	4.0	9.3	15.5	63.6	67.2	98.8	138.7	1071.9
2015	167.6	87.0	159.5	136.8	88.3	68.4	22.4	29.2	75.0	85.4	113.4	167.9	1200.9
2016	63.7	125.8	124.3	122.3	50.0	49.0	29.0	12.9	33.1	82.9	23.0	120.9	836.9
2017	173.7	169.7	162.8	53.7	50.8	49.0	24.6	18.0	27.3	70.4	83.1	138.8	1021.9
2018	142.3	134.2	122.4	122.7	50.8	51.1	44.0	19.5	29.7	81.8	89.5	127.2	1015.2
N° de Datos	33	31	33	32	33	33	33	33	33	32	33	33	33
Curtosis	-0.2	-0.3	0.3	-0.8	-0.2	1.3	0.4	6.2	-1.1	-0.3	1.3	0.6	-0.6
3 ^{er} Cuartil	172.7	166.0	168.3	114.1	50.8	24.0	22.4	20.5	72.4	109.2	96.1	154.2	1068
Mediana	140.2	138.4	150.9	74.7	40.0	8.1	8.9	12.9	45.1	83.9	79.9	125.0	911
1 ^{er} Cuartil	97.5	104.0	123.8	59.6	21.4	3.3	1.8	3.8	19.2	65.5	58.6	90.7	822
Máximo	261.6	242.6	262.1	163.0	88.3	68.4	45.0	66.6	105.8	164.0	201.6	249.6	1224.5
Promedio	136.4	139.7	150.9	86.0	38.2	15.9	12.5	14.2	45.7	85.8	84.0	121.6	930.9
Mínimo	15.9	39.8	47.2	13.8	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	18.8	23.0	0.0	517.5
Desv. Est.	55.3	48.7	48.2	39.6	20.9	17.8	13.0	13.4	31.3	35.8	40.1	52.9	180.1
Coef. Asi.	0.0	0.1	0.3	0.3	0.2	1.4	1.1	1.9	0.3	0.2	1.1	0.0	-0.3
Coef. Var.	0.4	0.3	0.3	0.5	0.5	1.1	1.0	0.9	0.7	0.4	0.5	0.4	0.2

Fuente:

1986-1997: Descargado de la página web del ANA (<http://snirh.ana.gob.pe/sadho/visorMapa.aspx>), operador:
SENAMHI 1998-2018: Data adquirida del SENAMHI (Amphos21 , Febrero 2019)

Sin dato.



Anexo 3. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Carhuamayo (1952 - 1994)

Estación: Meteorológica
Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 385256
Norte (m): 8793036
Altitud (msnm): 4150

Dpto : Junin
Prov : Junin
Dist : Carhuamayo

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
1952	78.2	159.1	106.2	75.0	21.7	25.9	1.1	12.4	62.0	88.5	90.3	82.0	802.4
1953	139.5	198.9	115.2	56.6	14.7	11.2	2.7	9.3	24.3	82.4	93.2	121.5	869.5
1954	175.9	89.3	86.2	33.9	49.2	11.5	4.9	8.8	41.8	5.1	84.2	132.3	723.1
1955	64.1	154.4	168.1	30.4	46.4	3.8	0.6	4.6	36.5	58.5	12.4	40.5	620.3
1956	139.2	29.3	20.4	79.9	38.4	3.8	12.1	96.0	60.4	66.8	68.5	34.0	648.8
1957	110.4	157.1	63.4	60.4	39.4	20.2	11.2	36.5	62.6	38.2	59.0	85.8	744.2
1958	120.8	108.6	112.9	39.5	30.0	0.9	2.5	10.5	20.3	85.2	63.5	80.8	675.5
1959	69.1	116.8	176.3	61.1	41.0	14.0	2.8	1.9	18.3	100.6	20.4	164.5	786.8
1960	144.0	62.5	32.2	59.2	37.1	0.0	8.7	31.9	27.9	89.1	132.6	61.0	686.2
1961	150.5	120.0	90.9	89.2	67.8	3.4	2.3	29.5	11.9	22.1	70.1	175.3	833.0
1962	132.6	29.8	142.1	23.4	11.6	8.3	0.7	18.4	8.0	23.7	90.2	113.1	601.9
1963	126.4	155.1	89.6	56.7	11.0	5.6	4.7	20.0	42.0	30.2	52.3	71.4	665.0
1964	109.2	129.7	102.3	10.7	25.3	0.0	11.9	17.9	29.5	78.4	93.9	81.5	690.3
1965	64.0	117.8	114.5	60.0	7.9	5.1	8.1	20.5	68.1	74.1	42.9	100.0	683.0
1966	116.7	75.1	105.3	71.2	82.3	0.0	0.0	3.1	16.3	38.3	83.3	82.7	674.3
1967	55.5	154.6	161.9	21.2	17.4	6.6	12.1	19.9	5.0	38.9	23.5	79.1	595.7
1968	64.0	81.7	71.7	9.7	10.4	8.1	15.6	31.9	40.4	41.1	45.4	93.9	513.9
1969	99.5	153.0	62.3	64.5	3.9	26.7	12.7	24.7	30.5	39.7	60.3	101.5	679.3
1970	136.7	83.6	64.7	74.2	21.9	7.6	7.4	2.1	36.2	61.5	63.5	102.7	662.1
1971	118.4	49.9	48.0	17.7	20.5	3.2	1.3	3.1	21.5	95.4	41.5	124.7	545.2
1972	120.6	95.9	141.1	67.6	33.4	10.2	12.7	24.6	45.6	49.4	47.6	81.9	730.6
1973	156.7	144.2	157.9	51.9	23.1	24.5	32.3	59.5	40.0	104.8	95.7	126.3	1016.9
1974	212.5	168.6	109.4	33.0	1.3	29.3	6.5	21.9	16.0	50.6	31.5	60.4	741.0
1975	130.6	170.3	119.3	67.3	34.3	3.3	15.8	21.5	65.8	68.0	79.0	112.7	887.9
1976	125.8	119.7	101.7	45.4	17.0	21.6	6.8	3.7	47.0	37.3	67.3	66.6	659.9
1977	83.0	111.7	63.3	62.0	42.0	15.1	14.2	15.5	36.6	37.3	168.7	98.7	748.1
1978	142.2	163.3	113.9	68.0	32.7	5.0	5.3	3.5	73.3	35.5	122.9	82.0	847.6
1979	73.3	147.7	136.6	70.9	24.5	11.4	12.1	39.6	45.0	71.0	82.1	74.4	788.6
1980	75.1	135.9	76.0	37.6	30.2	3.8	15.6	2.2	13.0	78.7	45.9	110.1	624.1
1981	108.7	135.4	104.0	30.6	34.2	17.2	1.3	49.0	44.2	140.9	110.9	138.7	915.1
1982	129.3	158.9	71.8	96.1	24.5	7.2	8.1	22.1	36.8	109.3	134.9	79.9	878.9
1983	118.2	53.5	97.8	89.3	18.5	56.9	5.8	8.0	46.7	53.0	32.8	98.5	679.0
1984	135.8	211.1	62.4	83.2	19.2	21.7	5.0	26.9	25.7	50.6	79.7	136.4	857.7
1985	90.3	94.2	80.8	101.7	17.7	10.4	12.0	10.2	64.8	78.0	83.3	89.8	733.2
1986	119.3	160.3	166.0	113.3	53.1	11.4	4.1	20.8	45.8	82.4	74.0	64.6	915.1
1987	206.3	61.9	68.1	38.4	48.0	12.2	10.4	8.3	46.6	52.3	50.3	113.6	716.4
1988	243.8	109.9	65.7	82.8	13.3	0.5	0.8	0.7	20.7	53.2	64.1	110.5	766.0
1989	209.6	153.2	132.5	51.3	22.2	21.0	1.0	36.8	52.2	63.0	49.7	65.5	858.0
1990	126.0	85.0	16.3	73.8	27.2	70.4	6.2	16.8	64.3	146.8	94.0	67.6	794.4
1991	85.9	64.1	101.9	47.0	20.6	14.6	1.9	0.5	42.3	36.1	61.6	67.6	544.1
1992	54.0	86.4	79.9	37.5	6.6	25.1	6.1	26.4	60.3	98.8	45.2	51.7	578.0
1993	133.7	154.4	148.4	56.6	43.8	13.5	20.7	15.6	76.2	61.3	135.3	94.4	953.9
1994	139.1	145.9	120.3	86.2	86.2	0.3	0.3	5.0	35.8				
N° de Datos	43	43	43	43	43	43	43	43	43	42	42	42	42
Curtosis	0.8	-0.6	-0.4	-0.5	1.8	7.1	3.4	6.7	-0.8	0.5	0.6	0.5	-0.4
3er Cuartil	139.2	154.5	119.8	74.0	38.9	18.7	12.1	25.6	49.6	82.4	90.3	112.2	825
Mediana	120.8	120.0	101.9	60.0	24.5	10.4	6.2	17.9	40.4	61.4	67.9	87.8	727
1er Cuartil	88.1	85.7	69.9	38.0	17.6	3.8	2.4	6.5	25.0	39.1	48.1	72.2	663
Máximo	243.8	211.1	176.3	113.3	86.2	70.4	32.3	96.0	76.2	146.8	168.7	175.3	1016.9
Promedio	121.7	119.9	99.3	57.8	29.6	13.3	7.6	19.6	39.7	64.7	72.6	93.3	739.2
Mínimo	54.0	29.3	16.3	9.7	1.3	0.0	0.0	0.5	5.0	5.1	12.4	34.0	513.9
Desv. Est.	43.3	44.2	39.3	24.8	18.8	14.0	6.5	18.1	18.7	30.5	33.7	30.4	118.4
Coef. Asi.	0.7	-0.3	0.0	0.0	1.2	2.4	1.4	2.1	0.1	0.7	0.7	0.6	0.3
Coef. Var.	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	1.1	0.9	0.9	0.5	0.5	0.5	0.3	0.2

Fuente:

1952-1994: Evaluación Hidrológica - Estudio de Ingeniería Básica del Depósito de Relaves Huachuacaja - Mina Colquijirca (Golder, Setiembre

2010) Sin dato.

