

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

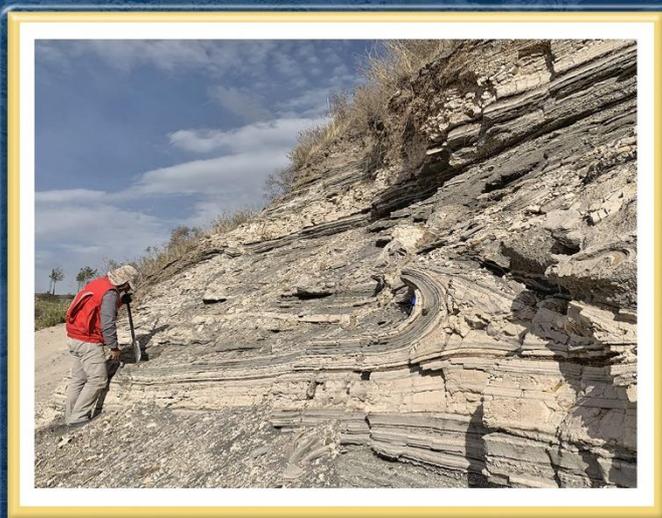
Informe Técnico N° A7528

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL RIESGO GEOLÓGICO DEL DESLIZAMIENTO DE ACHOMA

Departamento: Arequipa

Provincia: Caylloma

Distrito: Achoma



AGOSTO
2024

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL RIESGO GEOLÓGICO DEL DESLIZAMIENTO DE ACHOMA

Distrito Achoma, provincia Caylloma, departamento Arequipa

Elaborado por la
Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo
Geológico del Ingemmet

Equipo de investigación:

Josemanuel F. Carpio Fernández.
Baclimer Quispe Yanapa.
Danitza S. Machaca Fernandez.
Walter Pari Pinto
Domingo Ramos

Referencia Bibliográfica

Carpio, J.; Quispe, B.; Machaca, D.; Pari, W. & Ramos, D. (2024). Evaluación hidrogeológica del riesgo geológico del deslizamiento de Achoma. Distrito Achoma, provincia Caylloma, departamento Arequipa. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Informe Técnico N° A7528, 88 p.

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN	8
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1. Objetivos del estudio	10
2.2. Antecedentes	11
2.3. Ubicación y accesibilidad	14
3. CARACTERISTICAS DEL MEDIO DE CIRCULACIÓN	16
3.1. Unidades Geológicas	16
3.1.1. Grupo Tacaza (PN-t)	16
3.1.2. Grupo Barroso	16
3.1.3. Depósitos Cuaternarios	17
3.2. Geología estructural	18
3.2.1. Fallas y Pliegues	18
4. CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS	21
4.1. Geodinámica	21
4.1.1. Factores geodinámicos y agentes geodinámicos	21
4.2. Hidrogeología	22
4.2.1. Unidades Hidrogeológicas	22
4.3. Identificación de evidencias de agua	23
4.3.1. Inventario	23
4.3.2. Ensayos in situ / Ensayo de infiltración	28
4.4. Caracterización hidrogeológica	40
4.4.1. Unidades Hidrogeológicas	41
5. CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICA	47
5.1. Muestreo de campo	47
5.2. Análisis de resultados	47
5.2.1. Parámetros físico-químicos	47
5.3. Clasificación de las aguas	49
6. GEOFÍSICA	61
6.1. Métodos geofísicos	61
6.1.1. Resistividad-2D	61
6.2. Resultados e interpretación de las secciones de tomografía eléctrica - deslizamiento de Achoma	64

6.2.1.	SECCIÓN LT-1.....	64
6.2.2.	SECCIÓN LT-2.....	67
6.2.3.	SECCIÓN LT-3.....	69
6.2.4.	SECCIÓN LT-4.....	71
6.2.5.	SECCIÓN LT-5.....	73
6.2.6.	SECCIÓN LT-6.....	75
6.2.7.	SECCIÓN LT-7.....	77
6.2.8.	SECCIÓN LT-8.....	79
6.2.9.	SECCIÓN LT-9.....	81
7.	CONCLUSIONES.....	83
8.	RECOMENDACIONES	85
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Distancia y tipo de vía para acceder al sector consultado.	14
Cuadro 2. Coordenadas geográficas de las zonas de estudio:	14
Cuadro 3. Resumen del inventario de fuentes de agua	26
Cuadro 4. Resumen de ensayos de infiltración	30
Cuadro 5. Valores estimados de la conductividad hidráulica (m/día)	33
Cuadro 6. Valores de porosidad y permeabilidad en la unidad Centro Volcánico Hualca Hualca	36
Cuadro 7. Resultados de conductividad hidráulica y permeabilidad - Grupo Tacaza - Formación Pichu	37
Cuadro 8. Resultados de conductividad hidráulica y permeabilidad - Centro Volcánico Huarancante.	39
Cuadro 9. Clasificación hidrogeológica.	41
Cuadro 10. Facies Hidroquímicas de la altitud 4400 - 3900	51
Cuadro 11. Facies Hidroquímicas de la altitud 3400-3900	52
Cuadro 12. Facies Hidroquímicas de la altitud 3300-3450	53
Cuadro 13. Resumen de las líneas de Tomografía Eléctrica-Achoma-Arequipa.	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio después del evento.	14
Figura 2. Ruta de acceso desde Arequipa hasta Achoma.	15
Figura 3. Mapa geológico/estructural del área de estudio.	20
Figura 4. Unidades hidrogeológicas (Carpio; Machaca & Quispe, 2021)	22
Figura 5. Referencia cualitativa según la porosidad y permeabilidad para la clasificación hidrogeológica. (Carpio; Machaca & Quispe 2021)	23
Figura 6. Manantiales en la parte Alta por encima del Canal 9	23
Figura 7. Manantiales en la parte baja del área de estudio.	24
Figura 8. Filtraciones de agua alineada a un estrato condicionante.	24
Figura 9. Puntos de control en los principales aportantes de agua.	25
Figura 10. Fotografías, ingreso del canal 9	25
Figura 11. Fotografías, salida del canal 9.	25
Figura 12. Distribución del inventario de fuentes de agua.	27
Figura 13. Grietas y desniveles	27
Figura 14. Esquema del ensayo de Lefranc o ensayos de infiltración con carga constante y carga variable, respectivamente.	28
Figura 15. Distribución de los ensayos de infiltración.	29
Figura 16. Distribución y resumen de pruebas hidráulicas mostrando la variación de conductividad hidráulica.	40
Figura 17. Distribución de unidades hidrogeológicas.	45
Figura 18. Potencial de hidrogeno de las fuentes inventariadas	48
Figura 19. Total de sólidos disueltos de las fuentes inventariadas	49
Figura 20. Diagrama de Piper y Scatter de las muestras tomadas.	50
Figura 21. Distribución de facies hidroquímica representadas en diagramas Stiff (altitudes de 3400 - 4400 , parte alta/media de la zona de estudio)	52
Figura 22. Distribución de facies hidroquímica representadas en diagramas Stiff (altitudes de 3300 - 3450, parte baja de la zona de estudio)	54
Figura 23. Sección de evolución química del agua.	58
Figura 24. Evidencias de zonas húmedas	59
Figura 25. Riego por inundación, con canales sin revestimiento o acequia .	60
Figura 26. trabajo y equipos utilizados en la etapa de geofísica .	61
Figura 27. Distribución de las líneas de tomografía Eléctrica.	62
Figura 28. Ubicación de las Líneas de Tomografía Eléctrica.	63
Figura 29. Configuraciones electrodoicas de la tomografía Eléctrica como el de Dipolo-Dipolo utilizado en el presente estudio.	63
Figura 30. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-1.	66
Figura 31. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-2.	68
Figura 32. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-3	70
Figura 33. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-4	72
Figura 34. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-5.	74
Figura 35. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-6.	76
Figura 36. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-7	78
Figura 37. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-8.	80
Figura 38. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-9.	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 , Recta de descenso de caudal infiltrado en calizas de la Formación Pichu del Grupo Tacaza, mediante el ensayo de infiltración de carga variable.	32
Gráfico 2 . Dendograma de similitud.	34
Gráfico 3 . EI-007 Análisis de infiltración con respecto al tiempo.....	35
Gráfico 4 . Análisis de infiltración en el Centro Volcánico Hualca Hualca.	36
Gráfico 5 . Análisis de infiltración en la Formación Pichu.....	37
Gráfico 6 . Análisis de infiltración en la Centro Volcánico Huarancante.	38
Gráfico 7 . Diagramas de Gibbs relación TDS y aniones Cl/(Cl+HCO ₃), muestras entre las elevaciones 3300 hasta los 3900.....	55
Gráfico 8 . Diagramas de Gibbs relación TDS y cationes (Na/(Na+Ca), muestras entre las elevaciones 3900 hasta los 4500.....	56

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Poblado de Achoma (vista al NE)	10
Fotografía 2 Material removido por el deslizamiento de Achoma.	10
Fotografías 3 Ensayo de infiltración de carga variable realizado en rocas del Centro Volcánico Hualca Hualca.....	31
Fotografía 4 Vista del depósito cuaternario con fines agrícolas.....	42
Fotografía 5 Material del centro Volcánico Huarancante perteneciente al grupo barroso presenta fracturas que condiciona el afloramiento de manantiales. ...	43
Fotografía 6 Material fino al pie del deslizamiento.	46
Fotografía 7 Material fino de fácil saturación, considerado acuitardo.	46
Fotografías 8 Bocatoma del canal 9, dotación de agua para riego.....	60

1. RESUMEN

Este trabajo se centra en obtener información hidrogeológica sobre el deslizamiento ocurrido el 18 de junio de 2021 en Achoma, distrito Achoma, provincia Caylloma, departamento Arequipa. El deslizamiento presentó un escarpe principal con longitud de 950 m y altura entre 100 y 150 m, con desplazamiento de 500 m. afectando 40 ha. de terreno de cultivo, represando al río Colca (Informe técnico N° A7066. INGEMMET 2020). El deslizamiento muestra la importancia de las características geológicas e hidrogeológicas del área de estudio por lo que se pretende identificar y caracterizar el material del deslizamiento de Achoma desde el punto de vista hidrogeológico para comprender los factores que causaron la inestabilidad. Esta información formará parte de un plan estratégico para las autoridades y habitantes de Achoma, dado que el sector se ubica en una zona de peligro muy alto.

Los materiales en la zona del deslizamiento en Achoma están constituidos por depósitos lacustres, situados sobre una subunidad de terraza alta aluvial. Los factores desencadenantes podrían causar futuros avances del deslizamiento y la aparición de grietas, por lo que es necesario controlar los aportes del sistema de riego en la parte alta y establecer un plan de contingencia para prevenir daños. Además, es fundamental implementar sistemas de monitoreo permanente del deslizamiento.

Se identificó que los depósitos no consolidados, se ven afectados por el riego por inundación y la falta de revestimiento en los canales, que inundan áreas no controladas, además las precipitaciones extraordinarias entre los meses de enero y marzo, y la permeabilidad de las unidades hidrogeológica, lo que provoca infiltraciones y deterioro del suelo.

Se inventariaron y catalogaron 44 evidencias o fuentes de agua, incluyendo manantiales, manantiales captados y puntos de control, de los cuales se muestrearon 33 fuentes para un análisis químico de aniones, metales disueltos, metales totales y elementos traza por el método ICP Masa óptico, lo que nos permitió conocer las características hidroquímicas del agua subterránea, estos resultados indican un régimen hidrogeológico rápido que recibe una cantidad relativamente alta de agua de precipitación que fluye en los acuitardos y acuíferos, identificando sistemas de flujo de agua subterránea poco profundo/local e intermedio-profundo, debido a que el agua subterránea muestra un cambio sistemático en las facies hidroquímicas a lo largo de la dirección del flujo de agua subterránea desde la parte alta hacia la parte baja del área de estudio.

2. INTRODUCCIÓN

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), como ente técnico-científico, incorpora dentro de los proyectos de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), la ACT.11: Servicio de Asistencia Técnica en Evaluación de Peligros Geológicos a Nivel Nacional.

Su alcance contribuye con entidades gubernamentales en los diferentes niveles de gobierno (nacional, regional y local), a partir del reconocimiento, caracterización y diagnóstico de peligros geológicos en territorios susceptibles a movimientos en masa, inundaciones u otros peligros geológicos asociados a eventos hidroclimáticos, sísmicos o de reactivación de fallas geológicas, o asociados a actividad volcánica.

Mediante esta asistencia técnica el INGEMMET, proporciona un informe técnico que incluye resultados de la evaluación geológica realizada, así como recomendaciones pertinentes para la mitigación y prevención en el marco del Sistema de Gestión de Riesgo de Desastres.

La Municipalidad Distrital de Achoma, realizó la solicitud al Ingemmet realizar una "Evaluación hidrogeológica en la localidad de Achoma", mediante el Oficio N° 593-2020-GRA-PEMS-GE-GGRH AUTORIDAD AUTONOMA DE MAJES en el marco del DECRETO SUPREMO N° 198-2020-PCM Decreto Supremo que proroga el Estado de Emergencia en los distritos de Achoma, Yanque e Ichupampa, de la provincia de Caylloma, del departamento de Arequipa, por desastre a consecuencia de deslizamientos de tierra en el distrito de Achoma (fotografía 1).

El INGEMMET, a través de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, dispuso una brigada especializada en hidrogeología para la evaluación de la zona afectada por el deslizamiento ocurrido el 18 de junio de 2020 en la localidad de Achoma. La brigada estuvo conformada por los ingenieros, Josemanuel Carpio, Baclimer Quispe y Domingo Ramos. La inspección técnica se realizó en las fechas del 18 de octubre al 10 de noviembre del 2021, y en gabinete el apoyo del Ing. Walter Pari, Ing. Danitza Machaca y Bach. Johan Cruz, los resultados se muestran en el presente informe técnico que se enfoca en las características hidrogeológicas de la zona de estudio, con el fin de identificar la procedencia del agua subterránea que estaría inestabilizando el terreno en el área de estudio.



Fotografía 1 Poblado de Achoma (vista al NE)

En el área de estudio, se visualizó los diferentes materiales removidos por el deslizamiento de Achoma, entre ellos se identificaron arenas, limos, conglomerados, entre otros (fotografía 2).



Fotografía 2 Material removido por el deslizamiento de Achoma.

2.1. Objetivos del estudio

El presente trabajo tiene como objetivos:

- Identificar las características hidrogeológicas enfocados a los peligros geológicos que afectan al sector de Achoma.
- Emitir las recomendaciones pertinentes a las autoridades y pobladores de Achoma para la mitigación y prevención para la gestión del riesgo en este sector.

2.2. Antecedentes

El presente informe se centra en el deslizamiento ocurrido en Achoma, distrito de Achoma, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa (Figura 1). Este evento tuvo lugar el 18 de junio de 2021 a las 01:42 horas. El deslizamiento fue de tipo rotacional con avance retrogresivo, presentando una escarpa principal de 950 m de longitud, entre 100 y 150 m de altura, y un desplazamiento de 500 m. Debido al deslizamiento, 40 hectáreas de terreno de cultivo se deslizaron en dirección del río Colca, formando un dique natural y provocando el represamiento del río, lo que represento un peligro inminente, debido a que de romperse abruptamente pudo afectar a las poblaciones asentadas aguas abajo del río. (Informe técnico N° A7066. INGEMMET 2020).

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2020) Deslizamiento de Achoma ocurrido el 18 de junio del 2021. El informe técnico contiene datos de observaciones realizadas en el deslizamiento de Achoma, del movimiento en masa ocurrido en Achoma el 18 de junio, se trata de un deslizamiento rotacional con desplazamiento retrogresivo con dimensiones de entre 100 a 150 m de altura , 950 m de longitud y 500 m de desplazamiento. A demás se identificó el represamiento del río Colca, que en la actualidad la laguna formada se encuentra desaguada.

El evento fue registrado por la estación de Maca (MAC03) localizada a ~8 km al noroeste del distrito de Achoma, con una magnitud de 3.2 MI. También fue registrado por la red sísmica instalada en el volcán Sabancaya (Estaciones SAB07, SAB11, SAB16 y SAL01) y por la estación del volcán Misti denominada MST01, ubicada a más de 70 km de Achoma. El informe concluyó en que el sector de Achoma está ubicada en la **Zona de Peligro Muy Alto**, esto debido principalmente a las características geológicas del suelo, así como la humedad e infiltraciones de agua, que lo hacen muy susceptible a generar procesos de movimientos en masa.

Soncco, Cueva y Japuraet (2021). Evaluación de peligros geológicos en los Distritos de Achoma (sector Collpane), Yanque (sector Chacapi), e Ichupampa (sectores Anansaya, Urinsaya y Linde), INGEMMET, Informe Técnico A7115, El informe técnico es el resultado de la evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa. Los peligros geológicos identificados en los sectores Collpane, Chacapi, Anansaya, Urinsaya y Linde comprenden movimientos en masa de tipo deslizamientos, avalanchas de detritos y derrumbes. Eventos antiguos que han sufrido reactivaciones. También se han identificado zonas con procesos de erosión de laderas (cárcavas). En el cauce del río Colca, se han identificado tramos con erosión fluvial. Por estas condiciones se concluye que los sectores Collpane, Chacapi, Anansaya y Urinsaya son consideradas de Muy Alto Peligro; y el sector Linde de Alto Peligro.

Huanca, Ramos, Miranda, Taipe, Ancasi (2021) Monitoreo del deslizamiento de Achoma. El presente informe técnico tiene por finalidad dar a conocer la actividad del deslizamiento de Achoma a través de la información que proveen la red de monitoreo geodésico, monitoreo sísmico y los productos fotogramétricos multitemporales obtenidos para el periodo comprendido entre junio de 2020 y enero de 2021. Además, advierte sobre la determinante influencia que la precipitación y la sismicidad ejerce sobre el proceso evolutivo del deslizamiento. Los resultados obtenidos del monitoreo pusieron en evidencia la actividad del deslizamiento de Achoma, el cual presenta cambios morfológicos importantes tanto en el cuerpo como en la escarpa principal. Así mismo, identificó los factores que aceleran el deslizamiento, están relacionados a las intensas precipitaciones pluviales; la actividad sísmica local muy activa y la actividad antrópica, concluyendo que el deslizamiento de Achoma, constituye una **Zona Crítica de Muy Alto Peligro** y ~~en peligro inminente~~.

MINAM-IUNI (2001), “Inventario de minas inactivas del departamento de Arequipa”, El programa de inventario de minas inactivas identifico 35 minas abandonadas, de las cuales algunas se instalaban en una provincia metalogenética de polimetálicos en la zona Caylloma-Madrigal; el registro a su vez menciona la posible contaminación de los ríos aledaños y sitios turísticos como Achoma.

Román Robles Mendoza (2008), “Agricultura de riego y tradiciones en el valle del Colca”, La publicación presentada en el boletín antropológico de la UNMSM, destaca la agricultura en el valle, siendo resaltante mencionar que la misma tiene una distribución de terrenos de cultivo bajo riego en el año de estudio, posee datos de población humana, pecuaria y de camélidos sudamericanos; su distribución en cetros poblados y a su vez, menciona fuentes de agua e infraestructura de riego sin coordenadas.

