

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO COMPLEMENTARIO A LA LINEA
BASE FÍSICA DE LA ZONA DE TORREMANI - SANDIA - PUNO”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

LEANDRO VIDAL ARÉVALO BRAVO

LIMA – PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERIA AGRÍCOLA

**“ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO COMPLEMENTARIO A LA LINEA BASE
FÍSICA DE LA ZONA DE TORREMANI - SANDIA - PUNO”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TITULO DE:
INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

LEANDRO VIDAL ARÉVALO BRAVO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. JESÚS ABEL MEJÍA MARCACUZCO

Presidente

Mg. Sc. GUILLERMO CLEMENTE AGUILAR GIRALDO

Asesor

Mg. Sc. JAVIER ANTONIO GOICOCHEA RÍOS

Miembro

Mg. Sc. ALEXIS ENRIQUE RUBIO VALLE

Miembro

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA

A mis padres, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. Por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y su apoyo incondicional en los momentos más difíciles. A mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Guillermo Clemente Aguilar Giraldo, por la oportunidad, confianza y apoyo en el proceso de ejecución y redacción de Trabajo de Suficiencia Profesional.

Al Ing. Robert Sulcahuaman Delgado, quisiera hacer patente mi agradecimiento por las valiosas aportaciones para mejorar la presente investigación.

A la empresa CONSULTEA S.A.C por darme la oportunidad de hacerme parte de su equipo de trabajo por su apoyo y formación como profesional.

A la empresa SIFMAN SOLUCIONES S.A.C que me ha permitido mejorar mi desarrollo profesional, además de valorar el esfuerzo realizado para alcanzar con éxito los objetivos propuestos.

A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron y creyeron posible el desarrollo de este trabajo basado en una experiencia laboral y aplicativa con beneficio social.

ÍNDICE GENERAL

I. PRESENTACIÓN	1
II. INTRODUCCIÓN	3
III. OBJETIVOS	4
3.1. OBJETIVO GENERAL	4
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
IV. CUERPO DEL TRABAJO	5
4.1. CONCEPTOS APLICADOS	5
4.1.1. Medición del escurrimiento (aforos)	5
4.1.2. Hidrogeología	9
4.1.3. Acuíferos.....	10
4.1.4. Parámetros hidrogeológicos.....	12
4.1.5. Ley de Darcy.....	13
4.1.6. Prospección Geofísica	14
4.2. METODOLOGÍA	18
4.2.1. Ubicación y extensión del área de estudio.....	18
4.2.2. Geología y Geomorfología	18
4.2.3. Prospección Geofísica	27
4.2.4. Trabajo de gabinete.....	30
4.2.5. Interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEVs).....	35
4.2.6. Mapas Geofísicos Generalizados.....	41
4.2.7. Inventario de pozos y fuentes de agua	47
4.2.8. El acuífero.....	48
4.2.9. Napa Freática	49
4.2.10. Hidrodinámica subterránea	49
4.2.11. Permeabilidad o conductividad hidráulica (K)	49
4.2.12. Hidrogeoquímica	52
4.2.13. Modelo conceptual de flujo de agua subterráneo	60
4.3. EXPERIENCIAS Y APORTES AL TRABAJO PROFESIONAL	61
4.3.1. Contribuciones a la solución de situaciones problemáticas que se hayan presentado durante su estancia en la empresa.....	61
4.3.2. Contribuye al centro laboral en términos de las competencias y habilidades adquirida durante su formación profesional	61

4.3.3. Explica el nivel de contribución al centro laboral a partir de la solución de situaciones problemáticas	62
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
5.1. CONCLUSIONES.....	63
5.2. RECOMENDACIONES	64
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
VII. ANEXOS.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Distancia mínima entre verticales recomendadas	7
Tabla 2: Formaciones hidrogeológicas y rangos característicos de porosidad y permeabilidad	10
Tabla 3: Resistividades de algunas rocas	17
Tabla 4: Coordenadas de los SEVs	31
Tabla 5: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-01 (Zonas Qda. Torremani 2).....	31
Tabla 6: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-02 (Zonas Qda. Torremani 2).....	31
Tabla 7: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-03 (Zonas Qda. Torremani 2).....	32
Tabla 8: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-04 (Zonas Qda. Torremani 2).....	32
Tabla 9: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-05 (Zona Qda. Torremani 2)	32
Tabla 10: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-06 (Zona Qda. Torremani 2)	32
Tabla 11: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-07 (Zona Qda. Torremani 2)	33
Tabla 12: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-08 (Zona Qda. Torremani 2)	33
Tabla 13: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-09 (Zona Qda. Torremani 2)	33
Tabla 14: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-10 (Zona Qda. Torremani 2)	33
Tabla 15: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-11 (Zona Qda. Jalachaca).....	34
Tabla 16: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-12 (Zona Qda. Jalachaca).....	34
Tabla 17: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-13 (Zona Qda. Jalachaca).....	34
Tabla 18: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-14 (Zona Qda. Jalachaca).....	34
Tabla 19: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-15 (Zona Qda. Jalachaca).....	34
Tabla 20: Caudales obtenidos.....	47
Tabla 21: Valores de Permeabilidad.....	50
Tabla 22: Valores de Transmisividad.....	50
Tabla 23: Valores de Porosidad.....	51
Tabla 24: Resultados de laboratorio de las muestras vs ECAs	52
Tabla 25: Riesgo de salinidad en función a la conductividad eléctrica.....	55
Tabla 26: Clasificación del agua en función de los grados franceses	56
Tabla 27: Valores de dureza de las muestras.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Longitud de la superficie libre de agua	6
Figura 2: Dividir el espejo de agua	6
Figura 3: Medir la profundidad h, en cada tramo	7
Figura 4: Determinar el área en cada tramo	8
Figura 5: Velocidad en una sección de corriente	8
Figura 6: Tipos de acuíferos	11
Figura 7: Tipos de acuíferos según la porosidad	12
Figura 8: Parámetro de carga constante	14
Figura 9: Arreglo del dispositivo SEV Schlumberger	16
Figura 10: Columna Litoestratigráfica de los Cuadrángulos de Putina y La Rinconada	21
Figura 11: Columna Litoestratigráfica de la Formación Sandia.....	22
Figura 12: Vista de bloques erráticos mayores a 1m de Morrenas (Zona Quebrada Jalachaca).....	24
Figura 13: Vista de la parte media alta de la microcuenca Torremani 2	24
Figura 14: Mapa Geomorfológico	27
Figura 15: Vista de equipo empleado	30
Figura 16: Sección geofísica generalizada A-A' (Zona Qda. Torremani 2)	36
Figura 17: Sección geofísica generalizada B-B' (Zona Qda. Torremani 2).....	37
Figura 18: Sección geofísica generalizada C-C' (Zona Qda. Jalachaca)	39
Figura 19: Sección geofísica generalizada D-D' (Zona Qda. Jalachaca).....	40
Figura 20: Mapa de isoespesores del horizonte acuífero, zona Qda. Torremani 2, parte media baja.....	41
Figura 21: Mapa de isoespesores del horizonte acuífero, zona Qda. Torremani 2, parte alta.....	42
Figura 22: Mapa de isoespesores del horizonte acuífero, zona Qda. Jalachaca	43
Figura 23: Mapa de isopropfundidades del techo impermeable, zona Qda. Torremani 2, parte media baja.....	44
Figura 24: Mapa de isopropfundidades del techo impermeable, zona Qda. Torremani 2, parte alta.....	44
Figura 25: Mapa de isopropfundidades del techo impermeable, zona Qda. Jalachaca	45
Figura 26: Mapa de isoresistividades del acuífero (H3), zona Qda. Torremani 2 (SEV-01 al SEV-05)	46

Figura 27: Mapa de iso-resistividades del acuífero (H3), zona Qda. Torremani 2 (SEV-06 al SEV-10)	46
Figura 28: Aforo de afluente N°03 a la Qda. Jalachaca	47
Figura 29: Aforo del curso principal de agua de la Qda. Torremani.....	48
Figura 30: Error de balance iónico (EBI%).....	54
Figura 31: Clasificación según la norma Wilcox	57
Figura 32: Diagrama tipo Piper	58
Figura 33: Diagrama tipo Stiff	59
Figura 34: Diagrama tipo Schoeller Berkloff	60
Figura 35: Gráfico de la curva SEV - 01	68
Figura 36: Gráfico de la curva SEV - 02	68
Figura 37: Gráfico de la curva SEV – 03	69
Figura 38: Gráfico de la curva SEV - 04.....	69
Figura 39: Gráfico de la curva SEV – 05	70
Figura 40: Gráfico de la curva SEV – 06	70
Figura 41: Gráfico de la curva SEV – 07	71
Figura 42: Gráfico de la curva SEV – 08	71
Figura 43: Gráfico de la curva SEV – 09	72
Figura 44: Gráfico de la curva SEV – 10	72
Figura 45: Gráfico de la curva SEV – 11	73
Figura 46: Gráfico de la curva SEV – 12	74
Figura 47: Gráfico de la curva SEV – 13	75
Figura 48: Gráfico de la curva SEV – 14	76
Figura 49: Gráfico de la curva SEV – 15	77
Figura 34: Flujo de agua superficial y subterránea – zona Qda. Jalachaca.....	78
Figura 51: Flujo de agua superficial y subterránea – zona Qda. Torremani 2, parte alta – aguas arriba.....	79
Figura 52: Flujo de agua superficial y subterránea – zona Qda. Torremani 2, parte media baja – aguas abajo.....	80
Figura 53: Ubicación de la zona de estudio.....	81
Figura 54: Mapa Geológico.....	82
Figura 55: Mapa Hidrogeológico	83
Figura 56: Ubicación de los sondeos eléctricos verticales y secciones geoeléctricas	84
Figura 57: Mapa de inventario de fuentes de agua.....	85

Figura 58: Mapa de Hidroisohipsas	86
Figura 59: Mapa de Isopropundidades	87
Figura 60: Modelo Conceptual	88

I. PRESENTACIÓN

La ingeniería agrícola en el ámbito del desarrollo de los recursos hídricos comprende el manejo del agua superficial y subterránea, en el sentido promueve el manejo integrado, control, aprovechamiento, preservación y sostenibilidad de los sistemas hídricos con el fin de maximizar el bienestar social y económico.

Como egresado de la facultad de Ingeniería Agrícola me he desempeñado en diferentes empresas del sector público y privado desempeñando diferentes labores. En las empresas EINDESA S.A.C y CONSULTEA S.A.C se realizaron las siguientes funciones: inventario y reconocimiento de puntos de agua, usos potenciales, monitoreo de variaciones en las aguas subterráneas (nivel freático), determinación de la permeabilidad del terreno mediante ensayos de bombeo, pruebas de resistividad del suelo mediante sondeo eléctrico vertical, monitoreo superficial de la cantidad y calidad del agua. Se vinculan con los conocimientos aprendidos durante la formación como profesional en temas, propiedades y parámetros de los acuíferos, flujo de las aguas subterráneas, pruebas hidrodinámicas, medición de caudales, movimiento del agua en el suelo, balance hidrológico, calidad del agua entre otros.

Las actividades realizadas en la empresa SIFMAN que brinda servicios a la compañía minera Antapaccay fueron las siguientes: aforos diarios de canales de contacto y no contacto adyacentes a las operaciones de la compañía Minera Antapaccay, aforos en puntos hidrométricos establecidos en el río Cañipia para determinar las variaciones de caudal en transcurso de su cauce, sistema de reposición de agua en los canales; Quetara, San José, Vista Alegre, Jutumayo), Lectura de niveles de niveles de agua en piezómetros y pozos ubicados en el sector de Huinipampa, adyacentes a las operaciones de la minera Antapaccay Se puso en práctica el diseño del vivero para la producción de plántulas frutícolas, aprendido en la asignatura de Diseño Rural, proporcionando conocimientos sobre diseño, materiales y procedimientos constructivos. En el Proyecto de modernización de los recursos hídricos (PMGRH) de la Autoridad Nacional De Agua (ANA), se puso en práctica los conocimientos

adquiridos en la asignatura Percepción Remota y SIG. Diseño de canales de contacto y no contacto haciendo uso de programa AutoCAD civil 3D, se puso en práctica conceptos adquiridos en la asignatura de Mecánica de fluidos, Hidráulica, Aguas Subterráneas, Topografía I, II y III, Hidrología, Percepción Remota y SIG, Diseño Rural, Estructuras Hidráulicas I, Ingeniería de Drenaje, Mecánica de Suelos, Geología y Geotecnia.

II. INTRODUCCIÓN

La explotación de agua subterránea es una alternativa para el abastecimiento, sin embargo, es necesario la planificación y gestión de los recursos hídricos subterráneos, así como la protección del acuífero y evaluar, permanentemente, los niveles freáticos que permitan monitorear las reservas de agua en el acuífero a fin de evitar desequilibrios.

La empresa CORI PUNO S.A.C. solicitó ejecutar un estudio Hidrogeológico con fines de investigación de aguas subterráneas para caracterizar las condiciones hidrogeológicas en las zonas de las Quebradas “Jalachaca” y “Torremani 2” del proyecto minero TORREMANI.

En este contexto, se planificó ejecutar el reconocimiento geológico y geomorfológico; análisis hidrogeoquímico del agua subterránea del acuífero in situ y en laboratorio acreditado, además del estudio geofísico por el método de las resistividades eléctricas en su variante Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), a fin de reconocer la estructura del subsuelo, la calidad de los materiales y detectar la presencia de agua subterránea.

La iniciativa de la Asociación de CORI PUNO S.A.C. se sustenta en la Ley N° 29338 “Ley de Recursos Hídricos” que indica que el Estado promueve e impulsa la inversión privada en el uso del agua subterránea, por lo que a través del “Reglamento de Procedimientos Administrativos para el Otorgamiento de Derechos de Uso de Agua”, aprobado mediante la Resolución Jefatural N°007-2015-ANA, estableció los procedimientos específicos para el caso de la investigación de aguas subterránea.

III. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar el estudio Hidrogeológico de las Quebradas “Jalachaca” y “Torremani 2” del proyecto minero TORREMANI, ubicado en la cuenca Inambari; como complemento de la línea base física de la zona de estudio.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar trabajos de exploración indirecta de las aguas subterráneas mediante sondajes eléctricos verticales.
- Realizar el inventario y aforo de fuentes de agua.
- Evaluar las características geológicas, geomorfológicas e hidrodinámicas del acuífero, así como la hidrogeoquímicas de sus aguas.

IV. CUERPO DEL TRABAJO

4.1. CONCEPTOS APLICADOS

4.1.1. Medición del escurrimiento (aforos)

La hidrometría, es la rama de la hidrología que estudia la medición del escurrimiento. Para este mismo fin, es usual emplear otro término denominado aforo. Aforar una corriente, significa determinar a través de mediciones, el caudal que pasa por una sección dada y en un momento dado (Villón, 2002).

Existen diversos métodos, para determinar el caudal de una corriente de agua, cada uno aplicable a diversas condiciones, según el tamaño de la corriente o según la precisión con que se requieran los valores obtenidos. Los métodos más utilizados son:

- Aforos con flotadores
- Aforos volumétricos
- Aforos con vertederos
- Aforos con correntómetro o molinete
- Aforos con medidas de la sección y la pendiente

a. Aforos con correntómetro o molinetes: para este método, se emplea el correntómetro o molinete. Estos son aparatos que miden la velocidad, en un punto dado del curso del agua. Esta velocidad es medida en los instrumentos, por medio de un órgano móvil, que detecta la velocidad de la corriente y transmite las indicaciones de un interruptor encargado de cerrar un circuito eléctrico, cuando ha dado un cierto número de vuelta, sobre un contador o contómetro (de impulsiones de sonido, señales luminosas, digitales, etc.).

b. Proceso para realizar el aforo

Calcular el área de la sección transversal: Para iniciar un aforo, es necesario dividir la sección transversal (área hidráulica) en franjas, para esto:

- Medir el ancho del río (longitud de la superficie libre de agua o espejo de agua T_1).

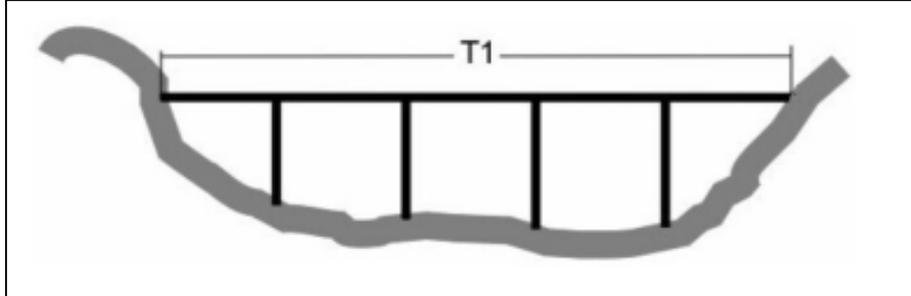


Figura 1: Longitud de la superficie libre de agua

FUENTE: Villón (2002)

- Dividir el espejo de agua T_1 , en un número de N tramos (por lo menos $N=10$), siendo el ancho de cada tramo:

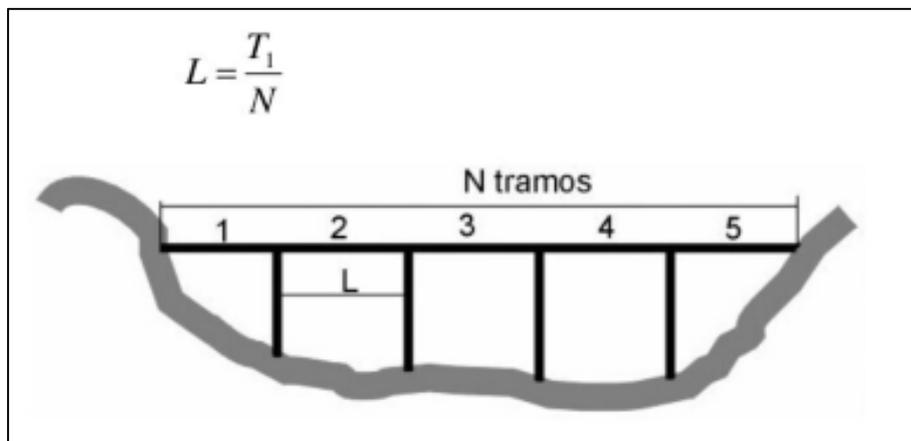


Figura 2: Dividir el espejo de agua

FUENTE: Villón (2002)

- Según, el proyecto hidrometeoro lógico centroamericano, la distancia mínima entre verticales, se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Distancia mínima entre verticales recomendadas

Ancho total mínimo del río (m)	Distancia entre verticales (m)
Menos de 2	0.20
2 – 3	0.3
3-4	0.4
4-8	0.5
8-15	1.0
15-25	2.0
25-35	3.0
35-45	4.0
45-80	5.0
80-160	10.0
160-350	20.0

FUENTE: Villón (2002)

- Medir en cada vertical, la profundidad h , puede suceder que en los márgenes la profundidad sea cero o diferente de cero.

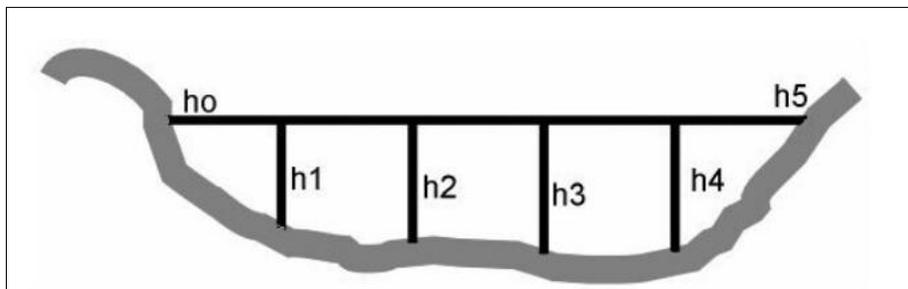


Figura 3: Medir la profundidad h , en cada tramo

FUENTE: Villón (2002)

- El área de cada tramo se puede determinar como el área de un trapecio. Si la profundidad en algunos de los extremos es cero, se calcula como si fuera un triángulo.

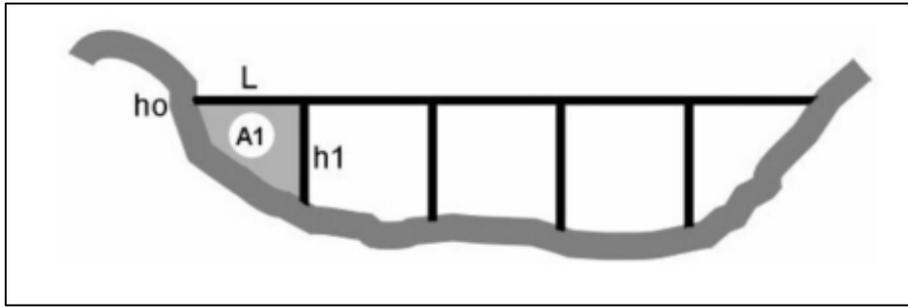


Figura 4: Determinar el área en cada tramo

FUENTE: Villón (2002)

Ejemplo:

$$A_1 = \frac{(h_0 + h_1)}{2} * L$$

Donde:

A_1 = área del tramo 1

h_0, h_1 = profundidades en los extremos del tramo

L = ancho de la superficie del tramo

Si $h_0 = 0$, la figura es un triángulo, siendo su área;

$$A_1 = \frac{(h_1)}{2} * L$$

Cálculo de la velocidad puntual: la velocidad en una sección de una corriente varía tanto transversalmente como con la profundidad, como se muestra en la figura.

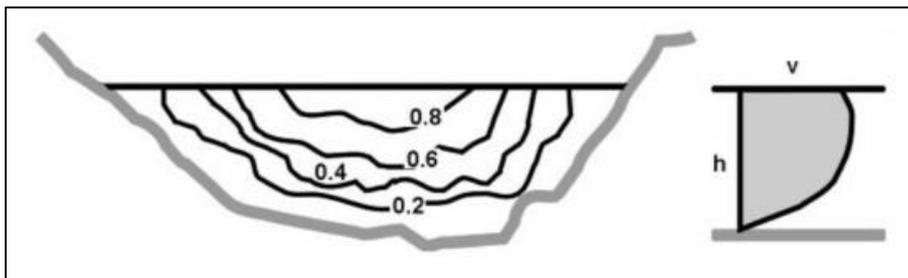


Figura 5: Velocidad en una sección de corriente

FUENTE: Villón (2002)

Las velocidades, se miden en distintos puntos en una vertical; la cantidad de puntos depende

de las profundidades del cauce y del tamaño del correntómetro.

Para calcular la velocidad en punto:

- Colocar el instrumento (correntómetro o molinete) a 1/3 de; tirante
- Medir la velocidad puntual en m/s a esa profundidad

Calcular el caudal

Método del área y velocidad promedio

Procedimiento:

- Calcular por cada vertical la velocidad media, usando el método de uno, dos o tres puntos.
- Determinar el área que existe entre dos verticales consecutivas, utilizando la fórmula del trapecio, es decir:

$$A_1 = \frac{(h_0 + h_1)}{2} * L$$

- Determinar el caudal que pasa por cada tramo utilizando la ecuación de continuidad, multiplicando la velocidad promedio del tramo por el área del tramo, es decir:

$$Q_1 = V_1 * A_1$$

- Calcular el caudal total que pasa por la sección, sumando los caudales de cada tramo, es decir:

$$Q = \sum Q_i$$

4.1.2. Hidrogeología

La hidrogeología o hidrología subterránea, se puede definir como “la ciencia de las aguas subterráneas comprendida en las ciencias de la Tierra que persigue el conocimiento de las condiciones geológicas e hidrogeológicas y de las leyes físicas que rigen el origen, la presencia, los movimientos y las propiedades de las aguas subterráneas. Se ocupa también de las aplicaciones de estos conocimientos a las acciones humanas sobre las aguas subterráneas, sobre todo a su prospección, captación y protección” (Castany y Margat, 1977).

4.1.3. Acuíferos

Los acuíferos deben ser entendidos como formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir agua. No todas las formaciones geológicas tienen la capacidad de almacenar y transmitir agua, encontrándose formaciones:

- a. **Acuitardos:** formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, donde el agua circula a través de ella con dificultad.
- b. **Acuicludos:** formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella.
- c. **Acuífugo:** formación geológica que no contiene agua, ya que no permite que circule a través de ella.

Tabla 2: Formaciones hidrogeológicas y rangos característicos de porosidad y permeabilidad

Tipo de formación hidrogeológica	Ejemplos	Rangos de permeabilidad	Rangos de porosidad
Acuífero	Formaciones aluviales con gravas y arena Formaciones calizas karstificadas	1 – 1000 m/día	10% - 30%
Acuitardo	Formaciones aluviales con arenas muy finas, limos y arcillas	0.1 – 0.001 m/día	20% - 40%
Acuicludo	Formaciones arcillosas	$10^{-4} - 10^{-7}$ m/di	>40%
Acuífugo	Rocosas ígneas y metamórficas “sanas” Formaciones carbonatadas sin fisuración ni karsitificación	$< 10^{-6}$ m/día	<0.1%

FUENTE: Molinero (2005)

Los acuíferos desde el punto de vista hidráulico de las formaciones geológicas, así como a su posición estructural en el terreno, se distinguen tres tipos principales de acuíferos:

- a. **Acuífero libre o freático:** son aquellos en los que el nivel superior de saturación se encuentra a presión atmosférica. A la superficie piezométrica de un acuífero libre se le denomina superficie freática. Por esta razón, los acuíferos libres son también conocidos como “acuíferos freáticos”. Por lo tanto, la superficie freática es una superficie real que delimita el acuífero libre (por debajo) de la zona vadosa (por encima) (Figura 6).
- b. **Acuíferos confinados** (o acuíferos cautivos): corresponden a formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua, confinadas entre dos capas o estratos que podemos asumir como impermeables, ya sean acuífugos o acuicludos (Figura 6).
- c. **Acuífero semiconfinado o semicautivos:** corresponden a situaciones similares a las que

presentan los acuíferos confinados, pero con la particularidad de que el estrato confinante corresponde a un acuitardo, en lugar de un acuífugo o acuícludo. Por lo tanto, los acuíferos semiconfinados pueden recibir una cierta recarga, también llamada goteo, a través de la capa semipermeable que los confina (Figura 6).



Figura 6: Tipos de acuíferos

FUENTE: Manual de aguas subterráneas (2012)

En función del tipo de porosidad se clasifican en:

- a. Acuíferos de porosidad primaria, porosos o sedimentarios: Constituidos por formaciones geológicas sedimentarias. Los materiales suelen ser gravas y principalmente arenas, que varían su composición y tamaño en función de su origen geológico (fluvial, eólico, lacustre, glacial, etc.). Estos materiales pueden estar sueltos o no consolidados (generalmente son formaciones recientes, de edad cuaternaria) o consolidados (Figura 7).
- b. Acuíferos de porosidad secundaria, fisurados o fracturados: Formados por rocas “duras” de origen ígneo o metamórfico. La porosidad en estos acuíferos viene dada por la presencia de zonas de alteración, fracturas, fallas o diaclasas, única forma que tiene el agua de almacenarse y de circular. Hay que tener en cuenta que para que el agua pueda circular, estas fracturas tienen que estar abiertas y comunicadas (Figura 7).

- c. Acuíferos por disolución, químicos o kársticos: Compuestos por rocas de origen sedimentario (calizas, margas, dolomías), donde la porosidad (huecos y cavernas) se desarrollan en forma secundaria por disolución del carbonato. El agua en estos acuíferos circula por entre las grietas con una velocidad mayor que en los acuíferos porosos o fracturados (Figura 7).