Anexo 4. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Cerro de Pasco (1975 - 2018)

Estación: Meteorológica

Este (m): 363291

Dpto : Pasco

Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Norte (m): 8818795

Prov : Pasco

Altitud (msnm): 4260

Dist : Chaupimarca

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1975	122.0	207.0	116.0	65.0		18.5	15.5	30.0	52.5	59.0	62.3	145.5	893.3
1976		41.8			340.0	211.0	63.0	191.0	180.0	123.0	86.0	213.0	
1977	256.0	276.0	223.0	76.0	57.0	17.0	14.0	95.0	50.0	90.0	180.0	72.0	1406.0
1978													
1979		134.0	304.0		59.0	3.0			88.0	97.0	209.0	152.0	
1980	215.0	272.0	287.0		69.0		67.4	39.0	64.0	314.0	260.0	289.0	
1981	381.0	543.0	231.0	171.0	40.0	26.0	6.0	159.0	94.0	250.0	438.0	230.0	2569.0
1982													
1983	309.0	197.0	310.0	178.0		92.0	30.0	46.0	110.0	206.0	269.6	226.0	1973.6
1984	252	434.0	272.0	102.0	42.0	55.0	31.0	57.0	68.0	132.0	220.0	90.0	1755.0
1985	136.0	92.0	142.0		26.0	48.0	68.0	44.0		10.0	161.0	139.0	866.0
1986	261.0	202.0	200.0	85.0	69.0	24.0	15.0	119.0	174.0	222.0	234.0	262.4	1867.4
1987	239.9	157.9	150.9	51.9	73.9	36.7	41.2	31.4	67.9	88.3	101.3	164.6	1205.9
1988	232.2	153.1	122.7	140.8	33.7	7.2	0.0	12.6	46.8	210.6	165.2	241.7	1366.6
1989	195.5	162.2	222.0	102.4	31.9	91.4	24.9	36.4	110.4	114.0	96.3	75.8	1263.2
1990	60.2	157.1	129.0	69.1	52.5	74.3	7.3	12.6	97.1	102.7	172.7	179.1	1113.7
1991	89.5	44.2	219.7	66.7	44.7	47.5	12.1	0.7	57.6	163.0	128.2	58.4	932.3
1992	100.0	78.1	106.0	76.0	8.5	29.9	3.2	48.5	60.8	93.2			604.2
1993		140.5	170.7	139.9	64.9	1.9	12.0	41.9	53.6	218.1	254.1	207.4	1305.0
1994	234.8	194.6	149.2	109.1	69.2	47.5	51.8	32.0	54.4	121.0	103.1	133.2	1299.9
1995	109.0	109.1	196.7	72.2	40.2	6.2	7.4	0.6	48.4	88.4	129.1	105.9	913.2
1996													
1997													
1998	91.5	214.2	112.0	72.2	15.7	11.4	0.0	1.5	25.4	130.5	103.7	69.0	847.1
1999	135.6	176.8	146.3	68.9	32.5	21.6	5.9	3.3	87.4	70.7	116.6	124.0	989.6
2000	189.1	153.1	132.5	42.8	43.6	5.5	11.4	29.0	25.1	118.2	48.2	144.0	942.5
2001	178.9	142.9	160.0	52.7	62.0	5.7	32.4	13.3	34.5	97.8	88.9	163.6	1032.7
2002	37.0	172.5	150.1	72.8	44.3	10.9	41.7	11.6	52.0	136.2	102.3	131.8	963.2
2003	124.2	125.6	174.7	114.0	39.2	26.2	5.0	20.2	50.7	24.8	98.4	141.9	944.9
2004	69.6	163.9	69.1	62.0	36.7	30.6	24.0	29.6	112.6	88.7	130.8	151.5	969.1
2005	93.6	138.4	159.2	53.3	12.2	6.8	7.8	20.3	32.2	79.7	85.9	85.3	774.7
2006	97.2	110.4	150.4	97.0	13.3	37.9	5.6	15.1	62.7	169.0	134.2	126.4	1019.2
2007	92.8	76.4	183.9	80.5	63.9	0.0	17.1	5.4	30.4	88.0	101.1	97.4	836.9
2008	135.8	94.1	50.2	63.7	11.6	26.8	6.2	13.2	58.4	103.3	68.8	83.0	715.1
2009	119.4	116.4	188.2	54.2	34.7	30.3	23.0	58.8	21.4	68.8	135.4	213.0	1063.6
2010	178.0	123.3	126.5	59.9	17.0	2.0	9.6	0.0	23.7	101.2	73.1		714.3
2011	165.8	164.0	149.3	65.7	25.6	0.0	15.6	12.9	60.3	74.0	76.5	191.7	1001.4
2012	152.6	166.6	88.4	104.7	44.2	16.9	5.7	7.3	53.6	106.8	116.7	203.8	1067.3
2013	190.4	134.7	177.0	85.3	46.7	26.6	21.4	35.6	52.5	168.3	77.8	119.2	1135.5
2014	200.0	165.2	156.0	71.1	45.2	22.0	19.7	8.3	73.7	63.4	92.9	124.9	1042.4
2015	139.0	65.0	130.5	98.0	43.1	15.7	19.5	8.9	56.6	76.3	124.4	120.9	897.9
2016	87.7	164.6			23.7	20.0	9.7	33.5	32.7	135.7	20.6	118.0	646.2
2017	160.3	180.2	134.2	88.8	66.9	0.5	7.7	7.1	57.1	58.3	122.0	115.9	999.0
2018	139.3	100.6	118.3	80.8	36.2	17.7	16.2	26.0					
N° de Datos	37	40	38	35	38	39	39	39	38	39	38	37	36
Curtosis	0.8	7.9	0.5	1.9	28.5	13.9	1.6	6.2	3.4	1.5	4.9	-0.3	4.6
3er Cuartil	200.0	177.7	194.6	100.0	58.5	33.7	24.5	40.5	72.3	136.0	164.2	191.7	1220
Mediana	139.3	155.1	150.7	76.0	42.6	21.6	15.0	26.0	56.9	102.7	116.7	139.0	1000
1er Cuartil	100.0	114.9	129.4	65.4	32.1	7.0	7.4	10.3	48.8	83.9	89.9	115.9	897
Máximo	381.0	543.0	310.0	178.0	340.0	211.0	68.0	191.0	180.0	314.0	438.0	289.0	2569.0
Promedio	161.4	163.6	166.0	85.5	49.5	30.1	19.9	34.8	65.3	119.5	136.5	148.9	1181.0
Mínimo	37.0	41.8	50.2	42.8	8.5	0.0	0.0	0.0	21.4	10.0	20.6	58.4	604.2
Desv. Est.	74.3	92.3	60.0	32.0	51.7	37.6	17.9	41.5	35.9	62.4	78.1	57.7	398.0
Coef. Asi.	0.8	2.4	0.7	1.4	5.0	3.3	1.5	2.4	1.7	1.1	1.8	0.6	1.9
Coef. Var.	0.5	0.6	0.4	0.4	1.0	1.3	0.9	1.2	0.5	0.5	0.6	0.4	0.3

Fuente:

1975-1995: Actualización del Plan de Cierre de la Unidad Minera Cerro de Pasco (Cesel, Mayo

2012). 1998-2011: Data proporcionada por SMEB (Marzo 2019)

2012-2018: Data adquirida del SENAMHI (Amphos 21, Noviembre 2018).

Sin dato.

Valor dudoso

x.x

Anexo 5. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Huaraucaca (1996 - 2018)

Estación: Meteorológica
Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 358560
Norte (m): 8806486
Altitud (msnm): 4151

Dpto : Pasco
Prov : Pasco
Dist : Tinyahuarco

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1996	110.7	112.5	157.2	90.2	42.5	9.8	8.8	15.9	46.2	112.7	120.7	148.6	975.8
1997	132.3	158.0	95.3	55.6	30.7	6.9	19.8	26.7	50.3	79.3	72.1	198.6	925.6
1998	166.9	243.8	171.7	286.0	7.9	15.5	4.3	9.9	31.8	172.7	122.7	85.1	1318.3
1999	161.0	226.6	213.9	102.4	75.7	48.8	16.0	20.1	98.8	66.0	95.5	178.6	1303.4
2000	207.5	176.3	183.4	73.7	81.5	10.4	31.0	42.4	38.4	111.5	70.4	196.3	1222.8
2001	230.1	119.1	202.2	71.9	40.4	16.3	38.6	25.9	67.3	90.7	121.9	347.5	1371.9
2002	166.6	191.3	157.5	88.4	47.5	26.4	62.0	25.4	67.1	163.8	115.6	151.1	1262.7
2003	120.4	118.4	188.2	108.7	90.2	57.2	62.2	83.3	85.6	105.9	81.0	94.0	1195.1
2004	50.8	99.1	64.8	43.2	76.2	64.8	54.6	58.4	68.6	31.8	80.0	62.2	754.5
2005	47.0	50.8	45.7	39.4	20.3	15.2	4.8	17.5	26.9	59.9	39.4	47.0	413.9
2006	44.5	28.2	34.0	13.7	20.1	41.1	4.1	18.3	67.3	106.7	110.0	98.3	586.3
2007	196.3	99.1	156.0	82.3	51.8	8.4	14.2	7.4	61.5	120.4	96.5	110.0	1003.9
2008	108.0	82.3	64.3	49.5	28.2	16.5	4.8	21.1	70.9	70.7	82.1	164.4	762.8
2009								35.2	3.1	9.3	48.1	126.6	
2010	69.7	43.7	108.0	49.5	9.9	9.1	4.8	2.1	2.3	170.2	192.2	146.2	807.7
2011	5.1	219.5	320.0	137.2		5.1	30.5	15.2	15.2	15.2	35.6	146.2	944.8
2012	330.2	198.1	198.1	137.2	8.8	3.4	138.0		248.2	248.2	132.1	193.0	1835.3
2013													
2014	157.4	159.2	85.4	27.6	30.4	19.1	13.0	9.0	37.6	73.8	91.2	127.0	830.7
2015	84.8	66.0	51.0	107.7	61.0	10.8	11.6	17.6	33.8	56.9	71.8	118.9	691.9
2016	89.2	146.6	62.4	53.4	13.4	8.4	7.8	34.6	21.2	76.0	28.0	109.4	650.4
2017	137.6	121.6	106.4	49.4	73.0	15.8	7.2	6.8	40.2	50.0	94.8	137.6	840.4
2018	146.6	96.8	171.6	80.8	21.8	13.2	7.8	10.8	44.0	106.0	61.6	58.0	819.0
N° de Datos	21	21	21	21	20	21	21	21	22	22	22	22	21
Curtosis	1.3	-0.8	0.4	7.6	-1.2	1.4	7.0	4.0	10.9	1.3	1.4	4.5	0.9
3er Cuartil	166.6	176.3	183.4	102.4	64.0	19.1	31.0	26.7	67.3	112.4	114.2	161.1	1223
Mediana	132.3	119.1	156.0	73.7	35.6	15.2	13.0	18.3	45.1	85.0	86.7	132.3	926
1er Cuartil	84.8	96.8	64.8	49.5	20.3	9.1	7.2	10.8	32.3	61.4	70.8	101.1	763
Máximo	330.2	243.8	320.0	286.0	90.2	64.8	138.0	83.3	248.2	248.2	192.2	347.5	1835.3
Promedio	142.8	143.3	149.6	91.7	42.0	16.7	26.8	22.7	56.0	100.0	91.3	149.3	1032.3
Mínimo	50.8	28.2	34.0	13.7	7.9	3.4	4.1	2.1	2.3	9.3	28.0	47.0	413.9
Desv. Est.	74.0	62.0	72.2	57.2	26.7	17.6	32.0	19.0	49.8	56.2	37.5	63.9	328.4
Coef. Asi.	0.7	0.2	0.6	2.3	0.4	1.6	2.4	1.8	2.9	0.9	0.7	1.6	0.8
Coef. Var.	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6	1.1	1.2	0.8	0.9	0.6	0.4	0.4	0.3