INDECI (2016) “Informe de movimientos sísmicos afecta a la provincia de Caylloma – Arequipa”, El informe de emergencia elaborado por INDECI por medio del COEN, reporta que, en agosto del 2016, a horas: 21:58, se registra un movimiento sísmico de magnitud de 5.3 y un epicentro con coordenadas: latitud -15.64 y longitud -71.68 a 10Km al SO de Chivay, dejando al distrito de Achoma con 554 familias dignificadas, 1 persona fallecida y 10 personas heridas,

CENEPRED (2017). “Informe de evaluación del riesgo por lluvias intensas en el área de influencia del centro poblado de Achoma”. El estudio realizado genera un mapa de peligros del área de influencia, analiza y determina niveles de vulnerabilidad, establece los niveles del riego y elabora el mapa de riesgos, la zona de estudio abarca 393.54Km² área total del distrito de Achoma, ubicado aproximadamente entre las coordenadas 15°39'39" Sur, 71°42'3"

Oeste; En el estudio se concluye que el distrito está en zona de Muy Alto Riesgo y Alto Riesgo ante lluvias.

INDECI-COEN (2017), “Reporte complementario de Inundación en localidades del distrito de Achoma – Arequipa”, Registro publicado por INDECI sobre las fuertes precipitaciones el 25 de enero del 2017, causantes de inundaciones en viviendas y vías de comunicación en la localidad de Churquina, además de activación de las quebradas de Tinamayo y quebradas afluentes del río Sepina el cual causa inundaciones en extensas áreas de cultivos,

HISTORIA EXITOSA (2019), “La gestión del riego de desastres es una política municipal”, Entrevista publicada a Yanque Flores, funcionario de la municipalidad de Achoma, quien menciona que en anteriores gestiones se desconocía completamente sobre los procedimientos ante desastres naturales, o la gestión de apoyo a familias dignificadas; Recién, al asumir la jefatura de Defensa Civil, la política cambia a un enfoque de aplicación y gestión del riesgo ante desastres en la comunidad, menciona a su vez que el GRD es una política municipal que se aplica desde esa fecha.

COEN (2019) “Reporte de incendios forestales en los distritos de Yanque y Achoma – Arequipa”, Reporte publicado tras el incendio forestal que afectó áreas de coberturas natural en los distritos de Yanque y Achoma el 18 de septiembre de 2019, el área afectada alcanza lo 35Ha entre ambas localidades el reporte menciona los trabajos ejecutados durante el aviso de alerta y respuesta oportuna.

2.3. Ubicación y accesibilidad

El deslizamiento está ubicado en la margen izquierda del río Colca, en el Distrito Achoma, Provincia Caylloma, Departamento Arequipa. La zona es accesible desde la ciudad de Lima vía aérea, después por la carretera asfaltada Arequipa – Chivay (capital de la provincia Caylloma) - Maca (Cuadro 1 y 2, Figura 1 y 2).

Cuadro 1. Distancia y tipo de vía para acceder al sector consultado.

Tramo		Km.	Tipo de vía	Duración
Lima	Arequipa	768	aérea	1h 15 min
Arequipa	Chivay	163	asfaltada	3h 06 min
Chivay	Achoma	14.3	asfaltada	21 min

Cuadro 2. Coordenadas geográficas de las zonas de estudio:

Zonas de estudio	Coordenadas geográficas	Coordenadas UTM
Deslizamiento de Achoma	15°39'40.01"S 71°41'19.55"O	Este: 211754.1 Norte: 8266723

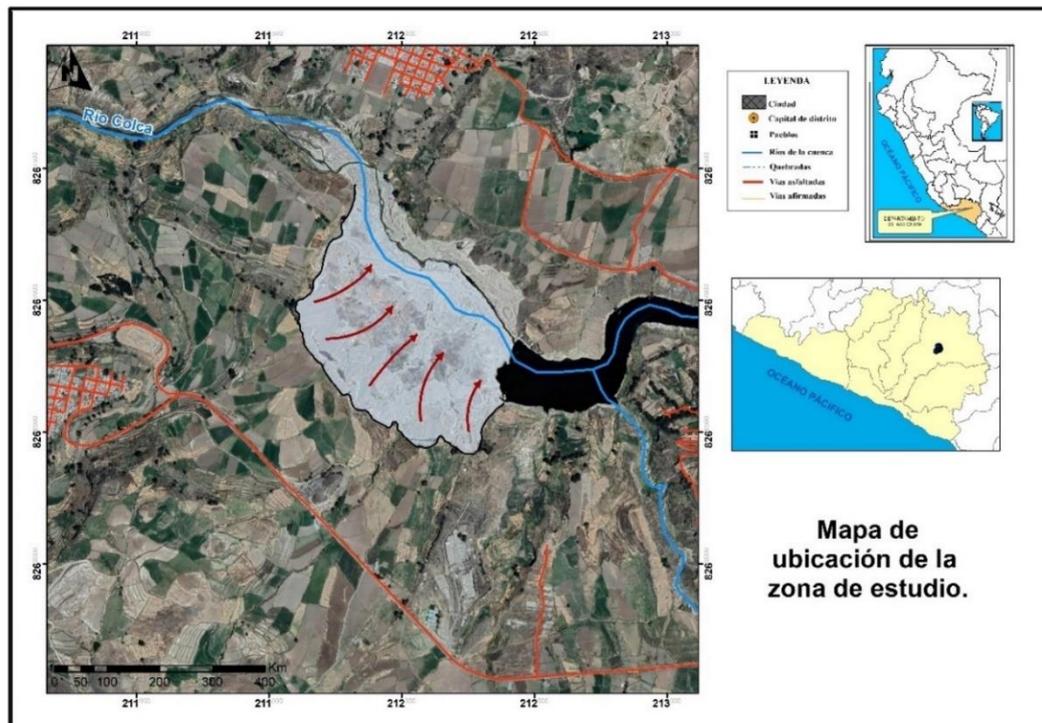


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio después del evento.

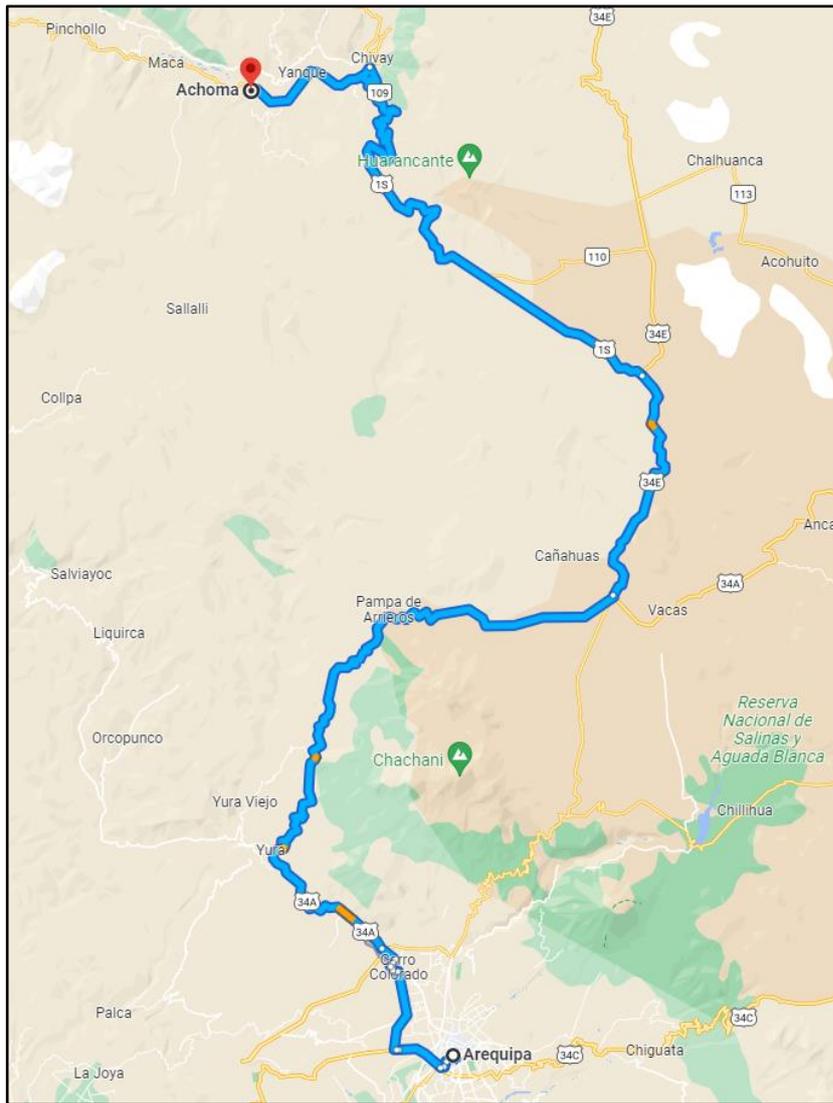


Figura 2. Ruta de acceso desde Arequipa hasta Achoma.

3. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO DE CIRCULACIÓN

3.1. Unidades Geológicas

La geología del área de estudio se encuentra enmarcada en las unidades correspondiente a cuadrángulo de la hoja 32-s y principalmente la cartografía de las últimas actualizaciones de los mapas de integración a escala 1:50 000 de INGEMMET (figura 3).

3.1.1. Grupo Tacaza (PN-t)

a) Formación Pichu (P-pi)

Unidad cartografiada en los mapas de integración a escala 1:50 000 de INGEMMET, su denominación se utiliza para referirse a depósitos de aglomerados violáceos a gris verdosos y calizas lacustrinas con niveles de lava andesítica, dentro del área de estudio los afloramientos de esta formación se encuentran en la parte norte del distrito de Achoma e Ichupampa, se extiende en la ladera y parte alta de los cerros Carahuane y Yurac Ccacca, se encuentran cubierta por vegetación y presenta un relieve de pendiente suave y moderada.

3.1.2. Grupo Barroso

a) Centro Volcánico Huarancante E1(Np-hua)

En los mapas de integración a escala 1:50 000, se denomina como Centro o Complejo Volcánico Huarancante a los depósitos con una litológica conformada por tobas de ceniza, lapilli, toba vítrea, toba lítica y areniscas volcanoclásticas.

En el área de estudio cubre la parte media, se extiende por un área mayor próximo a los centros poblados de Huaco, Utunco, Callanja y Humajala, además se tiene registro de un buzamiento sub horizontal de 6°SO en esta unidad.

b) Centro Volcánico Huangará (Np-huE3)

En los mapas de 2020 esta unidad recibe la denominación de Centro Volcánico Huangará, sin embargo, en los trabajos del año 1985 es donde recibe su descripción litológica, en la que su denominación era de Fm. Patambamba (TBa-pt) y se refería a tobas soldadas bandeadas de color gris medio a oscuro, con separación planar paralela a la estratificación, debido a flujos de cizalla, es de grano pequeño, tiene contenido lítico, cuarzo y sanidina bajo (Palacio Moncayo, y otros, 1993). Dentro del área de estudio su distribución espacial está al lado sur, desarrollándose con mayor extensión hacia la localidad de Huanahuara.

c) Centro Volcánico Mismi (Nm-miE1)

En los trabajos de 1985 es incluido en el Gpo. Tacaza indiviso (PN-t), en la actualización del 2001 se desprende con la denominación de Complejo

volcánico Mismi (Qpl-cvm-tbk) parte del tercer evento, cuenta con dataciones radiométricas de K/Ar que le asignan una edad plio-pleistocena, (Klinck et al., 1986), sin embargo es necesario mencionar que el cartografiado de esta unidad se ve limitada a la parte norte del área de estudio y en la actualización a escala 1:50 000 (INGEMMET) la unidad se extiende a la parte baja de los cerros, asentándose sobre ella los centros poblados de Marcapampa y Hupana.

d) Centro Volcánico Hualca Hualca (Qp-hhE3)

Inicialmente denominado como Grupo Barroso indiviso (TBa-a) en los mapas de 1985, se refirió a lavas andesíticas y traquiandesíticas al tope del grupo; Cambia su denominación en los trabajos del 2001 por “Complejo”, sin embargo la pertenencia de los eventos volcánicos sigue siendo relacionada al Volcán Hualca Hualca, es descrito como un segundo evento, el cual consiste de flujos de andesita intercaladas con tobas cristalopíticas, (Quispesivana Quispe & Navarro Colque, 2003); para el mapa de integración de 2020 se le denominó finalmente como Centro Volcánico Hualca Hualca, tiene una extensión media desarrollándose al Suroeste del área de estudio (misma dirección al volcán), abarca principalmente al Cerro Chila Cenja y el centro poblado de Achoma.

e) Secuencia Volcánica Canocota E1(Qp-caE1)

Inicialmente cartografiado en los mapas de 1985 como parte superior del Grupo Ampato- Fm. Inca (QA-an); cambia su denominación y agrupación en los mapas de actualización de 2020, pasando a llamarse Secuencia Volcánica Canocota E1, la cual describe a flujos de lavas andesíticas gris verdosa y vesicular, con espesores aproximados de 120m. La descripción de esta unidad es referencial, ya que cubre una extensión mínima dentro del área de estudio.

3.1.3. Depósitos Cuaternarios

a) Depósitos coluviales:

Hacen referencia a depósitos de bloques, gravas, arenas y limos producto de la desintegración *inSitu* de las rocas aledañas acumuladas por la acción de la gravedad, tienen mayor espesor y se encuentran formando terrazas más desarrolladas en los márgenes del río Colca. Es importante mencionar que en de estos depósitos se produjo el deslizamiento registrado en este estudio.

Trabajos anteriores denomina a estos depósitos como Grupo Colca, realizando un cartografiado y diferenciación de tres facies, *aluvial-fluvial*, *lacustrino* y *marginal lacustrino*, siendo este último en la que se produce el desplazamiento: En los trabajos de 1993 se menciona la evidencia expuesta de una sección en el tramo de la carretera entre Achoma y Yanque, donde la litológica predominante son gravas guijarrosas polimícticas moderadamente bien redondeado, areniscas-tobáceas de tonalidad oscura y limos laminados (Palacio Moncayo otros, 1993).

b) Depósitos fluviales:

Denominan así a la acumulación de fragmentos heterométricos y heterogéneos (grava y arenas) transportados por la corriente de los ríos a grandes distancias. En trabajos anteriores es incluido en las facies lacustrinas del Grupo Colca presentando interdigitación con las otras facies, se describe a limos de color amarillo claro, de grano muy fino con presencia de laminación, presenta micro-ondulación cruzada, deformación suave de sedimentos, evidencia de plegamientos volcados y sobrecorrimientos a pequeña escala, (Palacio Moncayo, y otros, 1993).

c) Depósitos aluviales:

De similar descripción a los depósitos coluviales, sin embargo, de menor dimensión y presentando cantos, bloques, grava y arenas sub-redondeadas polimícticas en una matriz limoarcillosa, formando conos de deyección, terrazas y abanicos aluviales.

d) Depósitos glaciario-fluviales:

Conformada por grava con clastos polimícticos, heterométricos, redondeados a sub-redondeados transportados por la corriente de agua que erosionan depósitos de glaciario de sistemas montañosos.

3.2. Geología estructural

El área de estudio se encuentra dentro del dominio estructural Alto Condoroma-Caylloma, según el mapa de 2010 este dominio se extiende desde la frontera sur con Bolivia hasta el centro del territorio peruano a la altura de Huánuco; en resumen se describe como un alto estructural mesozoico desarrollado en la parte media de la cuenca occidental, se encuentra controlada por el sistema de fallas Condoroma-Caylloma-Mollebamba, siendo su evolución en el cenozoico la que hace posible la formación de grandes cámaras magmáticas, dando lugar a calderas que emitieron los grandes volúmenes de ignimbritas. (Carlotto, y otros, 2010).

Dentro del área de estudio las características relacionadas a este dominio son las de calderas volcánicas, ya que el desarrollo y evolución de las cámaras magmáticas, eventos efusivos y sísmica condicionan de alguna manera las estructuras secundarias.

3.2.1. Fallas y Pliegues

El área de deslizamiento no tiene relación con estructuras de deformación cartografiadas en trabajos al 100 y 50 mil, sin embargo, existen lineamientos o fallas normales regionales inferidas o no confirmadas de dirección NNE-SSO, y

NNO-SSE al Sur del distrito de Achoma; La única información de estructuras secundarias registrados en el área son los trabajos y mapa de Benavente (2017), en el cual se tiene el registro de fallas neotectónicas interpretadas y/o confirmadas.

a) Falla del Río Cotahuasi – Ichupampa – San Juan de Tarucan (Confirmada)

Esta estructura se desarrolla en la parte norte del área de estudio, el trazo de esta falla es de dirección NO-SE, con una cinemática normal y en algunos sectores compuesta con sinistral (Benavente Escobar, Delgado Madera, Garcia Fernández Baca, Aguirre Alegre, & Audin, 2017), tiene un buzamiento al NE y afecta principalmente a las capitales de distrito de Yanque, lugar donde finaliza un trazo de la falla para posteriormente dividirse en dos fallas; Tera Cucho e Ichupampa, lugares donde después de dividirse vuelve a aparecer y continua su desarrollo al NO, la falla relacionada a esta última capital es de interés, ya que se encuentra próximo a Achoma.

En imágenes satelitales se observa un cambio de relieve y pendiente en las laderas del Cerro Carahuane, sin embargo, no es apreciable a simple vista *insitu*, por lo que su identificación no se desarrolló en trabajos de campo.

b) Fallas Chachas-Cabanaconde-Patapampa (Confirmada)

Se desarrolla al sur de los distritos de Achoma y del caserío de Churquina, tiene una dirección preferente O-E con cambios leves a una orientación NO-SE, los trazos de esta falla son discontinuos, levemente paralelos y sucesivos ya que se trata de la proyección de las fallas de Andagua, poseen una cinemática de falla normal con buzamiento al SO, en trabajos publicados recientes se describe la observación de depósitos de avalancha del flanco norte del Hualca Hualca, desplazados con movimiento tipo normal, teniendo un escarpe principal de 8m de desnivel. (Benavente Escobar, Delgado Madera, Garcia Fernández Baca, Aguirre Alegre, & Audin, 2017).

c) Falla Solarpampa-Puye Puye-Pillo (Confirmada)

Se ubica al norte de las Falla Chachas-Cabanaconde-Patapampa, tiene dirección andina de cinemática inversa con un buzamiento al SO, según los mapas y trabajos de Benavente en 2017, el trazo de falla se ve interrumpida (posiblemente cubierta) y se hace mención que se trata de la proyección sur de la falla Pallca-Tunupacha-Toto, la identificación de esta estructura es confirmada, sin embargo su identificación se realiza en pampa Solarpampa por lo que la proyección del mismo queda para futuros trabajos.