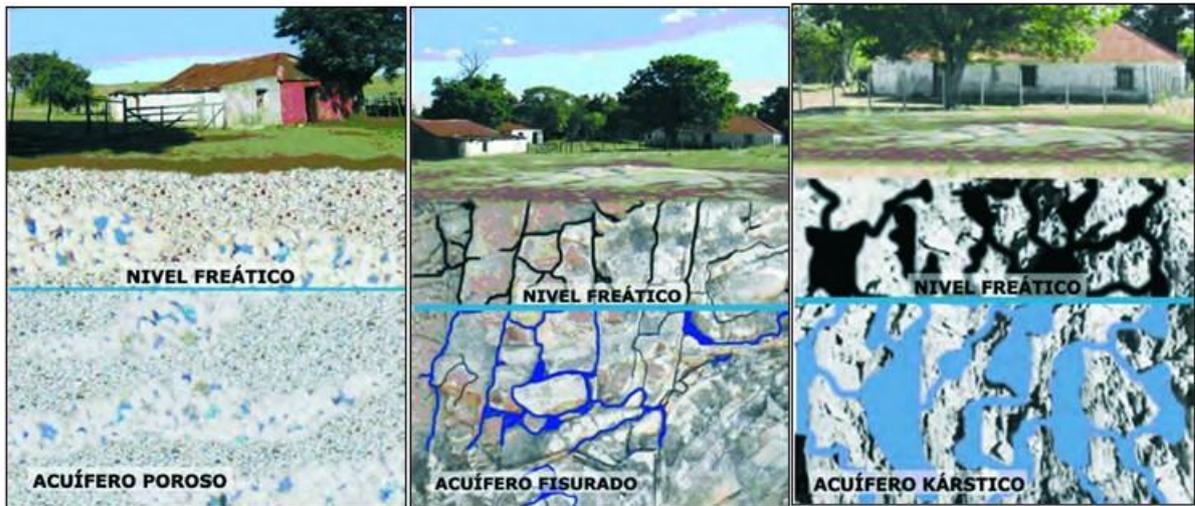


Figura 7: Tipos de acuíferos según la porosidad

FUENTE: Manual de aguas subterráneas (2012)

4.1.4. Parámetros hidrogeológicos

La propiedad de los acuíferos de contener agua está gobernada por varios factores: Porosidad, permeabilidad, transmisibilidad específica y coeficiente de almacenamiento. Conocer estas características permite evaluar la magnitud del recurso y su aprovechamiento racional sin peligro a agotarlo (Arocha, 1980).

- a. Porosidad (N): la porosidad es la relación entre el volumen de poros y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional y depende únicamente de la constitución de la roca o suelo.
- b. Permeabilidad (k): Es la propiedad de las rocas de permitir o no el flujo del agua; es decir, un estrato geológico siendo poroso, puede contener agua, pero si los espacios vacíos no se interconectan, el agua no circula.

Esta libertad de movimiento depende de: Tamaño y forma de las partículas, gradación del material y viscosidad del agua. La Permeabilidad tiene dimensiones de velocidad m/día o m (Arocha, 1980).

- c. Transmisibilidad o Transmisividad (T): Es una medida de la capacidad de un acuífero para conducir agua o transmitir agua, definiéndose como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, a través de una franja vertical de acuífero de ancho unitario, extendida en todo el espesor saturado, cuando el gradiente hidráulico es unitario y a una temperatura de 15°C.

La transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero:

$$T = b * K$$

Donde:

T: Transmisividad (L²/T),

b: Espesor saturado del acuífero (L)

K: Conductividad hidráulica (L/T).

- d. Coeficiente de almacenamiento (S): Es adimensional. Se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión). Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura del espesor saturado, si se produce un descenso de unidad del nivel piezométrico

$$s = \frac{\text{volumen de agua liberado}}{\text{volumen total que ha bajado la superficie piezométrica}} =$$

- Acuíferos libres: el coeficiente de almacenamiento, es igual a la porosidad efectiva y en general presenta extremos de 0,05 y 0,30.
- Acuíferos confinados: el coeficiente de almacenamiento varía entre 10^{-4} y 10^{-5}
- Acuíferos semiconfinados: el coeficiente de almacenamiento varía entre 10^{-3} y 10^{-4} .

4.1.5. Ley de Darcy

Darcy formulo la ley fundamental que describe el flujo de agua a través de un medio poroso como es el suelo, observando la relación entre la cantidad de agua que pasaba por unidad de tiempo a través de una columna de agua y el gradiente hidráulico (Goicochea, 2012).

Según Darcy la descarga es proporcional al gradiente hidráulico y a la sección de la región de flujo, proporcionalidad que puede explicarse matemáticamente como sigue:

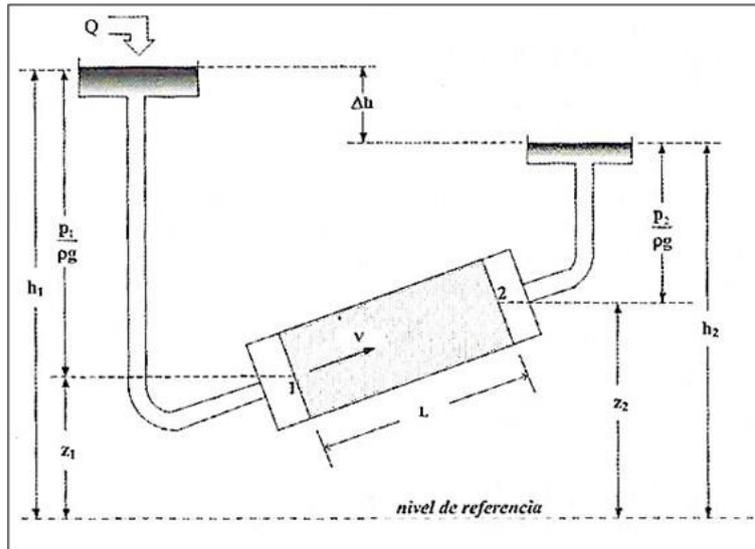


Figura 8: Parámetro de carga constante

FUENTE: Goicochea (2012)

$$Q = K * \frac{\Delta h}{L} * A = K * \frac{(h_1 - h_2)}{L} * A = K * i * A$$

Donde:

Q= Caudal de flujo a través de la muestra (L^3T^{-3})

Δh = pérdida de carga (L)

$h_1 - h_2$ = carga hidráulica (L)

L= longitud de la muestra (L)

A= sección transversal del tubo (L^2)

i= gradiente hidráulico

K = constante de proporcionalidad que depende de la naturaleza del suelo y del fluido (LT^{-1})

4.1.6. Prospección Geofísica

El método utilizado para este trabajo es el de Resistividades Eléctricas, el cual utiliza las características físicas de las rocas y materiales existentes en el subsuelo, tales como la conductividad eléctrica que se encuentra relacionada a la cantidad y calidad del fluido de saturación y que influye principalmente en las características hidrogeológicas del subsuelo.

El método utilizado es el de Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) que es la aplicación de dispositivos que permiten obtener información sobre la secuencia de horizontes geoelectrónicos existentes entre la superficie y una profundidad de investigación máxima determinada por la geometría de un sistema tetraelectrónico conectados al suelo. Como

resultado se obtiene curvas o diagramas de cada SEV cuya interpretación permite calcular la distribución vertical de las resistividades y los espesores reales de dichos horizontes o capas en el punto sondeado. Es a partir de esta información geoelectrica lo que permite correlacionar con las características litológicas existentes y la presencia de humedad en el subsuelo.

En este estudio se ha asumido que el material del subsuelo es aproximadamente horizontal e uniforme hacia abajo hasta la profundidad máxima de investigación y que las lecturas instrumentales solo están afectadas por cambios en la calidad del fluido intersticial y/o litológico.

En sondeo eléctrico vertical-SEV, consiste en introducir corriente continua al terreno mediante un par de electrodos llamados de emisión o de corriente A y B, cuya respuesta o sea la diferencia de potencial producido por el campo eléctrico se mide en otro par de electrodos denominados de recepción o de potencial M y N. Es posible calcular la resistividad del medio según:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

Dónde:

ρ : Resistividad del medio, en Ohm-m.

ΔV : Diferencia de potencial, en mV, medida en los electrodos M y N.

I: Intensidad de corriente en mA, medida en los electrodos A y B.

K: Constante geométrica que depende de la distribución de los electrodos, m.

Dispositivo Schlumberger: es también un dispositivo tetrapolar, rectilíneo y simétrico.

Debe cumplir con la siguiente condición: $MN < o = AB/5$

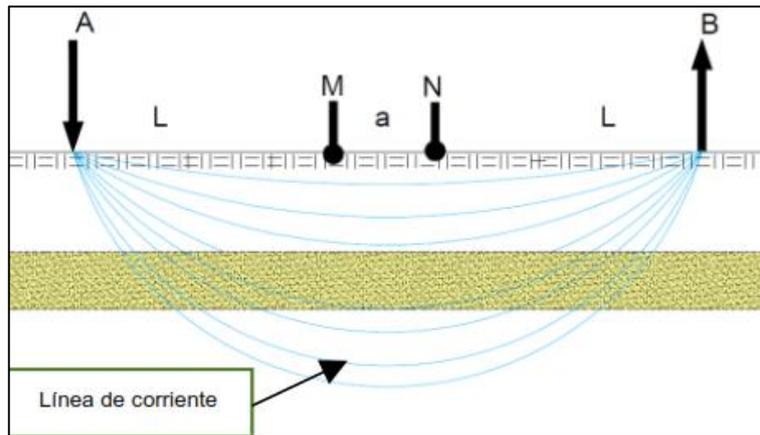


Figura 9: Arreglo del dispositivo SEV Schlumberger

FUENTE: García (2018)

El dispositivo Schlumberger tiene la ventaja que para una misma posición de los electrodos M y N, los electrodos A y B pueden disponerse a cualquier distancia que respete la condición mencionada. Esto acelera el trabajo en campaña ya que ahorra gran cantidad de operaciones.

a. Relación entre el comportamiento eléctrico e hidrogeológico del subsuelo

La aplicación del método de Resistividades Eléctricas permite conocer los espesores y la resistividad verdadera de las formaciones y a partir de esta última, de acuerdo a las correlaciones con las perforaciones o experiencia de las zonas, predecir el tipo de materiales que las integra.

Las características hidrogeológicas de los materiales o rocas no consolidadas vienen determinadas por su granulometría, existiendo una dependencia o relación entre la permeabilidad y el tamaño del grano. Dentro de estos materiales distinguiremos toda una gama, que van desde texturas finas (arcillas y limos), los cuales son impermeables hasta los de textura gruesa (gravas y arenas), los cuales son permeables.

Por lo tanto, existe una relación entre la permeabilidad y la resistividad dentro del acuífero saturado en las rocas no consolidadas, de tal manera que serán tanto más permeables cuanto más resistivas sean por el contrario serán más conductivas (porosidad grande, permeabilidad baja) ante la presencia de arcillas. Es por esta razón que la aplicación de este método nos permite detectar áreas permeables en las zonas investigadas.

En la siguiente tabla se muestran los valores típicos de resistividades de algunos medios y rocas.

Tabla 3: Resistividades de algunas rocas

Aguas y rocas	Resistividad (ohm-m)	
Agua de mar	0,2	
Agua de acuíferos aluviales	10	30
Agua de fuentes	50	100
Arenas y gravas secas	1000	10000
Arenas y gravas de agua dulce	50	500
Arenas y gravas de agua salada	0,5	5
Arcillas	2	20
Margas	20	100
Calizas	300	10000
Areniscas arcillosas	50	300
Areniscas cuarcitas	300	10000
Cineritas, tobas volcánicas	20	100
Lavas	300	10000
Esquistos Grafíticos	0,5	5
Esquistos arcillosos o alterados	100	300
Esquistos sanos	300	3000
Gneis, granitos alterados	100	1000
Gneis, granitos sanos	1000	10000

FUENTE: Astier (1975).

b. Limitaciones del Método

Este método es sensible a las perturbaciones eléctricas, lo cual influye en la efectividad de las interpretaciones.

Independientemente de la interpretación del modelo usado, la determinación de la profundidad del nivel del agua podría ser definida por el contraste de resistividades eléctricas en la cual podría haber influido la presencia del tipo de agua dulce presente. Además, ha influido la presencia de varios factores:

- En ciertas estaciones los contrastes de resistividad eléctrica podrían reflejar cambios en la composición del material del suelo y no cambios en el grado de saturación.
- Los cambios en la resistividad eléctrica podrán reflejar un incremento en la mezcla del suelo y/o de la calidad del tipo de agua, etc.
- Otra posibilidad es que la zona capilar sobre el nivel del agua podría ser causa de un contraste que indique un nivel del agua más alto que el nivel real: debido a que el espesor de la zona capilar dependa de la litología, la química del agua y condiciones atmosféricas que influyen en los cambios de las resistividades lo que reflejaría los límites entre el suelo parcialmente saturado y el techo de la zona capilar.

4.2. METODOLOGÍA

4.2.1. Ubicación y extensión del área de estudio

El área de estudio se ubica en el distrito de Quiaca, provincia de Sandia, región Puno. Hidrográficamente se ubica en la Cuenca Inambari, región hidrográfica del Atlántico (Figura 52).

4.2.2. Geología y Geomorfología

Los estudios geológicos y geomorfológicos realizados se enmarcan en los objetivos de una investigación de aguas subterráneas, que consiste en definir los límites laterales del acuífero existente en la zona y su correlación litológica, principalmente del horizonte aluvial que es donde se sitúa el acuífero a investigar.

a. Geología Regional

En base a información desarrollada por el INGEMMET a través de las cartas geológicas de cuadrángulo 30-y Rinconada y al trabajo realizado en campo se logra identificar que la zona de estudio (Figura 39).

b. Estratigrafía

En los cuadrángulos de Putina y La Rinconada, afloran rocas cuyas edades van desde el Ordovícico superior hasta el Cuaternario. Dentro de esta sucesión de rocas se pueden distinguir las siguientes etapas: El Paleozoico inferior, compuesto por una sedimentación lutítico-arenosa; el Paleozoico superior, compuesto por areniscas, lutitas, carbonatos; el Cretáceo, compuesto por conglomerados, areniscas, lutitas y, en una menor proporción, carbonatos. El Terciario representado por areniscas, lutitas y derrames de ignimbritas. El Cuaternario compuesto de conglomerados, areniscas y lodolitas. La actividad magmática está representada por intrusivos leucograníticos, probablemente emplazado en el límite Devoniano-Misissipiano.

• Formación Sandía (Os-s)

La unidad litoestratigráfica más antigua del Paleozoico en los cuadrángulos de Putina y La Rinconada, lo conforma la Formación Sandía (Ordoviciano medio). Fue definida inicialmente por Laubacher (1978) en el valle de Sandía, con un espesor aproximado de

3,000 m, constituida por una secuencia detrítica de cuarcitas, entrelazadas con niveles de pizarras negras.

Esta unidad aflora ampliamente en la parte norte del cuadrángulo de La Rinconada. Por el lado Norte, continúa con el cuadrángulo de Sandía; por el lado Este, continúa hasta la frontera con Bolivia; por el lado Sur, pasa por los alrededores de Pantini, La Rinconada, laguna Comini, Pararani, nevado Chapi, nevado Jorge Chávez, llegando hasta el nevado Salluyo en la frontera con Bolivia. En el cuadrángulo de Putina, continúa hacia el nevado Nacaria.

Su contacto estratigráfico con la unidad infrayacente no se observa, mientras que el contacto con la Formación Ananea es anormal a través de un sobrecurrimiento.

La columna más importante está dentro de la quebrada Iscaycruz, que da un grosor aproximado de 1,600 m. En la base se presentan un conjunto de sil titas finas de 150 m de espesor, con una foliación paralela denominada como de color gris oscuro a negro; inmediatamente después, vienen unos 700 m de una alternancia métrica o milimétrica de areniscas de grano fino, con cristales de muscovita y siltitas de grano fino, también con cristales de muscovita distribuidas subparalelamente a la esquistosidad, en bancos cuyos espesores varían entre 1 y 5 m. La muestra contiene textura de "Snowball" en cuarzo, que probablemente creció durante el aplanamiento de la foliación S1.

Sus estructuras sedimentarias internas son muy variadas, formando microdunas de 4 a 20 cm de longitud de onda; también "lenticular bedding", unas conectadas y otras sin conectar, presentan laminaciones paralelas, niveles de reactivación arcillosa dentro de los niveles de areniscas.

Hacia la parte superior, los bancos de areniscas de color gris plomo varían de 2 a 5 m de grosor, intercalándose sil titas negras que alcanzan entre 10 a 40 cm. En sección delgada, se observa que se trata de areniscas de grano fino, con microdunas cuyas longitudes de onda alcanzan los 10 cm, también con laminaciones paralelas. La esquistosidad no las afecta, debido a su carácter refractario, mientras que las siltitas desarrollan una esquistosidad

ligeramente subparalela a la foliación.

Edad y correlación

Desafortunadamente, no se ha podido encontrar fósiles en esta unidad, pero de acuerdo con su posición dentro de la secuencia litoestratigráfica del Paleozoico inferior y por su extensión con las mismas características petrológicas descritas en el valle de Sandía-Cuyo Cuyo, y otros lugares donde en base a su fauna, se le ha asignado una edad Caradociana.

Ambiente de sedimentación

Desafortunadamente, no se ha podido encontrar fósiles en esta unidad, pero de acuerdo a su posición dentro de la secuencia litoestratigráfica del Paleozoico inferior y por su extensión con las mismas características petrológicas descritas en el valle de Sandía-Cuyo Cuyo, y otros lugares donde en base a su fauna, se le ha asignado una edad Caradociana.

Por tratarse de una sedimentación impuesta por siltitas y lutitas, cuyas estructuras internas corresponden a "Flaser Bedding", "Lenticular Bedding", "Wave Bedding" y otras, indicarían que la formación se habría sedimentado en un ambiente de llanura tidal

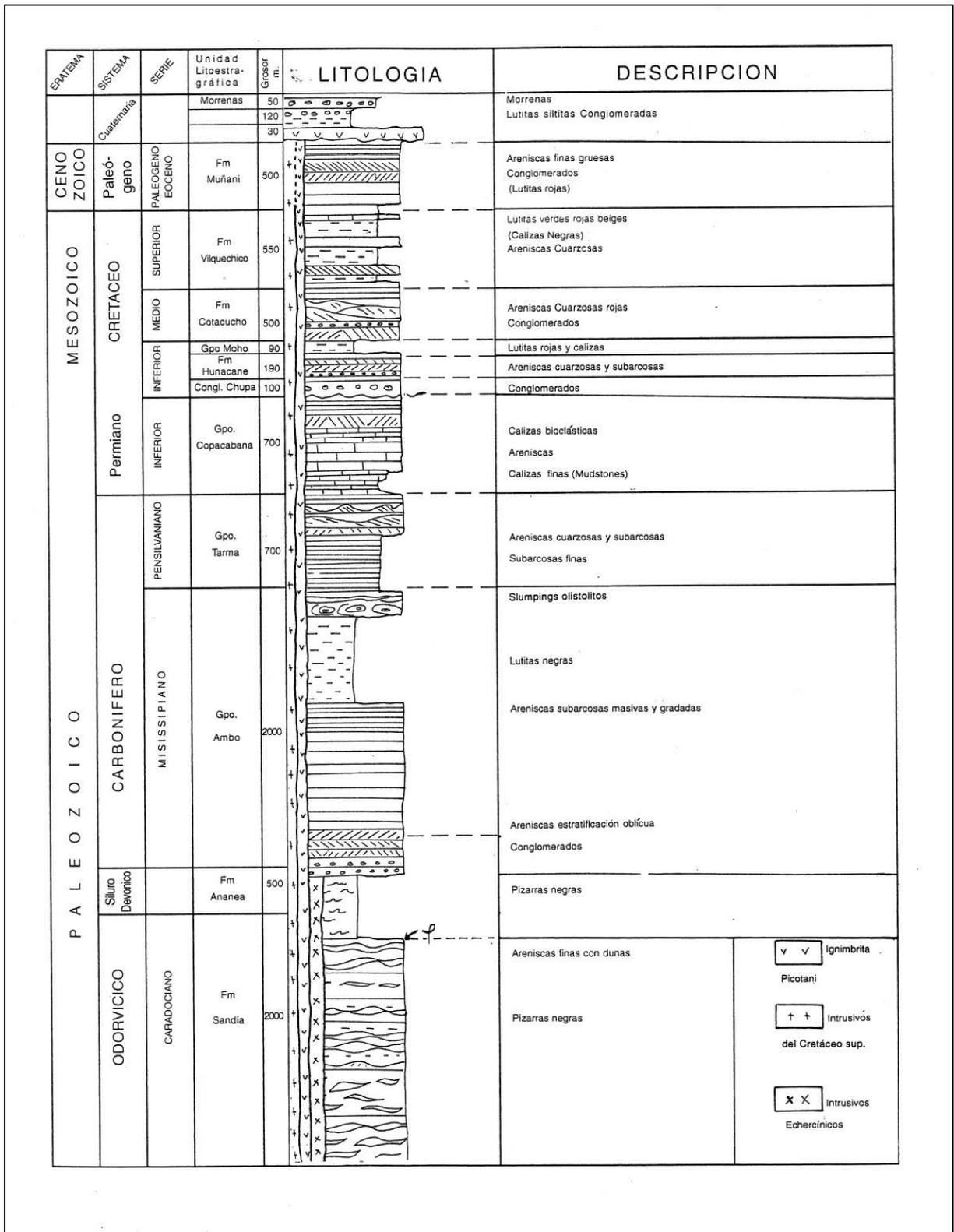


Figura 10: Columna Litoestratigráfica de los Cuadrángulos de Putina y La Rinconada

FUENTE: INGEMMET (1996). Boletín N° 66

Azángaro (Sur de los cuadrángulos de Putina y La Rinconada).

Esencialmente está constituido por limos y arcillas retrabajadas del substrato pliocénico. El espesor de esta cubierta por lo general es inferior a 1m; en depresiones pronunciadas forman suelos pantanosos.

d. Geología local

En base a información desarrollada por el INGEMMET a través de las cartas geológicas de cuadrángulo 30-y Rinconada y al trabajo realizado en campo se logra identificar que la zona de estudio se encuentra en un valle glacial con depósitos cuaternarios de origen morrénico, flanqueado por afloramiento rocoso de gran elevación.

Depósitos Morrénicos (Qpl-mo)

Compuesto por clastos sin ningún arreglo, dispersos en una matriz limo-arcillosa-arenosa. El tamaño promedio de clasto varía de 10 a 30 cm, existiendo bloques erráticos de más de 1 m de diámetro. En estos depósitos existen variaciones en la composición litológica de los clastos, dependiendo de su lugar de origen; así las morrenas que bordean la Cordillera Oriental tienen clastos de cuarcitas, pizarras, cuarzo de veta y algunos granitos, y las morrenas que bordean la precordillera del Carabaya contienen clastos de areniscas, calizas, chert y a veces ignimbritas. Estos depósitos morrénicos se han depositado en varias etapas de glaciación (Fornari et al.1981), etapas que se extenderían del Plioceno superior al Pleistoceno.

Los depósitos morrénicos tienen una importancia económica debido a su contenido de placeres auríferos, alcanzando valores comerciales, sobre todo las morrenas provenientes de la Cordillera Oriental más no las que provienen de la pre-cordillera del Carabaya.

Estos depósitos morrénicos se encuentran al pie de nevados entre los 4566 a 4806 msnm.

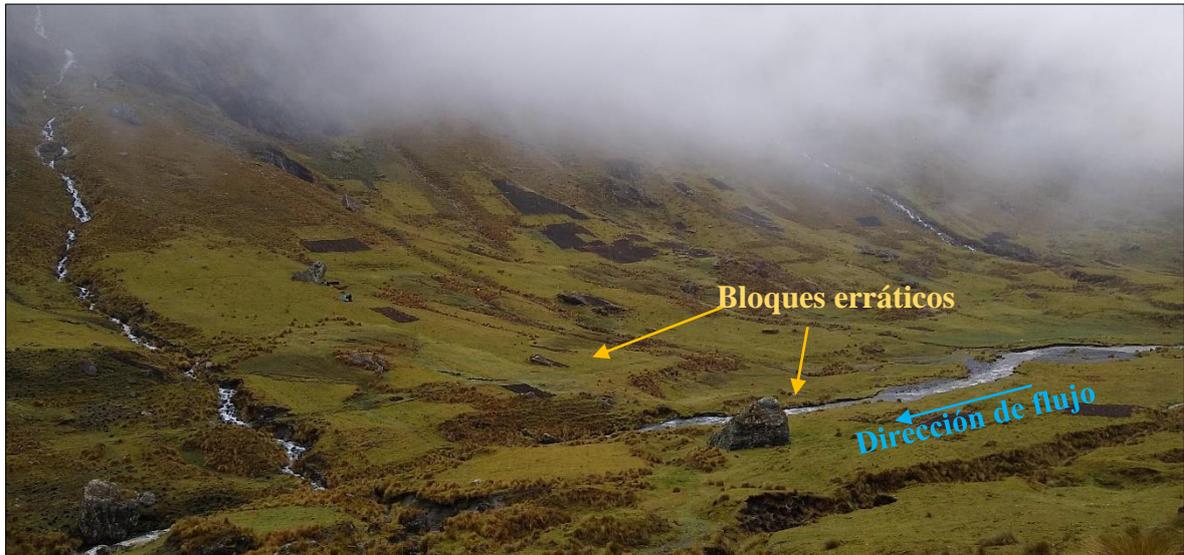


Figura 12: Vista de bloques erráticos mayores a 1m de Morrenas (Zona Quebrada Jalachaca)



Figura 13: Vista de la parte media alta de la microcuenca Torremani 2

e. Geología del Acuífero (Qh-c)

El área de estudio se encuentra sobre un acuitardo sedimentario, cubierto por un horizonte de morrenas. Este acuitardo se encuentra con algún grado de fracturación con baja porosidad y permeabilidad. Según la carta hidrogeológica del Perú indica se tratan de formaciones con acuíferos locales (detríticos o fisuradas) o regiones sin agua subterránea con cantidad apreciable. Estos acuíferos locales se encuentran en zonas fracturadas o meteorizadas en formaciones consolidadas, sin excluir acuíferos cautivos más productivos (permeabilidad

baja a muy baja) (Ver Figura 54).

f. Geomorfología

El territorio comprendido dentro de los límites de los cuadrángulos de Putina y La Rinconada puede ser subdividido geomorfológicamente en tres zonas: Zona de la Alta Cordillera, Zona de la Depresión Ananea - Trapiche, y Zona de la Pre-Cordillera de Carabaya. Todas estas zonas se extienden con una orientación clara y definida de NO a SE, conforme con la orientación general de la Cordillera de los Andes en esta parte del territorio peruano (Ver Figura 54).

d. Zona de la Alta Montaña

Esta zona se ubica en la parte noreste de ambos lados del área de estudio y se extiende hacia el NO y N, dentro de los cuadrángulos vecinos de Limbani y Sandia, así como hacia el SE, dentro de territorio boliviano.

Se caracteriza esta zona por su relieve muy abrupto, con crestas y aristas agudas producto de la acción glaciaria, debido a la presencia de altas montañas nevadas como Ñacaria (5,360 m), Vilacota (5,179 m), Ananea (5,600 m), Ananea Grande (5,829 m), Ritipata (5,350 m), Chapi (5,400 m), Callejón (5,350 m), Jorge Chávez (5,300 m), Riti Urmasca (5,350 m), Guna Cunea (5,650 m), Caballune (5,500 m), Viscachani (5,600 m), Sorapata (5,450 m), Lasacota (5,338 m) y otros. Todos estos nevados conforman una cadena que se prolonga tanto hacia el NO como al SE, dentro de Bolivia, donde toma el nombre de Cordillera Real. Estas montañas de crestas afiladas corresponden a afloramientos de cuarcitas, esquistos y pizarras de las formaciones Sandia y Ananea del Paleozoico inferior. Estas rocas se encuentran plegadas y falladas y, afectadas por un metamorfismo de bajo grado.

La red de drenaje que bisecta a esta gran cadena de nevados, presenta dos tipos bien definidos:

Red dendrítica. - Esta red se ha desarrollado en el flanco noreste de la cordillera y se caracteriza por valles fluviales con sección transversal en "V", muy angostos y con fuerte gradiente. Los ríos que discurren por estos valles son torrentosos. Es frecuente la presencia de caídas de agua en las paredes laterales de estos valles, debido a la fuerte pendiente de ellas; también son frecuentes los derrumbes de escarpas que a veces alteran el cauce de los ríos o causan represamientos, como en el caso de la laguna San Francisco. En las partes altas

o iniciales, la red es de tipo dendrítico típico, pero cambia a red subparalela en las partes intermedias.

Los ríos principales como Sagui, Grande, Untuca, Lahualahuani y Tambillo, tienen una orientación transversal a la orientación de la cadena de nevados pues son conformes con la pendiente de las laderas de las montañas; sin embargo, también existen ríos secundarios como Totorani, Yagua Yagua, Ocoruni, Totorá, Choquechambi, Hirigachi, Queo y muchas quebradas secundarias como Paco-pata, Llantayac, Apacheta, Pascaipucuro, Huaynauntuca y Laccalaccaine, que se orientan en el sentido coincidente con la estructura general de la cordillera.