Fuente:

1996-2005 Actualización del Balance de Agua Integral y Revisión al Plan de Contingencia Unidad de Producción Colquijirca (Ausenco, Diciembre 2015) 2006-2012: Informe Técnico Sustentatorio para el incremento de la producción de la planta concentradora Huaraucaca de 18,000 a 21,600 TMD y mejora

tecnológica al sistema de tratamiento de aguas y efluentes industriales

2014-2016: Estudio Hidrogeológico Integral de la Unidad Minera Colquijirca (Hydro-Geo, Mayo 2017) 2017-2018: Data proporcionada por SMEB (Marzo, 2018)

	Sin dato.
	Datos dudosos

Anexo 6. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Huayllay (1957 - 1970)

Estación: Meteorológica
Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 350989
Norte (m): 8783989
Altitud (msnm): 4275

Dpto : Pasco
Prov : Pasco
Dist : Huayllay

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1957	86.9	183.6	83.3	97.6	42.2	6.3	4.3	9.6	63.6	84.8	79.0	89.2	830.4
1958	209.4	210.0	132.1	56.1	21.3	7.7	2.3	20.2	14.8	120.9	99.9	104.0	998.7
1959	106.9	176.9	192.2	175.9	34.2	12.4	8.7	9.9	67.8	94.2	181.1	194.3	1254.5
1960	82.0	144.5	64.8	101.6	20.6	5.5	13.1	28.7	87.3	30.5	72.6	45.6	696.8
1961	135.1	110.4	135.7	64.6	69.3	6.0	0.4	6.8	52.8	85.0	131.2	149.1	946.4
1962	190.0	120.1	192.3	89.5	24.1	21.0	2.1	29.8	26.3	91.2	54.6	111.9	952.9
1963	207.8	196.1	151.1	115.6	19.1	8.3	5.1	21.6	53.4	99.7	138.4	86.9	1103.1
1964	111.8	170.7	179.1	83.2	64.1	5.1	25.5	38.6	46.5	143.0	94.6	56.5	1018.7
1965	160.0	133.5	115.6	54.0	9.2	19.7	22.0	64.0	89.5	68.6	95.3	201.9	1033.3
1966	95.3	138.4	152.4	64.8	49.5	1.6	21.4	1.7	49.4	190.2	101.7	134.0	1000.4
1967	118.1	216.5	143.5	49.1	28.6	15.2	27.3	24.8	61.0	141.0	105.2	132.1	1062.4
1968	120.7	111.6	135.9	53.3	42.5	15.7	30.5	47.0	71.1	102.2	148.6	86.4	965.5
1969	80.6	139.7	134.1	137.2	16.5	39.2	27.1	38.1	71.1	108.5	78.4	148.2	1018.7
1970	201.0	104.3	98.6	125.3	35.2	23.5	2.7	31.5	77.5	102.2	88.9	140.1	1030.8
N° de Datos	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Curtosis	-1.4	-1.3	-0.2	0.3	-0.2	2.1	-1.8	0.3	0.3	1.7	0.5	-0.4	2.5
3er Cuartil	182.5	181.9	152.1	112.1	42.4	18.7	24.6	36.5	71.1	117.8	124.7	146.2	1033
Mediana	119.4	142.1	135.8	86.4	31.4	10.4	10.9	26.8	62.3	101.0	97.6	122.0	1010
1er Cuartil	98.2	123.5	119.7	58.2	20.8	6.1	3.1	12.5	50.3	86.6	81.5	87.5	956
Máximo	209.4	216.5	192.3	175.9	69.3	39.2	30.5	64.0	89.5	190.2	181.1	201.9	1254.5
Promedio	136.1	154.0	136.5	90.6	34.0	13.4	13.8	26.6	59.4	104.4	105.0	120.0	993.8
Mínimo	80.6	104.3	64.8	49.1	9.2	1.6	0.4	1.7	14.8	30.5	54.6	45.6	696.8
Desv. Est.	48.3	38.0	37.6	37.7	17.9	10.0	11.3	17.0	21.1	37.5	33.9	46.1	126.6
Coef. Asi.	0.5	0.3	-0.3	0.9	0.7	1.4	0.2	0.6	-0.7	0.5	0.9	0.2	-0.5
Coef. Var.	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	0.8	0.6	0.4	0.4	0.3	0.4	0.1

Fuente:

1957-1970: Evaluación Hidrológica - Estudio de Ingeniería Básica del Depósito de Relaves Huachuacaja - Mina Colquijirca (Golder, Setiembre

x.x

0) Valor dudoso

Anexo 7. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Hueghue (1965 - 2005)

Estación: Meteorológica
Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 360179
Norte (m): 8757486
Altitud (msnm): 4175

Dpto : Junin
Prov : Yauli
Dist : Santa Barbara de Carhuacayan

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1965	80.6	132.7	63.5	62.1		1.5	31.6	50.0	56.1	65.7	80.5	96.4	720.7
1966	153.9	185.8	163.6	133.8	20.1	0.0	0.0				110.7	3.2	
1967				0.3	46.5	13.4	32.3	34.5	67.5	99.4	33.5	101.1	
1968	129.6	61.8	61.5	23.7	60.6	18.1	28.6	59.3	42.0	50.6	57.6	70.2	663.6
1969	52.6	86.3	83.7	107.8	27.8	3.1	10.3	18.4	38.5	38.5	80.6	113.5	661.1
1970	142.4	112.0	97.3	122.4	20.8	13.9	9.5	14.0	44.8	58.5	34.3	91.3	761.2
1971	62.9	156.2	81.1	31.7	39.3	2.6	10.0	34.2	20.2	134.5	51.8	95.6	720.1
1972	72.9	62.9	214.9	94.1	30.9	6.4	30.4	10.7	16.4	8.4	7.1	62.6	617.7
1973	138.5	104.9	82.2	96.7	32.2	12.0	33.7	16.8	67.5	28.4	99.1	94.9	806.9
1974	141.6	132.8	103.6	27.1	37.9	38.6	10.6	14.9	32.8	12.5	34.3	33.6	620.3
1975	11.7	173.8	155.4	28.7	38.6	13.0	8.0	3.9	49.0	34.6	54.5	68.0	639.2
1976	108.5	127.8	153.5	21.2	19.5	1.8	10.5	41.6	39.1	29.9	82.4	75.7	711.5
1977	146.6	113.3	98.5	49.7	36.1	13.4	3.2	7.9	64.5	59.1	100.2	107.6	800.1
1978	138.3	145.3	93.3	81.6	18.1	4.1	17.6	28.5	63.8	30.7	200.9	76.6	898.8
1979	178.2	169.9	204.7	65.0	14.8	0.0	0.0	14.7	36.7	63.4	31.7	69.7	848.8
1980	123.6	93.3	186.7	14.4	28.0	9.5	14.3	21.6	29.6	104.9	110.6	56.1	792.6
1981	77.5	146.8	170.8	51.6	0.0	0.0	0.0	41.4	79.2	95.9	119.5	127.8	910.5
1982	98.6	142.0	146.2	27.7	58.5	0.0	23.3	39.7	68.5	125.6	107.3	135.5	972.9
1983	179.2	61.5	129.0	61.1	22.7	0.0	0.0	11.1	62.7	63.5	88.5	84.6	763.9
1984	33.3	128.1	243.6	34.9	9.1	9.4	0.0	18.4	24.2	52.8	71.4	64.8	690.0
1985	65.4	110.1	94.2	215.3	71.8	11.2	14.5	0.0	106.4	16.4	20.6	95.4	821.3
1986	122.0	187.7	116.6	120.6	29.7	0.0	6.3	19.4	52.7	19.8	29.3	143.5	847.6
1987	60.9	90.5	87.3	46.6	9.7	17.6	18.1	39.9	50.0	50.1	86.4	108.1	665.2
1988	178.3	95.3	64.1	141.0	39.9	9.5	0.0	0.0	0.0	39.8	16.4	68.0	652.3
1989	153.6	162.3	115.7	72.4	17.5	18.8	5.5	55.4	60.6	88.3	39.3	28.6	818.0
1990	117.6	64.8	82.7	55.4	21.5	36.8	22.0	54.4	3.5	74.3	77.5	116.8	727.3
1991	24.5	157.9	242.4	23.4	69.2	16.7	16.3	0.0	51.6	40.8	29.0	45.2	717.0
1992	42.2	71.5	59.0	53.2	3.0	13.5	13.0	17.0	56.3	90.0	52.4	65.6	536.7
1993	139.7	132.2	151.2	87.4	29.2	7.2	7.6	17.5	39.2	108.7	181.2	161.3	1062.4
1994	85.1	170.1	159.6	133.0	35.9	3.8	13.8	16.9	50.5	50.4	100.0	102.9	922.0
1995	61.3	104.0	179.3	60.5	25.0	0.5	12.6	9.9	58.1	55.4	63.2	80.0	709.8
1996	101.8	165.9	110.0	93.0	38.1	1.3	2.0	10.2	33.1	79.4	45.3	112.2	792.3
1997	111.0	188.7	102.3	75.5	27.6	3.7	21.9	29.9	42.9	54.5	82.1	106.7	846.8
1998	140.9	138.3	125.4	65.2	25.3	6.5	0.2	7.4	59.1	119.8	34.8	48.2	771.1
1999	103.9	153.9	117.6	97.6	56.1	28.6	25.3	3.6	56.7	62.8	78.6	139.7	924.4
2000	226.8	147.9	142.6	54.4	39.6	1.6	34.9	46.2	25.3	121.3	111.5	142.1	1094.2
2001	112.9	105.9	151.6	42.3	35.9	4.0	22.8	4.2	60.3	78.0	74.5	48.2	740.6
2002	66.4	84.3	110.1	80.6	29.4	11.1	15.1	13.1	56.2	156.3	137.7	133.8	894.1
2003	107.0	142.2	155.5	89.0	40.4	3.9	2.1	33.2	42.8	64.0	40.3	157.6	878.0
2004	45.3	125.6	91.4	19.8	37.1	20.8	15.6	17.0	44.2	107.0	86.2	165.3	775.3
2005	113.7	97.5				1.8	4.8	25.3	10.3	46.8			
N° de Datos	40	40	39	40	39	41	41	40	40	40	40	40	38
Curtosis	-0.2	-0.9	0.0	1.9	0.5	2.2	-0.8	-0.5	1.0	-0.3	1.4	-0.4	0.3
3º Cuartil	140.0	154.5	155.5	93.3	39.0	13.4	21.9	34.3	59.4	91.5	99.3	114.3	849
Mediana	109.8	130.2	116.6	61.6	29.7	6.5	12.6	17.3	49.5	61.0	76.0	95.2	773
1º Cuartil	66.2	97.0	92.4	34.1	21.2	1.8	4.8	10.6	35.8	40.6	38.2	67.4	710
Máximo	226.8	188.7	243.6	215.3	71.8	38.6	34.9	59.3	106.4	156.3	200.9	165.3	1094.2
Promedio	106.3	125.8	128.0	69.0	31.9	9.3	13.4	22.6	46.6	67.0	73.6	92.5	785.8
Mínimo	11.7	61.5	59.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	7.1	3.2	536.7
Desv. Est.	47.7	37.0	48.4	43.2	16.3	9.6	10.6	16.5	20.8	35.9	42.2	38.2	121.9
Coef. Asi.	0.1	-0.1	0.7	1.1	0.5	1.5	0.5	0.7	0.0	0.5	1.0	0.0	0.5
Coef. Var.	0.4	0.3	0.4	0.6	0.5	1.0	0.8	0.7	0.4	0.5	0.6	0.4	0.2