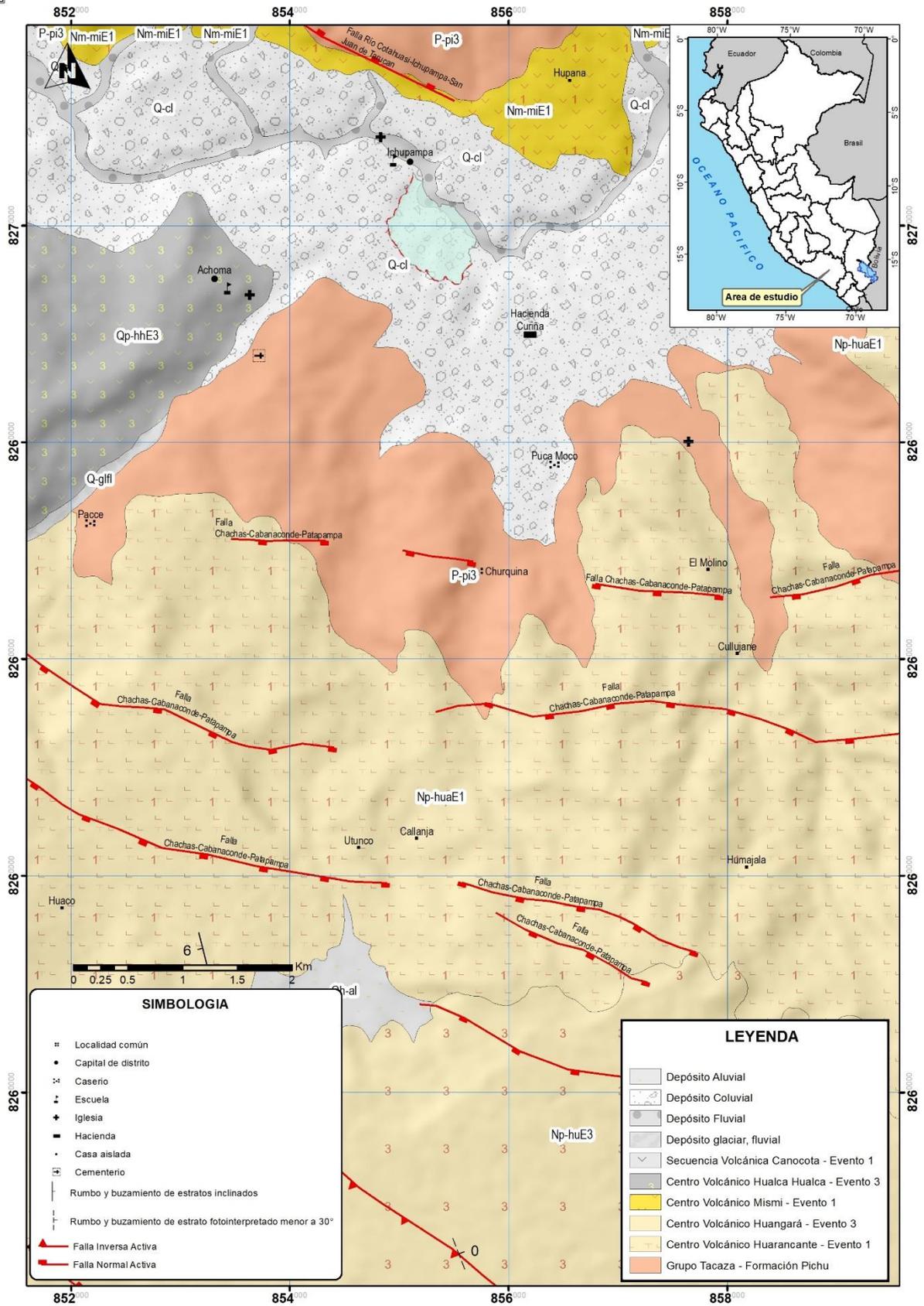


Figura 3. Mapa geológico/estructural del área de estudio.

4. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

El evento que produjo el deslizamiento pone en evidencia que las características geológicas e hidrogeológicas del material presentes en el área de estudio son muy importantes, es por ello que la presente investigación pretende identificar y caracterizar los peligros geológicos que afectan al sector, determinando las causas de inestabilidad del área de estudio, para ello se realizó un análisis Hidrogeológico enfocado a identificar el comportamiento hidráulico de los flujos de agua que amenazan y desestabilizan el terreno, esto permitirá establecer, plantear propuestas y alternativas de mitigación del riesgo, que podrán formar parte de un plan estratégico para las autoridades y pobladores de distrito de Achoma, ya que el sector de Achoma se ubica en una Zona de Peligro Muy Alto.

Para entender las características del área de estudio, tenemos que tener en cuenta la geodinámica y los agentes geodinámicos

4.1. Geodinámica

Conocer la geodinámica permite comprender como ocurren los eventos geológicos, cuáles son las causas y factores que los generan, las condiciones en que se desarrollan y, finalmente sus efectos. Es por ello que en el presente informe se pretende utilizar la hidrogeología, que nos permita identificar los mecanismos y factores, que participaron en la generación del deslizamiento.

4.1.1. Factores geodinámicos y agentes geodinámicos

Los factores geodinámicos determinan el grado de intensidad, magnitud y frecuencia de los eventos geodinámicos. Algunos de los factores o causas tienen una participación pasiva o estática, mientras que los otros son activos o desencadenantes. Entre los principales factores tenemos a los factores litológicos, tectónicos, geomorfológicos, estratigráficos, climatológicos, hidrogeológicos y antrópicos.

Dentro de los agentes geodinámicos tenemos, la gravedad, el sol, el viento, los organismos vivos, pero el más influyente es el agua.

El agua - Es el agente geodinámico principal y su acción modeladora de la superficie es casi universal. Participa en casi todas las etapas o fases de los ciclos de erosión y sedimentación tales como: la meteorización, en la remoción de materiales rocosos y en la acumulación de los sedimentos que casi siempre se realiza en medios acuosos (Medina, 1991).

4.2. Hidrogeología

4.2.1. Unidades Hidrogeológicas

Para la clasificación de las unidades hidrogeológicas depende de la geología, composición litológica, presencia de estructuras (fallas, fracturas y otras), esto permite su clasificación hidrogeológica en función a la capacidad para almacenar y transmitir agua (Figura 4). Y se pueden clasificar en, **Acuífero**, **Acuitardo**, **Acuicludo** y **Acuífugo**.

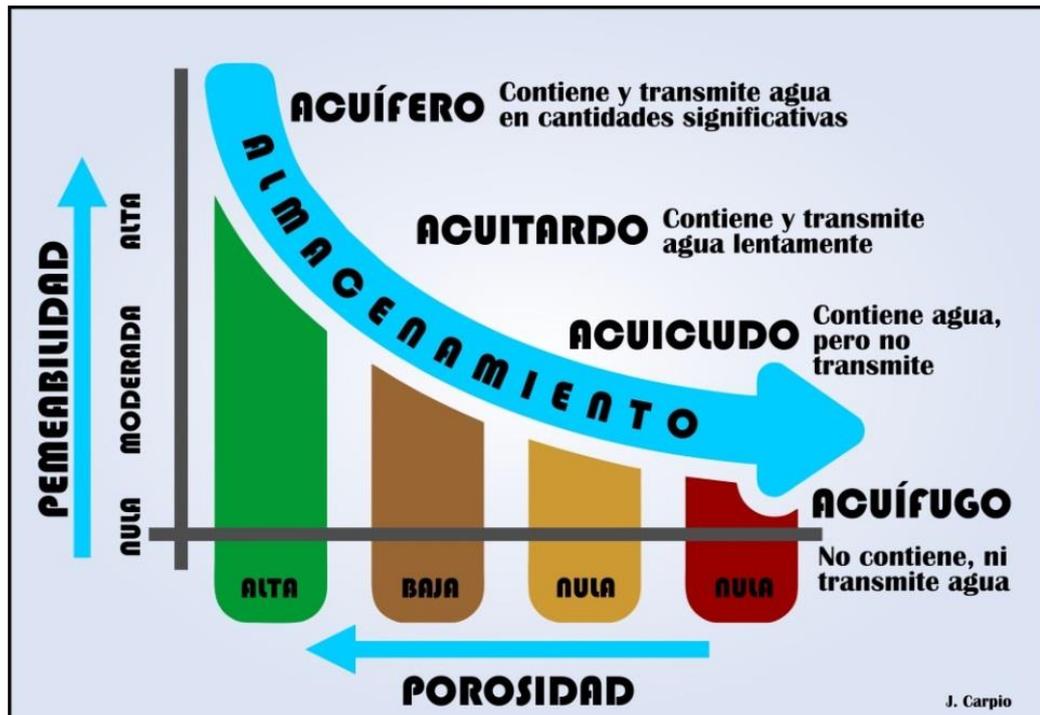


Figura 4. Unidades hidrogeológicas (Carpio; Machaca & Quispe, 2021)

En el área de estudio las unidades hidrogeológicas dependen de ciertos parámetros que condicionan el almacenamiento y transporte de agua subterránea, el parámetro principal que permite la circulación y almacenamiento de aguas subterráneas, es la permeabilidad y la porosidad.(Figura 5)

La permeabilidad de las rocas puede ser: Propia o primaria (de intersticios) en rocas detríticas. O la permeabilidad adquirida o secundaria, por fisuración, fracturamiento y alteración superficial, caso típico de las rocas calcáreas y volcánicas.

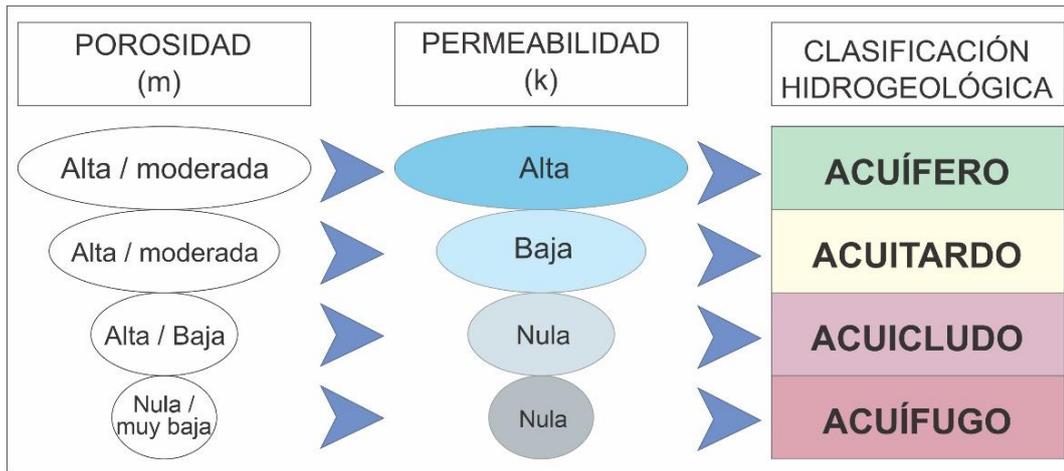


Figura 5. Referencia cualitativa según la porosidad y permeabilidad para la clasificación hidrogeológica. (Carpio; Machaca & Quispe 2021)

4.3. Identificación de evidencias de agua

Como parte del trabajo de campo se desarrolló el inventario de fuentes de agua, según su georreferenciación en el sistema WGS84 en la zona 19S.

4.3.1. Inventario

Se han inventariado 44 fuentes entre aguas superficiales y subterráneas (Figura 6 y 7).

En las 44 fuentes trabajadas (Cuadro 3 y figura 12) se realizó la toma de parámetros físicos y químicos (CE, TDS, temperatura, pH, oxígeno disuelto, resistividad, ORP y salinidad), con el siguiente detalle:



Figura 6. Manantiales en la parte Alta por encima del Canal 9



Figura 7. Manantiales en la parte baja del área de estudio.

Se comprueban un gran número de filtraciones y evidencia de flujos de agua a lo largo en un estrato el cual por sus características condiciona el afloramiento de algunos manantiales o filtraciones (figura 8).

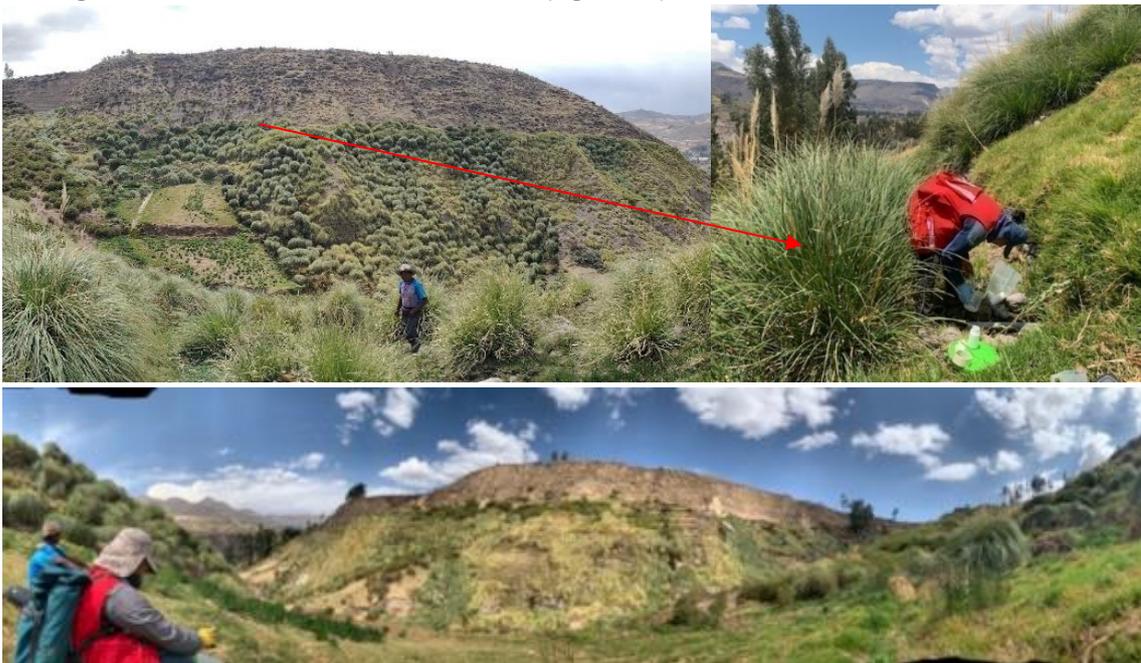


Figura 8. Filtraciones de agua alinea a un estrato condicionante.

También se tomaron puntos de control (aguas superficiales) en las principales quebradas del área de estudio (figura 9).



Figura 9. Puntos de control en los principales aportantes de agua.

Inventario, toma de datos y muestras al ingreso y salida del canal de 9 (figura 10 y 11).



Figura 10. Fotografías, ingreso del canal 9



Figura 11. Fotografías, salida del canal 9.

Cuadro 3. Resumen del inventario de fuentes de agua

	Código	Este	Norte	Cota	Tipo de Fuente	T°	pH	CE	TDS
1	1349-281	213108	8260761	4475	Manantial	10.3	7.56	33.34	16.83
2	1349-282	211899	8260908	4358	Manantial	18	7.67	108.1	53.7
3	1349-282	211899	8260908	4358	Manantial	12.3	7.79	58.15	28.49
4	1349-283	211590	8263894	3725	Manantial	18.2	4.02	2183	1070
5	1349-284	211422	8263935	3717	Manantial	19.5	7.28	1317	646
6	1349-285	207999	8258426	4362	Manantial	10.3	7.45	97.46	48.5
7	1349-286	214163	8261037	4491	Captación	11.1	7.38	84.82	42.06
8	1349-286	214163	8261037	4491	Captación	9.3	8.22	41.99	21.8
9	1349-287	214480	8260946	4487	Manantial	12.4	7.37	147.7	73.15
10	1349-288	213935	8267613	3348	Punto de control	15.1	8.03	1280	628.4
11	1349-289	212808	8263848	3721	Punto de control	11.8	8.03	506.8	248.8
12	1349-290	212808	8263848	3738	Punto de control	11.8	8.03	506.8	248.8
13	1349-291	211343	8267756	3315	Punto de control	19.8	8.87	1122	550.4
14	1349-292	211590	8263925	3720	Punto de control	14.1	7.74	453.9	222.9
15	1349-293	211645	8264281	3672	Manantial	16.5	8.15	846	418.6
16	1349-294	211547	8264031	3700	Manantial	16.5	4.38	2672	1310
17	1349-295	211538	8264617	3616	Punto de control	15.8	8.43	876.8	430.3
18	1349-296	212772	8266251	3429	Manantial	16.9	7.26	686.9	337.1
19	1349-297	212781	8266247	3436	Manantial	17	7.17	665	326.4
20	1349-298	212828	8266260	3436	Manantial	16.9	7.29	637.4	312.9
21	1349-299	212758	8266346	3420	Manantial	16.9	7.18	643.2	315.7
22	1349-300	212651	8266374	3423	Manantial	17.6	7.21	640.1	314.1
23	1349-301	212590	8266283	3406	Punto de control	17.8	8.22	645	316.6
24	1349-302	212570	8266266	3411	Manantial	16.2	7.46	699.1	343
25	1349-303	212569	8266234	3411	Manantial	16.3	7.53	800.6	392.7
26	1349-304	212525	8266178	3415	Manantial	15.6	8.9	850.2	417.2
27	1349-305	212395	8266137	3413	Manantial	17.4	7.77	1149	563.4
28	1349-306	212314	8266058	3439	Manantial	16.9	7.14	1290	663.7
29	1349-307	212470	8266020	3436	Punto de control	15.9	8.37	903.9	443.4
30	1349-308	212400	8265903	3453	Manantial	16.7	7.02	1170	573.7
31	1349-308	212400	8265903	3453	Manantial	16.7	6.97	1190.8	549.3
32	1349-309	212254	8266456	3407	Manantial	17.2	7.5	1110	554.4
33	1349-309	212254	8266456	3436	Manantial	15.4	7.26	1103	541.2
34	1349-310	212546	8266546	3345	Punto de control	17.3	8.7	913.1	448.4
35	1349-311	212802	8266619	3341	Punto de control	18.8	8.67	571.7	280.6
36	1349-312	212675	8266537	3338	Manantial	17.2	8.11	694.7	340.9
37	1349-313	208541	8263024	3994	Manantial	16.7	7.67	111.3	55.04
38	1349-314	208539	8263042	4016	Manantial	14.9	7.28	108.8	53.8
39	1349-315	208545	8263058	3996	Manantial	14.3	7.47	114.8	56.81
40	1349-316	209883	8263176	4024	Manantial	18.3	7.86	180.8	89.11
41	1349-317	210636	8263040	4043	Manantial	16.6	7.31	254.5	127.6
42	1349-318	211592	8263925	3718	Punto de control	10.5	8.51	473.5	232.5
43	1349-319	211924	8260953	4357	Manantial	16.8	7.72	56.84	28.31
44	1349-320	212207	8266474	3410	Punto de control	14.8	8.68	743.1	364.6

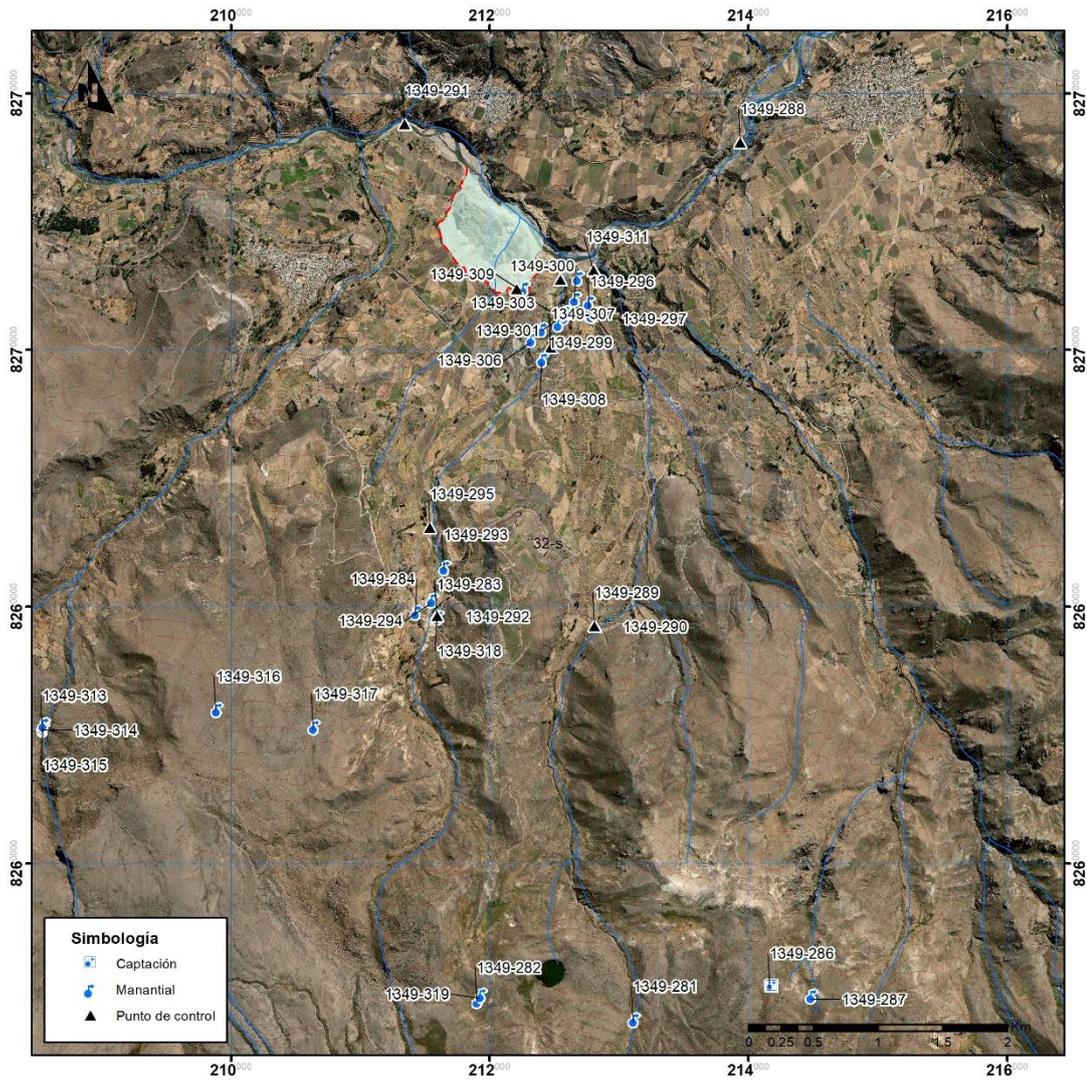


Figura 12. Distribución del inventario de fuentes de agua.