Red paralela. - Esta red se ha desarrollado en el flanco SO de la cordillera y se caracteriza por valles glaciales con típica sección trasversal en "U" y con una orientación también transversal a la orientación de la cadena de nevados. Estos valles de origen glaciar son el valle de las lagunas Pacharia y Saracucho, el valle de la laguna Rinconada, el valle de las lagunas Pararani y Lacayaqui, el valle de las lagunas Canllomoco y Cuybas y el valle de las lagunas Chocñocota, Salluyo y Ccaccani y Pararani.

Las diferencias de altitudes en esta zona son grandes, así tenemos que entre la altitud promedio de los nevados (5,400 m), y la altitud promedio de los cauces de los ríos (3,200 m) del flanco NE de la cordillera, la diferencia es de 2,200 m, con relación al flanco SO, la altitud promedio del cauce de los valles es de 4,565 m y la diferencia sería de 83.5 m.

litología de las capas acuíferas. Existe una relación clara entre la porosidad, salinidad y la resistividad eléctrica, para sedimentos saturados de agua. En consecuencia, es posible definir la columna de un acuífero saturado, para cada sondeo eléctrico vertical, correlacionando las diferentes capas u horizontes geológicos.

Para cumplir con los objetivos del presente estudio se ejecutaron un total de 15 sondeos eléctricos verticales (SEVs).

a. Objeto del estudio

La investigación geofísica ha sido efectuada con el objetivo de diferenciar las capas del subsuelo según sus resistividades eléctricas y consecuentemente, de acuerdo con la granulometría predominante y permeabilidad de cada capa.

Evaluar en primera aproximación la calidad de agua en cuanto a su grado de mineralización o salinidad.

b. Trabajo de campo

Previamente al inicio de los trabajos de sondeos, se efectuó un reconocimiento de campo, específicamente en todo el predio designado para su evaluación, lo cual sirvió para distribuir los puntos SEV con distanciamiento entre puntos de 50 a 60 metros.

c. Ubicación de las estaciones

Los trabajos de campo se realizaron, previamente se verificó la ubicación de las estaciones, lo que se hizo en coordinación con el personal encargado del proyecto.

Para la ubicación de las estaciones SEVs se utilizó imágenes de satélite, donde fueron ploteados los puntos a escala conveniente. Obsérvese en el Mapa (Figura 55: Ubicación de los sondeos eléctricos verticales y secciones geoelectricas).

d. Características Operativas

- **Configuración de electrodos.-** Se utilizó configuración electródica de Schlumberger Simétrico y Asimétrico por ser la más adecuada para este tipo de investigación, porque los electrodos se pueden colocar a ambos lados de la estación. El desplazamiento de los electrodos se realizó con rapidez debido a la topografía plana del sector en evaluación,

permitiendo uniformidad de las condiciones operativas. En este sentido se ha buscado un centro de despliegue y una orientación que permita conservar un mínimo de horizontalidad. Los espaciamientos de las líneas de corriente AB/2 fueron: 10, 15, 20, 30, 50, 70, 100, 120, 150, 200, 250, 300 y 350 metros. Las separaciones de MN de: 5, 10 y 20 m.

No se ha observado presencia de ruidos eléctricos de origen industrial ni telúricos que hayan ocasionado la obtención de medidas que originen anomalías, sin embargo, el control de calidad de cada SEV se verificó en el campo, mediante el análisis de cada diagrama para evitar errores en la interpretación.

- **Equipo empleado.-** El equipo de prospección geoelectrica estuvo constituido por:
Un equipo Terrameter SAS 1000 está conformado por una unidad de lectura digital de fabricación sueca.

e. Accesorios

Como parte del equipo se contó con:

- 02 bobinas con cable mono – electrodico de cobre acerado de 500 m. c/u.
- 02 bobinas con cable mono – electrodico de cobre acerado de 200 m c/u
- 08 electrodos de cobre y acero especial para la recepción de corriente Eléctrica. (MN)
- 02 electrodos de fierro para la inyección de corriente eléctrica. (AB.)
- 01 GPS GARMIN.
- 04 radios Motorola.
- 02 combas de 16 Lbs
- 01 comba de 8 Lbs
- 01 wincha de 50 mts.
- 01 laptop Toshiba modelo A135 – S4527 Satélite.
- 01 software especializado

En campo se utilizó el software IPI 2WIN, desarrollado en el Departamento de Geofísico de la Facultad de Geología de la Universidad Estatal de Moscú y en oficina se utilizó otro software GeoSoft/ WinSev 6.3 de procedencia Suecia.

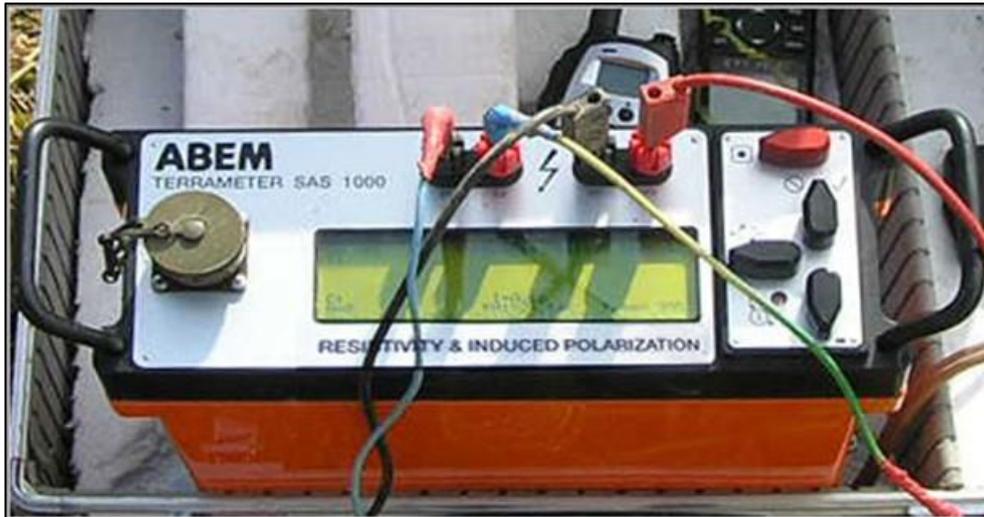


Figura 15: Vista de equipo empleado

4.2.4. Trabajo de gabinete

Luego de finalizado la fase de campo se procedió al análisis e interpretación de la información obtenida (Diagramas) para lo cual se utilizó un programa computarizado IPI2WIN (Software- GEOESCAN) que permite verificar los datos de campo.

Mediante esta técnica se ha podido calcular las diferentes capas presentes en el diagrama, que representan la variación tanto litológica como del fluido existente. Las pequeñas diferencias halladas se encuentran dentro del rango error de la aplicación del método. Además, dentro del proceso de interpretación de los datos de campo se hallaron algunos valores inconsistentes los cuales se han omitido durante la fase de correlación de los SEVs. Igualmente se ha tomado en cuenta que ciertas anomalías presentadas en la interpretación de estos modelos de 3 y 5 capas cuyas variables son: espesores y resistividades eléctricas han producido idénticas respuestas instrumentales. Es decir, que este problema no tiene una solución única, por esta razón durante el proceso se han desestimado respuestas que no son coherentes y que no correlacionan de acuerdo con las consideraciones geológicas e hidrogeológicas.

a. Resultados

Los diagramas obtenidos de cada Sondaje Eléctrico vertical se observan en los anexos (Gráficos SEV-01 al SEV-015). Además, se muestran las coordenadas en la Tabla 4 y los resultados numéricos en las Tablas del 5 al 19. Estos diagramas muestran una buena coherencia, no

habiéndose presentado anomalías notables que impidieran la interpretación.

Tabla 4: Coordenadas de los SEVs

SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL		DATUM WGS-84 ZONA 19L SUR		COTA
Nº	Nombre	m-Este	m-Norte	msnm.
1	SEV-01	459230	8397929	3722
2	SEV-02	459517	8397921	3702
3	SEV-03	459041	8397936	3756
4	SEV-04	459132	8398007	3734
5	SEV-05	459389	8397941	3705
6	SEV-06	457148	8397965	4274
7	SEV-07	456821	8397959	4355
8	SEV-08	456651	8397895	4407
9	SEV-09	457086	8397889	4291
10	SEV-10	456540	8397902	4442
11	SEV-11	456074	8399502	4016
12	SEV-12	456001	8399659	4019
13	SEV-13	456305	8399817	3991
14	SEV-14	456469	8400049	3984
15	SEV-15	456625	8399904	3985

Tabla 5: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-01 (Zonas Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	0.67	1,384.00	Capa de resistividad media conformada de material coluvial con presencia de humedad cubierto de topsoil.
2	3.60	8,083.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial con presencia de humedad.
3	17.00	449.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturada.
4	21.00	71.00	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca sana.

Tabla 6: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-02 (Zonas Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	0.78	1171.00	Capa de resistividad media conformada de material coluvial con presencia de humedad cubierto de topsoil.
2	9.50	8,222.00	Capa de resistividad muy elevada conformada de bloques de roca.
3	29.00	216.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial con presencia de humedad.
4	61.50	4,925.00	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca fracturada y/o alterada.

Tabla 7: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-03 (Zonas Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	0.53	3,566.00	Capa de resistividad media conformada de material coluvial con presencia de humedad cubierto de topsoil.
2	0.91	42,720.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial con presencia de humedad.
3	10.00	497.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturada.
4	11.00	51.00	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca sana.
5	77.56	46,625.00	

Tabla 8: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-04 (Zonas Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	0.67	1,242.00	Capa de resistividad media conformada de material coluvial con presencia de humedad cubierto de topsoil.
2	2.40	9,837.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial con presencia de humedad.
3	33.00	384.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturada.
4	15.00	40.00	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca sana.
5	52.00	36,868.00	

Tabla 9: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-05 (Zona Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	0.65	1,239.00	Capa de resistividad media conformada de material coluvial con presencia de humedad cubierto de topsoil.
2	3.80	7,015.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial con presencia de humedad.
3	17.00	403.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturada.
4	23.00	68.00	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca sana.
5	60.00	8,150.00	

Tabla 10: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-06 (Zona Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	0.68	709.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial con presencia de humedad.
2	1.10	2,941.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturada.
3	18.00	9.60	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca sana.
4	80.90	5,1972.00	

Tabla 11: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-07 (Zona Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor	Resistividad	Descripción
	(m)	(Ω m)	
1	0.45	1,809.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial con presencia de humedad.
2	2.40	8,701.00	
3	26.00	4.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturada.
4	71.15	45,689.00	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca sana.

Tabla 12: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-08 (Zona Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor	Resistividad	Descripción
	(m)	(Ω m)	
1	0.69	1,258.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial con presencia de humedad.
2	6.70	2,329.00	
3	19.00	19.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturada.
4	73.61	47,775.00	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca sana.

Tabla 13: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-09 (Zona Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor	Resistividad	Descripción
	(m)	(Ω m)	
1	0.48	4,614.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial con presencia de humedad.
2	0.76	63,321.00	
3	51.00	381.00	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturada.
4	47.76	41,200.00	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca sana.

Tabla 14: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-10 (Zona Qda. Torremani 2)

Capa	Espesor	Resistividad	Descripción
	(m)	(Ω m)	
1	1.20	281.00	Capa de resistividad media conformada de material coluvial y/o roca alterada con presencia de humedad.
2	4.50	22.00	
3	9.20	0.98	Capa de resistividad baja conformada de material coluvial saturada con intercalaciones de roca.
4	1.10	979.00	
5	1.20	0.90	Capa de resistividad muy elevada conformada de roca sana.
6	82.80	42,568.00	

Tabla 15: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-11 (Zona Qda. Jalachaca)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ohm-m)	Descripción
1	1,80	6351,00	Suelos semi compactos semi secos
2	2,52	39062,00	Materiales tipo conglomerados
3	17,80	1063,00	Materiales angulosos saturados
4	58,00	117,0	Materiales alterados saturados
5	----	37826,0	Impermeable rocoso

Tabla 16: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-12 (Zona Qda. Jalachaca)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ohm-m)	Descripción
1	0,71	2835,00	Suelos semi sueltos en estado seco
2	2,02	20457,00	Arenas medianas limos secos
3	22,54	637,00	Arenas medianas a finas arcillas
4	58,80	58,0	Arenas gruesas a medianas
5	----	61160,0	Impermeable rocoso

Tabla 17: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-13 (Zona Qda. Jalachaca)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ohm-m)	Descripción
1	1,42	6210,0	Suelos semi sueltos en estado seco
2	2,70	22161,00	Arenas medianas limos secos
3	22,63	1136,00	Arenas medianas a finas arcillas
4	45,43	131,00	Materiales alterados saturados
5	-----	133261,0	Impermeable rocoso

Tabla 18: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-14 (Zona Qda. Jalachaca)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ohm-m)	Descripción
1	0,72	3636,0	Suelos semi sueltos en estado seco
2	2,81	6976,00	Arenas medianas limos secos
3	15,87	872,00	Arenas medianas a finas arcillas
4	27,04	233	Arcillas y limos secos
5	50,60	88,0	Arenas gruesas a medianas
6	-----	17249	Impermeable rocoso

Tabla 19: Resultados del sondeo eléctrico vertical SEV-15 (Zona Qda. Jalachaca)

Capa	Espesor (m)	Resistividad (Ohm-m)	Descripción
1	1,52	1096,00	Suelos semi sueltos en estado seco
2	5,90	1843,00	Gravas, arenas medianas limos secos
3	4,59	353,00	Arenas gruesas a medianas arcillas
4	35,92	50,00	Arenas gruesas a medianas
5	----	704,0	Impermeable rocoso

--- Espesor no definido

4.2.5. Interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEVs)

De los resultados obtenidos en campo de sondeo vertical, se generaron dos secciones, de las cuales la primera sección está constituida por los sondajes SEV-01, SEV-02, SEV-03, SEV-04 y SEV-05. Y la segunda sección por los SEV-06, SEV-07, SEV-08, SEV-09 y SEV-10. La secuencia geoelectrica es la siguiente:

a. Sección A-A' (SEV-01 al SEV-05), zona Qda. Torremani 2

Capa superficial (R1): Presenta valores altamente resistivos promediándolos 5,000.0 ohm. Relacionados a los depósitos coluviales (bloques y gravas) que aflora por la zona de estudio y se visualiza perfectamente en la zona de trabajo, su espesor varía a lo largo de la sección hasta los 9 metros de profundidad.

Capa media (R2): Presenta valores menos resistivos promediando los 350 ohm conformada de material coluvial (grava y arenas), estado húmedo y fracturado por acción del agua, cuyo espesor llega hasta los 20 metros de profundidad.

Capa inferior (R3): Esta capa ha sido identificada con valores de resistividad bajas en promedio entre 40 ohm a 70 ohm. Que se asocia a un depósito con saturación de agua. Su espesor es de 70 metros aproximadamente.

Capa profundidad (R4): Última capa, de resistividad 8,000.0 ohm aproximadamente. Corresponde a roca sana a fracturada. Su profundidad es indefinida por ser la última capa (Figura 16).

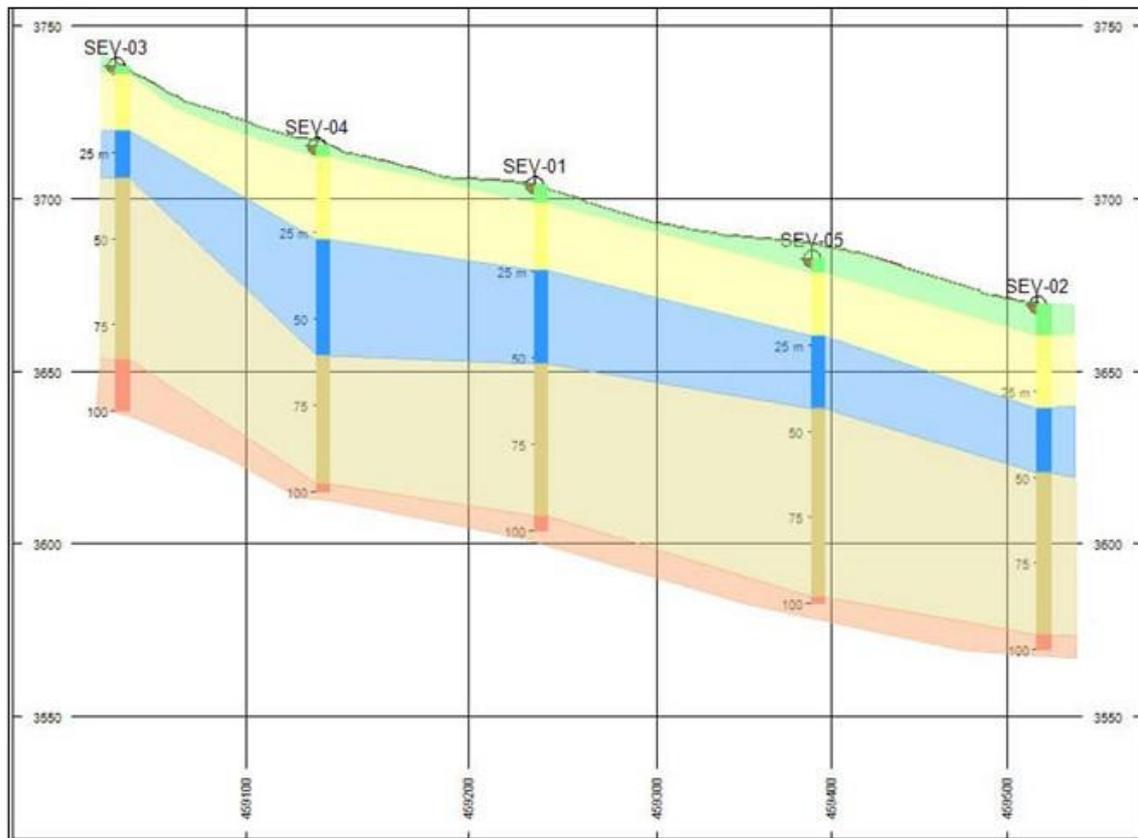


Figura 16: Sección geofísica generalizada A-A' (Zona Qda. Torremani 2)

b. Sección B-B' (SEV-06 al SEV-10), zona Qda. Torremani 2

Capa superficial (R1): Presentan valores altamente resistivos promediándolos 3,500.0 ohmm. Relacionados a los depósitos coluviales (bloques y gravas) que aflora por la zona de estudio, su espesor varía a lo largo de la sección hasta los 7 metros de profundidad.

Capa media (R2): Presenta valores menos resistivos promediando los 400.0 ohmm conformada de material coluvial (grava y arenas), estado húmedo y fracturado por la acción del agua, la profundidad es variable debido que dicha capa no se presenta en todos los perfiles.

Capa inferior (R3): Esta capa ha sido identificada con valores de resistividad bajas en promedio entre 9 ohmm a 22 ohmm. Que se asocia a un depósito con saturación de agua. Su espesor es de 20 metros aproximadamente.

Capa profunda (R4): Última capa, de resistividad 41,000.0 ohm-m aproximadamente.

Corresponde a roca sana. Su profundidad es indefinida por ser la última capa (Figura 17).

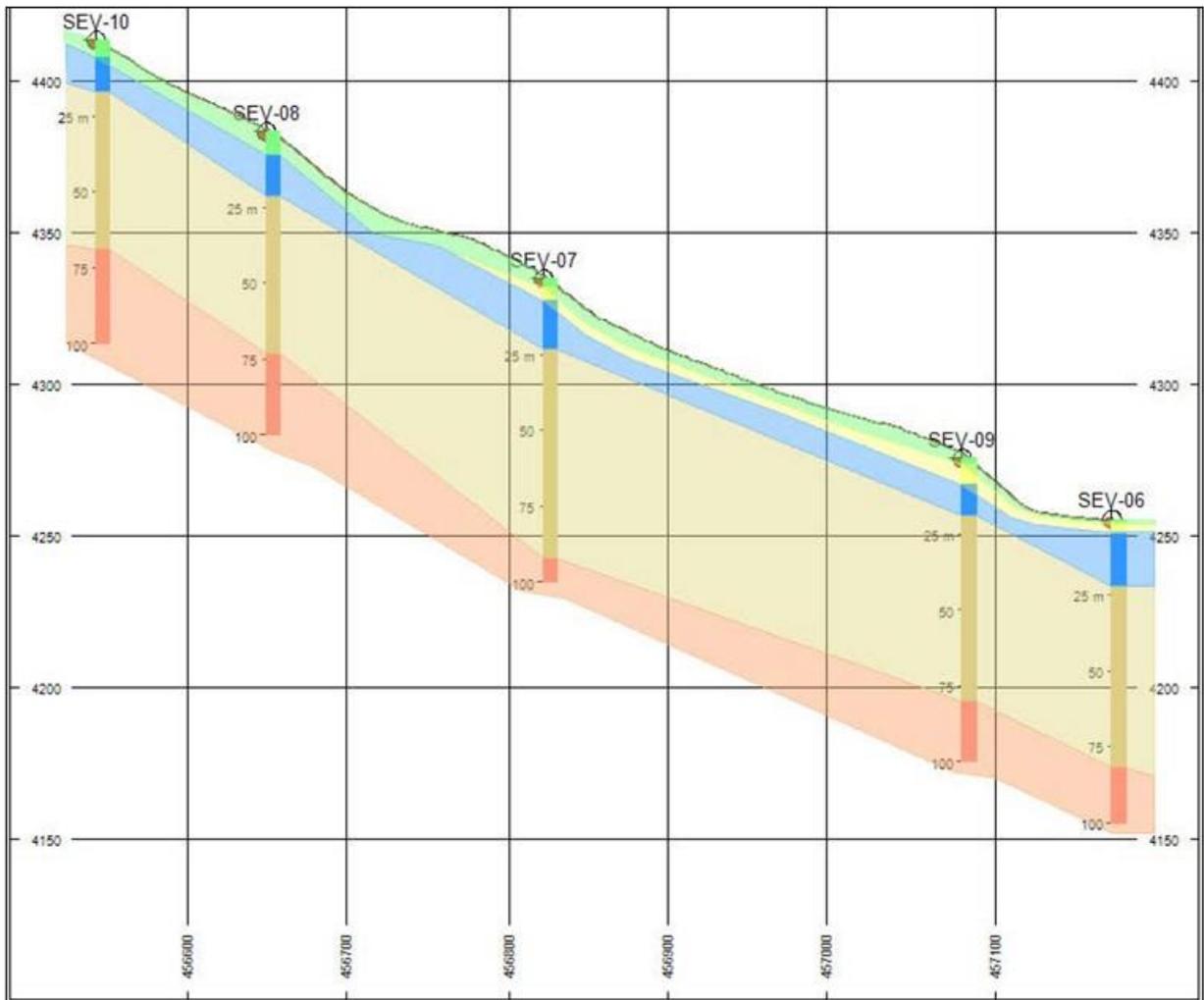


Figura 17: Sección geofísica generalizada B-B' (Zona Qda. Torremani 2)

c. Sección C-C' (SEV-12, SEV-13 y SEV-15), zona Qda. Jalachaca

Compuesta por los sondeos eléctricos verticales SEV N° 12, 13 y 15 (NW a SE).

En la presente sección se observa que el segundo horizonte (H2 trama celeste), representa el horizonte de mayor interés el mismo que estaría conformado por una variedad de valores con resistividades entre 50,0 a 131,0 Ohm-m relacionado a materiales angulosos con mayor alteración con matriz limo arcillosa, presenta una permeabilidad alta a muy alta. Su espesor es de (35,92 m SEV 15 menor espesor) a (58,80 m SEV 12 mayor espesor).

Por encima del horizonte H2 se puede apreciar depósitos (H1 trama marrón claro) de materiales recientes en superficie, y a mayor profundidad materiales fracturados

parcialmente saturados, con un espesor muy irregular.

El horizonte H3 corresponde a materiales bastante resistentes que sirven de techo a todo el relleno no diagenizados (Figura 18).

d. Sección D-D' (SEV-11, SEV-13 y SEV-14), zona Qda. Jalachaca

Compuesta por tres sondeos eléctricos verticales N° 11, 13 y 14 (SW a NE).

En la siguiente sección el horizonte (H2 trama celeste) se puede observar que esta estructura se ha identificado en los tres sondeos SEV, a diferentes niveles de profundidad con resistividades de 88,0 a 131,0 Ohm-m respectivamente relacionado a materiales con una permeabilidad alta a muy alta. Su espesor es menor en dirección al SEV 13, variando a mayor espesor en dirección al resto de puntos.

La parte superior (H1 trama marrón claro) parte superior se puede apreciar depósitos con materiales de origen reciente superficialmente, y a mayor profundidad materiales fracturados, en estado parcialmente seco y de corto espesor nada interesante.

El horizonte H3 se pudo determinar en los tres SEV a diferentes niveles de profundidad, conformado por materiales altamente resistentes que sirve de techo a todo el relleno no diagenizados (Figura 19).