Fuente:

1965-2005: Evaluación Hidrológica - Estudio de Ingeniería Básica del Depósito de Relaves Huachuacaja - Mina Colquijirca (Golder, Setiembre 2010)

	Sin dato.
x.x	Valor dudoso

Anexo 8. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Junín (1969 - 2018)

Estación: Meteorológica

Este (m): 392113

Dpto : Junín

Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Norte (m): 8766764

Prov : Junín

Altitud (msnm): 4120

Dist : Junín

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
1969	77.7	128.0	76.1	7.3	16.0	30.3	29.8	41.3	46.3	45.3	93.6	131.0	722.7
1970	245.6	141.9	158.7	128.7	67.0	29.5	30.6	1.3	54.3	88.0	68.7	159.5	1173.8
1971	140.0	150.4	97.4	43.7	48.9	6.0	11.6	25.0	27.7	153.6	40.3	147.4	892.0
1972	92.4	73.9	125.8	107.1	25.2	14.0	5.2	27.9	47.4	65.4	28.0	61.1	673.4
1973	217.0	157.8	163.2	54.7	11.2	28.4	37.8	53.6	28.9	160.2	51.4	174.3	1138.5
1974	138.1	154.6	106.9	55.9	4.2	19.2	7.0	36.1	14.7	43.7	33.6	72.9	686.9
1975	124.7	136.2	146.8	68.2	54.7	14.0	13.0	17.7	63.0	73.0	77.2	144.3	932.8
1976	196.8	191.1	131.0	47.2	23.6	23.7	6.5	16.4	61.0	42.4	42.4	105.9	888.0
1977	164.5	156.0	102.0	35.5	42.8	3.8	3.4	2.3	27.4	31.1	167.4	88.8	825.0
1978	184.1	122.3	59.0	69.0	15.1	0.0	11.4	0.7	85.7	40.6	126.5	82.7	797.1
1979	120.6	133.4	130.6	68.8	33.1	0.0	21.9	16.2	26.2	78.4	111.5	98.3	839.0
1980	112.2	137.0	127.7	69.4	21.2	8.0	14.0	11.8	12.0	88.0	41.2	57.6	700.1
1981	174.2	191.4	128.3	29.8	26.5	14.0	0.0	50.4	54.7	130.8	122.6	196.8	1119.5
1982	152.4	150.8	63.9	61.2	0.0	24.8	17.4	37.7	48.3	101.2	157.8	75.3	890.8
1983	121.3	47.0	206.5	56.0	9.6	33.5	0.0	17.0	46.0	53.8	38.0	117.6	746.3
1984	146.9	219.4	149.0	77.0	34.0	43.5	7.0	31.0	24.0	65.0	95.3	101.6	993.7
1985	117.3	81.3	120.0	131.5	0.0	17.1	13.0	6.0	115.5	73.5	101.0	116.0	892.2
1986	186.0	186.5	207.0	67.0	63.5	0.0	0.0	34.5	72.0	51.0	52.4	95.0	1014.9
1987	266.5	103.5	65.5	40.0	38.0	11.0	17.5	9.8	74.0	53.0	74.5	101.8	855.1
1988	239.0	115.0	109.5	76.5	9.0	0.0	0.0	2.0	14.0	96.5	60.0	143.0	864.5
1989	136.7	144.0	128.7	94.8	18.9	11.0	0.0	53.0	43.0	106.0	53.0	78.0	867.1
1990	185.5	100.0	48.0	50.0	59.3	84.5	0.0	8.0	83.5	156.0	80.0	120.4	975.2
1991	47.0	47.0	80.0	49.6	45.6	18.2	0.1	1.2	58.3	59.0	107.5	76.0	589.5
1992	50.0	112.5	68.5	42.0	0.0	38.5	14.0	26.0	18.0	77.0	67.0	77.0	590.5
1993	197.0	206.0	116.0	109.0	36.5	0.0	37.0	0.0	89.5	55.0	203.5	99.0	1148.5
1994	200.0	155.5	112.0	82.0	29.0	0.0	0.0	0.2	48.0	74.6	40.0	111.0	852.3
1995	92.0	112.1	202.0	39.5	27.0	3.0	12.0	3.0	21.5	57.6	101.5	71.5	742.7
1996	144.7	53.5	103.5	133.5	32.3	0.0	0.0	19.0	39.5	80.0	88.5	97.5	792.0
1997	94.5	125.7	89.5	57.5	13.5	4.0	0.0	56.0	70.1	85.0	96.7	82.7	775.2
1998	145.2	169.7	111.2	69.3	4.9	6.9	0.0	11.5	28.9	131.6	60.8	68.7	808.7
1999	125.2	125.5	108.5	63.4	25.0	21.9	10.8	5.1	91.8	49.7	80.5	91.0	798.4
2000	109.9	112.0	158.3	35.6	26.8	16.3	31.0	24.4	16.7	71.5	54.6	118.1	775.2
2001	196.4	112.9	115.5	39.6	57.6	5.5	36.8	15.8	43.4	81.8	114.9	114.5	934.7
2002	37.6	164.4	156.0	47.8	25.6	3.6	40.7	32.4	41.3	86.0	63.2	125.0	823.6
2003	92.9	112.7	156.9	76.2	27.0	3.6	12.9	47.2	54.0	22.7	70.7	156.1	832.9
2004	51.7	107.9	46.5	52.3	23.5	39.8	34.7	18.5	85.0	91.5	110.0	137.8	799.2
2005	103.2	118.8	99.3	93.1	33.6	6.7	0.3	23.3	36.4	110.2	63.4	100.8	789.1
2006	92.4	72.6	99.9	28.3	13.7	20.5	2.5	12.9	30.3	103.3	81.1	97.9	655.4
2007	114.2	96.5	97.3	64.5	20.5	0.0	12.6	6.8	43.0	71.8	55.8	73.5	656.5
2008	99.3	104.8	35.9	14.2	16.3	8.2	9.6	7.5	35.2	86.2	44.2	66.9	528.3
2009	116.1	72.1	122.6	60.5	37.2	42.4	49.6	55.8	26.8	141.2	149.4	308.0	1181.7
2010	321.0	240.2	162.4	83.5	67.2	1.0	16.2	0.0	86.0	92.8	136.2	269.6	1476.1
2011	241.2	375.8	203.6	103.4	41.8	0.0	13.8	20.6	62.8	141.8	119.0	270.6	1594.4
2012	149.6	144.6	79.0	141.2	25.0	36.2	8.2	0.0	29.2	59.6	109.2	218.8	1000.6
2013	145.8	159.6	155.6	90.1	53.8	37.6	19.2	33.0	45.0	129.4	79.2	112.4	1060.7
2014	163.0	177.9	127.7	44.8	65.8	7.4	21.2	20.4	52.0	55.0	62.4	115.4	913.0
2015													
2016				64.6	29.8		18.2	24.6	32.8	98.0	58.8	97.0	
2017	134.6	127.6	144.6	87.4	46.8	8.6	0.0	4.4	54.2	49.6	64.6	118.2	840.6
2018	116.8	84.0	140.2	55.4	18.2	11.8	21.4	19.6	57.2	91.6	62.6		678.8
N° de Datos	48	48	48	49	49	48	49	49	49	49	49	48	48
Curtosis	0.7	6.4	-0.1	0.4	-0.5	4.6	0.1	-0.4	0.1	-0.2	1.1	3.6	2.9
3er Cuartil	184.5	156.5	147.4	82.0	41.8	24.0	19.2	31.0	61.0	98.0	107.5	132.7	945
Mediana	137.4	127.8	118.0	63.4	26.8	11.0	12.0	17.7	46.0	78.4	74.5	103.9	840
1er Cuartil	108.2	107.1	97.4	47.2	16.3	3.6	0.3	6.0	28.9	55.0	55.8	82.7	768
Máximo	321.0	375.8	207.0	141.2	67.2	84.5	49.6	56.0	115.5	160.2	203.5	308.0	1594.4
Promedio	144.2	135.7	119.7	66.7	29.9	15.8	13.7	20.2	48.3	82.7	82.9	119.7	879.3
Minimo	37.6	47.0	35.9	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	22.7	28.0	57.6	528.3
Desv. Est.	59.3	55.6	41.7	30.0	18.4	16.7	13.0	16.7	23.7	33.8	37.9	54.7	207.2
Coef. Asi.	0.7	1.7	0.2	0.7	0.4	1.8	0.9	0.7	0.7	0.6	1.0	1.9	1.4
Coef. Var.	0.4	0.4	0.3	0.4	0.6	1.1	1.0	0.8	0.5	0.4	0.5	0.5	0.2

Fuente:

1969: Data proporcionada por SMEB (Marzo 2019)

1970-2004: Evaluación Hidrológica - Estudio de Ingeniería Básica del Depósito de Relaves Huachuacaja - Mina Colquijirca (Golder, Setiembre 2010)

2005-2011: Data proporcionada por SMEB (Marzo 2019)

2012-2018: Data adquirida del SENAMHI (Amphos21, Febrero 2019).