Además, como parte del cartografiado en el área de estudio se identificaron grietas (Figura 13) con desniveles de hasta 1 m.



Figura 13. Grietas y desniveles

4.3.2. Ensayos *in situ* / Ensayo de infiltración

Los ensayos de permeabilidad permiten darnos una noción de la cantidad de agua que transmiten los distintos materiales, los ensayos idóneos para este estudio son los ensayos de Lefranc en suelos y rocas fracturadas

En los ensayos Lefranc, consiste en introducir agua en un sondeo previamente recubierto, dejando libre el tramo de ensayo, existen dos formas de ejecución a nivel constante y a nivel variable. En el primer caso el nivel de agua se debe mantener a determinada altura, tomándose lecturas en el caudalímetro cada minuto. A nivel variable se llena el sondaje con agua a una determinada altura (altura inicial) dejando que el nivel del agua descienda libremente midiendo cada minuto su posición con respecto a la altura inicial (Figura 14).

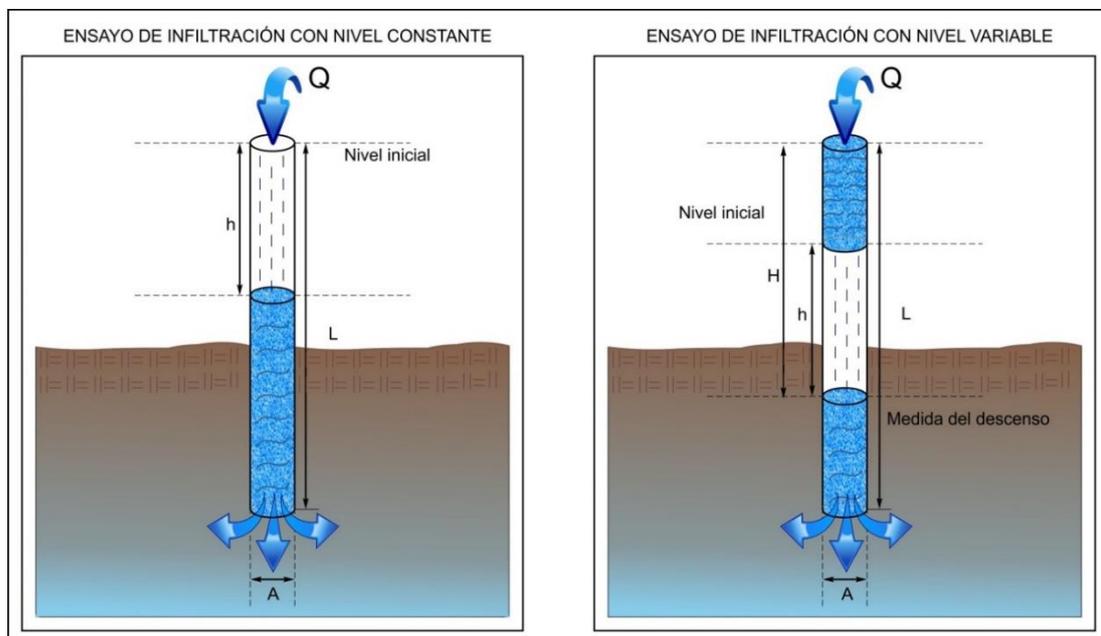


Figura 14. Esquema del ensayo de Lefranc o ensayos de infiltración con carga constante y carga variable, respectivamente.

Se han realizado en total 55 ensayos de infiltración con distribución dispersa en el área de estudio (Figura 15). El ensayo consiste en hacer un agujero en el material seleccionado, en donde se coloca un tubo con longitud y diámetro específico para conocer el volumen de agua que en este ingresa, se sella o compacta el material alrededor del tubo para evitar fugas de agua; se vierte agua de manera constante según un tiempo estipulado y se mide el nivel de agua que ingresa en el material, para obtener el volumen de agua que filtra en el material.

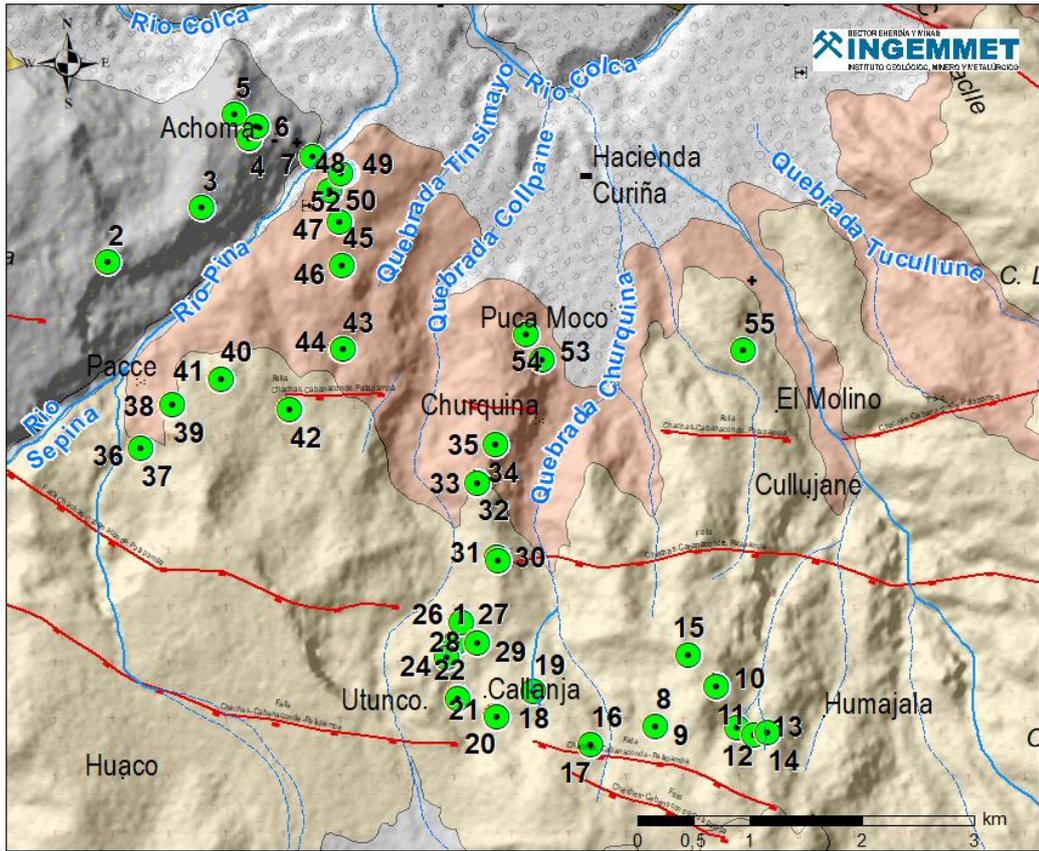


Figura 15. Distribución de los ensayos de infiltración.

Cuadro 4. Resumen de ensayos de infiltración

N°	Ensayo	Norte	Este	Cota (m)	K=m/day	y0=cm
1	EI-001	8261791	211781	4219	1.916	1.115
2	EI-002	8265197	208680	3872	0.726	7.424
3	EI-003	8265687	209512	3753	0.373	2.397
4	EI-004	8266311	209944	3660	1.916	18.650
5	EI-005	8266524	209810	5688	1.916	2.514
6	EI-006	8266419	210009	3627	0.305	1.481
7	EI-007	8266151	210505	3603	1.000	0.565
8	EI-008	8261038	213560	4484	1.210	1.418
9	EI-009	8261033	213559	4485	1.174	2.486
10	EI-010	8261397	214098	4452	1.026	2.570
11	EI-011	8261393	214100	4451	1.916	7.827
12	EI-012	8261022	214285	4484	1.916	0.808
13	EI-013	8260962	214439	4481	1.332	2.014
14	EI-014	8260977	214555	4489	0.489	0.100
15	EI-015	8261679	213848	4445	4.356	1.561
16	EI-016	8260873	212976	4442	1.360	11.240
17	EI-017	8260871	212979	4442	1.943	2.920
18	EI-018	8261355	212468	4343	0.550	0.113
19	EI-019	8261345	212472	4346	2.090	0.310
20	EI-020	8261128	212131	4346	1.916	0.864
21	EI-021	8261116	212142	4348	3.382	1.077
22	EI-022	8261291	211794	4283	2.912	0.446
23	EI-023	8261285	211796	4284	2.146	0.434
24	EI-024	8261651	211702	4238	0.904	8.233
25	EI-025	8261651	211695	4240	5.500	1.127
26	EI-026	8261970	211821	4176	1.075	12.780
27	EI-027	8261970	211826	4175	1.417	2.991
28	EI-028	8261789	211971	4206	1.394	0.363
29	EI-029	8261783	211971	4207	1.098	1.429
30	EI-030	8262552	212143	4065	0.270	0.106
31	EI-031	8262525	212150	4066	1.319	15.060
32	EI-032	8263223	211975	3977	10.470	0.967
33	EI-033	8263214	211972	3979	8.596	0.846
34	EI-034	8263560	212134	3918	1.916	7.201
35	EI-035	8263562	212128	3919	3.662	0.320
36	EI-036	8263533	208971	3939	0.753	0.222
37	EI-037	8263526	208977	3940	1.287	3.039
38	EI-038	8263914	209245	3937	1.493	3.818
39	EI-039	8263916	209257	3937	3.790	0.509
40	EI-040	8264152	209677	3929	3.118	0.296
41	EI-041	8264149	209690	3923	1.916	3.495
42	EI-042	8263873	210294	3878	2.247	0.266
43	EI-043	8264416	210768	3770	2.724	1.264
44	EI-044	8264417	210773	3769	2.391	0.747
45	EI-045	8265170	210767	3698	1.500	1.998
46	EI-046	8265171	210760	3698	1.916	2.059
47	EI-047	8265564	210748	3625	1.916	8.893
48	EI-048	8265845	210659	3591	1.916	3.885
49	EI-049	8266005	210794	3566	1.916	3.185
50	EI-050	8266005	210786	3565	4.954	2.196
51	EI-051	8266000	210771	3565	1.916	4.971
52	EI-052	8265992	210754	3563	2.172	0.275
53	EI-053	8264325	212548	3677	1.916	5.454
54	EI-054	8264555	212404	3656	1.916	1.571
55	EI-055	8264406	214332	3753	3.460	11.520

Los resultados de los 55 ensayos de infiltración (figura 15) se asociaron con un análisis estadístico y espacial, el cual permite conocer el coeficiente de permeabilidad vertical del suelo y de la capacidad de infiltración en las fracturas de las rocas.

El sector de Achoma, se caracteriza por presentar actividad tectónica la cual incrementa la aparición de fracturas con una distribución heterogénea en las rocas y suelo, en general posee número de medios porosos en su mayoría, facilitando el movimiento del agua subterránea, controladas por porosidad primaria o estructuras generadas por el sobre escurrimiento típicas de rocas de origen volcánico, en las misma unidad se tienen fallas y fracturas que generan una permeabilidad adquirida o secundaria, propia de rocas afectadas por el tectonismo.

Como herramienta de apoyo para la caracterización hidrogeológica del sector de Achoma, se calculó la permeabilidad superficial mediante ensayos de infiltración puntuales (método de Lefranc), realizados en las diferentes formaciones geológicas identificadas y seleccionadas, así mismo se complementó con datos de cuadros de permeabilidad recolectadas de diferentes autores (cuadro 5) para las diferentes litologías existentes.

a) Permeámetros de carga variable

Se aplico este método (figura 14), con un volumen determinado de agua “dQ” pasa a través del permeámetro de longitud “L” y de sección “A”, en un intervalo de tiempo “dt”, bajo una carga $h_0 - h = dh$. Según la ley de Darcy, se obtiene por la siguiente expresión (Castany, 1975):

$$K = \frac{dQ L}{A dt dh}$$



Fotografías 3 Ensayo de infiltración de carga variable realizado en rocas del Centro Volcánico Hualca Hualca.

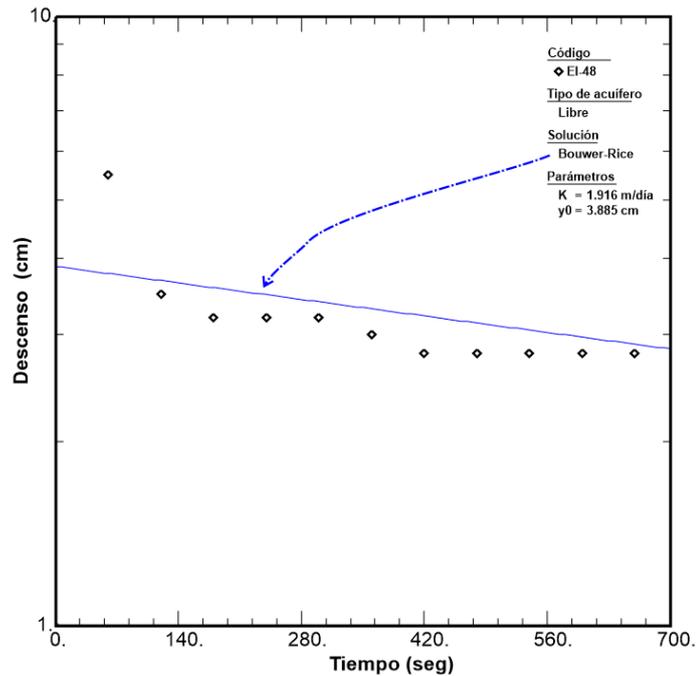


Gráfico 1, Recta de descenso de caudal infiltrado en calizas de la Formación Pichu del Grupo Tacaza, mediante el ensayo de infiltración de carga variable.

Para mencionar un ejemplo del cálculo de permeabilidad en rocas fisuradas con permeámetro a carga variable (gráfico 1), se realizó en el afloramiento de rocas volcánico sedimentaria de la Formación Pichu, dando un valor promedio de conductividad hidráulica de 1.916 m/día, por lo que evidencia un comportamiento favorable, clasificándolo como material permeable y con condiciones para ser un acuífero medio.

El procesamiento de los ensayos a carga constante en las diferentes formaciones geológicas en los alrededores de Achoma, se han comparado con valores estimados de la conductividad hidráulica, según ensayos de laboratorio realizados por distintos autores (cuadro 5).

Los valores de conductividad hidráulica y de permeabilidad, tienen variaciones de acuerdo al lugar y a las condiciones físicas donde se realice el ensayo, a pesar de realizar el ensayo en una misma formación estas varían, esto se debe a la técnica empleada al momento de realizar el ensayo (profundidad sumergida del permeámetro, tipo de suelo de la cubierta, etc.), al estado del material (alterado, intemperizado, densidad de fracturas y fisuras, zonas de cizalla, etc.). En los alrededores de Achoma, las formaciones con mayor conductividad hidráulica, son las que presentan alto grado de fracturamiento que le da un carácter permeable por porosidad secundaria, que afectan a los resultados ya que, al ser principalmente puntuales y superficiales, estos no reflejan la total realidad de cada “formación”, por comparación y promedios nos ayuda a clasificarlas hidrogeológicamente.

Cuadro 5. Valores estimados de la conductividad hidráulica (m/día)

		Doménico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 ⁵	100 a 10 ⁶	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0, 1a 50				
	Arena fina	0,02a 20			0,01 a 1	0,01 a 1
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻⁴ a 1	10 ⁻⁴ a 1	0,001 a 0,1	10 ⁻⁴ a 1
	Arcilla	10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Arcilla marina inalterada	10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷		
Rocas Sedimentarias	Calizas karstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
	Calizas, dolomías	10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		10 ⁻⁴ a 1
	Areniscas	3*10 ⁻⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻⁵ a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 ⁻⁶ a 0,001				
	Pizarras Sedimentarias (Shale) intactas	10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
	Pizarras sed. (Shale) fracturadas/alteradas		10 ⁻⁴ a 1			
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³			10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 ⁶
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 s 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵		10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵
	Rocas ígneas y metamórficas Fracturadas	0,001 a 25	10 ⁻⁵ a 1	0,0005 a 20		10 ⁻⁵ a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
	Gabro alterado	0,05 a 0,3				

Los valores de conductividad hidráulica registrados corresponden a rocas y suelos, aplicando la comparación con los cuadros se encontraron materiales con diferentes valores de conductividad hidráulica. En general los rangos de permeabilidad encontrada corresponden a calificaciones de poco permeable a algo permeable.

b) Conductividad Hidráulica

Para calcular los valores de conductividad hidráulica en rocas ensayadas, se aplicó el software Aqtesolv pro versión 4.5, calculado en unidades de m/día.

Resultado del análisis, utilizando la solución Bouwer-Rice, se obtuvo valores referentes de conductividad hidráulica (K) y Permeabilidad (y_0)

En un análisis estadístico de datos, de los ensayos de infiltración, se realizó el análisis Clúster de similitud, analizando valores de conductividad hidráulica y permeabilidad con finalidad encontrar una correlación, siendo tal el resultado (Gráfico 2) de dendograma de similitud en cual correlaciona los diferentes ensayos de infiltración con las formaciones geológicas.