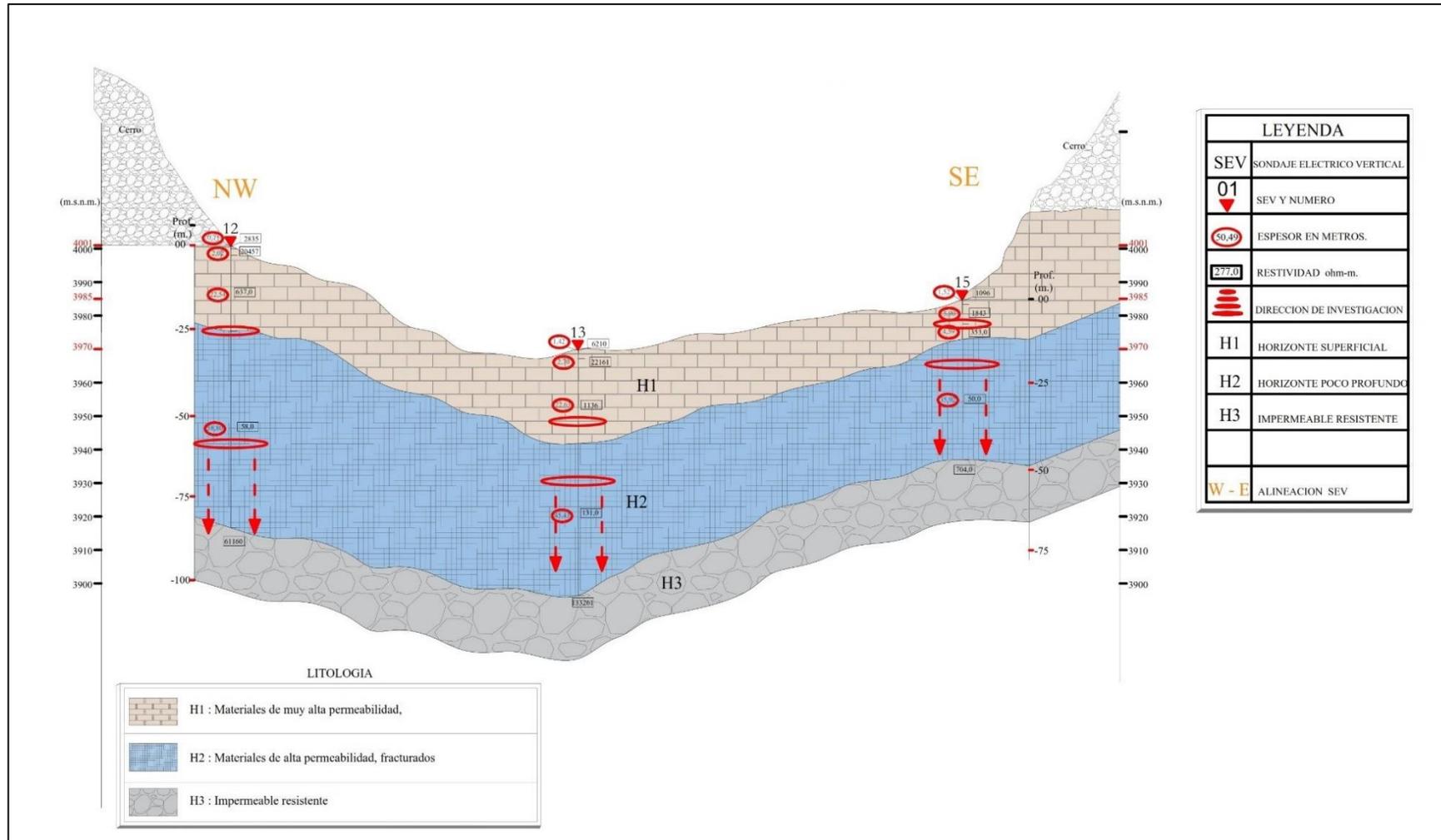


Figura 18: Sección geofísica generalizada C-C' (Zona Qda. Jalachaca)

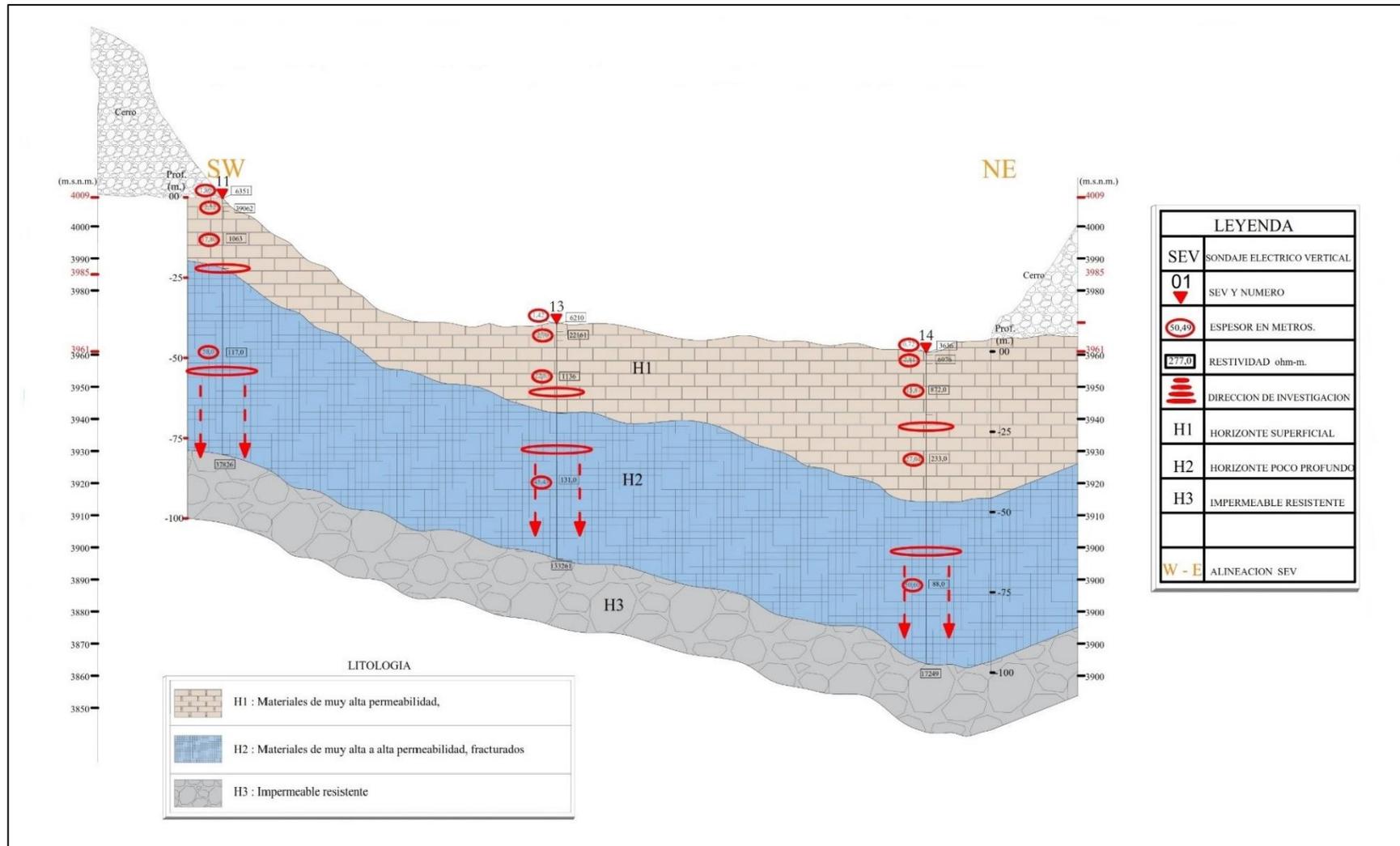


Figura 19: Sección geofísica generalizada D-D' (Zona Qda. Jalachaca)

4.2.6. Mapas Geofísicos Generalizados

Estos mapas permiten diferenciar espacialmente las variaciones de los diferentes parámetros geofísicos los mismos que servirán para precisar las mejores zonas en cuanto a permeabilidad y espesor para la ubicación y captación de las aguas subterráneas.

a. Mapa de Isoespesores del horizonte acuífero

- **Sector Qda. Torremani 2 – parte media baja de la microcuenca. (SEV-01 al SEV-05)**

Este mapa indica los espesores de las capas saturadas de agua (acuífero libre), en la zona de estudio, según el mapa los valores máximos se muestran de color rojo magenta y se localizan al noreste del área de estudio, con valores de $E > 30$ m (SEV-04), asimismo, en el mapa se muestra de color verde a verde amarillo y cuyas isocurvas decrecen hacia el noreste del área con valores de $E > 22$ m (SEV-01 y SEV-05) y valores mínimos de profundidades a la capa freática con $E > 15$ m y se localizan en el sector suroeste y noreste del área de estudio específicamente en el SEV-02 y SEV-03 y se muestran de color azul celeste en el mapa (Figura 20).

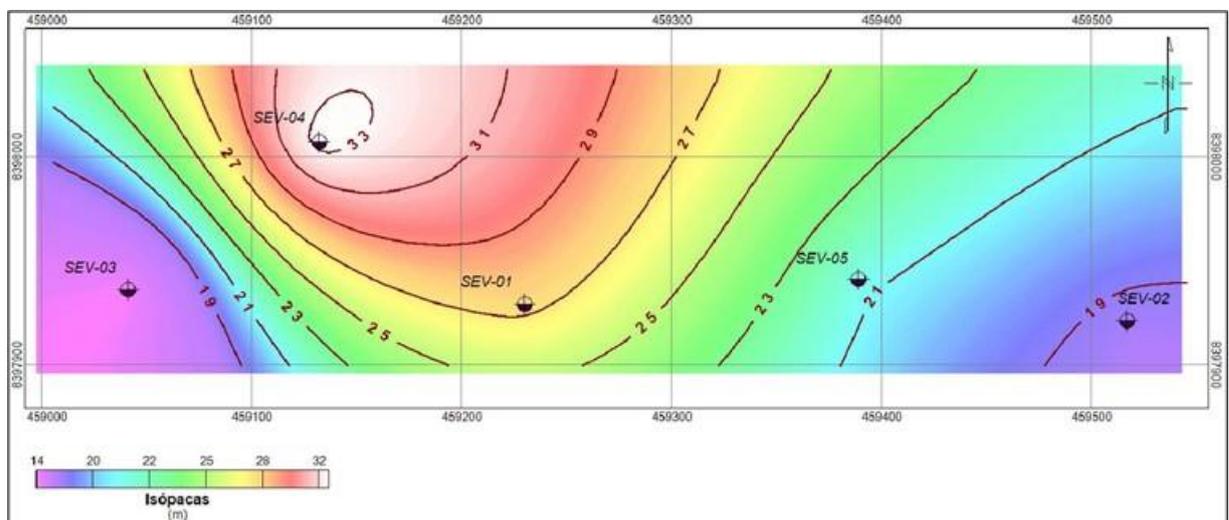


Figura 20: Mapa de isoespesores del horizonte acuífero, zona Qda. Torremani 2, parte media baja

- **Sector Qda. Torremani 2 – Parte alta de la microcuenca. (SEV-06 al SEV-10)**

Este mapa indica los espesores de la capa saturadas de agua (acuífero libre), en la zona de estudio, según el mapa los valores máximos se muestran de color rojo magenta y se localizan

al noreste del área de estudio, con valores de $E > 16\text{m}$ (SEV-07 y SEV-06), asimismo, en el mapa se muestra de color verde a verde amarillo y cuyas isocurvas decrecen hacia el noreste del área, con Valores de $E > 14\text{m}$ (SEV-08) y valores mínimos de profundidades a la Napa freática con $E > 11\text{m}$ y se localizan en el sector suroeste y noreste del área de estudio específicamente en el SEV-09 y SEV-10 y se muestran de color azul celeste en el mapa (Figura 21).

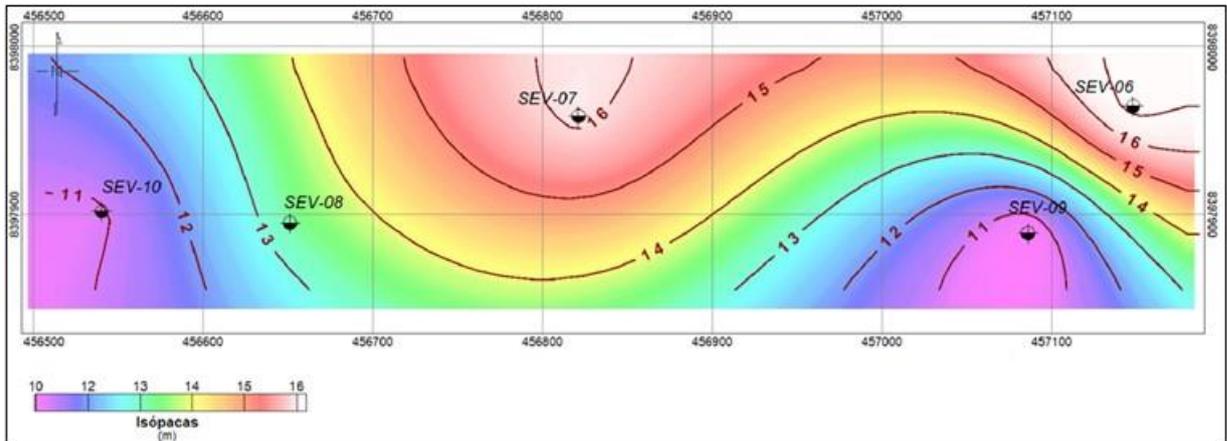


Figura 21: Mapa de isoespesores del horizonte acuífero, zona Qda. Torremani 2, parte alta

- **Sector Qda. Jalachaca (SEV-11 al SEV-15)**

Este mapa muestra las variaciones de los espesores saturados o isopacos, del horizonte de mayor espesor y saturado, es decir es la parte más importante para estos puntos el mismo que nos permitirá recomendar obras de exploración, con profundidades que atraviesen todo este horizonte.

Para la elaboración de este mapa se ha considerado los espesores del horizonte H2 con presencia de sedimentos de mayor alteración por la humedad los mismos que estarían totalmente saturados.

Las isocurvas para este mapa varían de 36,0 a 60,0 m aproximadamente en forma general. Las mejores potencias se ubican entre las tramas de color azul más intenso y celeste más claro es decir entre los SEV 11 y 12 presentando isocurvas de 50,0 a 60,0 m, disminuyendo en dirección a los demás SEV. Que presentan un espesor de menor potencia que los

anteriores puntos (Figura 22).

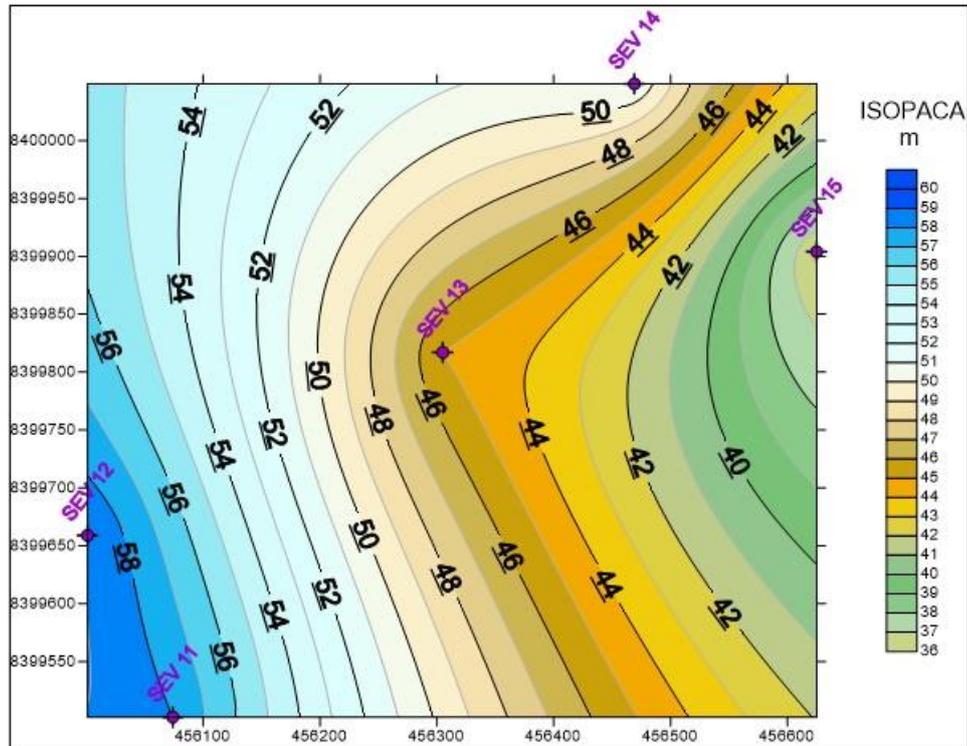


Figura 22: Mapa de isoespesores del horizonte acuífero, zona Qda. Jalachaca

b. Mapa de Isopropfundidades de la Napa Freática (horizonte más permeable)

- **Sector Qda. Torremani 2 – Parte media baja de la microcuenca. (SEV-01 al SEV-05)**

Este mapa nos indica las isopropfundidades a que se encuentra la Napa Freática en la zona con respecto a la superficie de terreno (topografía), donde los valores máximos, en el mapa de color rojo magenta se localizan al noreste del área de estudio, con valores de $Z > 56\text{m}$ (SEV-04), asimismo, en el mapa se muestra de color verde a verde amarillo y cuyas isocurvas decrecen hacia el noreste del área, con valores de $Z > 48\text{m}$ (SEV-01 y SEV-02) y valores mínimos de profundidades a la Napa Freática con $Z > 32\text{m}$ y se localizan en el sector suroeste y noreste del área de estudio específicamente en el SEV-03 y SEV-05 y se muestran de color azul celeste en el mapa (Figura 23).

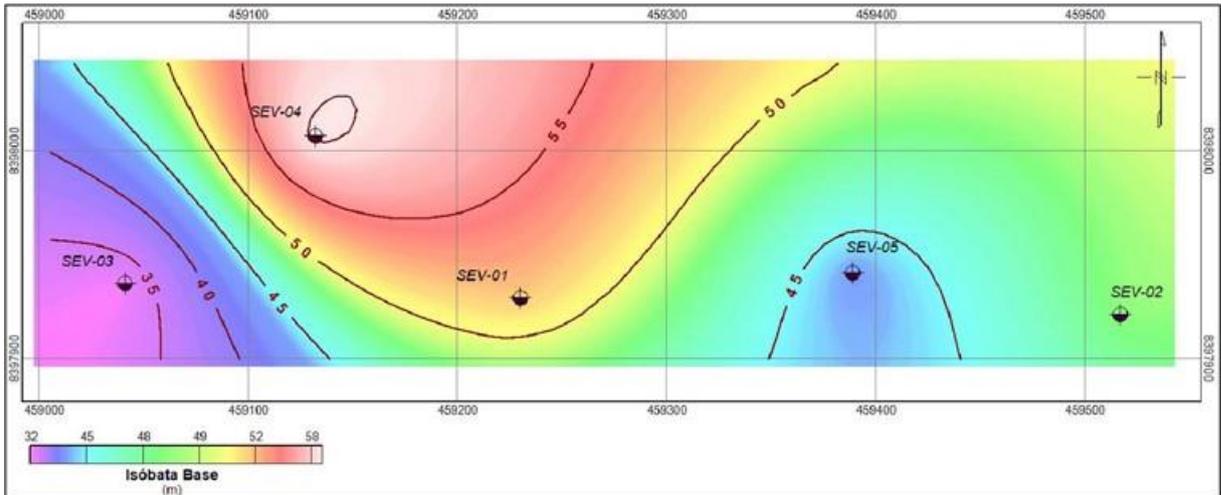


Figura 23: Mapa de isopropfundidades del techo impermeable, zona Qda. Torremani 2, parte media baja

- **Sector Qda. Torremani 2 – Parte media baja de la microcuenca. (SEV-06 al SEV-10)**

Este mapa nos indica las isopropfundidades a que se encuentra la Napa Freática en la zona con respecto a la superficie de terreno (topografía), donde los valores máximos, en el mapa de color rojo magenta se localizan al noreste del área de estudio, con valores de $Z > 56\text{m}$ (SEV-07), asimismo, en el mapa se muestra de color verde a verde amarillo y cuyas isocurvas decrecen hacia el noreste del área, con valores de $Z > 40\text{m}$ (SEV-08 y SEV-06) y los valores mínimos de profundidades a la Napa Freática con $Z > 30\text{m}$ y se localizan en el sector suroeste y noreste del área de estudio específicamente en el SEV09 y SEV-10 y se muestran de color azul celeste (Figura 24).

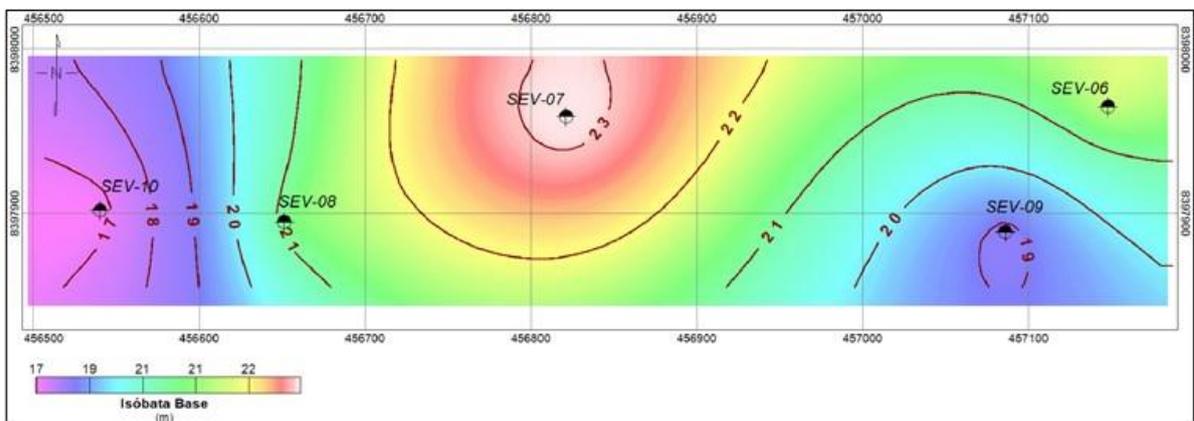


Figura 24: Mapa de isopropfundidades del techo impermeable, zona Qda. Torremani 2, parte alta

- **Sector Qda. Jalachaca (SEV-11 al SEV-15)**

Para construir este mapa se han considerado los valores de los SEV al techo del impermeable rocoso H3 estas isocurvas nos muestra las variaciones a partir de la cota superficial hasta dicho techo rocoso H3, estas isocurvas de profundidad nos indican las zonas donde el techo rocoso puede ser más profundos con relación a cada punto de investigación.

La mayor profundidad se puede apreciar en dirección al NE entre los SEV N° 14, 12, 11 y 13 disminuyendo en dirección a los de más SEV (Figura 25).

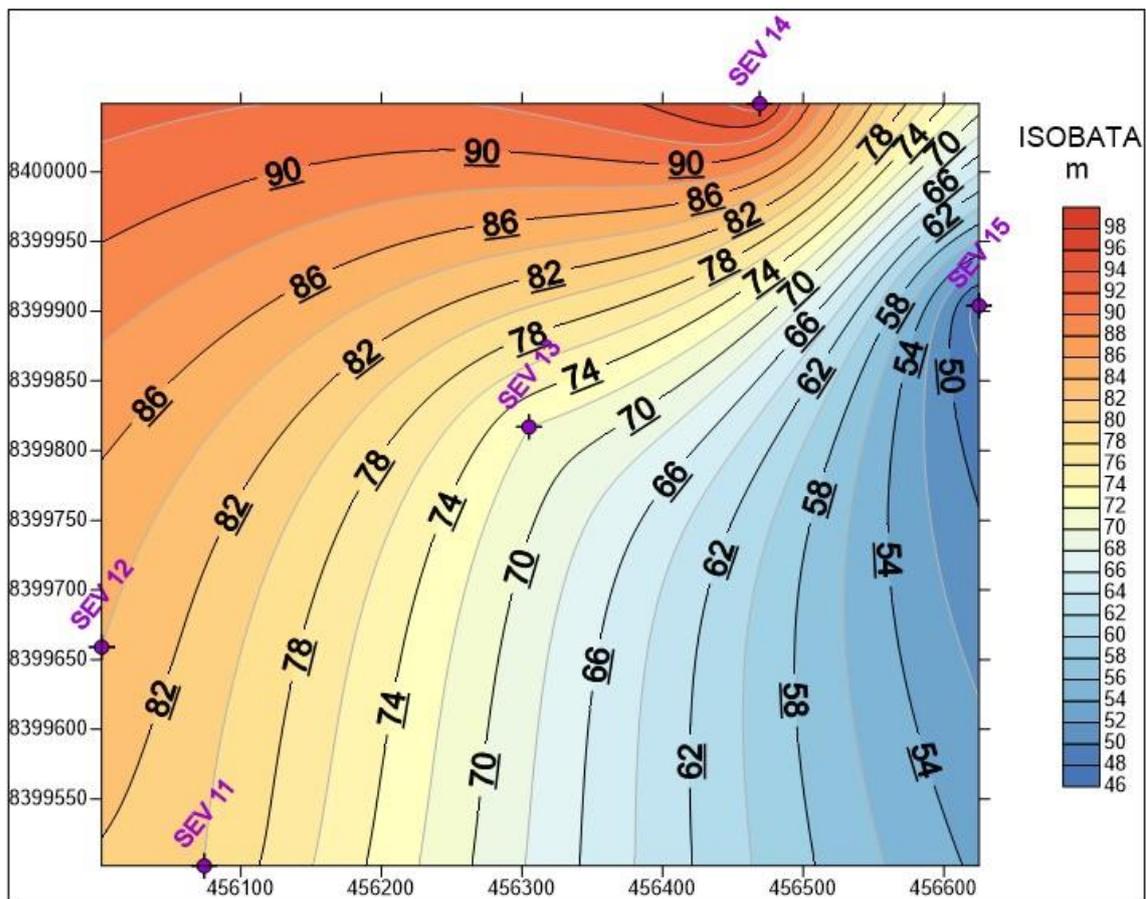


Figura 25: Mapa de isopropiedades del techo impermeable, zona Qda. Jalachaca

c. **Mapa de Geofísico de iso-resistividades del horizonte saturado**

- **Sector Qda. Torremani 2 – Parte media baja de la microcuenca. (SEV-01 al SEV-05)**

El presente mapa nos muestra la distribución de los valores de conductividad eléctrica del horizonte acuífero fisurado, indicando probablemente un mayor fracturamiento en los alrededores de los SEV-03, SEV-04, y SEV-05 correspondiente a resistividades de 70 a 90 ohm-m y, por otro lado, los SEV-01 y SEV-02 presentan resistividades entre 90 a 150 ohm-

m, indicando un menor grado de fracturamiento del acuífero fisurado (Figura 26).

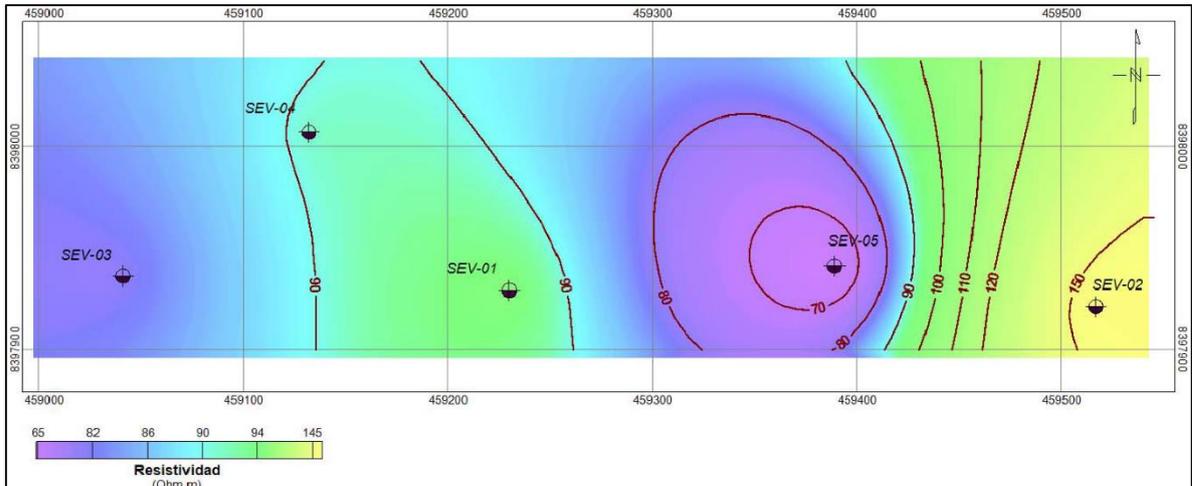


Figura 26: Mapa de iso-resistividades del acuífero (H3), zona Qda. Torremani 2 (SEV-01 al SEV-05)

- **Sector Qda. Torremani 2 – Parte media baja de la microcuenca. (SEV-06 al SEV-10)**

El presente mapa nos muestra la distribución de los valores de conductividad eléctrica del horizonte acuífero fisurado, indicando probablemente un mayor fracturamiento y/o mineralización en los alrededores de los SEV-06, SEV-07, SEV-08 y SEV-10 correspondiente a resistividades de 5 a 10 ohm-m y, por otro lado, alrededor del SEV-09 presenta resistividades entre 65 a 85 ohm-m, indicando un menor grado de fracturamiento del acuífero fisurado (Figura 27).

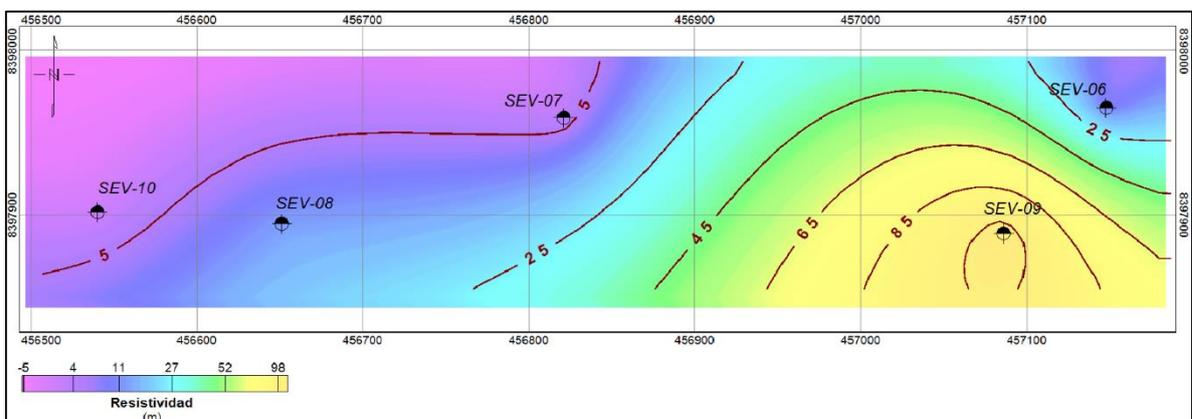


Figura 27: Mapa de iso-resistividades del acuífero (H3), zona Qda. Torremani 2 (SEV-06 al SEV-10)

4.2.7. Inventario de pozos y fuentes de agua

No se encontraron pozos, pero si fuentes de agua superficial, representados por un curso de agua en la zona de la Qda. Jalachaca y dos cursos principales en la zona de la Qda. Torremani 2 en ambas zonas. Asimismo, ambas zonas se encuentran caracterizadas por la presencia de alta precipitación pluvial y nival, así como por los deshielos de la nieve que se acumula en las partes altas y que alimentan de agua el acuífero debajo de los depósitos morrénicos, propios de valles glaciales. Estas fuentes se muestran en las siguientes imágenes:

a. **Objetivos:** realizar aforos sobre ríos y riachuelos ubicados en la quebrada Torremani y la quebrada Jalachaca, para determinar la oferta hídrica del mismo.

b. Detalles de los trabajos de campo

Con el propósito de obtener más información sobre la oferta hídrica en las quebradas Torremani y Jalachaca, se realizaron aforos en cinco (05) puntos.