Sin dato.



Anexo 9. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Laguna Surasaca (1995 - 2018)

Estación: Meteorológica

Este (m): 304841

Dpto : Lima

Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Norte (m): 8836907

Prov : Oyón

Altitud (msnm): 4400

Dist : Oyón

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1995				39.5	16.9	13.2	18.3	4.7	40.4	81.5	34.1	62.3	310.9
1996	101.5	95.5	120.4	50.2	0.0	0.0	0.0	6.6	14.7	27.3	39.9	90.6	546.7
1997	112.0	125.4	126.6	58.4	26.6	5.1	6.7	14.2	48.1	54.4	106.1	134.7	818.3
1998	196.5	133.6	153.4	72.3	9.4	11.8	0.0	12.1	17.8	92.5	39.9	62.9	802.2
1999	128.9	200.0	79.6	65.2	40.0	7.1	2.9	1.9	28.4	38.0	61.7	141.1	794.8
2000	168.2	152.1	132.1	81.7	45.0	8.6	10.4	22.7	31.3	69.9	51.2	139.8	913.0
2001	234.8	132.3	188.9	43.5	38.7	23.1	9.1	0.0	49.9	45.6	97.0	82.1	945.0
2002	76.2	102.9	191.3	80.2	28.4	24.5	2.1	0.8	19.2	152.5	100.0	126.7	904.8
2003	127.0	135.6	169.7	85.2	36.6	0.0	4.8	17.3	21.3	29.5	29.2	180.1	836.3
2004	61.1	119.1	96.6	42.8	8.5	34.5	0.0	3.7	71.3	113.0	104.8	117.3	772.7
2005	86.3	69.0	113.6	66.3	21.6	0.0	0.0	19.7	17.4	75.7	29.8	105.2	604.6
2006	64.4	103.3	196.1	88.7	4.8	5.7	0.0	11.5	26.4	77.5	117.8	109.1	805.3
2007	115.9	83.0	220.9	74.2	47.9	4.5	0.0	0.0	11.0	142.1	61.2	69.0	829.7
2008	166.1	115.6	65.7	26.9	6.9	6.0	11.5	4.3	25.7	106.6	39.2	93.6	668.1
2009	179.5	145.3	275.7	88.7	47.1	0.0	24.3	25.6	34.4	110.1	119.6	259.4	1309.7
2010	133.2	122.9	193.0	68.6	5.1	0.0	0.0	0.0	66.5	53.6	104.8	227.5	975.2
2011	180.0	135.8	220.7	47.8	45.2	0.0	19.3	11.0	38.0	48.5	115.8	211.4	1073.5
2012	126.3	211.5	190.2	158.2	35.6	0.0	10.4	0.0	73.0	92.6	111.3	176.1	1185.2
2013	133.0	140.2	171.4	36.4	36.8	11.7	0.0	15.2	20.8	113.3	76.2	135.9	890.9
2014	191.0	208.8	169.1	68.1	39.5	0.0	13.3	20.8	56.2	88.0	65.8	132.5	1053.1
2015	161.8	135.6	201.9	111.7	62.3	4.0	0.0	9.3	10.3	67.6	126.2	156.8	1047.5
2016	50.1	135.5	152.9	80.5	14.0	16.4	9.8	2.2	60.5	66.3	3.7	133.6	725.5
2017	198.6	176.8	249.4	124.5	47.3	0.0	0.0	5.6	22.9	56.9	57.5	137.9	1077.4
2018	149.5	109.4	174.5	143.1	37.0	16.7	6.6	15.4	28.8	85.5	83.2	83.8	933.5
N° de Datos	23	23	23	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Curtosis	-0.7	0.4	-0.1	0.9	-1.1	1.4	0.3	-1.0	-0.6	-0.1	-1.2	0.5	1.2
3er Cuartil	173.9	142.8	194.6	86.1	41.3	12.2	10.4	15.3	48.6	96.1	105.1	145.0	993
Mediana	133.0	133.6	171.4	70.5	36.1	5.4	3.9	8.0	28.6	76.6	71.0	133.1	864
1er Cuartil	106.8	112.5	129.4	49.6	12.9	0.0	0.0	2.1	20.4	54.2	39.9	92.9	789
Máximo	234.8	211.5	275.7	158.2	62.3	34.5	24.3	25.6	73.0	152.5	126.2	259.4	1309.7
Promedio	136.6	134.3	167.6	75.1	29.2	8.0	6.2	9.4	34.8	78.7	74.0	132.1	885.9
Mínimo	50.1	69.0	65.7	26.9	0.0	0.0	0.0	0.0	10.3	27.3	3.7	62.3	310.9
Desv. Est.	49.3	36.9	52.2	32.9	17.3	9.4	7.2	8.0	19.3	32.9	35.7	51.0	213.1
Coef. Asi.	0.0	0.7	-0.1	1.0	-0.2	1.3	1.0	0.5	0.7	0.5	-0.2	0.8	-0.4
Coef. Var.	0.4	0.3	0.3	0.4	0.6	1.2	1.2	0.9	0.6	0.4	0.5	0.4	0.2

Fuente:

1995-2016: Estudio de Factibilidad para el Crecimiento de las Etapas 4 y 5 del Depósito de Relaves Nieve Ucro II (ANDDES, 2017). 2017-2018: Data descargada de la página web del SENAMHI.

	Sin dato.
x.x	Valor dudoso

Anexo 10. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Oyón (1987 - 2018)

Estación: Meteorológica
Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 306760
Norte (m): 8820325
Altitud (msnm): 3641

Dpto : Lima
Prov : Oyón
Dist : Oyón

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
1987	127.3	105.1	35.8	25.8	1.7	0.0	5.3	3.6	14.9	19.6	90.2	45.4	474.7
1988	104.7	61.8	58.1	72.9	12.6	0.0	0.0	0.0	11.1	27.6	29.7	61.8	440.3
1989	133.8	93.9	109.7	46.5	22.5	3.7	0.0	2.0	14.7	39.5	18.4	7.6	492.3
1990	51.4	76.0	59.4	4.4	8.5	1.0	0.0	0.0	1.5	139.0	82.7	113.3	537.2
1991	49.1	146.2	108.4	23.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	16.8	358.8
1992	39.5	23.8	48.7	23.5	2.6	3.4	0.0	0.4	6.6	19.9	22.8	17.3	208.5
1993	89.2	127.7	147.0	110.2	0.8	0.0	0.0	0.0	9.0	83.1	85.2	247.4	899.6
1994	129.0	127.3	163.9	110.5	45.4	1.7	1.9	0.7	41.7	8.9	56.8	47.9	735.7
1995	73.3	35.2	140.1	59.4	9.0	5.1	1.2	4.4	7.3	43.2	49.4	85.5	513.1
1996	121.9	96.4	125.0	58.2	3.9	0.0	0.0	2.0	6.1	26.5	21.4	61.8	523.2
1997	88.3	115.7	40.5	26.8	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	24.2	64.4	125.3	499.2
1998	178.1	112.3	123.3	20.9	2.0	2.5	0.0	0.0	11.9	58.5	33.6	32.0	575.1
1999	101.6	193.2	85.7	52.6	38.5	0.0	4.2	0.0	31.9	57.1	50.3	76.9	692.0
2000	120.6	124.0	104.9	63.4	35.9	0.0	2.7	4.5	26.4	60.1	29.5	135.1	707.1
2001	143.3	87.0	149.9	33.9	9.9	7.5	0.0	0.0	26.4	35.6	104.9	66.0	664.4
2002	92.0	65.1	96.9	45.5	8.6	2.1	0.0	2.1	17.2	73.5	73.9	93.1	570.0
2003	89.7	96.3	121.7	37.0	0.0	0.0	0.0	1.3	11.3	15.8	8.7	87.7	469.5
2004	36.3	78.7	56.5		0.0	6.8	0.0	0.0	22.3	56.4	95.6	95.1	447.7
2005		40.6	105.6	9.5	4.1	0.0	0.0	3.9	0.5	28.0	23.8	80.3	296.3
2006	70.9	124.3	145.9		0.3	11.5	0.0	6.0	6.0	35.0	80.8	92.3	573.0
2007	106.3	77.4	148.5	55.2	36.6	0.0	0.0	0.0	6.7	52.2	44.9	39.5	567.3
2008	108.8	136.0	100.7	49.9	0.0	5.2	0.0	0.0	2.8	59.6	17.4	83.4	563.8
2009	101.0	104.5	165.3	78.1	16.8	0.0	1.5	7.5	8.2	54.2	86.9	92.4	716.4
2010													
2011													
2012	80.4	134.6	91.5	113.9	1.8	2.7	0.0	0.0	34.1	35.2	46.5	89.3	630.0
2013	55.8	88.4	115.0	21.6	17.5	0.4	2.6	8.5	1.4	80.6	49.0	75.5	516.3
2014	95.1	125.3	133.5	29.0	19.6	0.0	1.0	1.8	15.5	50.6	37.9	135.1	644.4
2015	102.0	62.5	69.5	48.9	6.6	3.4	0.0	7.7	2.8	22.6	50.0	82.8	458.8
2016	27.6	85.3	95.9	38.2	1.1	1.0	1.6	4.0	15.0	29.4	5.6	81.0	385.7
2017	130.0	128.3	181.4	60.5	32.6	0.4	0.0	2.7	6.4	35.8	19.0	52.3	649.4
2018	107.6	84.0	120.3	65.0	8.6	3.3	1.0	0.0	10.0	33.0	35.7	88.2	556.7
N° de Datos	29	30	30	28	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Curtosis	0.0	0.6	-0.7	0.4	0.4	3.2	4.0	0.3	0.9	4.0	-1.0	5.6	0.9
3er Cuartil	120.6	125.1	138.5	61.2	17.3	3.4	1.2	3.8	15.4	56.9	71.5	92.4	641
Mediana	101.0	96.4	109.1	47.7	7.6	0.7	0.0	1.0	10.6	35.7	45.7	81.9	547
1er Cuartil	73.3	77.7	87.2	26.6	1.3	0.0	0.0	0.0	6.2	26.8	23.1	54.7	471
Máximo	178.1	193.2	181.4	113.9	45.4	11.5	5.3	8.5	41.7	139.0	104.9	247.4	899.6
Promedio	95.0	98.6	108.3	49.4	11.6	2.1	0.8	2.1	12.8	43.5	47.6	80.3	552.0
Mínimo	27.6	23.8	35.8	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	7.6	208.5
Desv. Est.	35.0	36.1	39.0	28.8	13.5	2.8	1.4	2.6	10.5	27.2	28.6	45.2	139.7
Coef. Asi.	0.0	0.1	-0.2	0.8	1.2	1.7	2.0	1.2	1.1	1.5	0.4	1.6	0.0
Coef. Var.	0.4	0.4	0.4	0.6	1.2	1.4	1.8	1.2	0.8	0.6	0.6	0.6	0.3

Fuente:

1987-2015: Segunda Modificación del EIA Detallado de las Etapas 4 y 5 del Depósito de Relaves Nieve Ucra II (INSIDEO, 2018).