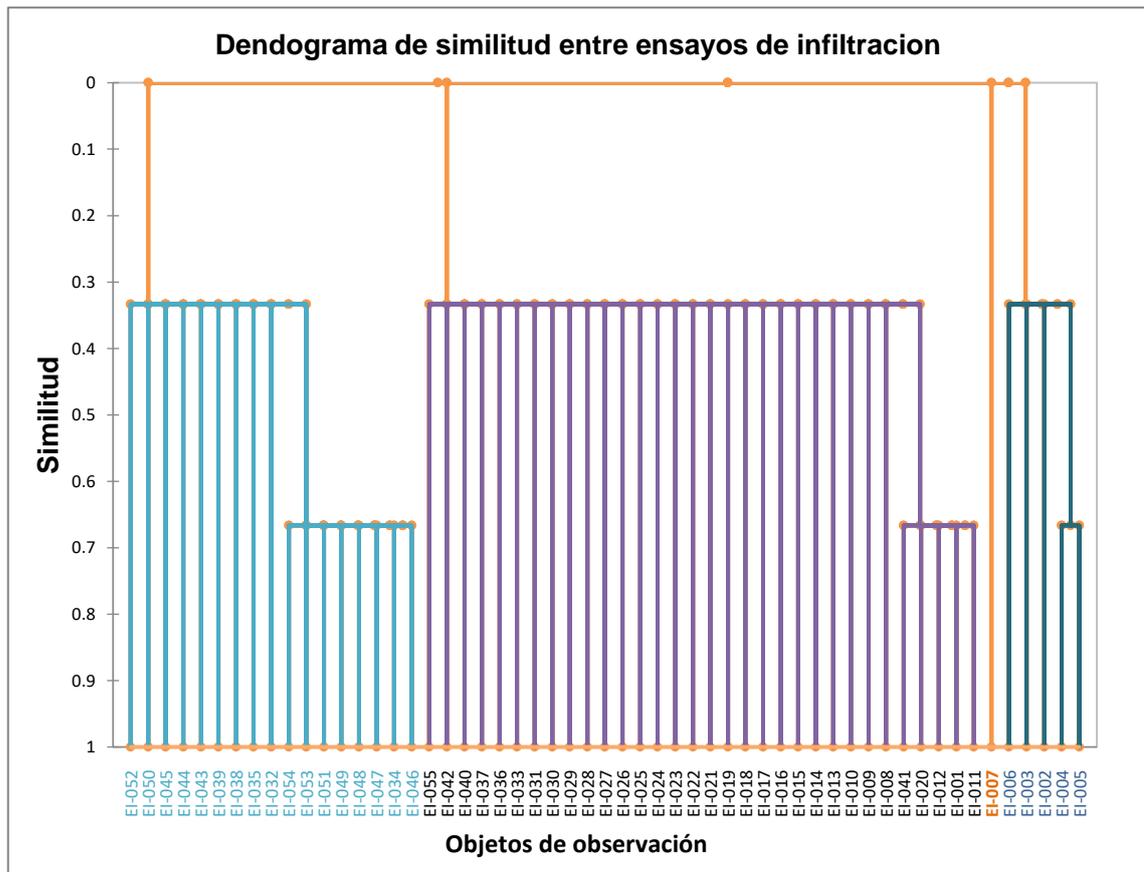


Gráfico 2. Dendograma de similitud.

Del análisis de estos resultados en combinación de los ensayos de infiltración y la geología resultado del análisis Clúster se puede decir:

- **Depósito coluvial.**

El comportamiento del agua en esta unidad es repelente, en condiciones normales, sin embargo, gracias a sus características a su protolito, los coluviales de este cuaternario provienen de rocas volcánicas y sedimentarias ambas granulares; geológicamente clasificados como depósitos de bloques, gravas, arenas y limos producto de la desintegración de las rocas aledañas y por la acción de la gravedad, por lo que su porosidad se considera muy buena.

En el gráfico 3 se muestra en análisis de infiltración realizada en campo donde se muestra el descenso del agua respecto a unos minutos el material se satura parcialmente. Este comportamiento de saturación se tiene en suelos con capacidad de transmisividad por este resultado es que se considera a esta formación como un acuífero.

En esta formación se realizó 01 ensayo de infiltración (EI-07) los valores de conductividad hidráulica son 10.0×10^{-1} m/día, 5.65×10^{-1} m/día. Estos valores evidencian que la conductividad hidráulica en el cuaternario se clasifica como materiales permeables y desde el punto de vista hidrogeológico como Acuífero

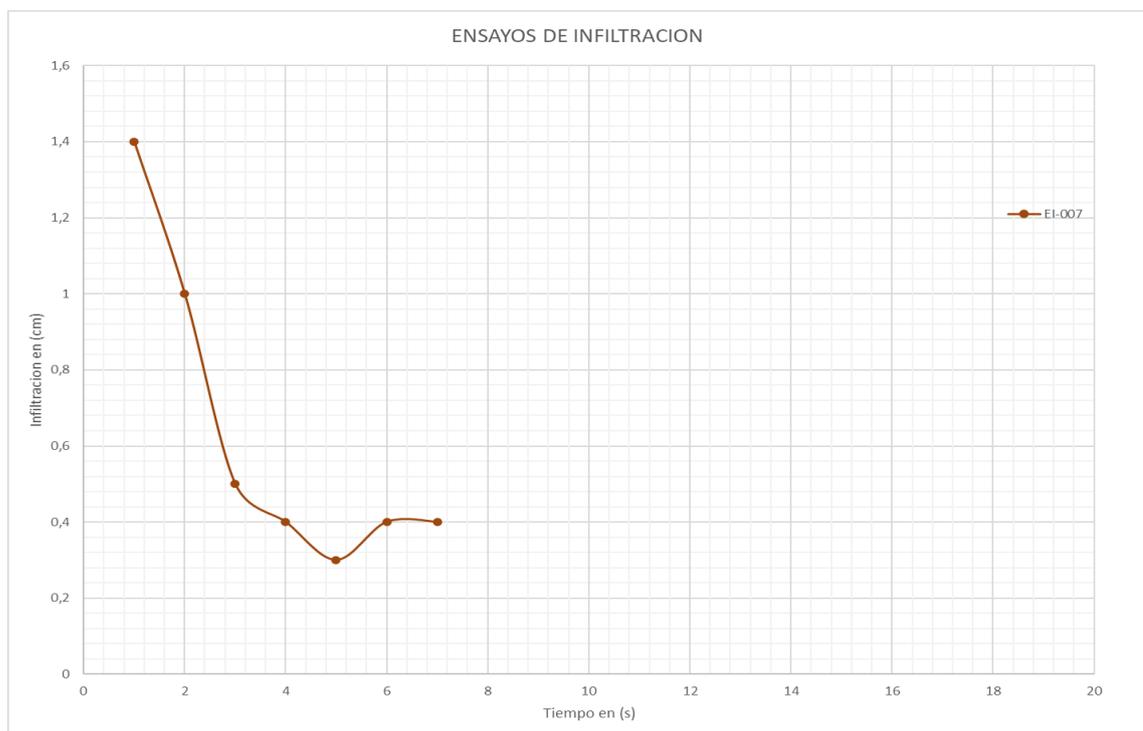


Gráfico 3. EI-007 Análisis de infiltración con respecto al tiempo.

- **Centro Volcánico Hualca Hualca.**

Esta unidad geológica está compuesta de depósito de flujos de cenizas con cristales, y con lavas andesíticas porfiríticas. Su espesor promedio es de 200 m. el agua en esta unidad está dominada por fracturas y diaclasas, típicas de flujos de lavas cubiertos de sedimentos de piroclastos.

En esta unidad se han realizado 05 ensayos de infiltración, en EI-004 es que el agua se observa el descenso rápido, minutos después el suelo se satura, en los demás ensayos de infiltración (EI-002, EI-003, EI-05 y EI-006) Los descensos son constantes y con valores constantes según Gráfico 4.

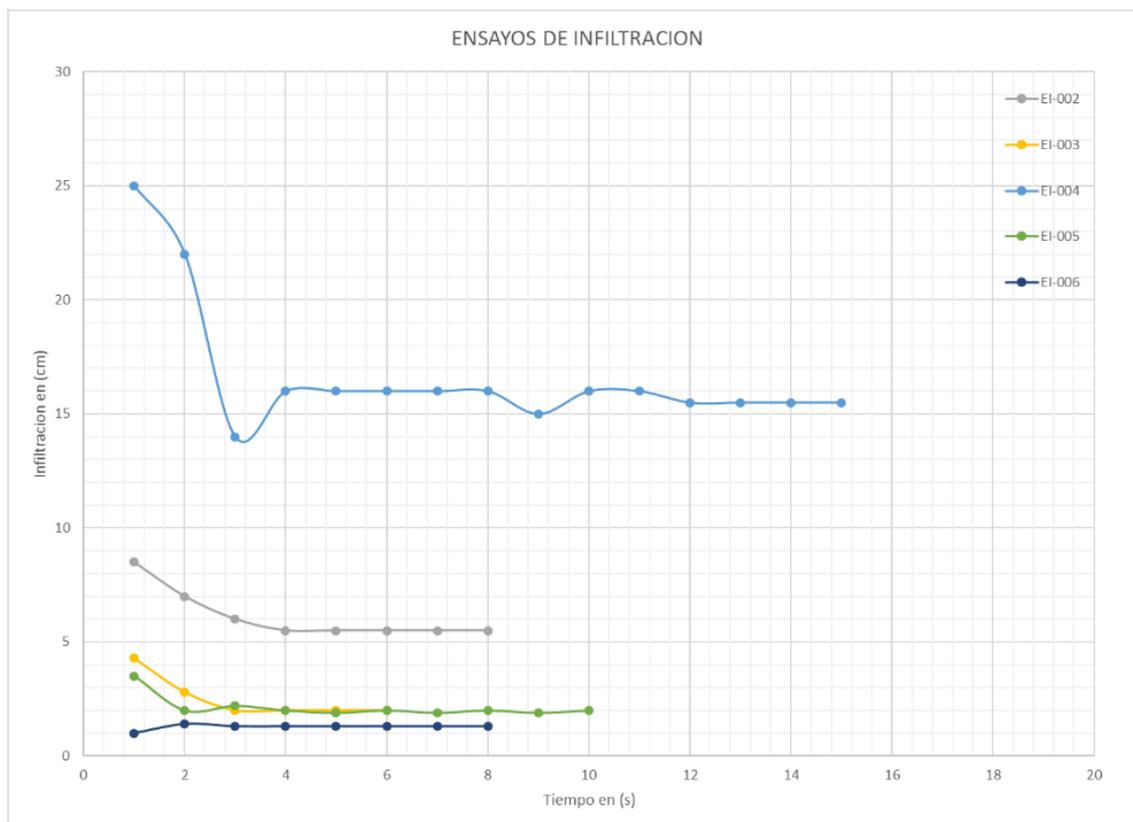


Gráfico 4. Análisis de infiltración en el Centro Volcánico Hualca Hualca.

En esta unidad obtuvo datos de según el siguiente detalle:

Cuadro 6. Valores de porosidad y permeabilidad en la unidad Centro Volcánico Hualca Hualca

Código	K=m/día	y0=cm	Cond. Hidráulica	Permeabilidad
EI-002	0,7259	7,424	Bajo	Alto
EI-003	0,3729	2,397	Bajo	Moderado
EI-004	1,916	18,65	Moderado	Muy alto
EI-005	1,916	2,514	Moderado	Bajo
EI-006	0,305	1,481	Bajo	Bajo

Resultado de este análisis es que la formación se puede considerar como acuífero fisurado volcánico sedimentario de baja productividad.

- **Grupo Tacaza - Formación Pichu**

Formación compuesta de Aglomerados, calizas lacustrinas con niveles de lava andesítica, en esta unidad se realizaron 17 ensayos de infiltración (EI-032, EI-034, EI-035, EI-038, EI-039, EI-043, EI-044, EI-045, EI-046, EI-047, EI-048, EI-049, EI-050, EI-051, EI-052, EI-053 y EI-054), se muestran resultados de infiltración en el Gráfico 5.

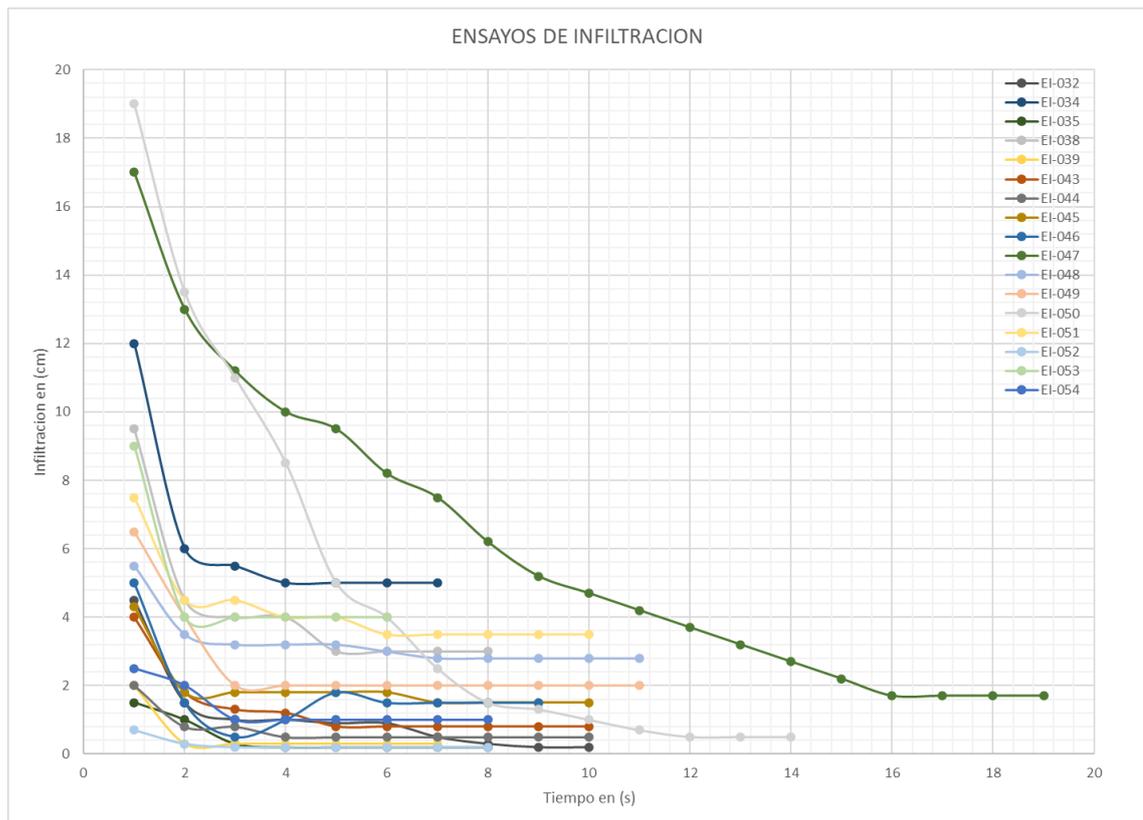


Gráfico 5. Análisis de infiltración en la Formación Pichu.

Del Gráfico 5, se observa a los ensayos de infiltración (EI-038, EI-047 y EI-050) muestran un descenso rápido, este descenso continúa en un periodo de EI-038, 3 cm por cada 60 s, EI-047 de 1 cm más por cada 60 s y EI-050 0.5 cm más cada 60 s, esto indica buena permeabilidad y según el análisis de resultados de conductividad hidráulica y permeabilidad para estos tres ensayos se tiene según detalle del Cuadro 7, este análisis se observa un alineamiento y presencia de fracturas alrededor de estas el cual por porosidad primaria y secundaria permiten calcular este tipo de comportamiento en el terreno, sin embargo el comportamiento de los demás ensayos de infiltración muestran características de acuitardos o acuíferos muy pobres.

Cuadro 7. Resultados de conductividad hidráulica y permeabilidad - Grupo Tacaza - Formación Pichu

Código	K=m/día	y ₀ =cm	Cond. Hidráulica	Permeabilidad
EI-032	10,47	0,9671	Alta	Bajo
EI-034	1,916	7,201	Moderado	Alto
EI-035	3,662	0,3199	Moderado	Bajo
<u>EI-038</u>	<u>1,493</u>	<u>3,818</u>	<u>Moderado</u>	<u>bajo</u>
EI-039	3,79	0,5094	Moderado	Bajo
EI-043	2,724	1,264	Moderado	Bajo
EI-044	2,391	0,7465	Moderado	Bajo
EI-045	1,5	1,998	Moderado	Bajo
EI-046	1,916	2,059	Moderado	Bajo

EI-047	1,916	8,893	Moderado	Alto
EI-048	1,916	3,885	moderado	Bajo
EI-049	1,916	3,185	moderado	Bajo
EI-050	4,954	2,196	Alto	Bajo
EI-051	1,916	4,971	moderado	Alto
EI-052	2,172	0,2752	Moderado	Muy bajo
EI-053	1,916	5,454	Moderado	Alto
EI-054	1,916	1,571	Moderado	Bajo

Resultado de este análisis podemos observar en el gráfico anterior que los ensayos en su mayoría presentan la conductividad hidráulica en moderado y la permeabilidad en bajo, el cual se clasifica como acuitardo.

- **Centro Volcánico Huarancante.**

Esta Formación geológica está compuesta de depósito consistente en intercalaciones de flujos piroclásticos de líticos y cenizas de color grisáceo con flujos piroclásticos de cenizas y cristales de color gris blanquecino, en ella se ha realizado 32 ensayos de infiltración (EI-001, EI-008, EI-009, EI-010, EI-011, EI-012, EI-013, EI-014, EI-015, EI-016, EI-017, EI-018, EI-019, EI-020, EI-021, EI-022, EI-023, EI-024, EI-025, EI-026, EI-027, EI-028, EI-029, EI-030, EI-031, EI-033, EI-036, EI-037, EI-040, EI-041, EI-042 y EI-055), se muestran resultados de infiltración en el Gráfico 6.