Tabla 20: Caudales obtenidos

Quebrada	Caudal (m ³ /s)	Caudal (l/s)
Quebrada Torremani	0.35	348.14
Quebrada Jalachaca	0.15	145.84



Figura 28: Aforo de afluente N°03 a la Qda. Jalachaca



Figura 29: Aforo del curso principal de agua de la Qda. Torremani

4.2.8. El acuífero

El acuífero es de naturaleza fisurado, cuyo origen se da por la acumulación y movimiento del agua principalmente a través de la porosidad secundaria (planos de discontinuidad como fracturas, fallas, fisuras de la roca) y en menor medida por la porosidad primaria (porosidad de la roca y microfisuras). La edad del acuífero va de la mano con la era de formación de la unidad geológica, siendo está formada en la era Paleozoica Superior.

Las unidades hidrogeológicas que conforman tanto la quebrada Jalacahca como Torremani 2 están asentadas, por una parte, sobre una roca sedimentaria del tipo Arenisca según el Mapa geológico regional, comportándose como un acuitardo sedimentario según el Mapa hidrogeológico. Y por otro lado sobre una roca metamórfica del tipo Pizarra según el Mapa geológico regional, comportándose como un acuitardo metamórfico según el Mapa hidrogeológico (figuras 53 y 54).

Así, el acuitardo sedimentario conformado por las metareniscas y areniscas presentaría una mejor permeabilidad debido que, además de la porosidad secundaria propio de rocas fisuradas, su porosidad primaria es considerable debido a la porosidad de la roca arenisca. Por otro lado, ambos acuíferos se desarrollan en el fondo de los valles, teniendo formas alargadas tanto en la Qda. Jalachaca como en la Qda. Torremani 2.

Asimismo, los límites de las unidades hidrogeológicas corresponden a los delimitados en el Mapa Hidrogeológico.

Ambas quebradas son consideradas zonas de cabeceras de cuenca, estando por encima entre los 3709 a 4445 msnm, y en donde las fuentes de recarga de agua se dan por precipitaciones pluviales y nivales, por lo que consideran zonas de recarga hacia el acuífero.

4.2.9. Napa Freática

La napa freática contenida en el acuífero es libre y superficial, siendo sus principales fuentes de recarga, las precipitaciones pluviales y nivales y las aguas que se infiltran del deshielo de los nevados en las partes más altas de los valles glaciales. Se pueden los niveles de la napa representadas en los mapas de hidroisohipsas y de isoprofundidades (figuras 57 y 58).

4.2.10. Hidrodinámica subterránea

Las características hidráulicas de un acuífero son cuantificadas, con los parámetros de la transmisibilidad (T) ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ o $\text{m}^3/\text{día}/\text{m}$), la permeabilidad (K) (m/s o $\text{m}/\text{día}$) y el coeficiente de almacenamiento (S en %). Para la determinación de estos parámetros, se realizan ensayos de bombeo a caudal constante, que comprenden la fase de descenso y fase de recuperación. Para la estimación del coeficiente de almacenamiento, en un acuífero, se tienen que controlar uno a más pozos de observación en las cercanías del pozo central o de bombeo.

4.2.11. Permeabilidad o conductividad hidráulica (K)

Descrito principalmente por la conductividad hidráulica (K) del suelo, que se define como una medida del flujo que atraviesa una sección del sistema poroso del suelo saturado (Amoozegar, 2002). Una definición más precisa, se refiere al volumen de agua que se desplaza cuando el gradiente hidráulico (i) es unitario: la cabeza hidráulica o carga hidráulica dividida entre la longitud de la muestra es igual a uno (Núñez, 1997). La conductividad hidráulica se deriva de una relación empírica establecida por Darcy en 1856, en base en los volúmenes de flujo de agua impulsados por un gradiente hidráulico, a través de una columna de suelo arenoso, saturado con agua. Para un suelo saturado con agua y estructura estable, el valor puede considerarse estable. Es por esto que los ensayos de permeabilidad procuran

tener un volumen de ensayo saturado. El grado de permeabilidad puede describirse con valores numéricos de K como lo muestra en la Tabla 21.

Tabla 21: Valores de Permeabilidad

Conductividad Hidráulica (m/día)	Calificación estimativa
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$100 > K$	Muy alta

FUENTE: Villanueva e Iglesias (1984). Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. IGME, 23 p.

Dada descripción sobre la permeabilidad del Mapa Hidrogeológico del Perú, el acuífero tiene una permeabilidad de baja a muy baja, por lo que sus valores están entre 10^{-2} a 1 m/día según Villanueva (1984).

c. Transmisividad (T)

La Transmisividad es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua (Villanueva e Iglesias, 1984). Así tenemos algunos valores representativos en la Tabla 22.

Tabla 22: Valores de Transmisividad

T (m ² /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T<10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
10<T<100	Baja	Pozo entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
100<T<500	Media a alta	Pozo entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
500<T<1000	Alta	Pozo entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
T>1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

FUENTE: Villanueva e Iglesias (1984). Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. IGME, 23 p.

Dada descripción sobre la permeabilidad del Mapa Hidrogeológico del Perú, el acuífero tiene una Transmisividad de baja a muy baja, por lo que sus valores son menores a 10 hasta 100 m²/día según Villanueva (1984).

d. Porosidad eficaz (me)

Es el cociente entre el volumen de poros o huecos conectados que presenta el acuífero por donde puede circular efectivamente el agua subterránea referida al volumen total del mismo.

Así tenemos algunos valores representativos en la Tabla 23.

Tabla 23: Valores de Porosidad

Materiales		Porosidad total % m					Porosidad eficaz % me			Observaciones
Tipo	Descripción	Media	Normal		Extraordinaria		Media	Máx.	Mín.	
			Máx.	Mín.	Máx.	Mín.				
Rocas masivas	Granito	0.3	4	0.2	9	0.05	<0.2	0.5	0	A
	Caliza masiva	8	15	0.5	20		<0.5	1	0	B
	Dolomia	5	10	2			<0.5	1	0	B
Metamórfica		0.5	5	0.2			<0.5	2	0	A
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobas	30	50	10	60	5	<2	20	0	C, E
	Escorias	25	80	10			20	50	1	C, E
	Pumitas	85	90	50			<5	0	0	D
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0.1			<1	2	0.1	A
	Basaltos vacuolares	12	30	5			5	10	1	C
Rocas sedimentarias consolidadas (ver rocas masivas)	Pizarras sedimentarias	5	15	2	30	0.5	<2	5	0	E
	Areniscas	15	25	3	30	0.5	10	20	0	F
	Creta blanda	20	50	10			1	5	0.2	B
	Caliza detrítica	10	30	1.5			3	20	0.5	
Rocas sedimentarias sueltas	Aluviones	25	40	20	45	15	15	35	5	E
	Dunas	35	40	30			20	30	10	
	Gravas	30	40	25	40	20	25	35	15	
	Loess	45	55	40			<5	10	0.1	E
	Arenas	35	45	20			25	35	10	
	Depósitos glaciares	25	35	15			15	30	5	
	Limos	40	50	35			10	20	2	E
	Arcillas sin compactar	45	60	40	85	30	2	10	0	E
Suelos superiores	50	60	30			10	20	1	E	

A = Aumenta m y me por meteorización.

B = Aumenta m y me por fenómenos de disolución.

C = Disminuye m y me con la edad.

D = Disminuye m y me puede aumentar me con la edad.

E = me muy variable según circunstancias y tiempo.

F = Variable según el grado de cementación y su solubilidad.

FUENTE: Custodio y Llamas, A. 1983. Hidrología Subterránea

Ya que los acuíferos en estudio corresponden a rocas fisuradas sedimentarias consolidadas (areniscas y pizarras sedimentarias), sus porosidades eficaces van en el rango de <2 a 10%. Por lo que podría tomarse un valor de 5% como porosidad eficaz como representativo para ambos acuíferos.

4.2.12. Hidrogeoquímica

a. Resultados de Laboratorio y evaluación preliminar

La evaluación de la calidad de las aguas subterráneas es una actividad importante que se efectúa en todo estudio hidrogeológico, cuyo resultado permitirá conocer la calidad del recurso hídrico almacenado del acuífero en evaluación y la evolución que ha presentado. Sin embargo, no se cuenta con fuentes de agua propiamente subterránea como manantiales o piezómetros cercanos, sin embargo, por lo que se analizó el agua del deshielo de la nieve acumulada en las quebradas Jalachaca (TM-05) y Torremani 2 (TM-01 al TM-04), las cuales se infiltran en el subsuelo, recargando los acuíferos de ambas quebradas, influenciando en la composición química de sus aguas. La calidad del agua subterránea depende de varios factores tales como:

- Litología del acuífero y velocidad de circulación.
- Calidad del agua infiltrada y su relación con otras aguas o acuíferos.

Se extrajeron cinco (05) muestras de agua superficial. Los resultados de laboratorio se pueden observar en la Tabla 24. Presenta la comparación de los resultados obtenidos en un laboratorio acreditado con los ECAs para aguas superficiales de Categoría 4 (Conservación del ambiente acuático), subcategoría E1 (Laguna y lagos) y E2 (Ríos costa y sierra).

Tabla 24: Resultados de laboratorio de las muestras vs ECAs

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		TM-1	TM-2	TM-3	TM-4	TM-5
			Costa	sierra					
FÍSICOS-QUÍMICOS									
Nitrito	mg/L	No precisa	No precisa		<0.006		<0.05		
METALES TOTALES									
Antimonio	mg/L	0.64	0.64		<0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Arsénico	mg/L	0.15	0.15		<0.0037	0.0029	0.0030	0.0051	0.0027
Bario	mg/L	0.7	0.7		0.0015	0.0016	0.0008	0.0011	0.0010
Cadmio Disuelto	mg/L	0.00025	0.00025		<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
Cobre	mg/L	0.1	0.1		0.0054	0.0020	0.0006	0.0006	0.0009
Cromo VI	mg/L	0.011	0.011		0.0006	0.0007	<0.0005	0.0007	<0.0005
Mercurio	mg/L	0.0001	0.0001		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Níquel	mg/L	0.052	0.052		0.0025	0.0036	0.0013	0.0014	0.0022
Plomo	mg/L	0.0025	0.0025		0.0142	0.0268	0.0177	0.0159	0.0196
Selenio	mg/L	0.005	0.005		0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Talio	mg/L	0.0008	0.0003		0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
Zinc	mg/L	0.12	0.12		0.0193	0.0973	0.0035	0.0050	0.0074
Li (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa		0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012

«continuación»

B (Tot)	Mg/L	No precisa	No precisa	0.0034	0.0024	0.0021	0.0024	0.0023
Be (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
Al (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.2228	0.1160	0.1119	0.0951	0.0399
P (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.3093	4.4699	0.0182	0.3622	0.0101
V (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0003	0.0003	0.0006	0.0003	0.0003
Mn (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0102	0.0036	0.0035	0.0036	0.0042
Co (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0010	0.0003	0.0004	0.0003	0.0002
Sr (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0189	0.0162	0.0143	0.0096	0.0123
Mo (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Ag (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0011	0.0038	0.0002	0.0002	0.0002
Sn (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	<0.0004	0.0004	<0.0004	0.0004	0.0004
Ce (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0004	0.0003	0.00030	0.0003	0.0003
Bi (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	<0.0003	0.0003	<0.0003	0.0003	0.0003
Th (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
U (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
Na (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	1.5464	5.4354	0.9419	0.8595	1.0259
Mg (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.3686	0.3958	0.3425	0.3766	0.4055
K (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.7194	5.2248	0.2109	1.1932	1.5301
Ca (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	1.7921	1.5548	1.6283	1.7999	2.3830
Fe (Tot)	mg/L	No precisa	No precisa	0.3008	0.1408	0.1408	0.1270	0.0899
Si (Tot) (*)	mg/L	No precisa	No precisa	3.4121	3.5139	2.7072	1.9438	2.6532
MICROBIOLÓGICO								
O								
Coliformes	NMP/100 ml	1,000	2,000	<1.8		<1.8		
Termotolerantes								
Escherichia coli	NMP/100 ml	No precisa	No precisa	<1.8		<1.8		

FUENTE: Elaboración propia

Se observa en la Tabla 21, los resultados de las cinco muestras, el elemento plomo excede hasta ocho veces más en promedio el estándar de calidad ambiental en aguas superficiales, categoría 4, ríos y lagunas.

Los análisis fisicoquímicos se llevaron a cabo en un laboratorio acreditado por la INACAL - DA, los cuales ofrecen resultados cuantitativos de parámetros físico – químicos, inorgánicos, orgánicos y bacteriológicos.

b. Error de balance iónico

Se utiliza para el cálculo de Error del Balance Iónico (EBI), para verificar la calidad analítica del conjunto de datos adquiridos, sumando los componentes aniónicos y los componentes catiónicos de cada muestra. El porcentaje de EBI se calcula de la siguiente manera:

$$EBI(\%) = \frac{\sum \text{Cationes} \frac{meq}{l} - \sum \text{aniones} \frac{meq}{l}}{\sum \text{Cationes} \frac{meq}{l} + \sum \text{aniones} \frac{meq}{l}} * 10$$

De acuerdo con los resultados de EBI para la presente campaña (Ver Figura 30), se ha evaluado que el único resultado de laboratorio aceptable es de la muestra MA-05 de la quebrada Jalachaca, indicando que el balance iónico de sus resultados se encuentra dentro de los límites de (+-10%) considerados para este estudio como aceptables. Por lo que los resultados con mayores discrepancias entre aniones y cationes son de las muestras MA-01, MA-02, MA-03 y, MA-04, todas ubicadas en la Qda. Torreman 2.

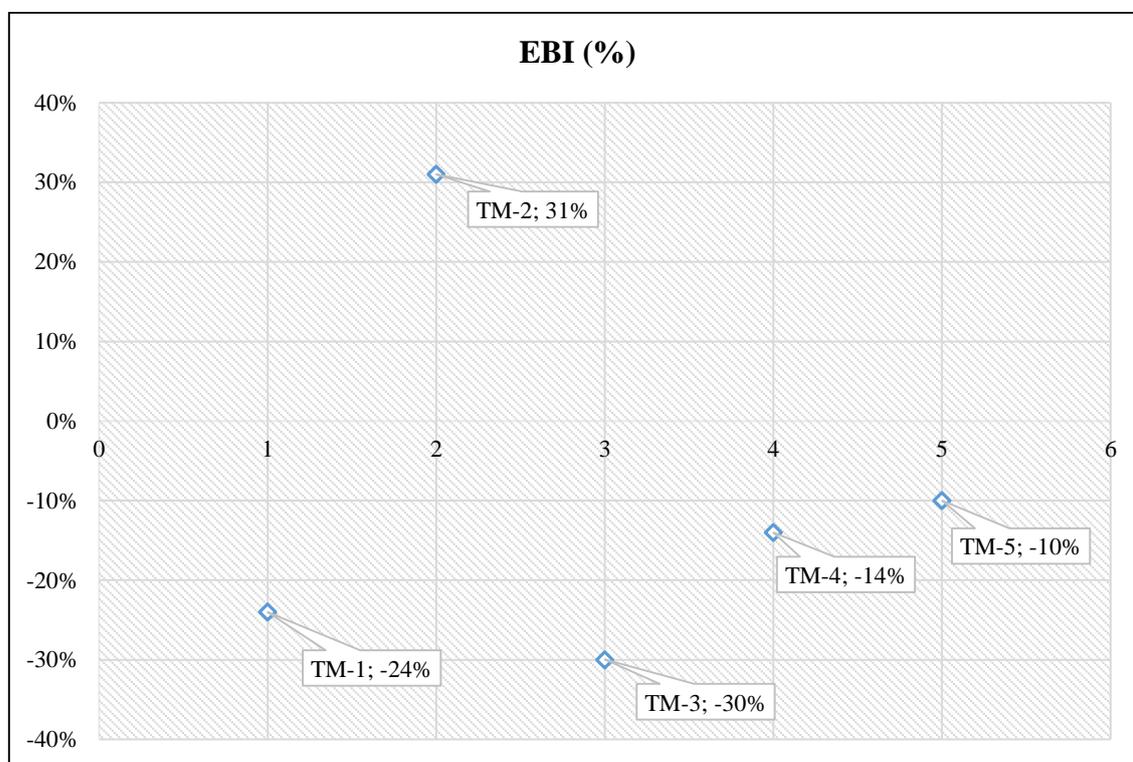


Figura 30: Error de balance iónico (EBI%)

c. Características físicas

- Sabor y olor

Las características organolépticas, indican el agua de todas las muestras no presenta olor ni sabor.

- **Color**

El agua de todas las muestras es incolora.

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material o sustancia, en este caso el agua, para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él. Además, es una medida que indica la concentración global de constituyentes ionizados, mineralización o grado de salinidad del agua subterránea.

Tabla 25: Riesgo de salinidad en función a la conductividad eléctrica

Riesgo de Salinidad	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Bajo	<750
Medio	750-1500
Alto	1500-3000
Muy Alto	>3000

FUENTE: Pizarro (1985)

Se observa que la CE medidas in situ, presentan valores entre 50 a 65 $\mu\text{S}/\text{cm}$ representando un riesgo de salinidad bajo y está muy por debajo del ECA comparado.

d. Características Químicas

- **pH**

Mide el grado de acidez del agua. Es el inverso del logaritmo de la concentración del ion hidrogeno, que se ve afectado por las pérdidas de CO_2 , ante la presencia de CO_2 en el agua e implica que adquiera un cierto carácter ácido; si el CO_2 desaparece, el equilibrio se desplaza a la izquierda con el consiguiente cambio de pH.

El pH es adimensional, siendo el valor de 7 que indica una solución neutra; un valor de pH menor de 7, indica una condición ácida; un pH mayor que 7, corresponde a una solución alcalina. Las muestras presentaron resultados in situ de pH igual entre 7.5 a 8, pudiéndose considerar como alcalina, cumpliendo con ECA comparado.

- **Dureza**

Se denomina dureza es grado de mineralización en una determinada cantidad de agua,

principalmente de iones magnesio y calcio. Las concentraciones de dichos iones dependen fundamentalmente de las formaciones geológicas atravesadas por el agua de forma previa a su captación, aunque también puede deber su causa a cierto tipo de contaminación.

Una de las maneras de calcular la clasificación de la dureza del agua es a través de Grados Hidrotimétricos Franceses (GHF o °F), que para $[Ca^{2+}]$ y $[Mg^{+2}]$ expresados en mequ/L, se rige por la siguiente ecuación:

$$F^{\circ} = ([Ca^{2+}] \times 2.5 + [Mg^{2+}] \times 4.12) / 10$$

Tabla 26: Clasificación del agua en función de los grados franceses

Tipo de agua	Grados Hidrotimétricos Franceses (°F)
Muy dulce	<7
Dulce	7-14
Medianamente dulce	14-22
Medianamente dura	22-32
Dura	22-54
Muy dura	>54

FUENTE: Canovas (1986)

Tabla 27: Valores de dureza de las muestras

Elemento	TM-1	TM-2	TM-3	TM-4	TM-5
Ca (meq/L)	0.0896	0.0777	0.0814	0.09	0.1192
Mg (meq/L)	0.0303	0.0326	0.0282	0.031	0.0334
Dureza(F°)	0.60	0.55	0.55	0.61	0.76

Todas las muestras indican aguas del tipo Muy dulce con respecto a la dureza, lo que corrobora el origen superficial de las mismas, que son producto de precipitaciones pluviales, nivales y deshielo de nieve acumulada en temporada, no estando mucho tiempo en contacto con la litología de la zona por lo que son muy poco mineralizadas.

Complementariamente, se analizó las muestras de agua con la norma Wilcox, la cual considera como índices para la clasificación: el porcentaje de sodio respecto al de cationes, y la Conductividad Eléctrica. Se determinó como “excelente” para el riego para ambas zonas (Figura 30).

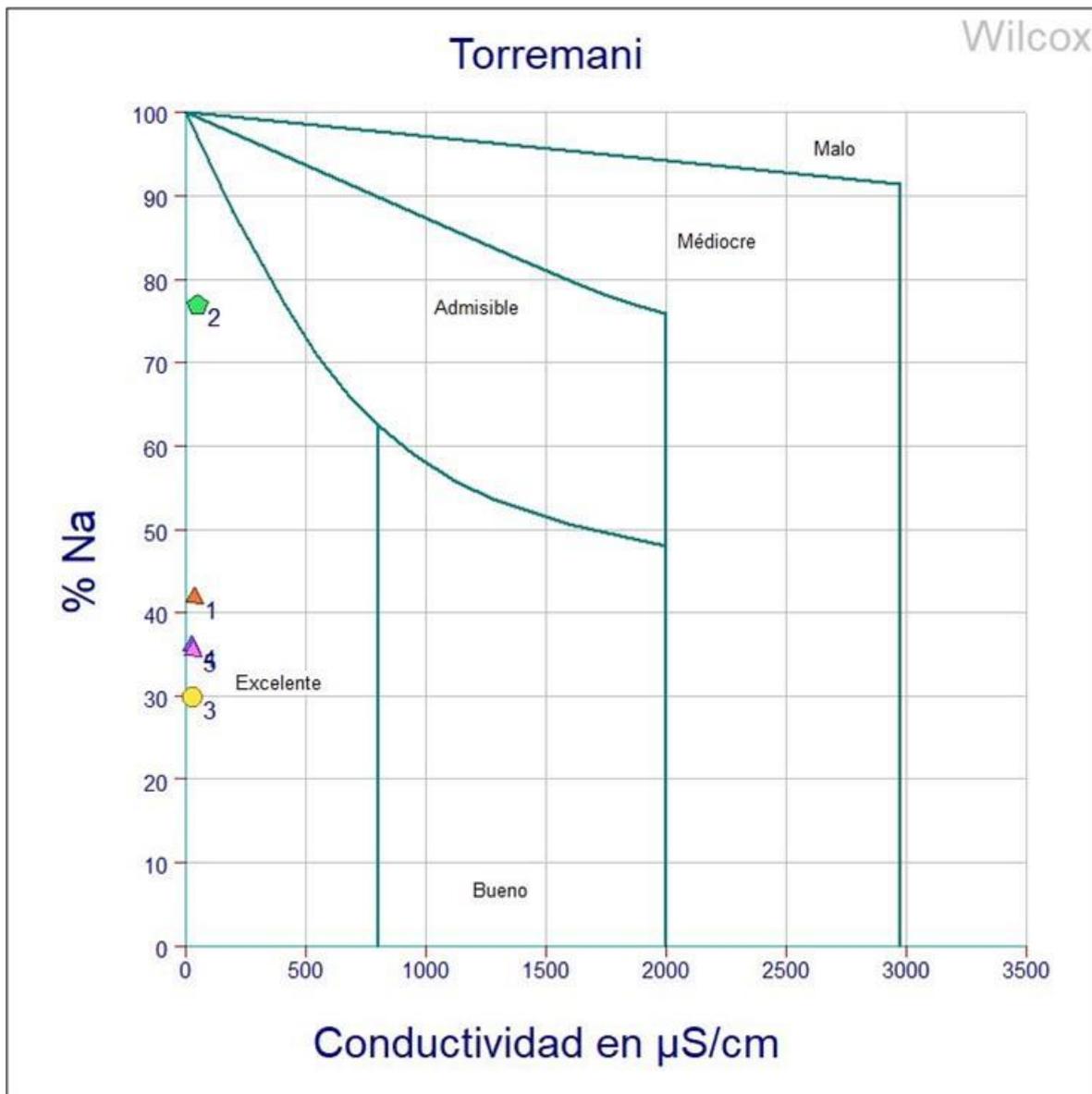


Figura 31: Clasificación según la norma Wilcox

e. Familias Hidroquímicas

Los métodos de interpretación de los resultados químicos utilizados se basan en las combinaciones de iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- y Cl^- . Teniendo en cuenta la representación y clasificación de los diagramas de Piper, diagrama logarítmico de Schoeller Berkloff y, Stiff (figuras 32, 33, y 34).

Se puede apreciar que los resultados obtenidos de todas las muestras de agua pertenecen a la familia del tipo Sulfatada cálcica magnésica.