2016: Data descargada de la página web del SENAMHI.

Ene-Set 2017: Segunda Modificación del EIA Detallado de las Etapas 4 y 5 del Depósito de Relaves Nieve Ucra II (INSIDEO, 2018).
ct 2017-2018: Data descargada de la página web del SENAMHI.

	Sin dato.
x.x	Valor dudoso

Anexo 11. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Picoy (1968 - 2015)

Estación: Meteorológica

Este (m): 390399

Dpto : Huanuco

Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Norte (m): 8894421

Prov : Pachitea

Altitud (msnm): 3641

Dist : Molino

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
1968	65.5	45.3	129.8	13.1	4.8	0.0	0.7	5.2	6.8	33.9	48.7	56.8	410.6
1969	24.9	75.6	104.3	48.0	5.9	0.0	3.1	1.7	5.6	45.2	45.0	167.2	526.5
1970	165.9	57.9	69.1	86.1	30.4	0.0	1.8	0.8	35.6	48.5	44.0	64.0	604.1
1971	70.5	100.7	141.1	34.9	5.3	0.0	0.0	7.0	5.0	12.8	25.6	93.5	496.4
1972	105.5	109.1	247.8	64.0	0.0	0.0	8.8	0.0	11.1	34.7	35.8	65.4	682.2
1973	134.3	105.7	126.1	90.9	16.6	0.0	7.9	5.7	36.6	84.4	40.8	133.1	782.1
1974	98.1	113.2	153.7	39.4	3.0	0.0	1.7	1.4	16.6	11.6	33.6	33.2	505.5
1975	113.7	93.2	186.0	38.9	24.7	2.5	0.0	15.1	3.0	20.6	24.1	54.9	576.7
1976	113.4	157.1	115.2	34.6	2.6	3.3	0.0	1.6	10.0	1.9	7.5	53.7	500.9
1977	99.8	146.1	78.1	21.9	21.5	0.0	0.0	0.0	4.3	8.0	56.7	63.3	499.7
1978	91.7	145.8	52.7	31.6	0.9	0.7	0.8	0.0	24.8	28.3	56.6	50.3	484.2
1979	27.9	109.8	126.3	32.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	11.0	9.5	27.4	347.0
1980	116.6	50.6	61.8	38.0	0.0	2.4	0.2	0.3	1.4	80.1	48.9	62.2	462.5
1981	106.1	160.2	151.4	12.9	0.0	0.0	0.0	9.1	0.5	46.4	72.1	105.6	664.3
1982	86.1	148.1	83.1	41.0	0.0	0.4	0.5	0.4	9.5	47.6	97.1	46.3	560.1
1983	99.0	39.9	103.9	66.2	10.7	4.3	0.0	0.0	5.8	24.4	26.0	119.7	499.9
1984	80.9	162.7	160.9	34.9	32.6	9.8	0.4	0.8	1.2	48.8	71.1	88.1	692.2
1985	29.7	116.4	113.4	47.8	16.4	3.3	0.0	0.0	16.3	16.8	31.5	78.5	470.1
1986	127.9	157.0	91.0	77.9	18.9	0.0	1.0	5.1	1.1	13.1	25.1	122.7	640.8
1987	104.6	88.3	69.2	26.9	19.9	0.0	0.0	4.6	9.3	10.8	40.4	76.1	450.1
1988	91.6	70.2	73.1	58.2	19.2	0.0	0.0	0.9	4.2	21.0	17.9	76.1	432.4
1989	145.6	147.0	134.7	40.3	14.0	2.8	0.0	2.4	7.3	36.5	8.5	8.7	547.8
1990	105.2	26.8	37.8	18.8	5.8	0.7	0.0	0.0	5.5	76.5	70.3	63.5	410.9
1991	59.2	57.9	120.6	31.3	9.4	0.0	2.8	0.0	7.4	63.4	44.5	37.0	433.5
1992	35.3	40.1	80.0	25.8	0.0	0.0	0.0	1.7	6.4	13.1	33.5	19.3	255.2
1993	97.6	100.5	118.4	72.7	18.2	0.0	0.0	0.0	12.5	69.9	99.9	104.0	693.7
1994	100.9	130.2	130.1	61.6	14.0	0.0	0.7	0.0	9.4	7.1	40.3	65.9	560.2
1995	74.3	31.5	79.9	46.5	8.6	0.0	3.4	0.0	4.6	32.2	63.9	74.3	419.2
1996	92.6	139.7	119.1	71.2	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	20.9	16.9	70.7	534.6
1997	82.5	96.5	44.2	6.4	0.0	0.0	0.0	0.6	12.0	13.4	45.4	116.2	417.2
1998	140.0	83.7	133.2	41.6	0.0	5.2	0.0	0.0	10.0	24.6	34.5	43.2	516.0
1999	92.9	200.6	105.1	56.0	40.9	3.0	0.0	0.0	21.9	37.2	17.8	95.7	671.1
2000	65.5	83.9	66.3	35.4	21.0	0.0	0.0	0.0	7.5	5.9	12.0	57.4	354.9
2001	84.2	57.4	138.5	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	4.0	109.6	17.7	430.9
2002	31.8	39.8	40.2	33.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.0	35.9	50.2	257.7
2003	64.1	49.0	85.3	26.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.0	61.7	307.1
2004	7.3	76.9	76.6	22.4	0.0	0.0	0.0	0.0	26.0	41.4	94.0	93.3	437.9
2005	64.2	61.9	110.3	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0		6.7	13.1	78.4	350.8
2006	109.0	112.7	182.9	103.9	0.0	3.3	0.0	0.0	3.8	8.1	45.9	93.7	663.3
2007	111.3	97.3	152.6	74.3	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	37.2	9.3	50.6	557.1
2008	164.7	130.4	107.8	36.2	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	81.8	40.6	77.0	640.5
2009	152.6	155.4	152.7	85.5	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59.2	89.6	139.7	847.7
2010	92.9	45.7	106.2	51.0	7.6	0.0	0.0	0.0	4.6	15.6	44.7	123.0	491.3
2011	131.7	85.9	116.0	47.3	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	74.4	120.9	583.6
2012	63.1	130.5	115.7	121.8	0.0	0.0	0.0	0.0	15.4	21.6	55.5	103.8	627.4
2013	77.8	126.2	143.6	30.9	14.3	0.0	0.0	3.4	0.0	57.3	24.5	71.3	549.3
2014	113.1	95.0	110.7	43.2	16.3	0.0	0.0	0.0	6.5	35.1	24.9	93.9	538.7
2015	110.2	82.9	92.5	69.3	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	4.4	83.9	460.1
N° de Datos	48	48	48	48	48	48	48	48	47	48	48	48	48
Curtosis	0.1	-0.7	1.5	0.7	0.5	10.1	12.7	10.2	3.0	-0.2	0.1	0.1	0.2
3º Cuartil	111.8	130.4	133.6	62.2	16.5	0.5	0.4	1.6	10.0	45.5	55.8	94.4	589
Mediana	95.3	96.9	112.1	39.9	5.9	0.0	0.0	0.0	5.8	24.5	40.4	72.8	503
1º Cuartil	69.3	60.9	80.0	31.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	11.5	24.4	54.6	433
Máximo	165.9	200.6	247.8	121.8	40.9	9.8	8.8	15.1	36.6	84.4	109.6	167.2	847.7
Promedio	92.2	98.7	111.2	46.2	9.5	0.9	0.7	1.5	8.1	30.4	42.4	76.1	517.8
Mínimo	7.3	26.8	37.8	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	8.7	255.2
Desv. Est.	36.0	42.2	40.8	25.3	10.4	1.9	1.8	2.9	8.8	23.3	26.4	33.7	126.4
Coef. Asi.	-0.2	0.2	0.7	0.9	1.0	2.9	3.5	2.9	1.7	0.8	0.8	0.4	0.2
Coef. Var.	0.4	0.4	0.4	0.5	1.1	2.2	2.6	2.0	1.1	0.8	0.6	0.4	0.2

Fuente:

1968-2015: Segunda Modificación del EIA Detallado de las Etapas 4 y 5 del Depósito de Relaves Nieve Ucro II (INSIDEO, 2018).

Sin dato.