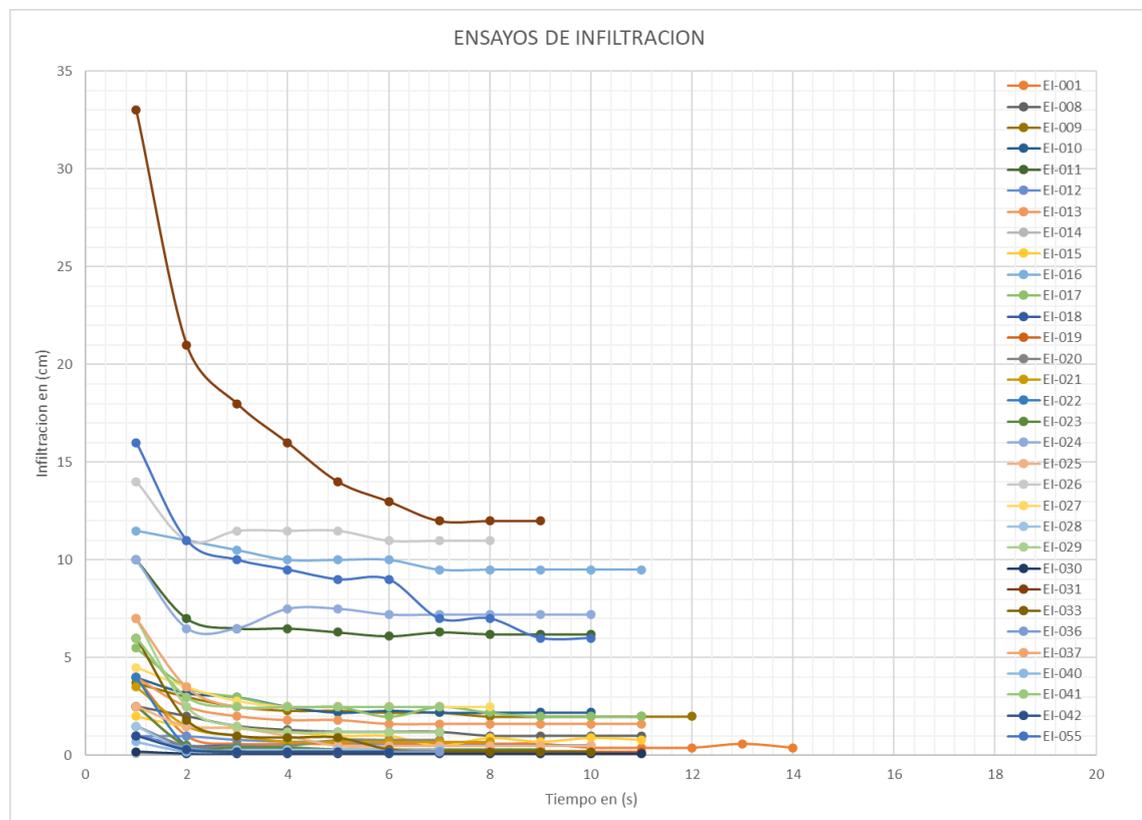


Gráfico 6. Análisis de infiltración en la Centro Volcánico Huarancante.

Del Gráfico 6, se observa que los ensayos de infiltración (EI-011, EI-024, EI-016, EI-026, EI-055 y EI-031) son los que muestran mayor infiltración, estas están asociadas a lomadas o fallas neotectónicas, mientras el resto de los ensayos de infiltración se tiene otra relación, resultado del análisis en el Software Aqtsolv Pro, se tiene resultados de Conductividad hidráulica y permeabilidad en el cuadro 8.

Cuadro 8. Resultados de conductividad hidráulica y permeabilidad - Centro Volcánico Huarancante.

Código	K=m/día	y0=cm	Cond. Hidráulica	Permeabilidad
EI-001	1,916	1,115	Moderado	Bajo
EI-008	1,21	1,418	Moderado	Bajo
EI-009	1,174	2,486	Moderado	Bajo
EI-010	1,026	2,57	Moderado	Bajo
EI-011	1,916	7,827	Moderado	Alto
EI-012	1,916	0,8078	Moderado	Bajo
EI-013	1,332	2,014	Moderado	Bajo
EI-014	0,489	0,1	Bajo	Bajo
EI-015	4,356	1,561	Alto	Bajo
EI-016	1,36	11,24	Moderado	Muy Alto
EI-017	1,943	2,92	Moderado	Bajo
EI-018	0,5502	0,113	Bajo	Bajo
EI-019	2,09	0,3104	Moderado	Bajo
EI-020	1,916	0,8637	Moderado	Bajo
EI-021	3,382	1,077	Bajo	Bajo
EI-022	2,912	0,446	Moderado	Bajo
EI-023	2,146	0,4337	Moderado	Bajo
EI-024	0,9038	8,233	Bajo	Alto
EI-025	5,5	1,127	Alto	Bajo
EI-026	1,075	12,78	Moderado	Muy alto
EI-027	1,417	2,991	Moderado	Bajo
EI-028	1,394	0,3625	Moderado	Bajo
EI-029	1,098	1,429	Moderado	Bajo
EI-030	0,2703	0,1059	Bajo	Bajo
EI-031	1,319	15,06	Moderado	Muy alto
EI-033	8,596	0,846	Alto	Bajo
EI-036	0,7528	0,2218	Bajo	Bajo
EI-037	1,287	3,039	Bajo	Alto
EI-040	3,118	0,296	Alto	Bajo
EI-041	1,916	3,495	Moderado	Alto
EI-042	2,247	0,2661	Moderado	Bajo
EI-055	3,46	11,52	Alto	Muy Alto

Resultado de este análisis, se observa valores anómalos en la reacción de conductividad y permeabilidad, la relación de conductividad alta, y permeabilidad baja se le clasifica como acuitardo, la relación de conductividad moderado y permeabilidad baja, se considera también como acuitardo, por ello esta unidad se le va clasificando como una permeable, pero con conductividad baja.

En general la relación de conductividad hidráulica en el área de evaluación rededores de Achoma se tiene en plasmado en la figura 16.

La conductividad hidráulica en los rededores de Achoma está condicionada por la litología, la relación que se muestra en la figura 16, se tiene los mayores valores relacionados a lomadas de origen volcánico asociado a fallas neotectónicas, con valores de 5 a 10 m/día lo que indica que tiene buena conductividad.

Mientras los valores menores están asociados a composición litológica fina, por ende, estas unidades sedimentadas dentro de rocas volcánicas muestran alta saturación de agua, este comportamiento causa inestabilidad en el terreno por saturación del suelo.

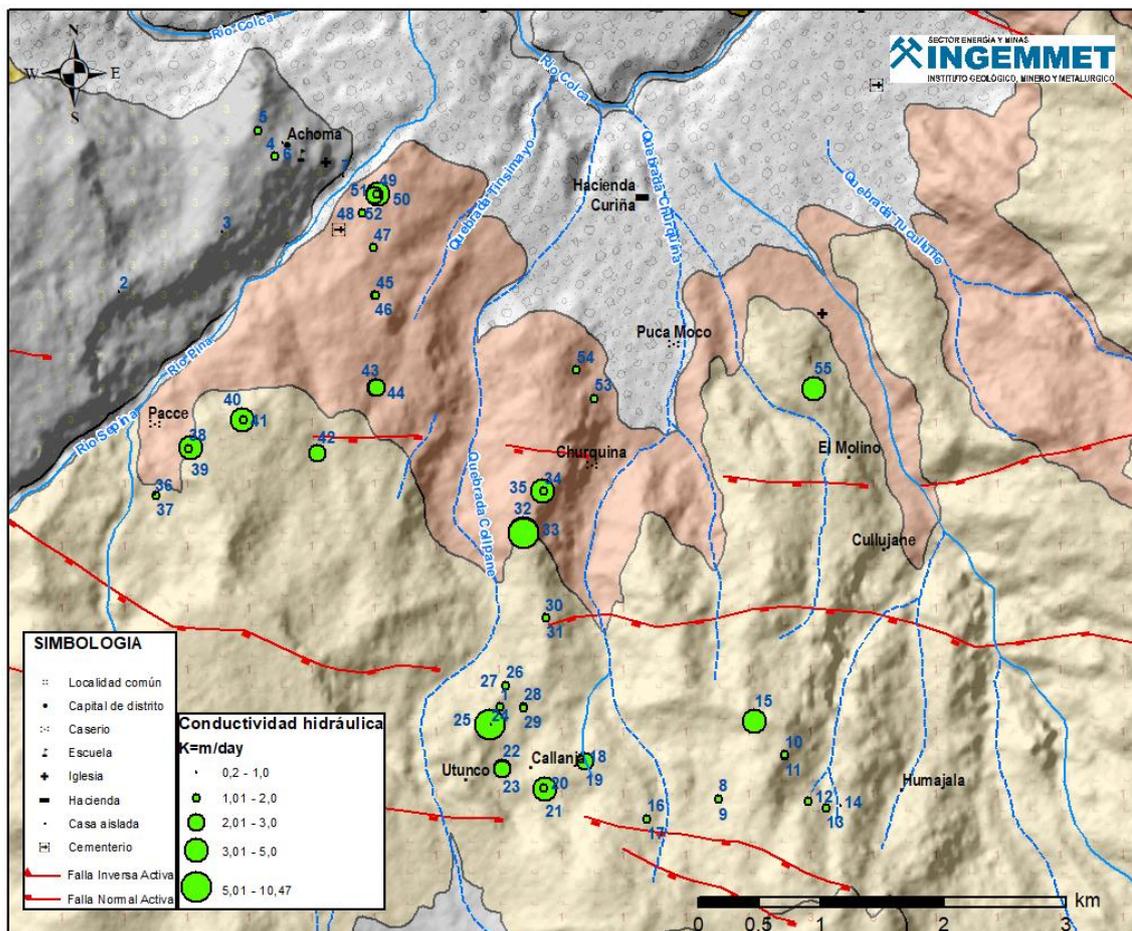


Figura 16. Distribución y resumen de pruebas hidráulicas mostrando la variación de conductividad hidráulica.

4.4. Caracterización hidrogeológica

La caracterización hidrogeológica se basa en la necesidad de plasmar es una metodología que se desarrolló a partir de la necesidad de representar

cartográficamente las características hidrogeológicas de las formaciones geológicas, en particular aquellas que poseen aguas subterráneas con potencial para su explotación como acuíferos

Basados en la geología, litología, estructural y considerando también la geomorfología como medios de circulación (Cuadro 9 y figura 17).

Se tiene muy presente las propiedades hidráulicas de los materiales como la conductividad hidráulica, la porosidad, la disposición estructural de los materiales, considerando la descarga que poseen los acuíferos, manifestadas en surgencias o manantiales.

Según las unidades geológicas y según la información obtenida en los apartados anteriores

Cuadro 9. Clasificación hidrogeológica.

Unidad geológica	Formación	Unidad Hidrogeológica	Código
<i>Grupo Tacaza (PN-t)</i>	Formación Pichu (P-pi)	Acuitardo volcánico sedimentario	ATVS-pi
<i>Grupo Barroso</i>	Centro Volcánico Huarancante E1 (Np-hua)	Acuitardo volcánico	ATV-hua
	Centro Volcánico Huangará (Np-huE3)	Acuitardo volcánico sedimentario	ATVS-hue
	Centro Volcánico Mismi (Nm-miE1)	Acuitardo volcánico sedimentario	ATVS-mi
	Centro Volcánico Hualca Hualca (Qp-hhE3)	Acuífero fisurado volcánico sedimentario	AFVS-hh
	Secuencia Volcánica Canocota E1 (Qp-caE1)	Acuitardo volcánico sedimentario	ATVS-ca
<i>Depósitos Cuaternarios</i>	Depósitos coluviales	Acuífero poroso no consolidado	APNC-cl
	Depósitos Fluviales	Acuífero poroso no consolidado	APNC-fl
	Depósitos Aluviales	Acuífero poroso no consolidado	APNC-al
	Depósitos Glaciar-Fluviales	Acuífero poroso no consolidado	APNC-gflf

4.4.1. Unidades Hidrogeológicas

a) Acuíferos

Se identificaron dos tipos de acuíferos: Acuífero poroso no consolidado y Acuífero fisurado volcánico sedimentario.

Los **Acuífero poroso no consolidado** en la zona de trabajo están representados por depósitos de tipos coluvial, fluviales, aluviales y glaciar-fluviales (APNC-cl, APNC-fl, APNC-al y APNC-gflf).

Los depósitos porosos no consolidados del cuaternario, representan los

acuíferos porosos que consisten en una mezcla de materiales como arena, grava, limo y arcilla. Estos permiten tanto el almacenamiento como el flujo del agua subterránea debido a su estructura porosa y permeable. Las características esenciales de estos acuíferos incluyen:

- Porosidad: Estos sedimentos presentan espacios entre partículas que varían en tamaño e influyen la capacidad de almacenamiento de agua.
- Permeabilidad: La capacidad de dejar pasar el agua es alta debido a la presencia de poros interconectados.
- Capacidad de almacenamiento: Gracias a su estructura porosa, pueden almacenar una cantidad considerable de agua dulce.
- Recarga y descarga: Reciben agua de diversas fuentes y pueden ser explotados a través de pozos; su extracción se conoce como descarga.
- Vulnerabilidad a la contaminación: Su rápida circulación los hace más susceptibles a la contaminación, afectando la calidad del agua subterránea.
- Variedad de materiales: Pueden estar compuestos por una mezcla de materiales que influyen en sus propiedades.
- Zona no saturada y saturada: Tienen dos zonas distintas: una donde los poros no están completamente llenos de agua y otra donde sí lo están.

Estos acuíferos son vitales como fuentes de agua subterránea para la agricultura, la industria y el consumo humano, además de jugar un rol crucial en la recarga de cuerpos de agua durante periodos de sequía.



Fotografía 4 Vista del depósito cuaternario con fines agrícolas.

Un **Acuífero fisurado volcánico sedimentario**, es una formación que combina características de acuíferos fisurados con elementos volcánicos y

sedimentarios. Estos acuíferos se forman en áreas donde la actividad volcánica ha ocurrido en el pasado, lo que ha dado lugar a la presencia de rocas volcánicas como cenizas, lava y depósitos piroclásticos.

La característica principal de estos acuíferos es su estructura fisurada, es decir, tienen grietas, fracturas o fisuras en las rocas que los componen. Estas grietas actúan como canales por los cuales el agua puede fluir y ser almacenada bajo tierra. La combinación de la naturaleza volcánica de las rocas con la presencia de sedimentos forma un tipo específico de acuífero que puede tener propiedades únicas en términos de su capacidad de almacenamiento, la velocidad de recarga y la respuesta a cambios en las condiciones del agua.

A diferencia de los acuíferos porosos, donde el agua se desplaza entre espacios entre partículas, en los acuíferos fisurados, el movimiento del agua se produce principalmente a lo largo de estas fracturas y grietas presentes en la roca. Estas grietas actúan como canales naturales que permiten el movimiento y almacenamiento del agua subterránea. Durante lluvias o flujos superficiales, parte de esta agua puede penetrar en las capas rocosas y llenar estas fisuras, creando una especie de red subterránea de agua.

En la zona estudiada, el acuífero fisurado volcánico sedimentario: Se encuentra a los alrededores del distrito de Achoma, donde se logró distinguir que está rodeado por la unidad hidrogeológica acuífero fisurado volcánico sedimentario del Grupo Barroso correspondiente al Centro Volcánico Hualca Hualca (Qp-hhE3) (AFVS-hh).



Fotografía 5 Material del centro Volcánico Huarancante perteneciente al grupo barroso presenta fracturas que condiciona el afloramiento de manantiales.

b) Acuitardos

Se identificaron dos tipos de acuitardos: Acuitardo volcánico y Acuitardo volcánico sedimentario

El Acuitardo volcánico: esta unidad está representada por el Centro Volcánico Huarancante E1 (Np-hua) (ATV-hua) del Grupo Barroso considerado Acuitardo volcánico por el contenido litológico de materia fina de dicha formación.

Esta unidad posee características específicas que limitan o restringen significativamente el flujo de agua subterránea. Este tipo de formación se encuentra comúnmente en áreas volcánicas donde se depositaron cenizas, lavas y otros materiales volcánicos que con el tiempo se compactaron y endurecieron. Un acuitardo actúa como una barrera o capa de baja permeabilidad que dificulta significativamente el movimiento del agua subterránea. Aunque el acuitardo puede contener agua, esta se mueve a una velocidad muy lenta debido a la baja permeabilidad de la capa, lo que la hace menos accesible para la extracción o para ser utilizada como recurso hídrico.

El acuitardo volcánico puede consistir en cenizas volcánicas compactadas, tobas o capas de lava solidificada, entre otros depósitos de origen volcánico, y su presencia puede influir en la dinámica del agua subterránea en las áreas donde se encuentra, afectando la formación y comportamiento de los acuíferos adyacentes.

Los Acuitardos volcánicos sedimentarios: De igual manera se logró diferenciar a las unidades hidrogeológicas acuitardos volcánicos sedimentario, del Grupo Barroso con la Secuencia Volcánica Canocota E1 (Qp-caE1)(ATVS-ca), el Centro Volcánico Huangará (Np-huE3) (ATVS-hua) y el Centro Volcánico Mismi (Nm-miE1) (ATVS-mi), además se identificó del Grupo Tacaza (PN-t), la Formación Pichu (P-pi) (ATVS-pi), siendo las unidades hidrogeológicas, que domina gran parte del área.

De manera general el término de Acuitardo Volcánico Sedimentario hace referencia a una unidad geológica que combina características de un acuitardo (una capa de baja permeabilidad que limita el flujo de agua subterránea) con elementos tanto volcánicos como sedimentarios.

Este tipo de formación se encuentra en áreas donde se han acumulado sedimentos, como arena, arcilla o materiales orgánicos, junto con depósitos volcánicos como cenizas, tobas o lava solidificada que, con el tiempo, se compactaron y endurecieron. La combinación de estos materiales sedimentarios y volcánicos crea una capa que, aunque limita el flujo del agua subterránea debido a su baja permeabilidad, también puede contener una

mezcla de elementos provenientes tanto de procesos volcánicos como de sedimentación.

La presencia de un acuitardo volcánico sedimentario puede afectar la dinámica del agua subterránea en un área determinada, influyendo en la formación y comportamiento de los acuíferos adyacentes. Esta combinación de elementos volcánicos y sedimentarios aporta una complejidad adicional a la hidrología subterránea en comparación con acuitardos o acuíferos que no presentan esta combinación de características (fotografía 6 y 7).

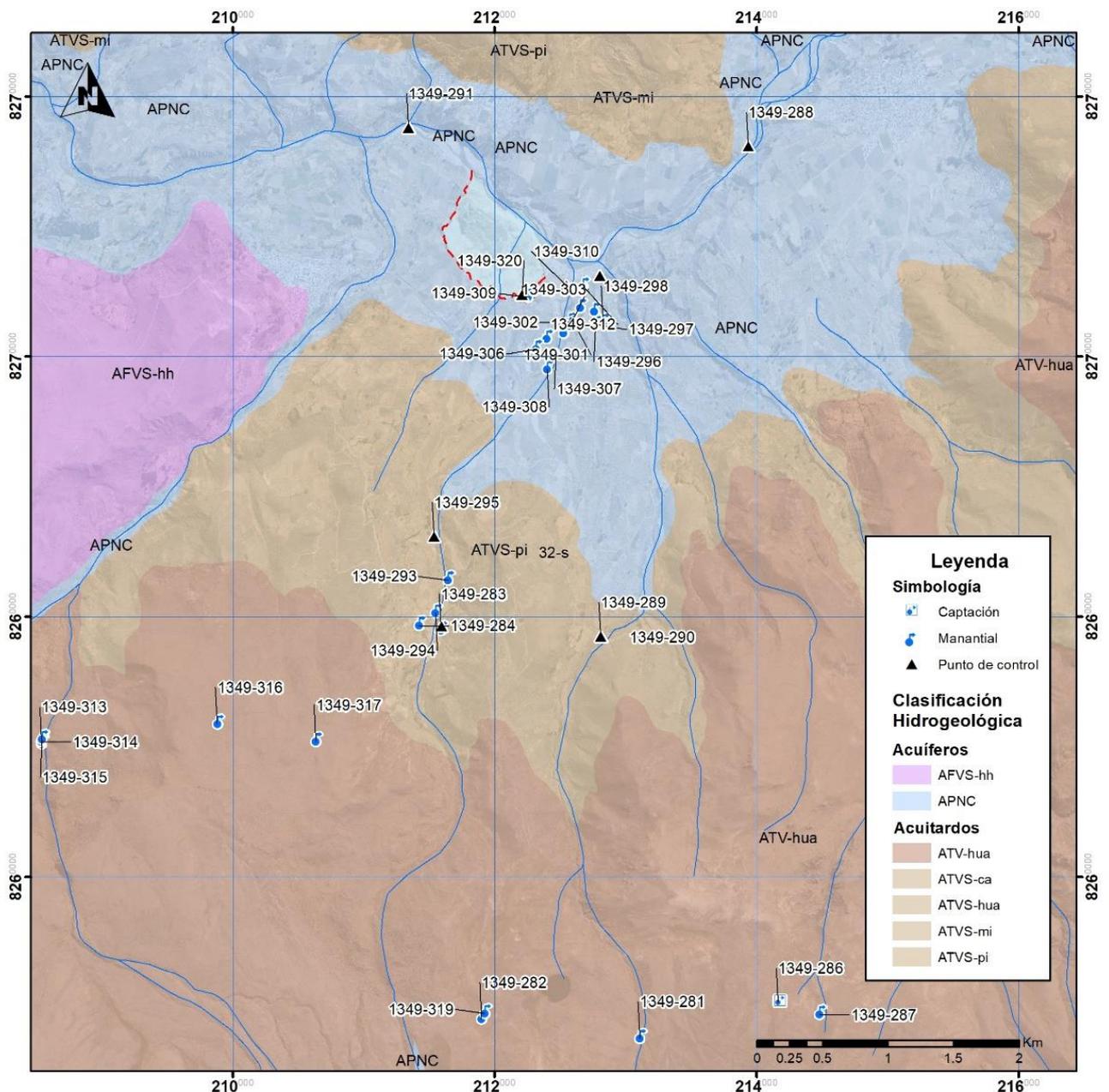


Figura 17. Distribución de unidades hidrogeológicas.