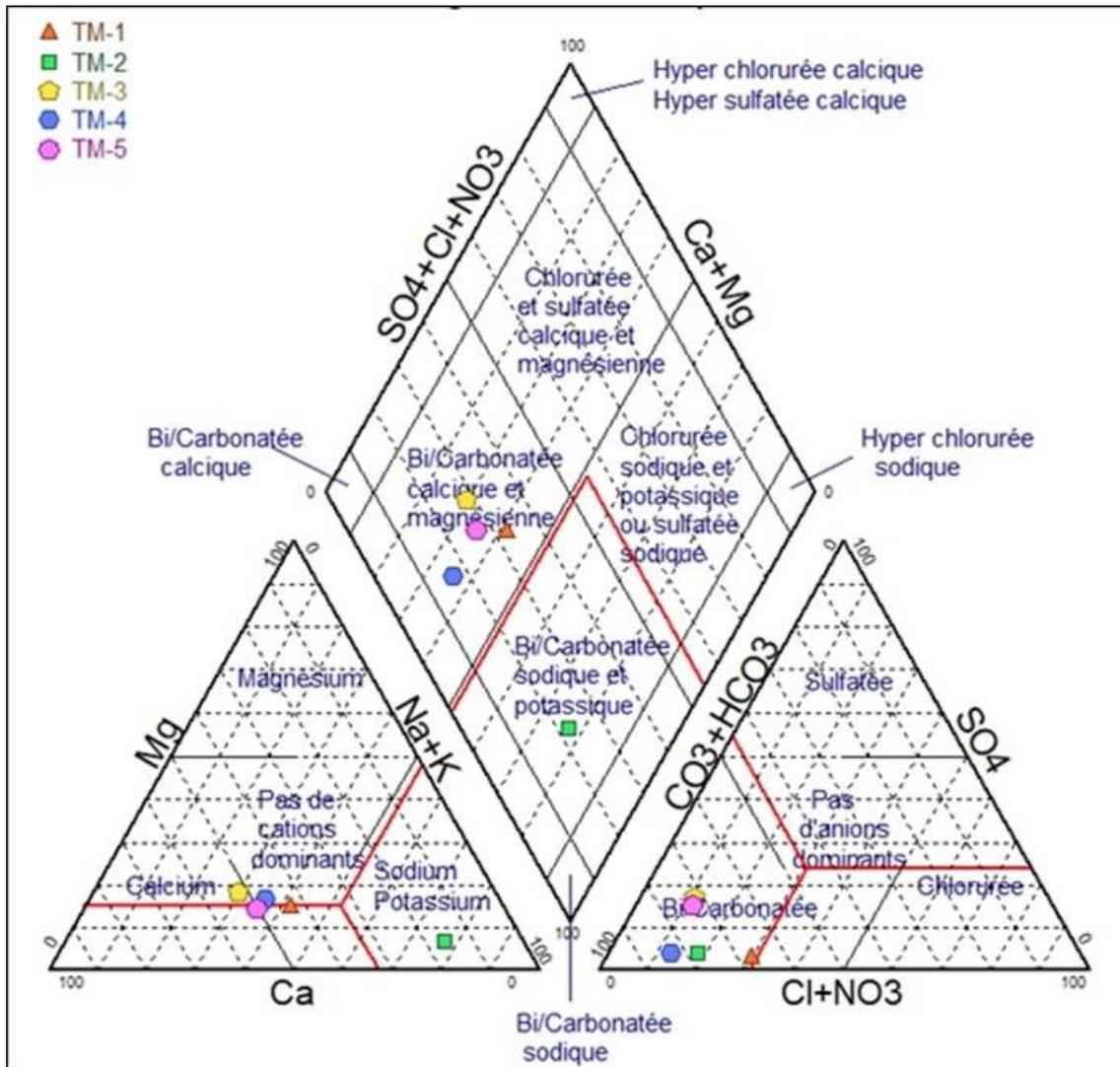


Figura 32: Diagrama tipo Piper

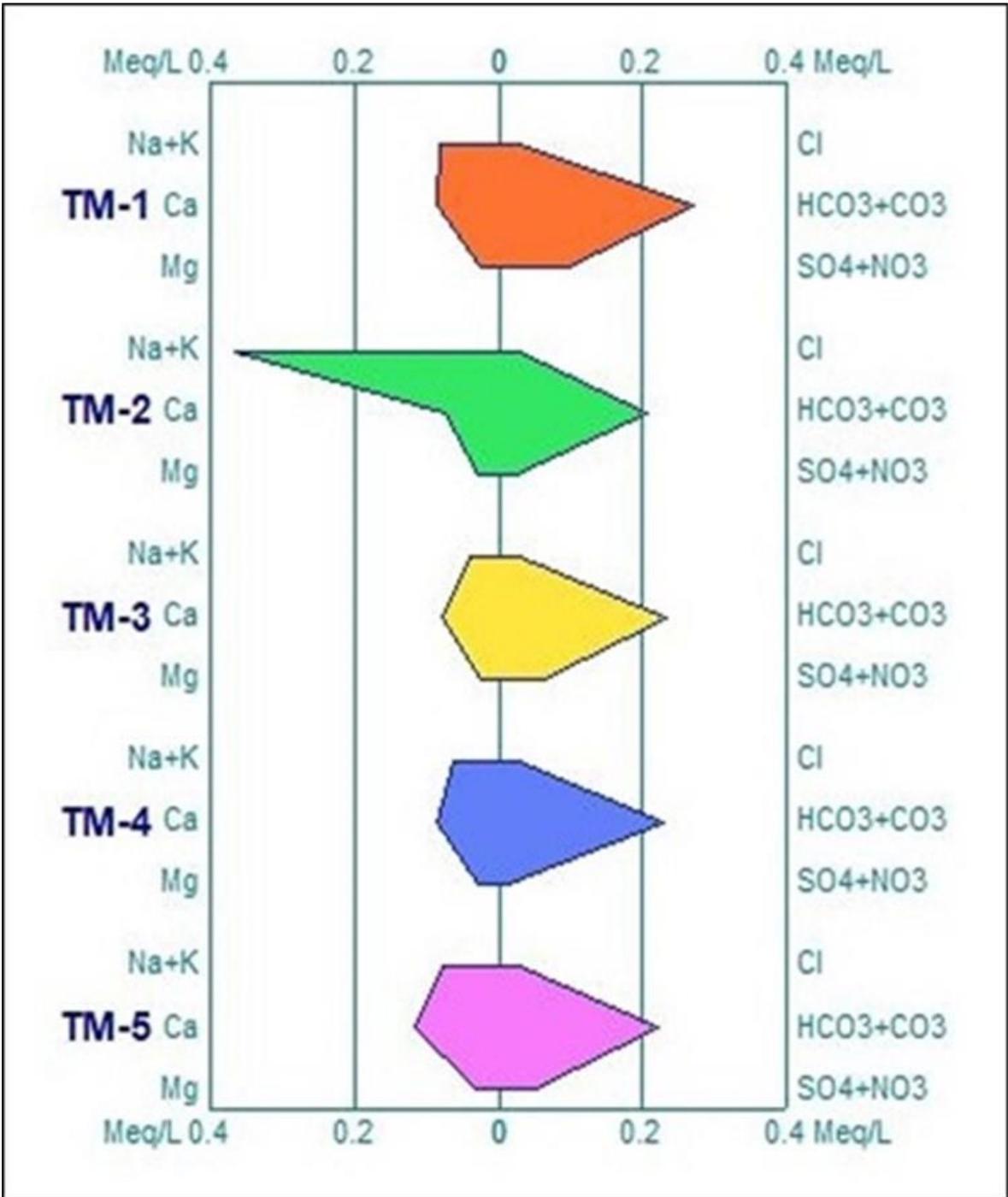


Figura 33: Diagrama tipo Stiff

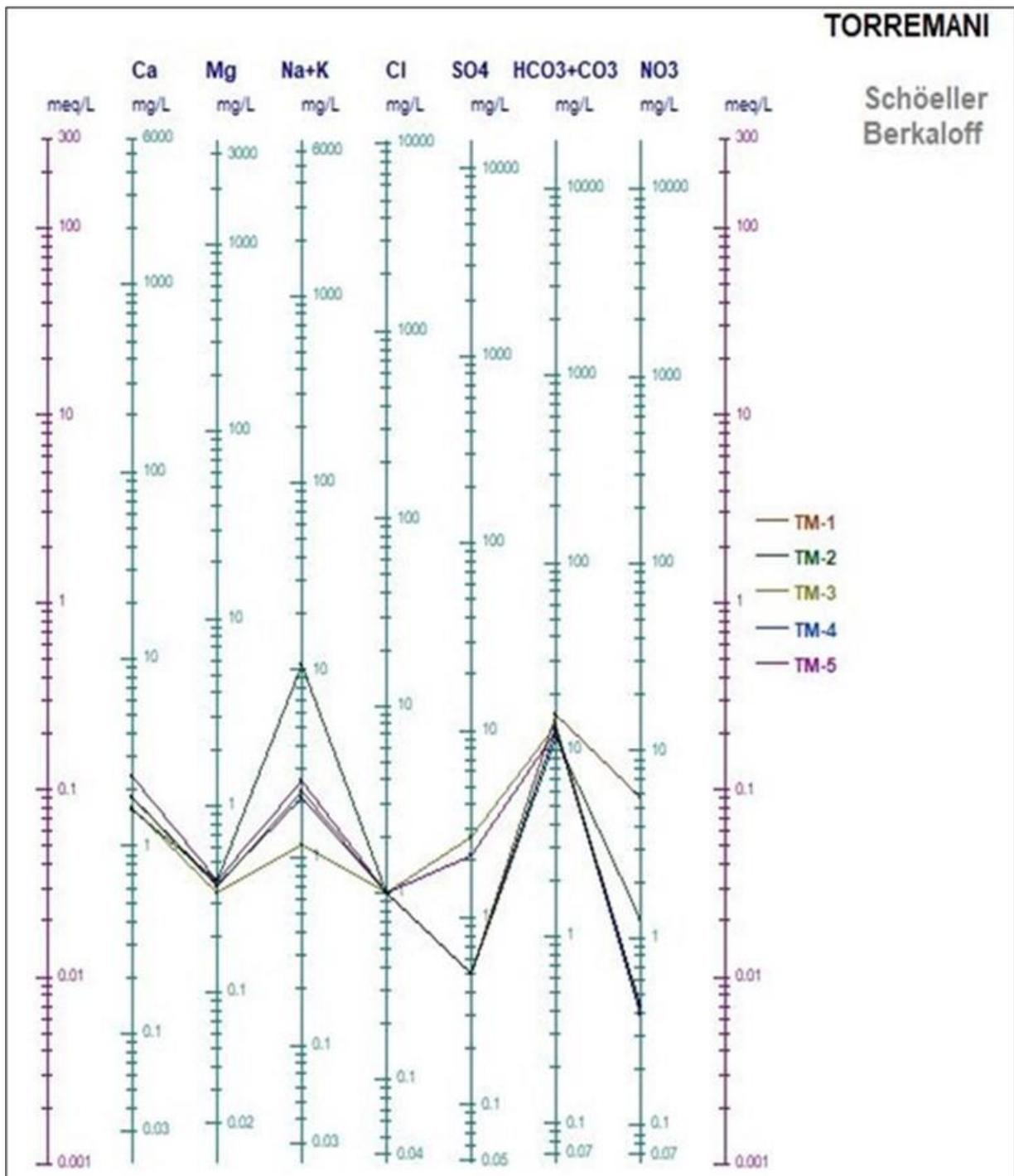


Figura 34: Diagrama tipo Schoeller Berkaloff

4.2.13. Modelo conceptual de flujo de agua subterráneo

Se elaboró una representación gráfica del comportamiento hidrológico e hidrogeológico en el ámbito de las unidades hidrogeológicas (Ver Figura 60).

En la zona de la Qda. Torremani 2 el agua subterránea es alimentada por las precipitaciones

pluviales y nivales, que caen sobre el valle infiltrándose a través del suelo superficial hacia estratos subyacentes conformados por rocas en estado fracturado, como también el agua de precipitaciones llega a ingresar en las partes altas a través de los planos de discontinuidad como fallas, fracturas, diaclasas, etc. Siendo estas fracturas vías por donde se mueve el agua subterránea, que son transversales a los planos de sedimentación de las rocas. Una parte del agua de precipitación provoca escorrentía superficial y otra se infiltra hacia el acuífero que se comportan como acuitardos sedimentarios y metamórficos en las zonas de Jalacachaca y Torremani 2 respectivamente, dada su geología.

4.3. EXPERIENCIAS Y APORTES AL TRABAJO PROFESIONAL

4.3.1. Contribuciones a la solución de situaciones problemáticas que se hayan presentado durante su estancia en la empresa

- Conociendo nuevas tecnologías para el registro de niveles de agua, se puso en práctica el uso del *Diver* para los ensayos de prueba de bombeo, debido a que es reconocido como el instrumento más fiable para la medición y registro autónomo del nivel de agua subterránea.
- Para el monitoreo de los niveles de agua subterránea en los piezómetros, actualmente se hace uso de los *Divers*, el cual proporciona datos exactos para su respectiva evaluación del acuífero.
- Se emplearon imágenes satelitales y el uso de *Arcmap*, con el objetivo de localizar las posibles zonas donde se puedan ejecutar los sondajes eléctrico-verticales (S.E.V)
- Para garantizar que las muestras de agua, tomadas en campo se realicen de forma correcta para obtener resultados óptimos y confiables, se siguieron los procedimientos establecidos por el laboratorio.

4.3.2. Contribuye al centro laboral en términos de las competencias y habilidades adquirida durante su formación profesional

- El curso de Agua Subterránea, proporciono los conocimientos necesarios para la evaluación de los principales parámetros hidráulicos de los acuíferos para el correcto equipamiento de las captaciones de agua subterránea.
- Los conocimientos adquiridos durante la formación como Hidráulica y Mecánica de Fluidos permitieron emplear diversos métodos de aforo para determinar el caudal de una corriente de agua.

- Los conocimientos adquiridos durante la formación profesional juntamente con las experiencias sobre nuevas alternativas para el registro de niveles freáticos y temperatura. El *Diver* consiste en un sensor de presión diseñado para medir la presión del agua, de un sensor de temperatura, el *Diver* es un registrador de datos autónomo que puede ser programado por el usuario. Los *Divers* miden la presión absoluta, esto significa que el sensor de presión no solo mide la presión del agua, sino también la presión del aire de empuje sobre la superficie del agua.
- Durante la formación profesional aprendimos el uso de *softwares* diseñados para el procesamiento e interpretación de datos como el *software Surfer*, diseñando especialmente para hidrogeología. Entre otros como *Hec-Hms*, *WaterCad*, *ArcGis*, *Qgis*, permitiendo gestionar y analizar la información espacial de forma precisa.

4.3.3. Explica el nivel de contribución al centro laboral a partir de la solución de situaciones problemáticas

- Se elaboró *Dashboard* herramienta de reporte con la información obtenida en campo tanto del monitoreo como el registro de los piezómetros, para una mejor presentación grafica que muestra información relevante y de fácil lectura.
- Se realizó con eficiencia el trabajo de aforo superficial en puntos hidrométricos de la cada cuenca, así como toma de muestras para sus respectivos análisis físicos químicos.
- Para un eficiente trabajo en la prueba de bombeo se hizo mediante el equipo *Diver*, obteniendo valores más exactos para su respectivo análisis e interpretación de estos.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se realizaron 5 sondeos eléctricos verticales en la zona de la Qda. Jalachaca y 10 en la de la Qda. Torremani 2 y 2 secciones geoelectricas por cada zona de los cuales se pudo determinar a través de la interpretación de las resistividades aparentes 5 horizontes geofísicos en la Qda. Jalachaca y 4 en la Qda. Torremani 2, los cuales fueron correlacionados con la litología de la zona.
- Se estima una profundidad de la napa freática entre 12 a 47 m en la zona de la Qda. Jalachaca y de 0.9 a 14 m en la zona de la Qda. Torremani 2.
- Asimismo, el espesor con mejores propiedades de almacenamiento y trasmisión de agua entre 19 a 33 m en la zona de la Qda. Torremani 2 y de entre 42 a 58 m en la zona de la Qda Jalachaca.
- No se encontraron fuentes de aguas subterráneas que se estén aprovechando como pozos tubulares o a tajos a abiertos en un radio de 1 km. Por otro lado, ambas zonas cuentan con fuentes de agua superficial como cursos de agua producto de los deshielos de los glaciales y de precipitaciones pluviales y nivales. Y particularmente en la zona de la Qda Jalachaca se halló un área humedecida donde el agua subterránea se encuentra muy superficialmente, el cual es alimentada por las infiltraciones entre las fisuras de las rocas en la parte alta de los afloramientos rocosos.
- Considerando el medio geológico, se distinguen dos tipos de acuífero; uno de naturaleza detrítica (depósitos morrénicos) y otra fisurada de naturaleza rocosa fisurada en ambas zonas cuya litología corresponde a la de la formación Sandia Inferior, constituida ésta por areniscas y pizarras sedimentarias. Siendo un acuitardo sedimentario en la zona de la Qda. Jalachaca y un acuitardo metamórfico en la Qda. De Torremani 2.
- Se estima una profundidad de la napa freática entre 12.5 a 47 m en la zona de la Qda. Jalachaca y de 0.9 a 14.5 m en la zona de la Qda. Torremani 2.

- El sentido de la dirección de flujo de agua subterránea se da gracias al trazo de las curvas hidroisohipsas, siendo de suroeste (SW) a noreste (NW) principalmente en la zona de la Qda. Jalachaca y de oeste a este en la zona de la Qda. Torremani 2.
- Dada la naturaleza del acuífero descrito en el mapa hidrogeológico del Perú, litología y de los resultados de la prospección geofísica se estimaron los parámetros hidrogeológicos del acuífero. Teniendo la permeabilidad en ambas zonas una calificación que va de baja a muy baja, estando entre 10^{-2} a 1 m/día según Villanueva (1984). Asimismo, la transmisividad de los acuíferos de ambas zonas tiene una calificación estimativa de muy baja a baja, estando entre <10 a 100 m²/día según Villanueva.
- La porosidad efectiva es un parámetro importante para determinar las reservas de aguas, ya que esta porosidad representa el volumen de poroso o huecos (fisuras) conectados. Por lo que se relacionó la litología propia de las zonas de estudio con valores de porosidad efectiva, resultando un estimado de 5% para ambas zonas según Custodio y Llamas (1983).
- Complementariamente se analizaron las muestras de agua con la norma Wilcox, la cual considera como índices para la clasificación de aguas el porcentaje de sodio respecto al de cationes, y la Conductividad Eléctrica. Se determinó como “excelente” para el riego para ambas zonas.

5.2. RECOMENDACIONES

- Es necesario contar con información adicional que recopile los estudios realizados que sirva de base para nuevos estudios.
- El éxito de la prospección geoelectrica depende no solo del trabajo de campo, sino de toda una metodología que empieza con la preparación del área prospectada hasta el procesamiento e interpretación de los datos.
- La sección para el aforo debe estar ubicada en un tramo recto de sección constante de longitud suficiente.
- Las muestras de agua de ríos y de arroyos han de extraerse de preferencia de la zona central del río o de una zona donde fluya el agua, pero sin turbulencia.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amoozegar, A. (2002). Models for field determination of saturated hydraulic conductivity. pp. 45-53. In: C. E. Stokes (ed.). XLV Annual Meeting. Raleigh, NC, USA.

Arocha, S. (1980). Abastecimiento de agua (Teoría y Diseño). Caracas, Venezuela: Editorial Vegas. 284 p.

Astier, J.L. (1975). Masson et Cie. Paris. Geofísica aplicada a la hidrogeología). Madrid: Paraninfo.

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2015). R.J. N° 007-2015-ANA “Reglamento de procedimientos administrativos para el otorgamiento de derechos de uso de agua y autorizaciones de obras en fuentes naturales de agua”.

Béjar, M.V. (2004). Hidrología. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica

Canales Elorduy, A. (1989). Hidrología subterránea. Ed. Insto. Tecnológico de Sonora. 224p.

Canovas Cuenca, J. (1986). Calidad Agronómica de las Aguas de riego. Madrid, España: Mundi Prensa.

Castany, G. (1975). Prospección y explotación de las aguas subterráneas. Barcelona, España: Omega. 738p.

- Chow, V.; Maidment, D.; Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. Editorial Mc Graw Hill. 100 p.
- Custodio, E.; Llamas, M. (1996). Hidrología subterránea. Barcelona, España: Ediciones Omega. Volumen I. 1577, 2361p.
- Davis, S.; De Wiest, R. (1971). Hidrogeología. Barcelona, España: Ediciones Ariel. 555 p.
- Dingman, S. (2002). Physical Hydrology. New Jersey, EE.UU. Prentice Hall Inc. 646 p.
- Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona. (FCIHS). (2009). Hidrogeología: Conceptos básicos de hidrología subterránea. Comisión docente curso internacional de hidrología subterránea. Barcelona, España. 768 p.
- Fornari, M.; Grandin, G.; Herail, G.; Jungbluh, R.; Laubacher. (1981). Las mineralizaciones auríferas en la cordillera Sur Oriental del Perú. El papel de la evolución geomorfológica en la formación de placeres. ORSTOM -INGEMMET.
- García, R.F. (2018). Apuntes sobre Captación de Aguas Subterráneas. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de Salta.
- Goicochea, J.A. (2012). Ingeniería de drenaje. Lima, Perú: Q y P Impresores S.R.L. 190 p.
- INGEMMET. (1996). Boletín N° 66: Geología de los cuadrángulos: Putina (30-x) y; Rinconada (30-y).
- INGEMMET. (2017). Mapas Geológicos de los cuadrángulos: Rinconada (30-y).
- Klimentov, P.; Kónonov, V. (1982). Metodología de las investigaciones hidrogeológicas. Moscú: Editorial MIR.

Martínez, P.; Martínez, S.; Castaño, S. (2006). Fundamentos de hidrogeología. Madrid, España: Mundi Prensa Libros. 279 p.

Ministerio del ambiente (MINAM). (2017). D.S. N° 004-2017-MINAM “Estándares de Calidad Ambiental”.

Núñez Solís, J. (1997). Manual de laboratorio de edafología. MONTES DE OCA, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia

Pizarro, C.F. (1985) drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos, ed. agrícola española Madrid.

Villanueva, M.; Iglesias, A. (1984). Pozos y Acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. IGME, 21 p. Madrid, España