Valor dudoso

X.X

Anexo 12. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Pirca (1992 - 2018)

Estación: Meteorológica
Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 319857
Norte (m): 8759559
Altitud (msnm): 3342

Dpto : Lima
Prov : Huaral
Dist : Atavillos Alto

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1992			262.5	17.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	107.0	0.0	30.6	
1993	82.1	87.6	150.3	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	66.8	92.2	124.7	623.8
1994	241.1	110.1	240.5	44.8	24.6	0.0	0.0	0.0	15.8	13.7	0.0	31.8	722.4
1995	93.9	26.6	164.4	48.4	0.0	0.0	0.0	12.4	10.0	11.0	68.6	131.9	567.2
1996	90.0	236.2	152.0	73.1	0.0	0.0	0.0	3.6	8.2	10.9	17.9	54.5	646.4
1997	106.8	106.4	43.5	11.2	0.0	0.0	0.0	0.0	8.1	23.4		152.5	451.9
1998	115.3	116.9	141.0	37.7	0.0	3.2	0.0	3.8	16.7	40.3	17.2	38.2	530.3
1999	77.6	239.3	93.8	53.3	36.1	0.0	0.0	4.5	13.4	33.6	26.8	93.6	672.0
2000	142.8	200.0	109.3	43.2	22.5	0.0	0.0	4.7	25.5	37.1	42.3	121.8	749.2
2001	134.9	95.0	200.8	24.9	4.6	1.2	1.2	0.0	22.9	25.2	88.8	20.1	619.6
2002	47.9	96.0	86.4	55.9	6.4	2.7	0.0	1.2	13.5	47.8	73.5	64.3	495.6
2003	78.9	77.3	150.9	26.7	6.6	0.0	0.0	0.0	1.7	27.1	5.3	128.2	502.7
2004	17.4	105.1	59.4	34.9	4.5	3.0	0.0	0.0	14.2	35.5	69.5	120.7	464.2
2005	81.6	66.8	120.2	25.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	9.8	83.5	391.5
2006	72.8	116.4	155.6		0.0	1.2	0.0	1.4	6.6	18.5	58.5	127.9	558.9
2007	73.2	80.9	188.0	65.6	3.7	0.0	0.0	2.5	2.8	31.9	12.7	24.5	485.8
2008	81.0	104.7	113.4	31.6	0.0	1.7	0.0	8.9	3.2	42.8	45.8	56.8	489.9
2009	156.8	164.3	154.6	63.3	3.8	0.0	0.0	1.7	5.6	58.8	63.2	87.6	759.7
2010	73.3	57.6	126.0	40.0	5.2	1.2	0.0	2.5	12.7	13.4	42.1	127.4	501.4
2011	148.9	79.7	118.5	57.5	2.4	0.0	0.0	0.0	17.3	8.1	83.1	114.6	630.1
2012	78.5	133.1	142.4	92.3	2.7	0.0	0.0	0.0	30.5	25.1	31.4	118.7	654.7
2013	58.1	152.9	121.6	13.6	15.4	0.0	0.0	10.7	3.1	33.8	50.8	77.0	537.0
2014	92.6	74.2	125.7		13.2	1.2	0.0	5.1	15.7	18.4	59.1	99.7	504.9
2015	80.6	63.8	86.6	53.4	0.0	0.0	0.0	4.2	11.7	30.3	38.7	60.8	430.1
2016	18.1	105.8	74.7	15.7	4.7	0.0	0.0	0.0	8.2	6.0	0.8	60.5	294.5
2017	148.3	140.4	178.9	45.6	10.6	0.0	0.0	1.8	7.1	37.0	11.8	27.4	608.9
2018	101.5	81.9	115.2	53.3	9.4	2.6	0.0	0.0	1.7	23.4	25.8	38.9	453.7
N° de Datos	26	26	27	25	27	27	27	27	27	27	26	27	26
Curtosis	2.8	1.2	0.8	0.0	3.8	0.5	27.0	2.2	0.3	4.9	-1.1	-1.4	-0.2
3er Cuartil	113.2	129.1	155.1	53.4	8.0	1.2	0.0	4.0	15.0	37.1	62.2	121.3	629
Mediana	81.9	104.9	126.0	43.2	3.8	0.0	0.0	1.4	8.2	27.1	40.4	83.5	534
1er Cuartil	74.4	80.0	111.4	25.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	16.1	13.8	46.7	487
Máximo	241.1	239.3	262.5	92.3	36.1	3.2	1.2	12.4	30.5	107.0	92.2	152.5	759.7
Promedio	95.9	112.3	136.2	41.9	6.5	0.7	0.0	2.6	10.3	30.8	39.8	82.2	559.2
Mínimo	17.4	26.6	43.5	11.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	20.1	294.5
Desv. Est.	46.4	51.6	50.2	20.4	9.0	1.1	0.2	3.4	7.9	21.7	29.0	40.8	112.8
Coef. Asi.	1.1	1.2	0.6	0.4	2.0	1.4	5.2	1.6	0.8	1.8	0.2	0.0	0.0
Coef. Var.	0.5	0.5	0.4	0.5	1.4	1.6	5.2	1.3	0.8	0.7	0.7	0.5	0.2

Fuente:

1992-2018: Data adquirida del SENAMHI (Amphos21, Febrero 2019).

Sin dato.

Valor dudoso

x.x

Anexo 13. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Santa Cruz (1983 - 2018)

Estación: Meteorológica
Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 319857
Norte (m): 8759559
Altitud (msnm): 3583

Dpto : Lima
Prov : Huaral
Dist : Santa Cruz de Andamarca

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1983	45.6	42.8	149.1	15.2	2.1	4.4	0.0	0.0	12.7	78.4	27.2	137.3	514.8
1984	38.7	225.8	208.1	43.2	43.0	0.0	0.0	1.4	16.7	47.4	77.1	54.5	755.9
1985	7.4	105.2	97.9	78.7	23.0	1.3	0.0	6.9	7.8	22.7	44.7	60.9	456.5
1986													
1987	160.3	106.9	48.1	2.1	1.6	0.0	0.0	4.1	5.9	4.0	14.5	35.3	382.8
1988	111.4	166.3	67.1	112.4	18.9	0.0	0.0	8.1	15.2				
1989	106.3	122.4	157.0	163.5	65.5	5.6	9.9	12.3	12.5	51.4	5.7	0.0	712.1
1990	30.3	9.1	51.7	5.5	13.7		0.0	0.0	0.0	96.8	80.8	29.0	316.9
1991	34.9	47.3	89.0	0.0	29.3	0.0	0.0	0.0	10.3	31.0	33.2	51.5	326.5
1992	5.8		45.8	54.3	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	49.0	0.0	22.4	183.8
1993	67.9	73.7	191.1	59.7	13.9	0.0	1.8	0.0	7.2	53.1		89.0	557.4
1994	96.2	133.1	136.4	52.0	27.3	0.0	0.0	2.0	18.4	18.0	56.9	68.6	608.9
1995	98.7	33.0	92.3	50.6	5.5	0.0	2.0	3.0		45.4	49.2	81.8	461.5
1996	129.0				8.3	0.0	0.0		9.1	26.8	31.8	59.6	
1997	102.4	148.6	35.6	7.8	4.6	0.0	0.0	0.6	9.8	28.9	88.2	141.2	567.7
1998	138.0	112.3	157.3	24.2	0.0	0.0	0.0	2.6	15.8	55.5	25.1	54.2	585.0
1999	74.7	230.5	87.1	54.1	40.6	5.0	3.5	3.8	25.0	41.1	38.0	100.9	704.3
2000	147.8	195.0	118.0	55.8	13.8	0.0	1.0	3.6	26.4	35.2	44.1	139.4	780.1
2001	141.7	94.3	206.3	33.7	3.9	0.0	1.4	0.0	14.7	25.3	104.2	28.1	653.6
2002	90.8	98.5	91.3	64.3	7.9	0.0	1.6	0.0	7.6	109.3	97.2	81.1	649.6
2003	105.3	103.3	176.8	32.4	4.1	0.0	2.1	2.4	0.0	29.5	4.0	142.1	602.0
2004	28.6	104.6	71.2	26.1	0.6	1.4	5.4	0.0	14.0	52.1	75.8	138.4	518.2
2005	82.8	54.4	140.8	21.8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6	9.6	80.7	399.7
2006	100.0	141.0	158.6		0.0	1.2	0.0	0.0	10.2			125.6	
2007	115.4	75.9	178.2	129.1	34.9	0.0	0.0	7.1		51.1			
2008	88.7			52.4	0.0		0.0	11.0	1.6	47.2	64.6	75.3	
2009	151.7	200.8	117.0	70.3	6.3	0.0	0.5	2.6	10.6	56.2	68.9	94.4	779.3
2010	88.2	52.5	142.3	42.8	4.9	1.0	0.0	2.2	4.7	12.7	38.0	175.5	564.8
2011	212.8	36.3	113.5	64.3	2.7	0.6	1.8	0.5	18.8	4.5	93.4	132.7	681.9
2012	84.1	153.7	152.8	100.4	4.6	0.5	0.0	0.0	35.6	53.9	38.3	56.9	680.8
2013	37.4	121.8	136.3	4.0	14.5	0.0	0.0	9.5	6.2	48.1	50.9	83.8	512.5
2014	109.5	89.2	140.7	39.1	20.0	0.0	0.0	8.0	10.1	23.7	61.0	107.6	608.9
2015	97.1	70.8	93.2	52.3	2.0	0.5	0.0	2.2	6.9	25.3	51.2	77.7	479.2
2016	20.0	103.0	85.9	23.7	4.2	0.0	0.0	0.0	12.6	10.2	2.5	64.0	326.1
2017	176.9	129.5	210.6	52.1	18.0	0.0	0.0	2.5	10.7	41.6	11.6	35.6	689.1
2018	91.6	80.7	103.3	40.3	10.7	5.8	0.0	0.0	1.6	12.5	31.2	44.0	421.7
N° de Datos	35	32	33	33	35	33	35	34	33	33	31	33	30
Curtosis	-0.1	0.0	-0.8	2.1	3.5	3.8	13.1	0.8	2.0	1.4	-0.8	-0.6	-0.3
3er Cuartil	113.4	135.1	157.0	59.7	18.5	0.6	1.2	3.8	14.7	51.4	66.8	107.6	674
Mediana	96.2	104.0	118.0	50.6	6.3	0.0	0.0	2.1	10.2	41.1	44.1	77.7	566
1er Cuartil	56.8	73.0	89.0	24.2	2.4	0.0	0.0	0.0	6.5	23.7	26.2	54.2	458
Máximo	212.8	230.5	210.6	163.5	65.5	5.8	9.9	12.3	35.6	109.3	104.2	175.5	780.1
Promedio	91.9	108.2	122.7	49.3	12.9	0.8	0.9	2.8	11.1	39.3	45.8	80.9	566.7
Mínimo	5.8	9.1	35.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	183.8
Desv. Est.	48.8	55.1	49.0	36.6	15.0	1.7	2.0	3.5	7.8	24.3	29.9	42.4	151.4
Coef. Asi.	0.2	0.5	0.1	1.2	1.8	2.2	3.4	1.3	1.1	0.9	0.3	0.3	-0.5
Coef. Var.	0.5	0.5	0.4	0.7	1.2	2.1	2.2	1.2	0.7	0.6	0.7	0.5	0.3

Fuente:

1983-2018: Data adquirida del SENAMHI (Amphos21, Febrero 2019).