Fotografía 6 Material fino al pie del deslizamiento.



Fotografía 7 Material fino de fácil saturación, considerado acuitardo.

5. CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICA

Las características químicas del agua subterránea, considerando que sea de origen meteórico (FCIHS, 2009), se adquiere en principio desde las características químicas de las masas de agua de mar al momento de la evaporación, la atmósfera por el cual las nubes hicieron su recorrido hasta la precipitación, y finalmente al momento de su paso por la zona no saturada del subsuelo.

El agua subterránea que fluye dentro de las rocas volcánicas altera la composición química del agua subterránea misma, con influencias de la precipitación, la mineralogía de los acuíferos de la cuenca, el clima, la topografía y las actividades antropogénicas y volcánicas (Edmunds et al.1992). Así como la topografía controla los flujos en el ciclo hidrológico, también controla la firma hidroquímica del agua subterránea.

5.1. Muestreo de campo

Durante la campaña de campo, se realizó el inventario total de 44 fuentes, de las cuales 33 se han muestreado de una manera puntual, no sistemática. Se consideraron las características litológicas e hidráulicas de los manantiales. Asimismo, se analizaron por iones y cationes mayoritarios (Ca, Na, Mg, K, HCO₃, SO₄, Cl), así como metales disueltos.

5.2. Análisis de resultados

Los análisis químicos se realizaron en el laboratorio de INGEMMET. Para la interpretación de los datos obtenidos, se realizó el cálculo de determinadas relaciones iónicas para la elaboración de diagramas hidroquímicos. Los puntos de muestreo, sus análisis químicos y los parámetros físico-químicos, medidos in situ, se presentan en el Anexo I.

5.2.1. Parámetros físico-químicos

Los parámetros físico-químicos de las fuentes de agua subterránea se recolectaron in situ, empleando equipos portátiles (multiparamétricos y pHchímetros). Estos fueron previamente calibrados de acuerdo con los manuales del fabricante. Para el presente estudio, se recolectaron datos de temperatura del agua, conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos y pH del agua.

a) Potencial Hidrogeno

El pH del agua subterránea suele encontrarse entre 6.5 y 8.5 (Martínez et al. 2006), aunque en algunos casos puede ser más ácido o básico.

Esto se debe a que las partes altas de dicho sector por donde discurre el agua,

está en contacto con material alterado/meteorizado, lo que produce la oxidación y descomposición de los minerales que constituyen las rocas, provocando acidez en el agua. Los valores de pH muestran que el agua es ligeramente ácida a alcalina (6.9–8.9) en manantiales y puntos de control (ríos, quebradas); extraordinariamente los manantiales 1349-283 y 13349-294 tienen un pH de 4.02-4.38. (Figura 18) estos surgen en próximos a rocas alteradas.

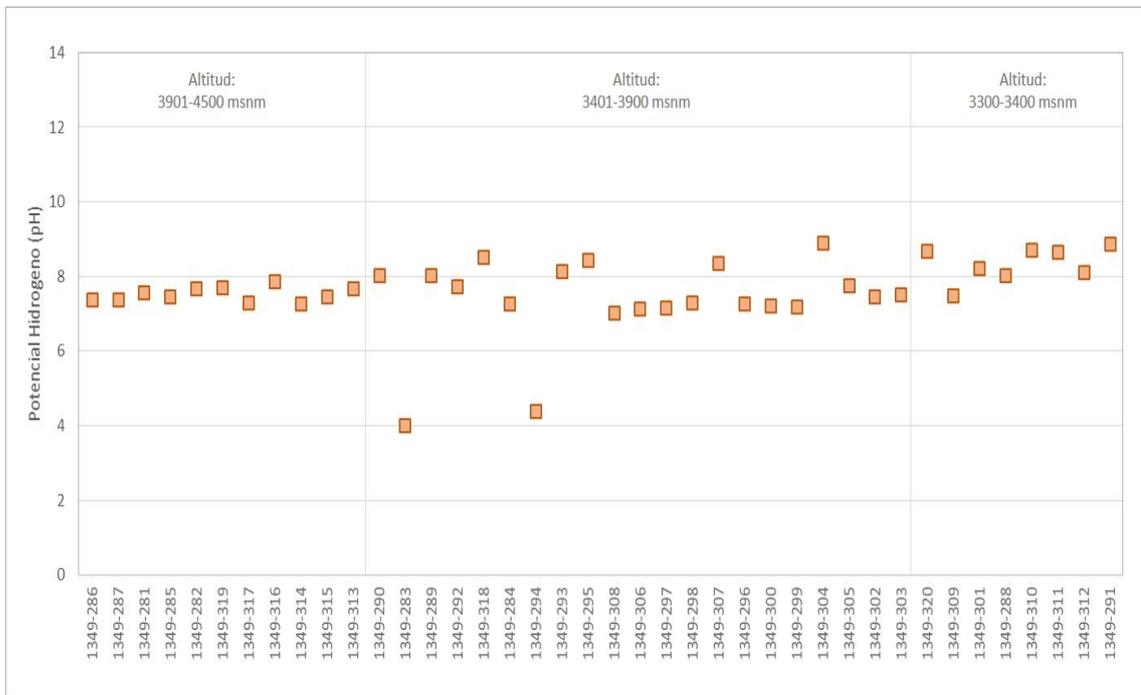


Figura 18. Potencial de hidrogeno de las fuentes inventariadas

b) Conductividad Eléctrica (CE)

Este parámetro físico-químico nos brinda una idea de la capacidad del agua al permitir el paso de la corriente eléctrica por este medio (Custodio, 2010). Así, de manera cualitativa, refleja la mayor o menor cantidad de sales disueltas, así como los iones que tenga el agua.

La conductividad eléctrica se encuentra, estrechamente, ligada a la mineralización del agua. Su variación se debe al contacto de las aguas subterráneas con materiales solubles por efecto de la circulación en formaciones que contienen cantidades sustanciales de sólidos disueltos (sales, sulfatos, etc.). Las temperaturas de las fuentes subterráneas guardan relación al promedio de temperatura media anual del ambiente 10.05 °C. Sin embargo, Asimismo, la temperatura de los manantiales se debe a que su posible recarga sea subsuperficial.

El agua de lluvia que recarga a los acuíferos posee una temperatura ligeramente inferior a la temperatura ambiente local y muy similar a la del agua

que se infiltra en el subsuelo.

c) Sólidos Totales Disueltos (TDS)

Es el peso que tienen todas las sustancias disueltas presentes en el agua, sean volátiles o no. Se suele medir en ppm o mg/L.

Este parámetro puede verse afectado por los cambios en el pH y la temperatura, que pueden producir disolución o precipitación de sales. Los valores de TDS recolectados en campo, se hicieron a través de la medición directa (in situ) con equipos portátiles (multiparámetro). Las aguas subterráneas y superficiales de la zona se caracterizan por un bajo contenido de sólidos disueltos totales (TDS) variando de 16.83 a 1310 mg/L (Figura 19).

El TDS del agua subterránea cambian a lo largo de sus trayectorias de flujo, aumentando hacia altitudes más bajas. El contenido de TDS aumenta a lo largo de la dirección del flujo a medida que el agua fluye desde las áreas de recarga a las de descarga. Los manantiales 1349-283 y 13349-294 surgen en próximos a rocas alteradas.

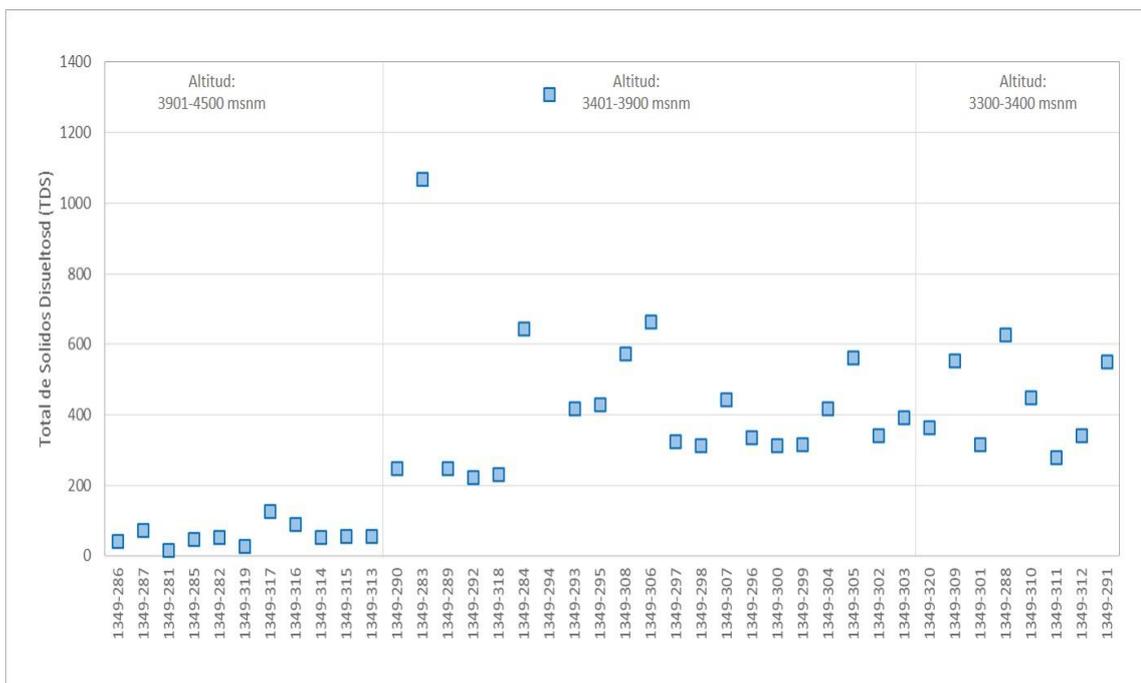


Figura 19. Total de sólidos disueltos de las fuentes inventariadas

5.3. Clasificación de las aguas

Para la clasificación de las aguas, se han considerado los principales aniones (bicarbonato, sulfato, cloruro) y cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio), que corresponden a la clasificación geoquímica por los iones dominantes (Custodio y Llamas, 1996). Para ello, se convierten los valores de mg/L a

meq/L (miliequivalentes por litro) de cada catión y anión.

Según la clasificación mencionada, para nombrar al primero, se menciona el anión de mayor porcentaje y luego el catión de mayor porcentaje, siempre y cuando el catión y el anión se encuentren en 50 % de concentración que el resto. Si ninguno de los 4 cationes o cuatro aniones supera el 50 % de composición de cada grupo, se procede a nombrar los dos primeros cationes o aniones por su porcentaje de predominancia.

La interacción del agua subterránea con estos factores conduce a la formación de diferentes facies hidroquímicas que pueden correlacionarse con la ubicación, la geología, las condiciones climáticas y la topografía (Clark y Fritz 1997).

Los tipos químicos de aguas subterráneas de un área se pueden distinguir y agrupar por su posición en el diagrama de Piper (Piper 1944) (Figure 20). Por la secuencia de Chebotarev el bicarbonato junto con el calcio, son los iones predominantes; donde el agua catiónicamente evoluciona desde el tipo cálcico, pasando al magnésico, para posteriormente finalizar en sódico; respecto a la evolución aniónica, lo hace de bicarbonatadas a sulfatadas, para finalizar en cloruradas en las zonas de descarga.

El bajo contenido de sólidos disueltos totales y los tipos bicarbonato (Ca-Na-HCO₃ y Na-Ca-Mg-HCO₃) del agua subterránea, indican un régimen de flujo de agua subterránea rápido que recibe una gran cantidad de precipitación.

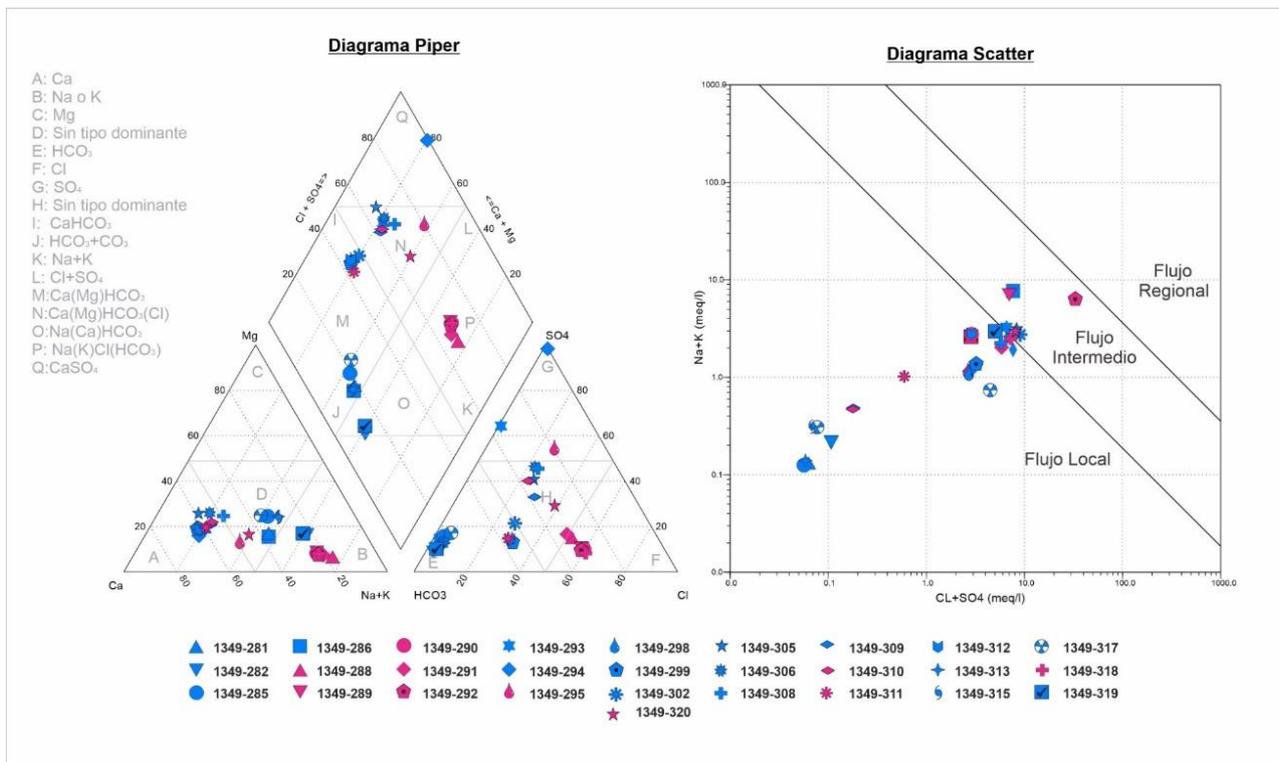


Figura 20. Diagrama de Piper y Scatter de las muestras tomadas.

El sistema de unidades hidrogeológicas es drenado por los manantiales perennes (1349-281, 1349-282, 1349-285, 1349-286, 1349-313, 1349-315, 1349-317, 1349-319,) ubicados en la parte superior de las laderas, suelen tener un $\text{Ca}^{2+}(\text{Na}-\text{Mg})-\text{HCO}_3$ y hay un general cambio de composición de un $\text{Ca}^{2+}(\text{Na})-\text{HCO}_3$ a lo largo de la trayectoria del agua subterránea de mayor a menor altitud.

En el cuadro N°10 se observan las facies hidroquímica de los manantiales que se encuentran entre las altitudes de 4400 - 3900 las cuales han sido representadas en el mapa hidroquímico de diagramas stiff. (Figura 21)

Cuadro 10. Facies Hidroquímicas de la altitud 4400 - 3900

Código	Nombre	Tipo de fuente	Anión dominante	Catión dominante
1349-281	Huaco	Manantial	HCO3	Ca-Na
1349-282	Pongo	Manantial	HCO3	Na-Ca
1349-285	Huaco	Manantial	HCO3	Ca-Na-Mg
1349-286	Achoma 06	Manantial	HCO3	Ca-Na
1349-313	Yahuar Puyco	Manantial	HCO3	Na-Ca-Mg
1349-315	Yahuar Puquios	Manantial	HCO3	Na-Ca-Mg
1349-317	Kaicho	Manantial	HCO3	Ca-Na-Mg
1349-319	Pongo 2	Manantial	HCO3	Na-Ca

Fuente: Elaboración propia

En la figura 21 se observa que los manantiales del cuadro N° 11 son de flujo local por lo que se infiere que es de circulación de agua subterránea poco profunda y tiempo de residencia corto que contienen etapas tempranas de evolución geoquímica (recarga reciente) o agua subterránea de circulación rápida que no ha sufrido interacciones significativas entre agua y roca.

Los bajos TDS y el tipo de agua subterránea bicarbonatada en la parte alta indican, que el rápido régimen hidrogeológico recibe un volumen relativamente alto de precipitación. En el área de estudio, $\text{Ca}-\text{Na}-\text{Mg}-\text{HCO}_3$ es el tipo de agua dominante en las volcánicas básicas. En general, el TDS aumenta desde el área de infiltración a lo largo del área de estudio.

En el cuadro N° 11 se observan las facies hidroquímica de los manantiales y puntos de control que se encuentran entre las altitudes de 3400-3900 las cuales han sido representadas en diagramas Stiff Figura 21

Cuadro 11. Facies Hidroquímicas de la altitud 3400-3900

Código	Nombre	Tipo de fuente	Anión dominante	Catión dominante
1349-289	Canal Majes 1	Punto de control	Cl-HCO3	Na-Ca
1349-290	Canal Majes 2	Punto de control	Cl-HCO3	Na-Ca
1349-292	Canal Majes 9	Punto de control	Cl-HCO3	Na-Ca
1349-293	Collpani	Manantial	SO4-HCO3	Ca
1349-294	Collpa	Manantial	SO4	Ca
1349-295	Collpani 2	Punto de control	SO4-Cl	Ca-Na
1349-318	Canal 9	Punto de control	Cl-HCO3	Na-Ca

Fuente: Elaboración propia

Además, se puede observar que los puntos de control que se tomaron a lo largo del canal son de composición clorurada bicarbonatada sódica y los manantiales del sector de Collpa corresponden a una facie diferente con mayor mineralización lo cual podría indicar la presencia de un flujo intermedio.