VII. ANEXOS

Gráficos de las curvas de los resultados de los sondeos eléctricos verticales

ZONA QDA. TORREMANI 2

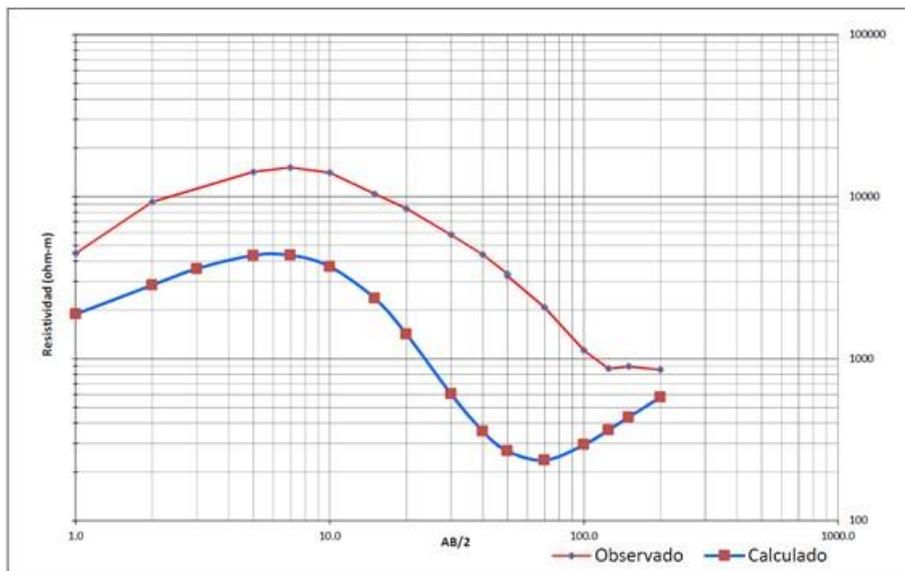


Figura 35: Gráfico de la curva SEV - 01

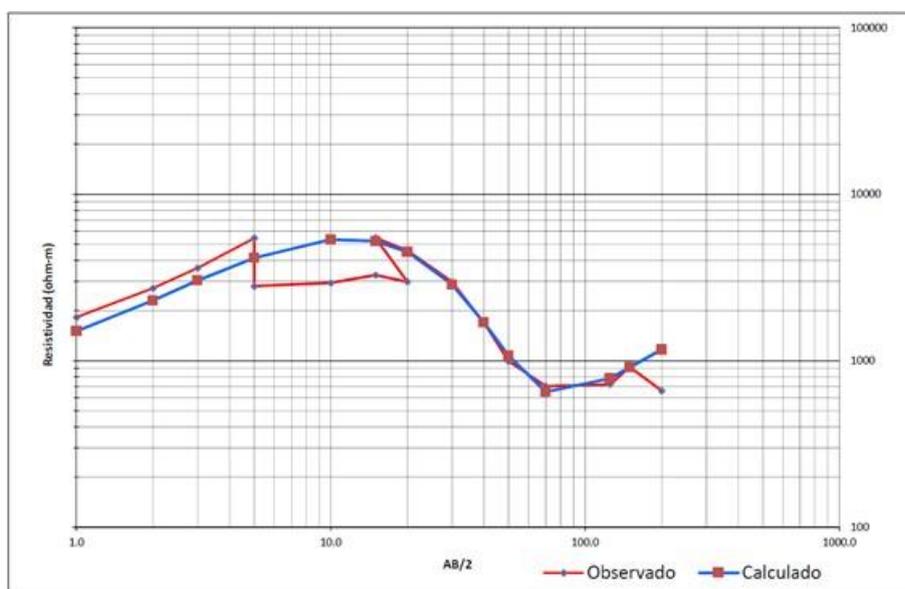


Figura 36: Gráfico de la curva SEV - 02

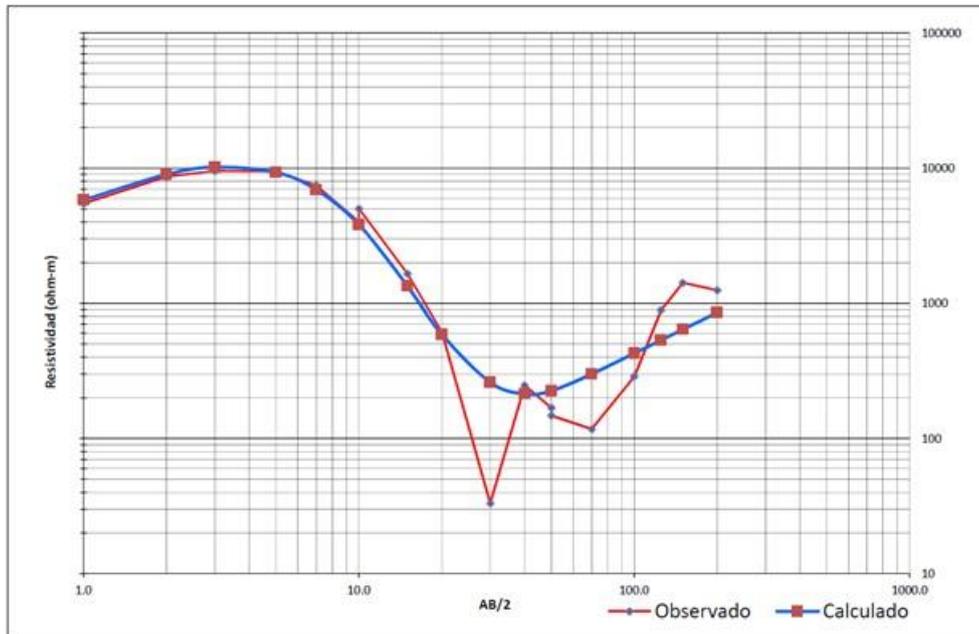


Figura 37: Gráfico de la curva SEV – 03

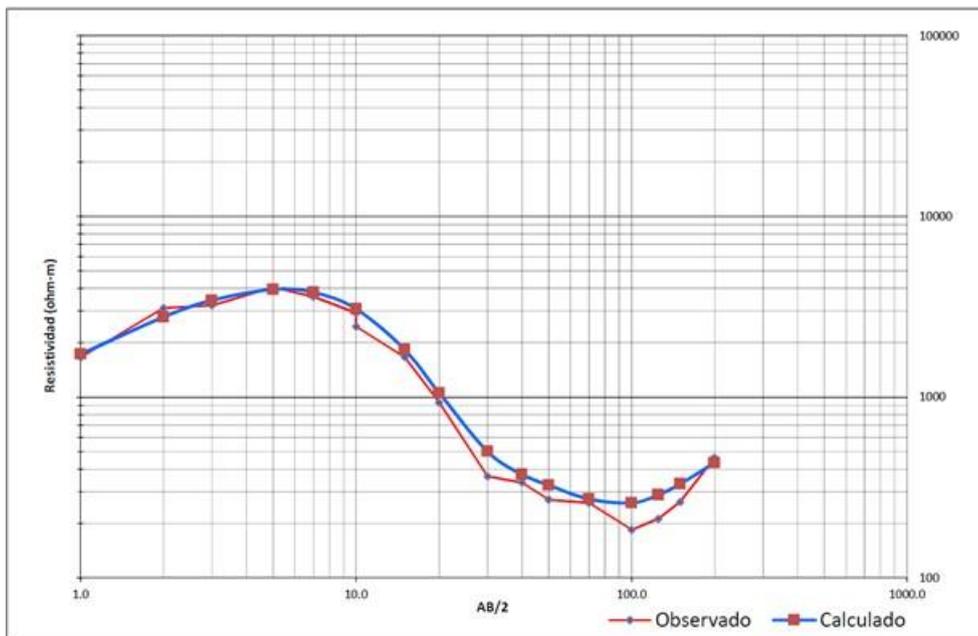


Figura 38: Gráfico de la curva SEV - 04

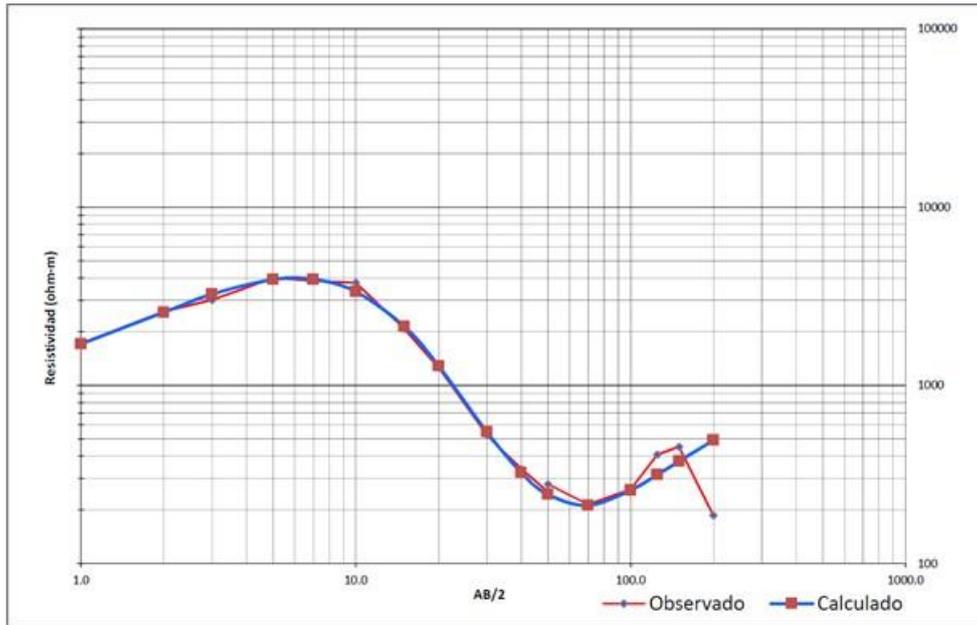


Figura 39: Gráfico de la curva SEV – 05

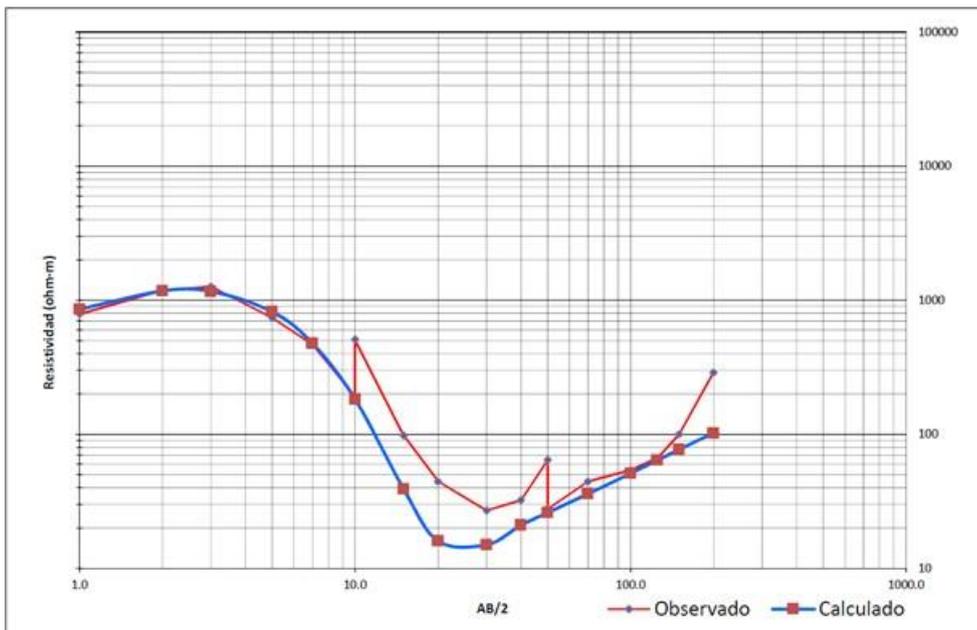


Figura 40: Gráfico de la curva SEV – 06

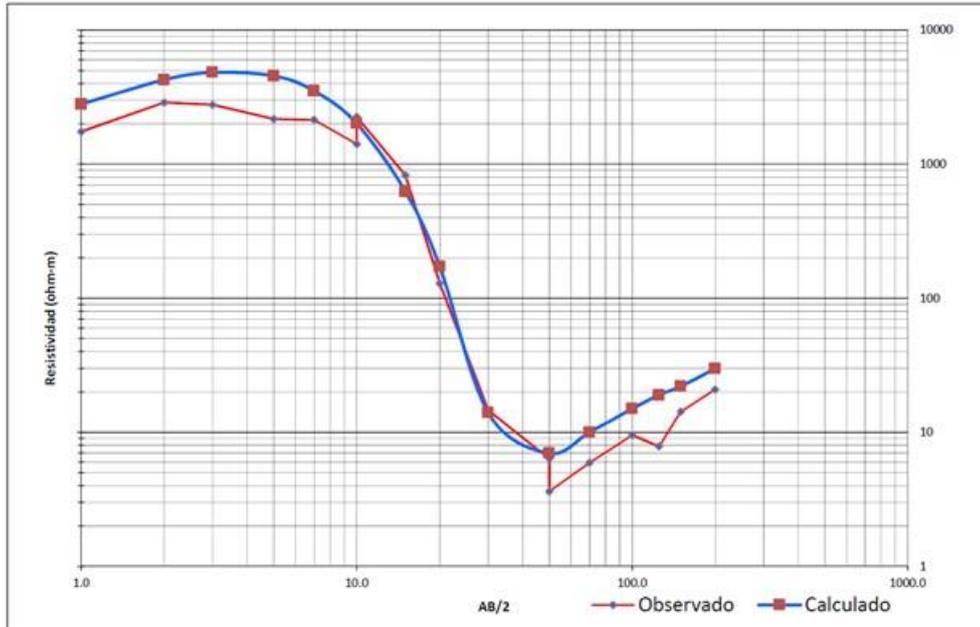


Figura 41: Gráfico de la curva SEV – 07

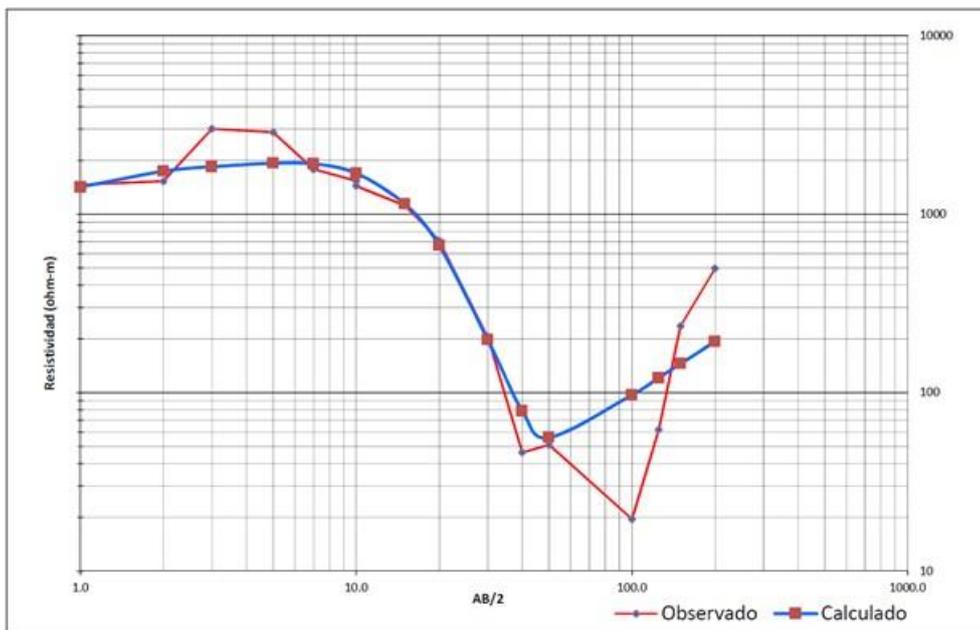


Figura 42: Gráfico de la curva SEV – 08

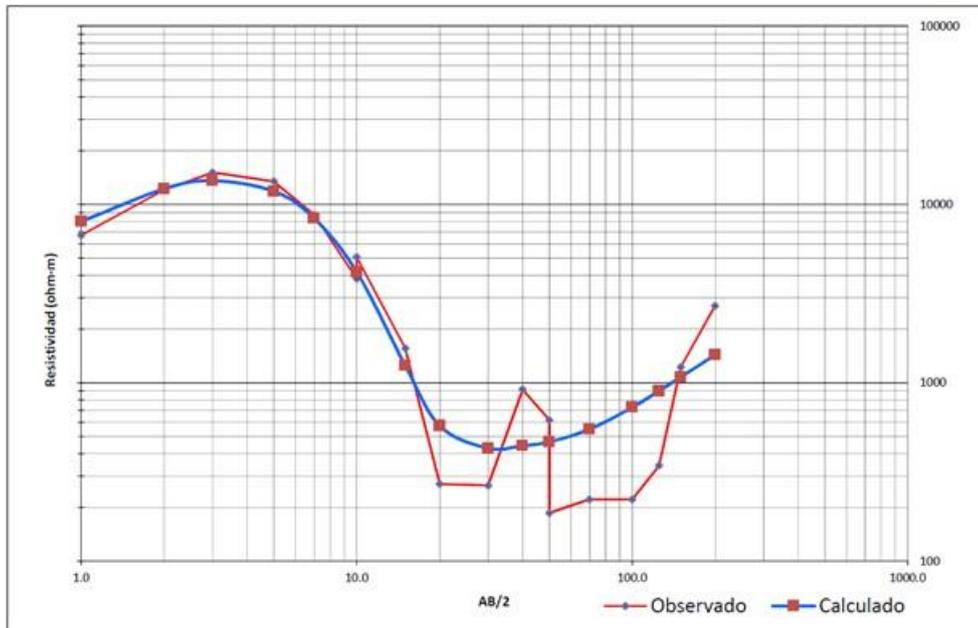


Figura 43: Gráfico de la curva SEV – 09

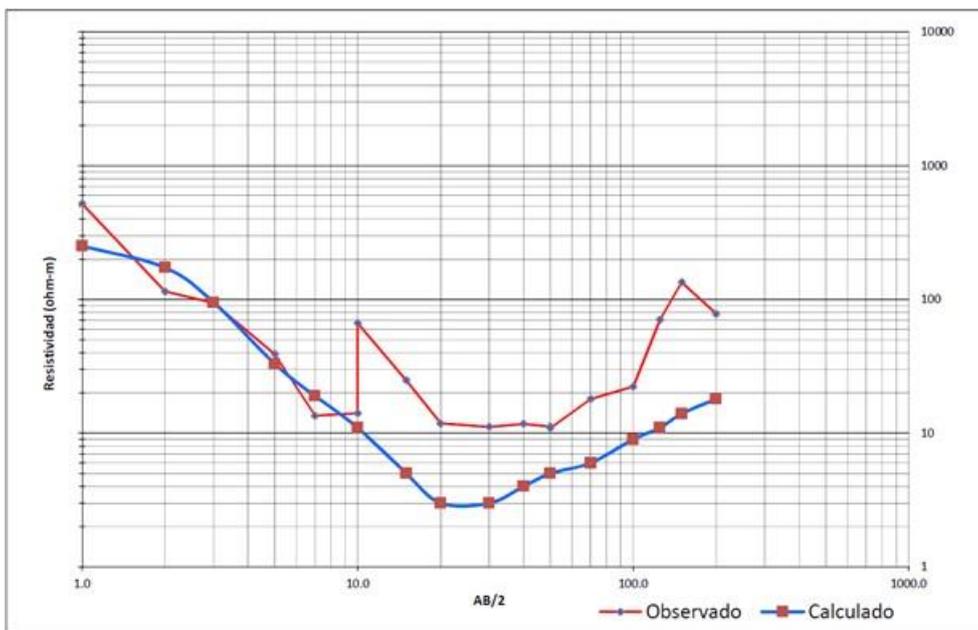


Figura 44: Gráfico de la curva SEV – 10

ZONA QDA. JALACHACA

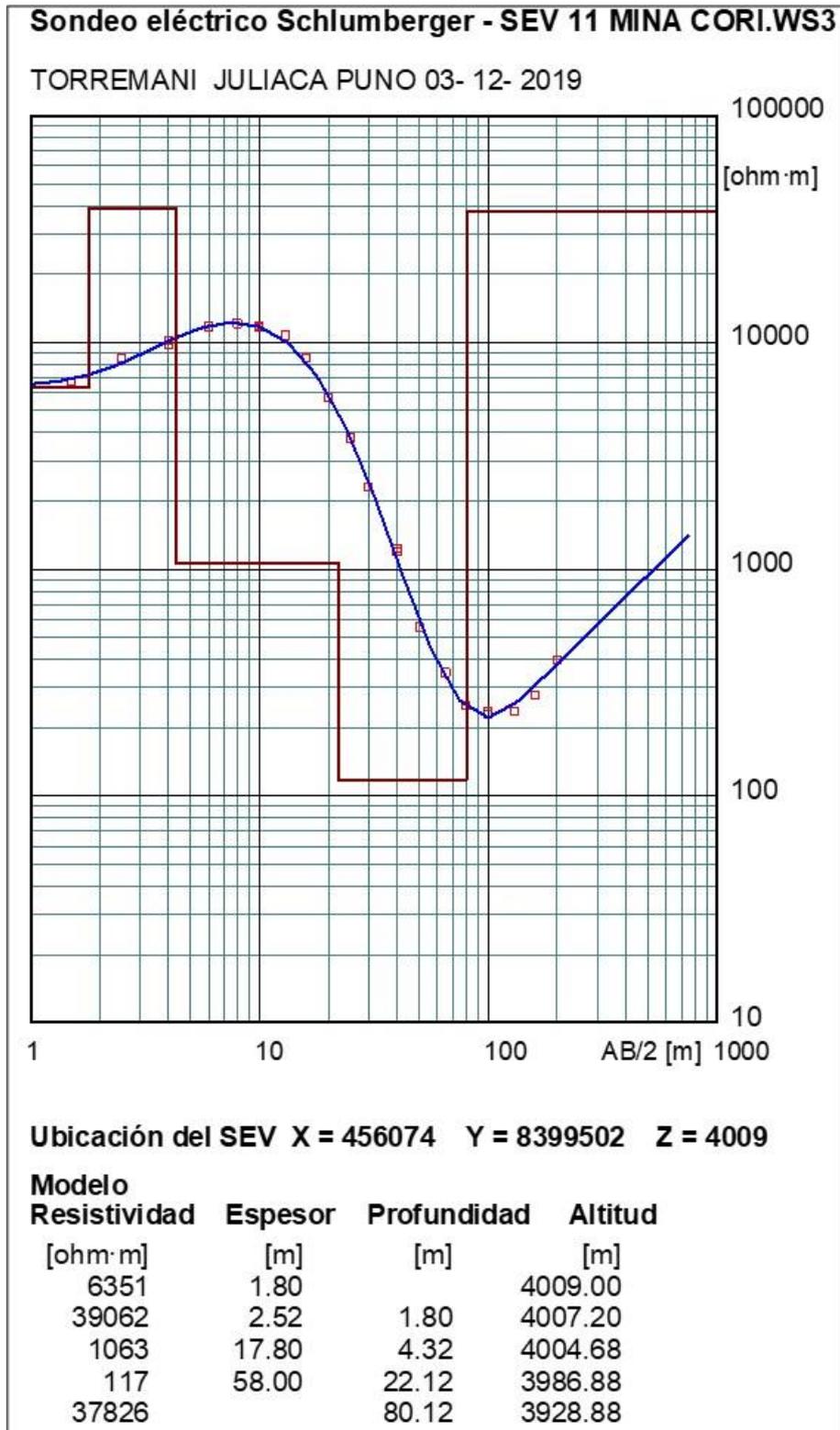
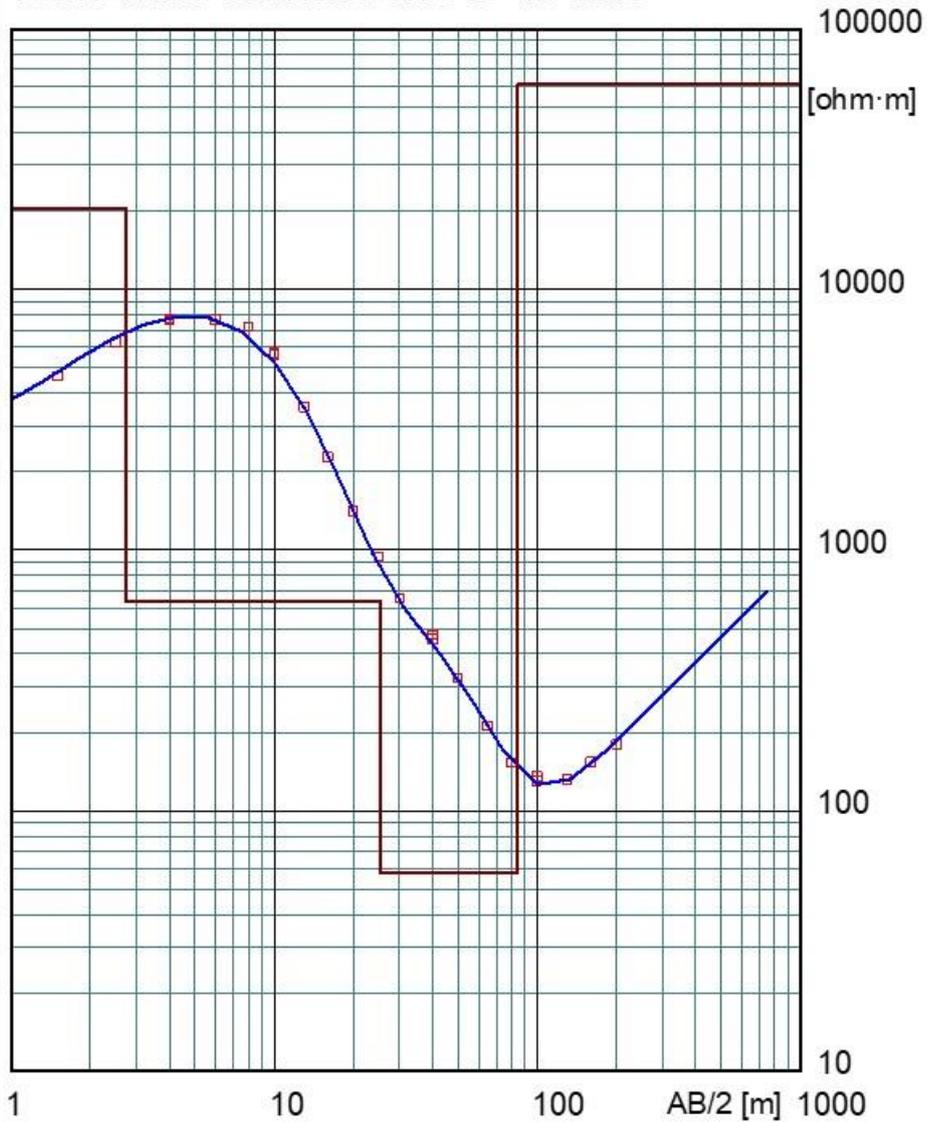


Figura 45: Gráfico de la curva SEV – 11

Sondeo eléctrico Schlumberger - SEV 12 MINA CORI.WS3

TORREMANI JULIACA PUNO 03- 12- 2019



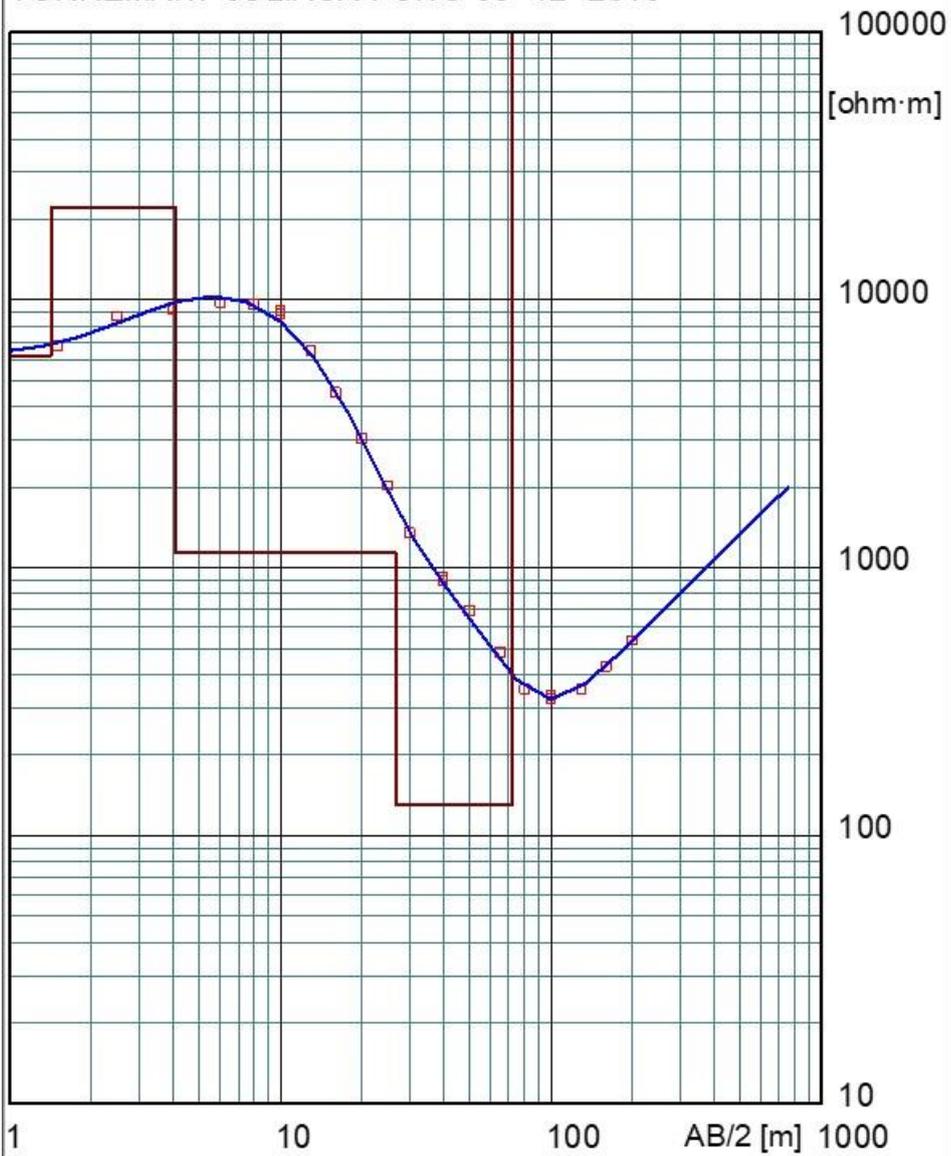
Ubicación del SEV X = 456001 Y = 8399659 Z = 4001

Modelo

Resistividad	Espesor	Profundidad	Altitud
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
2835	.71		4001.00
20457	2.02	.71	4000.29
637	22.54	2.73	3998.27
58	58.80	25.27	3975.73
61160		84.07	3916.93

Figura 46: Gráfico de la curva SEV – 12

TORREMANI JULIACA PUNO 03- 12- 2019



Ubicación del SEV X = 456305 Y = 8399817 Z = 3970

Modelo

Resistividad	Espesor	Profundidad	Altitud
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
6210	1.42		3970.00
22161	2.70	1.42	3968.58
1136	22.63	4.12	3965.88
131	45.43	26.75	3943.25
133261		72.18	3897.82

Figura 47: Gráfico de la curva SEV – 13

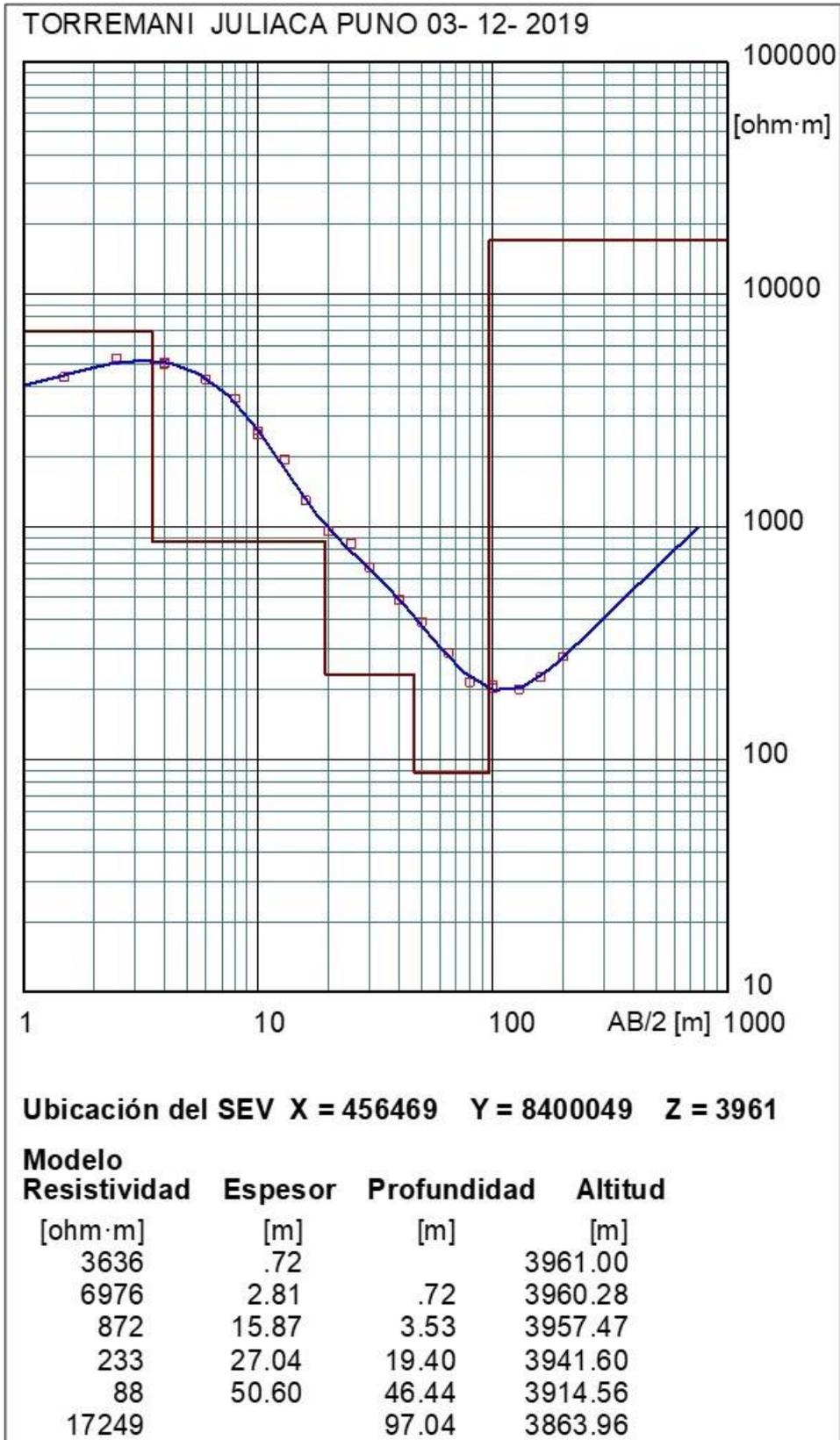
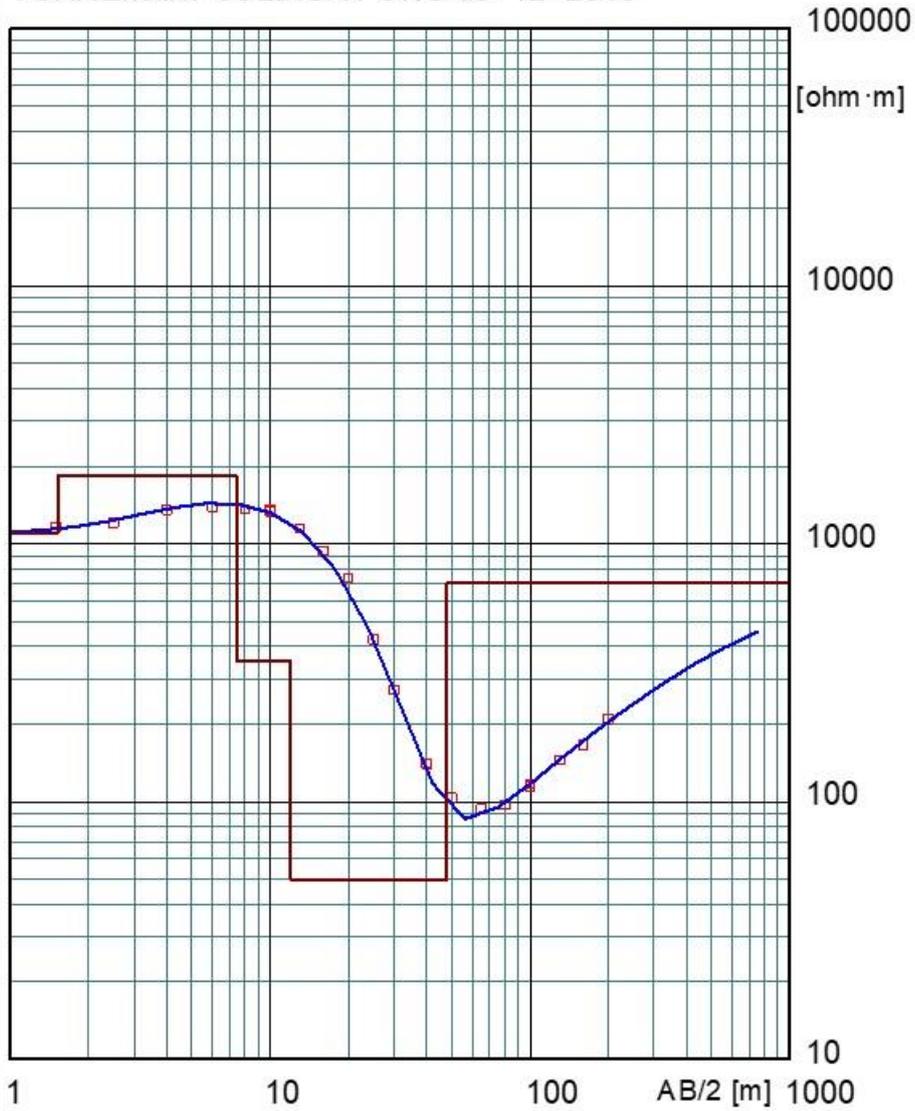


Figura 48: Gráfico de la curva SEV – 14

TORREMANI JULIACA PUNO 03- 12- 2019



Ubicación del SEV X = 456625 Y = 8399904 Z = 3985

Modelo

Resistividad	Espesor	Profundidad	Altitud
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
1096	1.52		3985.00
1843	5.90	1.52	3983.48
353	4.59	7.42	3977.58
50	35.92	12.01	3972.99
704		47.93	3937.07