	Sin dato.
x.x	Valor dudoso

Anexo 14. Precipitación Total Mensual (mm) Estación Shelby (1957 - 1992)

Estación: Meteorológica
Parámetro: Precipitación total mensual (mm)

Este (m): 365159
Norte (m): 8812074
Altitud (msnm): 4132

Dpto : Pasco
Prov : Pasco
Dist : Vicco

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
1957	134.5	211.7	88.7	95.0	37.6	8.5	7.6	15.4	63.0	67.8	64.2	122.9	916.9
1958	123.1	151.7	167.7	69.6	13.9	16.0	10.2	6.6	21.9	100.8	62.1	102.1	845.7
1959	77.8	181.6	124.0	71.6	23.7	4.0	0.7	2.8	54.0	96.8	39.1	118.7	794.8
1960	119.2	131.5	85.3	90.5	23.3	0.4	7.3	16.8	42.6	101.8	116.6	60.1	795.4
1961	211.6	132.5	147.5	90.9	35.9	5.5	1.4	14.2	35.7	41.4	80.4	237.9	1034.9
1962	131.3	135.6	161.4	68.0	15.4	2.4	1.5	28.0	11.3	71.5	60.4	116.5	803.3
1963	172.2	154.2	124.6	97.7	17.5	1.5	3.1	4.7	38.9	84.7	84.4	98.0	881.5
1964	94.6	110.7	242.3	33.7	45.0	3.4	3.0	19.2	34.8	114.5	86.2	71.1	858.5
1965	60.5	159.1	146.9	66.4	20.3	5.4	7.3	17.7	68.6	51.6	81.8	166.4	852.0
1966	149.6	57.6	144.6	57.9	48.5	0.8	4.5	3.6	40.0	127.5	103.3	104.8	842.7
1967	60.8	253.6	143.9	41.5	14.1	0.4	20.6	39.0	40.8	152.1	86.0	217.5	1070.3
1968	105.0	103.0	112.9	32.8	6.0	5.2	5.7	46.4	44.8	87.1	55.3	57.3	661.5
1969	104.2	85.1	91.4	34.7	8.6	15.6	22.7	20.8	46.1	42.3	73.8	118.6	663.9
1970	158.6	71.4	106.5	61.5	43.7	20.0	9.6	0.0	36.2	56.6	82.3	118.7	765.1
1971	95.4	107.1	85.5	18.4	27.0	14.6	2.4	23.9	19.9	94.6	63.4	108.4	660.6
1972	132.9	92.8	149.6	76.5	29.2	3.8	6.8	28.0	22.6	51.3	74.6	79.1	747.2
1973	183.2	119.1	159.9	82.6	11.7	10.0	21.3	30.4	24.8	95.2	38.4	170.4	947.0
1974	91.4	138.4	79.8	48.5	0.5	27.7	12.6	20.8	31.8	62.2	63.5	114.3	691.5
1975	191.0	120.0	121.0	126.0	50.0	14.0	3.0	195.0	71.0	111.0	141.0	81.0	1224.0
1976	133.0	128.0	121.0	6.0	31.0	27.0	0.0	23.0	0.0	87.0	123.0	88.0	767.0
1977	93.0	132.0	126.0	128.0	98.0	15.0	3.0	22.0	63.0	79.0	258.0	73.0	1090.0
1978	257.0	130.0	84.0	110.0	32.0	10.0	0.0	1.0	90.0	82.0	109.0	123.0	1028.0
1979	90.0	188.0	85.0	66.0	19.0	1.0	1.0	1.0	18.0	30.0	122.0	102.0	723.0
1980	143.5	97.0	61.0	106.7	9.7	2.0	0.0	1.3	7.2	102.9	134.1	163.8	829.2
1981	143.5	226.1	90.2	27.9	13.0	2.3	0.0	43.2	82.5	121.9	167.6	114.5	1032.7
1982	127.3	133.6	81.3	52.3	19.1	4.4	19.8	3.2	32.4	144.8	156.2	120.7	895.1
1983	111.8	69.8	92.7	78.9	18.3	5.7	0.0	29.8	29.8	44.5	66.0	59.8	607.1
1984	124.6	191.8	90.8	99.1	43.1	1.3	0.0	0.0	8.9	97.5	36.8	153.9	847.8
1985	128.7	78.7	105.5	111.8	40.6	56.4	0.8	0.5	57.1	38.7	87.6	104.7	811.1
1986	71.2	195.1	134.6	104.7	63.0	3.7	11.8	49.4	0.0	48.1	22.8	155.8	860.2
1987	198.9	149.9	138.4	56.9	30.5	23.4	13.2	30.5	40.6	68.1	93.2	118.9	962.5
1988	240.5	139.2	144.5	139.7	26.9	0.0	1.5	3.8	54.4	55.6	70.6	155.4	1032.1
1989	171.2	163.8	139.8	0.0	33.3	7.9	1.0	53.8	60.5	121.0	91.9	69.8	914.0
1990	214.4	82.3	92.5	91.7	57.1	63.0	12.2	3.6	64.0	104.1	142.2	88.9	1016.0
1991	76.5	44.2	129.5	61.5	44.2	13.0	5.3	6.1	42.7	89.4	66.0	68.1	646.5
1992	43.4	78.2	106.0	46.0	12.2	11.7	7.1	18.8	38.6	84.5	81.7	118.6	646.8
N° de Datos	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
Curtosis	-0.1	0.0	2.7	-0.5	3.3	6.6	0.5	21.2	-0.3	-0.5	4.5	1.4	-0.3
3º Cuartil	161.8	155.4	144.1	95.7	41.2	14.7	9.8	28.5	55.1	102.1	110.9	122.9	951
Mediana	128.0	131.8	121.0	68.8	27.0	5.6	3.8	18.3	39.5	85.9	82.1	114.4	847
1º Cuartil	94.2	96.0	90.7	47.9	15.1	2.4	1.0	3.6	24.3	56.4	64.0	86.3	761
Máximo	257.0	253.6	242.3	139.7	98.0	63.0	22.7	195.0	90.0	152.1	258.0	237.9	1224.0
Promedio	132.4	131.8	119.6	70.9	29.5	11.3	6.3	22.9	40.0	83.6	91.3	115.1	854.6
Mínimo	43.4	44.2	61.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	22.8	57.3	607.1
Desv. Est.	51.6	48.5	35.0	34.3	19.2	14.1	6.7	33.3	22.1	30.7	44.4	41.7	147.6
Coef. Asi.	0.6	0.5	1.1	-0.1	1.4	2.4	1.2	4.2	0.2	0.2	1.6	1.1	0.4
Coef. Var.	0.4	0.4	0.3	0.5	0.7	1.2	1.1	1.5	0.6	0.4	0.5	0.4	0.2

Fuente:

1957-1992: Ampliación Presa de Relaves Ocroyoc - Evaluación hidrológica - Precipitación Máximas en 24 Horas y PMP (Golder, Setiembre 2008) 1975-1979: Data proporcionada por SMEB (Marzo 2019)

	Sin dato
x.x	Valor dudoso

Anexo 15. *Evidencia de ejecución y control numérico del modelo modflow 6*

La corrida final del modelo fue ejecutada con MODFLOW 6.7.0. El control previo reportó 0 errores y 0 advertencias. Tanto la simulación estacionaria como la simulación transitoria de doce periodos registraron terminación normal. Los archivos binarios de salida heads.hds y budget.cbc fueron generados para ambas simulaciones y utilizados en el postproceso de resultados.

Control	Resultado
PRE-CHECK	0 errores / 0 advertencias
Estacionario	Normal termination of simulation
Transitorio	12 periodos; Normal termination of simulation
Salida de carga	heads.hds
Salida de balance	budget.cbc

Anexo 16. balance de masas del modelo

El cierre de masa se verificó directamente a partir del archivo budget.cbc. El estado estacionario presenta un residual de -1.54×10^{-7} m³/d. En los doce periodos transitorios los residuales se mantienen próximos a cero, sin evidencia de pérdida o generación artificial de masa.

Mes	RCHA (m ³ /d)	DRN (m ³ /d)	GHB (m ³ /d)	Residual (m ³ /d)
Ene	1736.64	-1718.94	171.05	-4.21E-08
Feb	1736.64	-1735.91	171.05	-9.86E-08
Mar	1753.92	-1756.89	171.05	-5.08E-08
Abr	1481.97	-1626.33	171.05	-1.95E-08
May	1062.72	-1411.15	171.05	-5.64E-08
Jun	768.96	-1255.31	171.05	5.94E-07
Jul	596.16	-1159.06	171.05	3.10E-07
Ago	794.88	-1218.72	171.05	1.20E-07
Sep	1296	-1431.87	171.05	-3.96E-09
Oct	1610.48	-1603.32	171.05	-8.54E-08
Nov	1641.6	-1645.74	171.05	-3.85E-07
Dic	1710.72	-1694.5	171.05	-5.57E-08

Anexo 17. Trazabilidad de la implementación numérica

Para la formulación del modelo numérico se integró la información hidrogeológica disponible en la tesis, incluyendo la configuración geológica e hidrogeológica del área de estudio, las propiedades hidráulicas de las unidades, las condiciones de recarga y descarga y los elementos de control del sistema. Esta información fue incorporada al dominio numérico mediante la discretización espacial y la asignación de parámetros y condiciones de contorno requeridas por MODFLOW 6.7.0, manteniendo coherencia con el modelo conceptual hidrogeológico desarrollado para el Tajo Raúl Rojas.

Elemento	Clasificación / tratamiento
Recarga media sectorial 37.8 L/s	THESIS_DATA; entrada del balance hídrico
Serie mensual de recarga	THESIS_DATA
Unidades A2/B2/C1/C2	THESIS_DATA + reconstrucción espacial desde figuras
Huella del tajo / falla / labores	FIGURE_MODELING
8 capas numéricas	MODEL_ASSUMPTION de discretización
Ss, Sy y anisotropía vertical	MODEL_ASSUMPTION
Conductividad de la zona de falla	CALIBRATABLE_PARAMETER
Conductancia DRN	CALIBRATABLE_PARAMETER / representación equivalente
SEV-17 ~80 m sin agua	Condición hidrogeológica local representada en el modelo MODFLOW 6.7.0