Figura 49: Gráfico de la curva SEV – 15

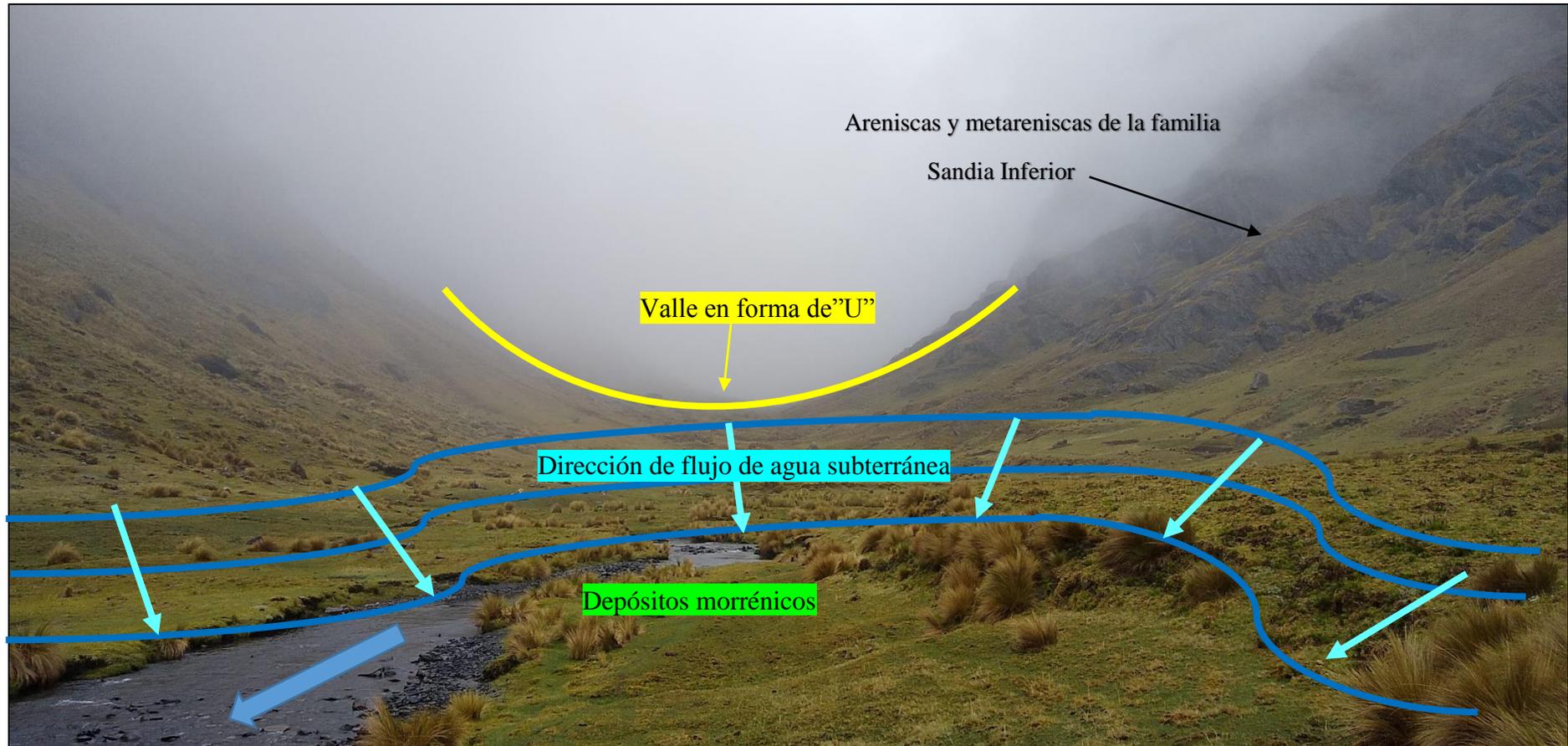


Figura 50: Flujo de agua superficial y subterránea – zona Qda. Jalachaca

Vista de valle glacial típico en forma de “U”. Cuyos depósitos morrénicos producto de los factores erosivos propios del valle, de espesores entre 2 a 24 metros formando bofedales con bastante grado de saturación debido a que el nivel de agua subterránea se encuentra a poca profundidad (alrededor de 1 metro en el fondo del valle, según el mapa de Isoprofundidades), formándose así dos tipos de acuíferos con respecto al medio geológico que lo conforma (detrítico: depósitos morrénicos y fisurado: roca fisurada), así también los límites impermeables como acuitardos sedimentarios estaría conformados por roca sana a mayores profundidades. La zona de recarga de estos acuíferos se encuentra sobre ellos mismos, ya que, se ubica sobre los 4000 msnm en la cabecera de cuenca donde ocurren altas precipitaciones pluviales y nivales y la zona de descarga local se daría también sobre el valle, específicamente en el fondo del valle (ver mapa de Hidroisohipsas), haciendo que se eleve el nivel freático alimentando los pequeños cursos de agua, como también escorrentía de deshielos que alimentan al valle como el de la fotografía de la derecha.

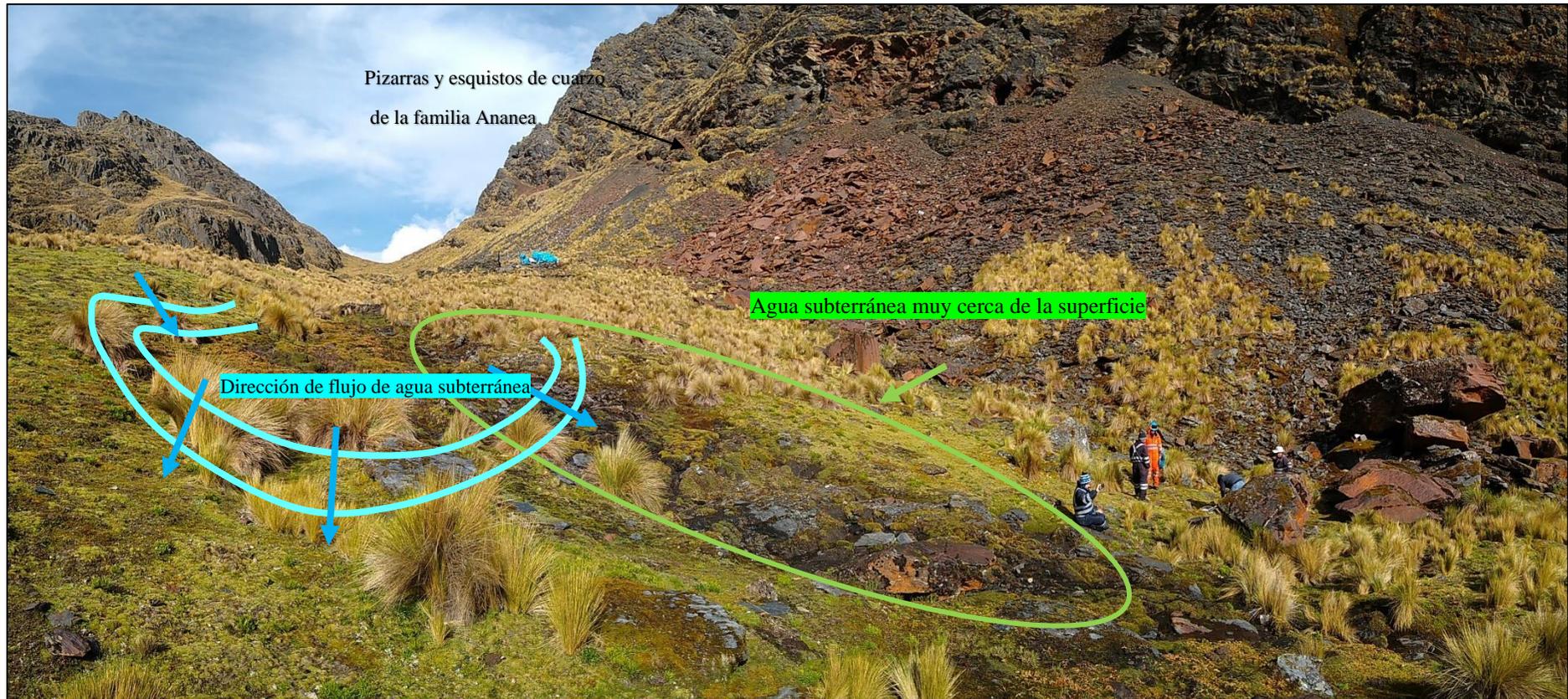


Figura 51: Flujo de agua superficial y subterránea – zona Qda. Torremani 2, parte alta – aguas arriba

Vista del valle aguas arriba, del flujo de agua subterránea, además podemos notar que el agua subterránea se encuentra muy superficialmente en una determinada área, según las hidroisohipsas y los planos de discontinuidad perpendicular o casi perpendicular a los planos de estratificación de las rocas, siendo estos planos de discontinuidad conductos por donde se mueve el agua subterránea.



Figura 52: Flujo de agua superficial y subterránea – zona Qda. Torremani 2, parte media baja – aguas abajo

Vista aguas abajo de la Qda. Torremani 2, parte media-baja, formándose así un acuífero fisurado: roca fisurada, así también los límites impermeables están conformados por acuitados sedimentarios probablemente por roca sana a mayores profundidades. La zona de recarga de estos acuíferos se encuentra sobre ellos mismos y aguas arriba, ya que, se ubica sobre los 3700 msnm en la cabecera de cuenca donde ocurren altas precipitaciones nivales y la zona de descarga local se daría también sobre el valle, específicamente en el fondo del valle.

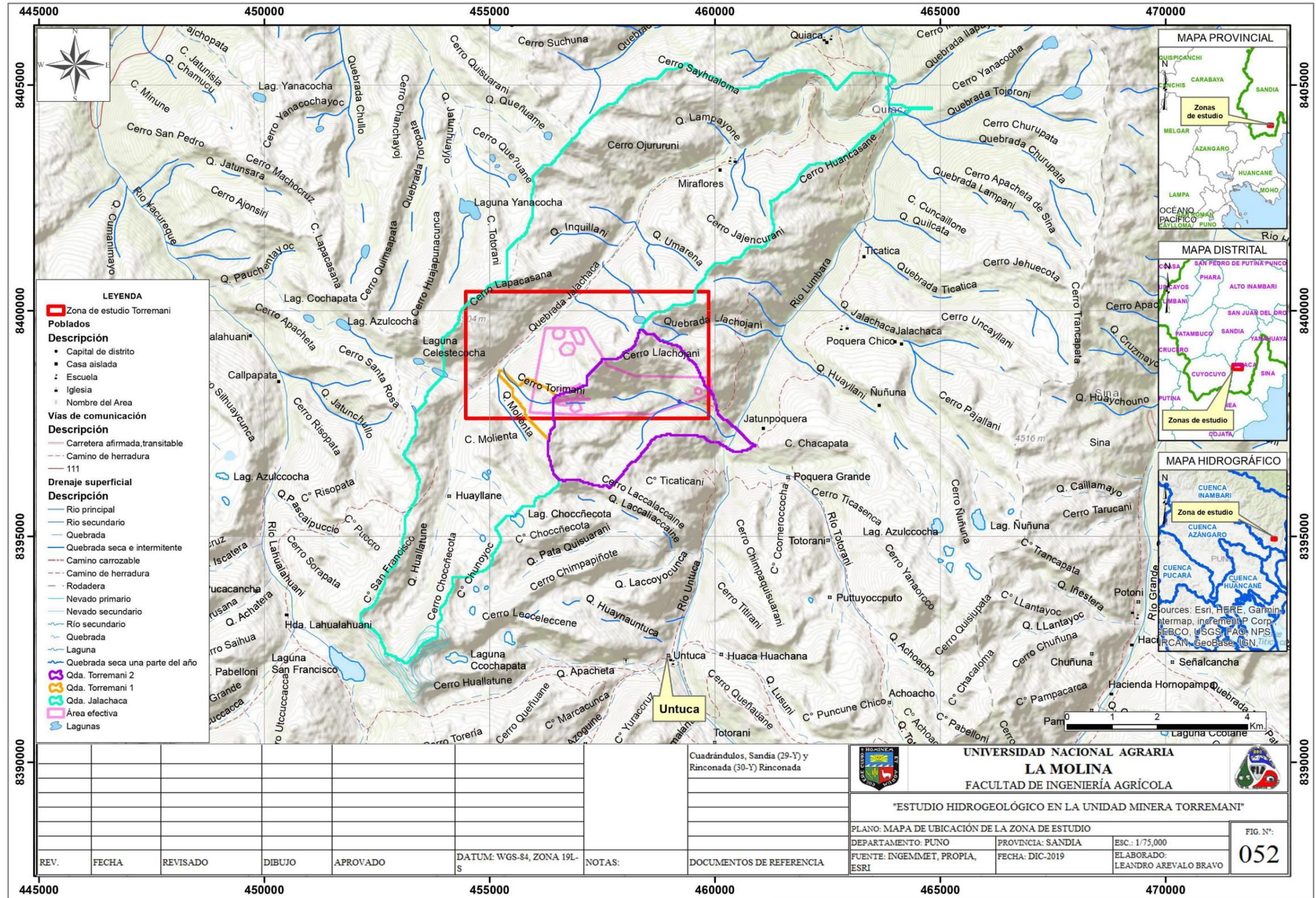


Figura 53: Ubicación de la zona de estudio

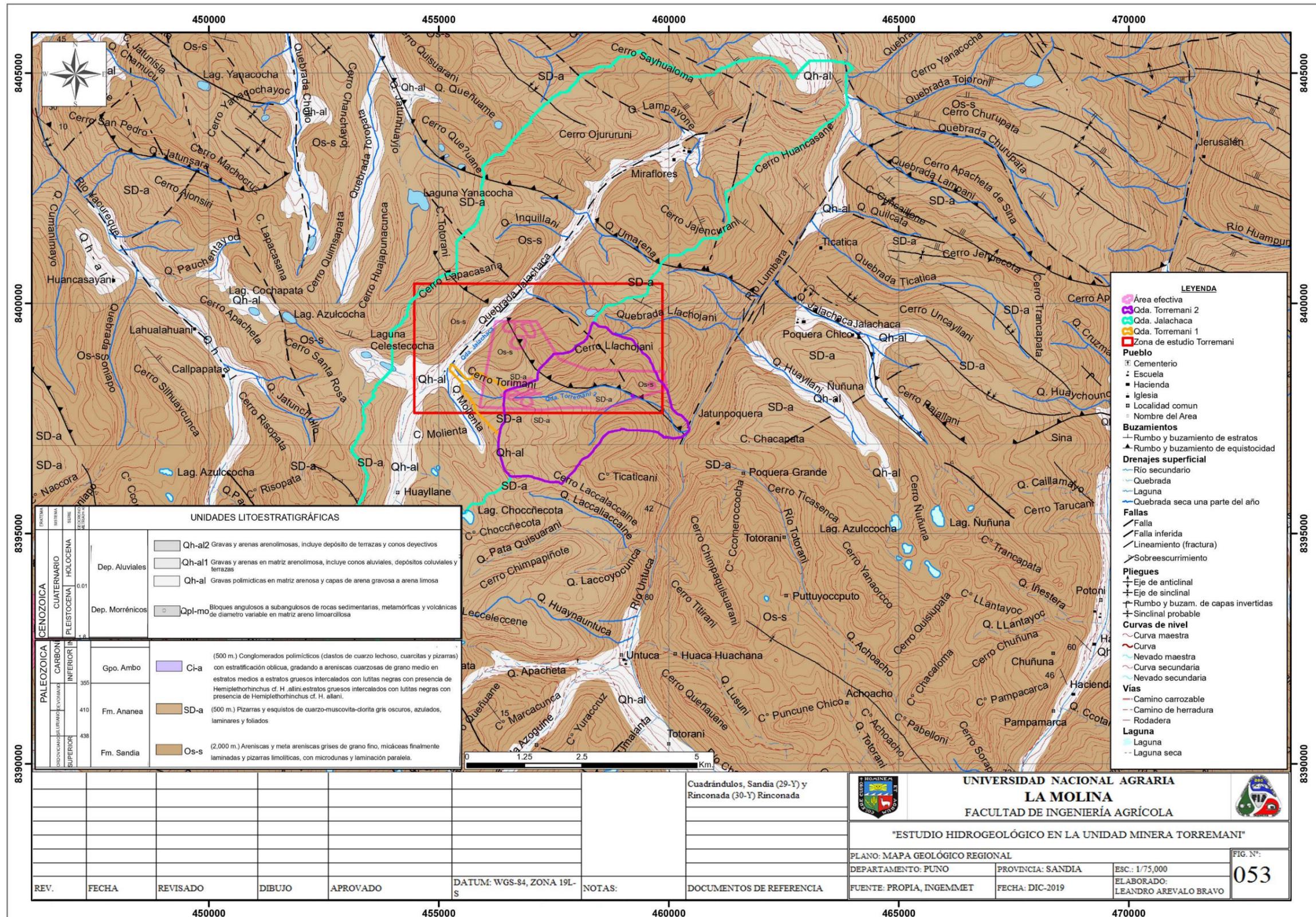


Figura 54: Mapa Geológico

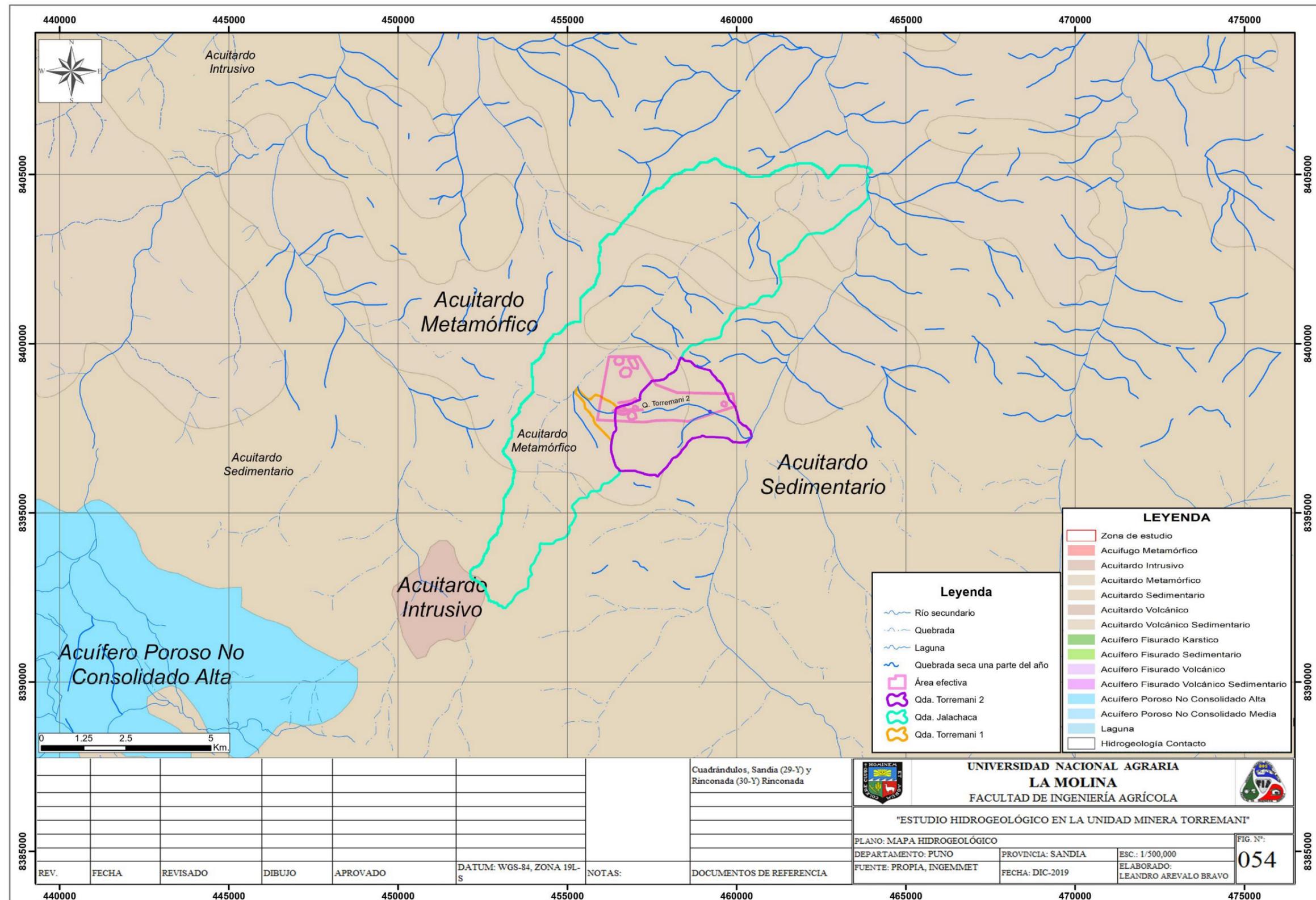


Figura 55: Mapa Hidrogeológico

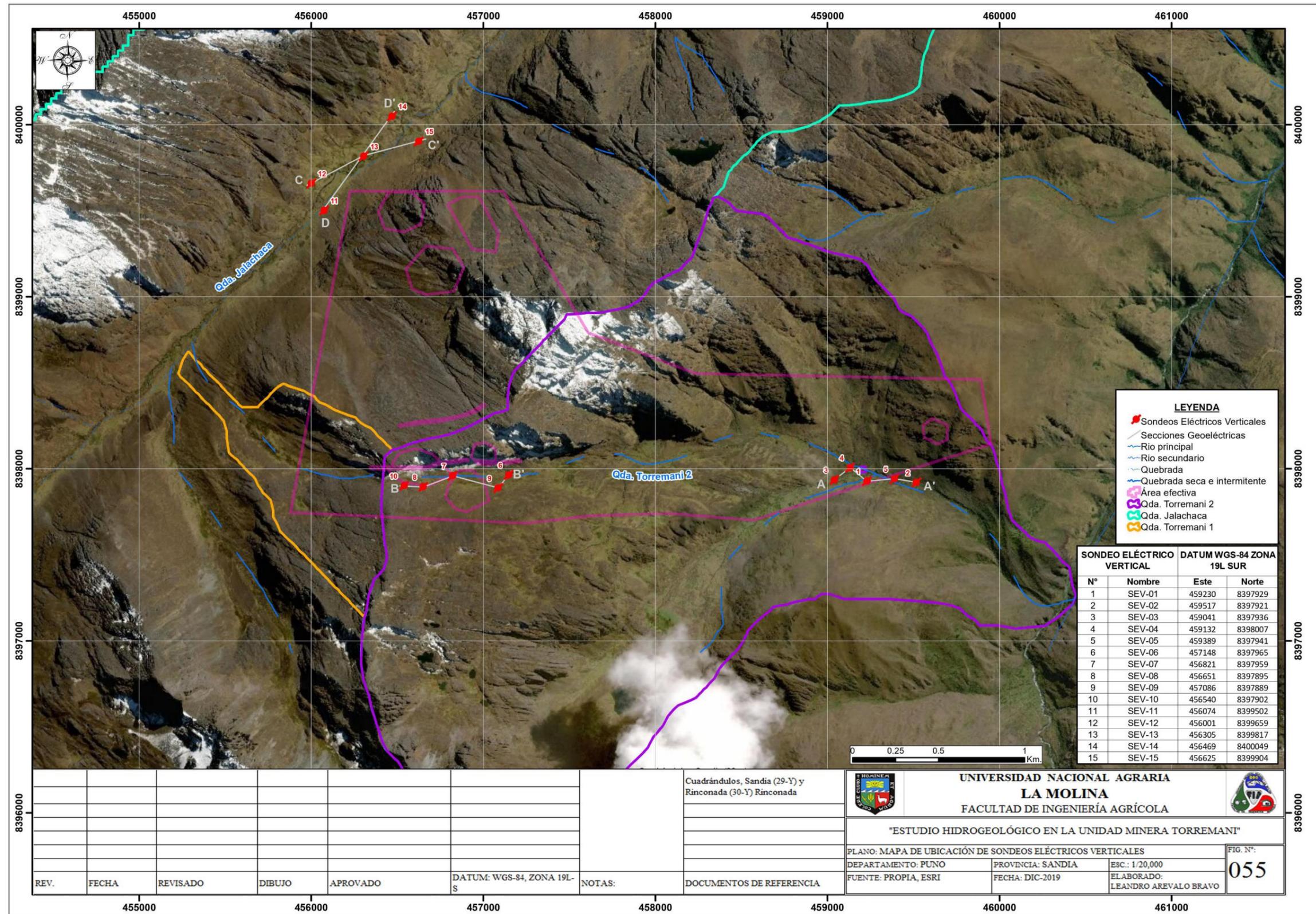


Figura 56: Ubicación de los sondeos eléctricos verticales y secciones geoeléctricas

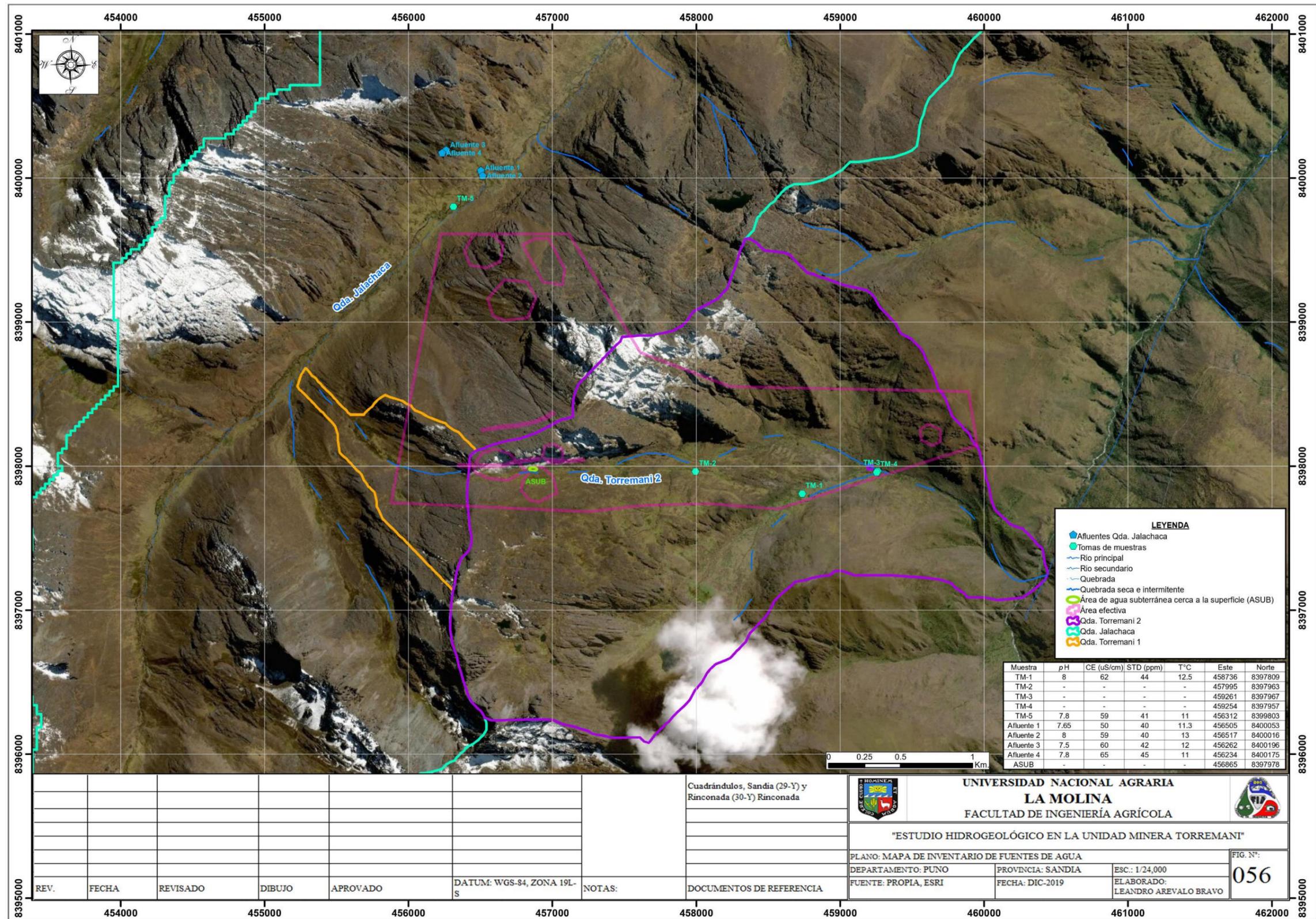


Figura 57: Mapa de inventario de fuentes de agua