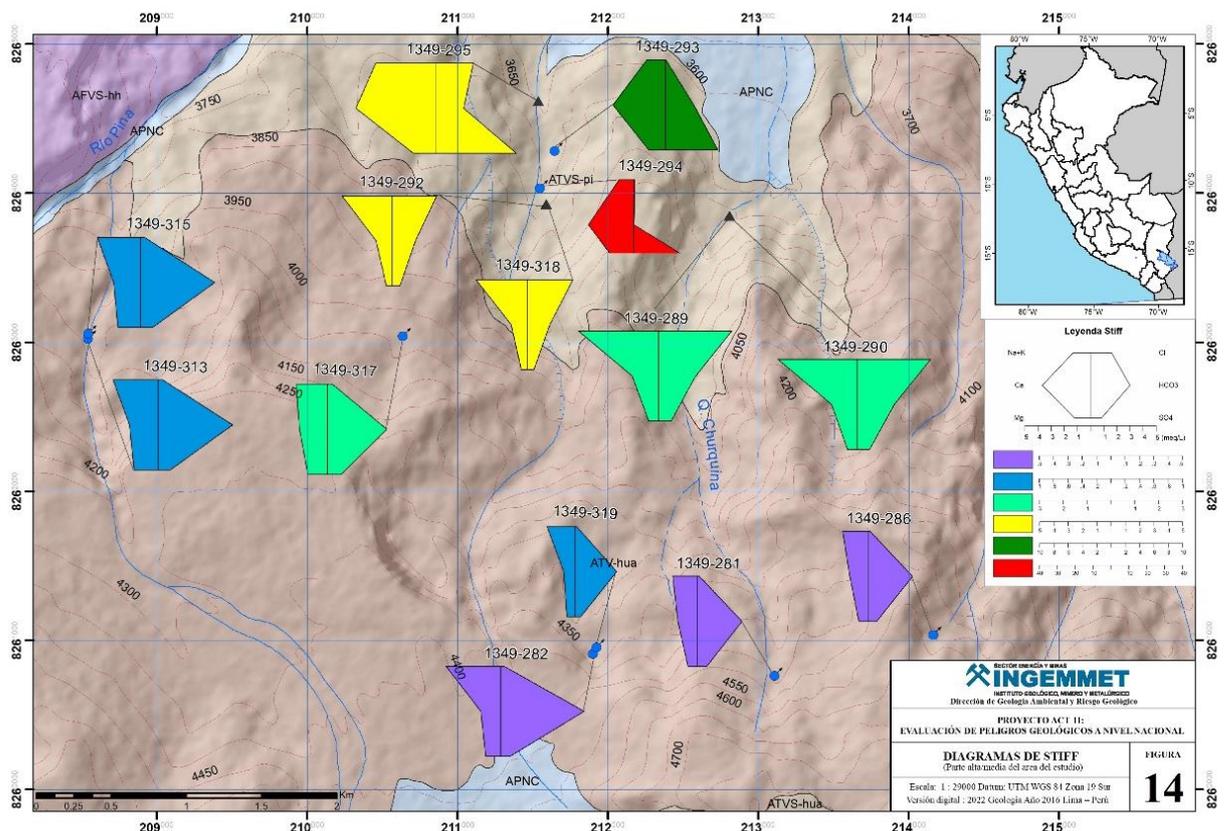


Figura 21. Distribución de facies hidroquímica representadas en diagramas Stiff (altitudes de 3400 - 4400 , parte alta/media de la zona de estudio)

Una parte significativa del agua subterránea se descarga a los ríos como manantiales. El flujo de agua subterránea de profundidad intermedia está fuertemente influenciado por la litología de la superficie.

En el cuadro N°12 se observan las facies hidroquímica de los manantiales y puntos de control que se encuentran entre las altitudes de 3300-3450 las cuales han sido representadas en el mapa hidroquímico de diagramas stiff. (Figura 22).

En este grupo de agua representados se observa una química más diluida y en consecuencias facies químicas mixtas, donde se infiere que el agua son mezclas de los tipos de agua Ca–Na–HCO₃ y Ca–HCO₃-Cl y Ca–SO₄. Los manantiales ubicados en la parte inferior muestran que el agua estuvo en contacto con rocas volcánicas.

Cuadro 12. Facies Hidroquímicas de la altitud 3300-3450

Código	Nombre	Tipo de fuente	Anión dominante	Catión dominante
1349-288	Río Colca 1	Punto de control	Cl-HCO ₃	Na
1349-291	Río Colca 2	Punto de control	Cl-HCO ₃	Na
1349-298	Maccapi 1	Manantial	HCO ₃ -Cl	Ca-Mg
1349-299	Maccapi 2	Manantial	HCO ₃ -Cl	Ca
1349-300	Tarani	Manantial	HCO ₃ -Cl	Ca
1349-302	Uchatira	Manantial	HCO ₃ -Cl-SO ₄	Ca
1349-305	Pacsuro	Manantial	SO ₄ -HCO ₃ -Cl	Ca-Mg
1349-306	Pacsuro 2	Manantial	SO ₄ -HCO ₃ -Cl	Ca-Mg
1349-308	Alfa Barranco	Manantial	SO ₄ -HCO ₃ -Cl	Ca-Mg-Na
1349-309	Achoma 029	Manantial	HCO ₃ -SO ₄ -Cl	Ca-Na-Mg
1349-310	Huancaro	Punto de control	SO ₄ -HCO ₃ -Cl	Ca-Mg
1349-311	Maccapi 2	Punto de control	HCO ₃ -Cl	Ca-Mg
1349-312	Huancaro-Huacapi	Manantial	HCO ₃ -Cl	Ca
1349-320	Achoma 043	Punto de control	Cl-HCO ₃ -SO ₄	Ca-Na
1349-309	Achoma 029	Manantial	HCO ₃ -SO ₄ -Cl	Ca-Mg-Na

Fuente: Elaboración propia

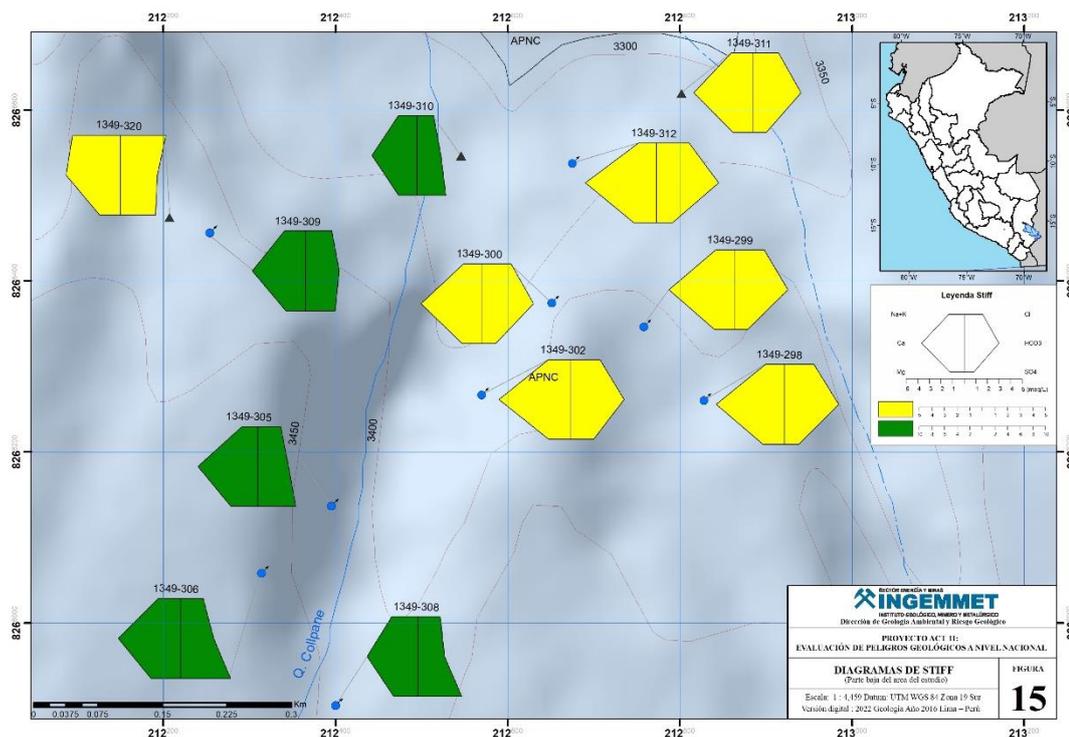


Figura 22. Distribución de facies hidroquímica representadas en diagramas Stiff (altitudes de 3300 - 3450, parte baja de la zona de estudio)

En general, existe una zonación clara en la concentración iónica total de las aguas naturales siguiendo la dirección del flujo de agua subterránea desde la parte alta hacia las elevaciones más bajas. El aumento en la concentración iónica total hacia la parte baja implica que es probable que el tiempo de residencia del agua subterránea y la magnitud de la interacción roca-agua aumenten en la misma dirección.

Los datos hidroquímicos proporcionaron información útil sobre los principales procesos hidrogeoquímicos involucrados en la mineralización del agua. La concentración aumenta debido al intercambio catiónico. De manera similar, hay un cambio de facies, de estar ligeramente mineralizada a un tipo de agua significativamente mineralizada.

Para comprender los mecanismos que controlan la química del agua se ha elaborado los diagramas de Gibbs (Gibbs 1970, 1971); los cuales se emplean para comprender los procesos geoquímicos de las aguas subterráneas.

En los diagramas se graficaron los sólidos disueltos totales (TDS) en función de la relación catiónica $Na/(Na+Ca)$ y aniónica $Cl/(Cl+HCO_3)$; por lo que, si los puntos que se ubican en el tercio superior derecho del gráfico tienen una relación catiónica o aniónica cercana a 1 y los SDT muy altos, el proceso dominante es el de evaporación.

Cuando los puntos se ubican en la zona media, el proceso determinante es la interacción de agua-roca, posiblemente el flujo puede estar relacionado a la meteorización. Estos dos procesos pueden darse en forma conjunta y no se excluyen entre sí. Por otro lado, si los puntos se ubican en el tercio inferior derecho, el proceso que determina el tipo de agua es la dilución por precipitación, ya que con relaciones catiónicas o aniónicas cercanas a 1 con valores de TDS muy bajos.

El diagrama de Gibbs (Gráfico 7) se observa que las muestras que se ubican entre las elevaciones desde los 3300 hasta los 3900 caen en el grupo de dominancia de interacción agua-roca (meteorización). Se pueden derivar diagramas del mecanismo natural que controla la química del agua subterránea, incluido el dominio de la meteorización de las rocas, el dominio de la evaporación y la precipitación

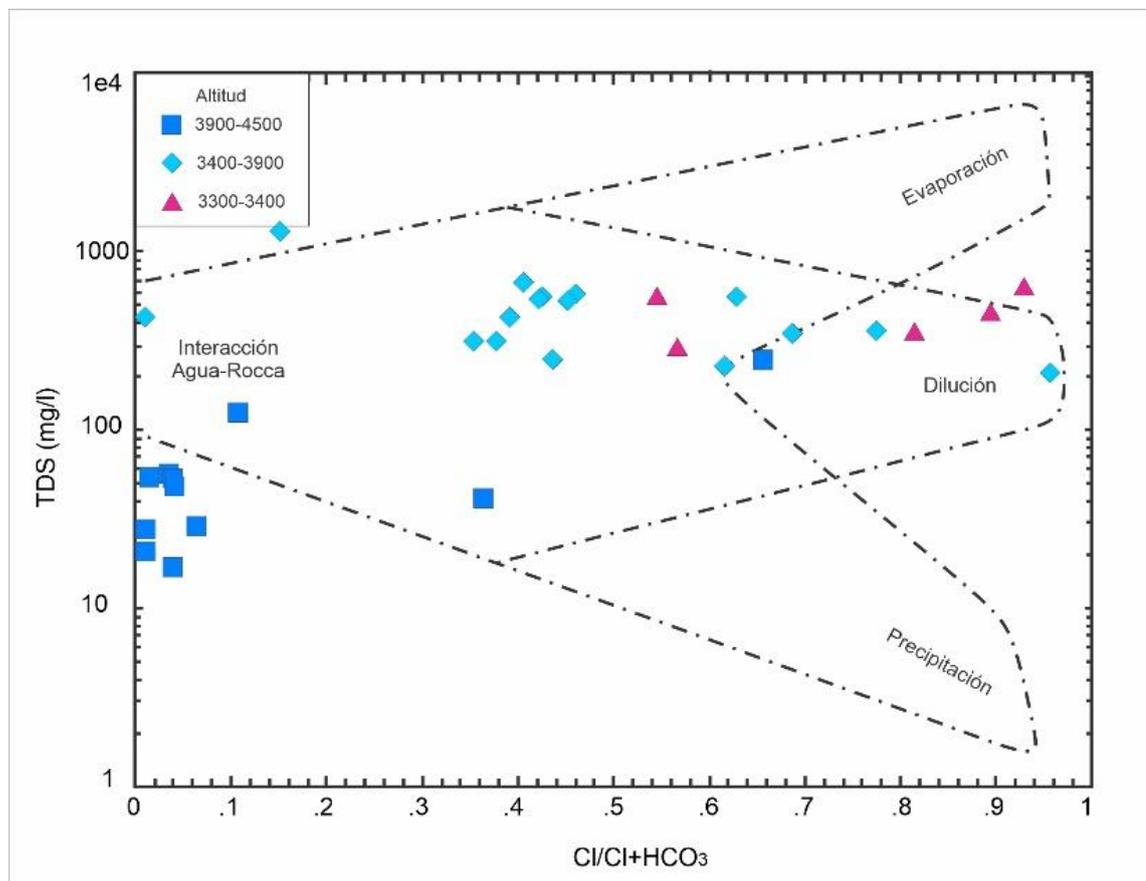


Gráfico 7. Diagramas de Gibbs relación TDS y aniones $Cl/(Cl+HCO_3)$, muestras entre las elevaciones 3300 hasta los 3900.

La evapotranspiración, como sucede en áreas de cultivo o superficies con aridez que reciben escurrimiento subsuperficial por aguas de retorno agrícola; elevan el contenido de Na y de sólidos disueltos TDS (Gráfico 7). Los puntos que se ubican en el dominio de la interacción agua-roca indican que la

meteorización química controla la química del agua. Como se indicó anteriormente, la interacción entre las rocas y el agua da como resultado la lixiviación de iones en el sistema de aguas, influye en la química del agua.

Las fuentes de agua que se ubican entre las elevaciones 3900 hasta los 4500 se ubican próximo a la celda de dominancia de precipitación.

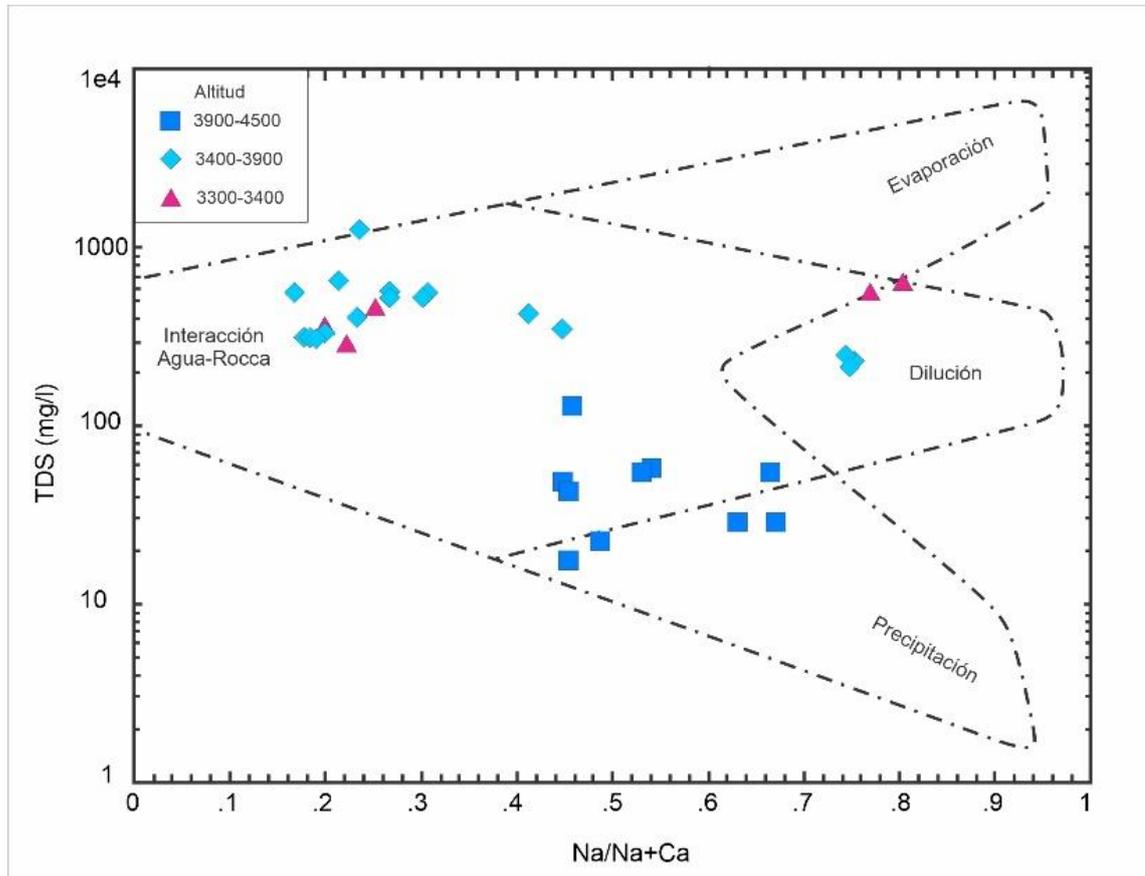


Gráfico 8. Diagramas de Gibbs relación TDS y cationes (Na/(Na+Ca), muestras entre las elevaciones 3900 hasta los 4500.

Las características de las fuentes ubicadas entre las elevaciones de 3900 a 4500 se prevén que se ubican en el área de recarga (tiempo de residencia bajo) y la presencia de material con menor solubilidad lo que indica que el agua subterránea se recarga con agua de lluvia (precipitación); además en la figura 20 estas fuentes se ubican en la zona de flujo local.

El incremento de sales debido a la interacción agua-roca aumenta la proporción de sólidos disueltos TDS afectando las concentraciones de calcio o bicarbonato relativas a sodio y cloruro. La química del agua de las fuentes de agua puede estar controlada principalmente por el tiempo de residencia y la intensidad de recarga. Los manantiales de ladera superior muestran tipos de agua de baja mineralización, mientras que los manantiales en la base del área del deslizamiento muestran agua de mayor mineralización.

Las fuentes de agua subterránea que se encuentran en las áreas de mayor altitud se caracterizan por bajas concentraciones de los iones principales y por su baja salinidad, con TDS por debajo de 127 mg/L.

Las muestras con un rango de CE de 115 - 465 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y bajas concentraciones de todos los iones, se encuentran en altitudes 3400 a 3900. Estas muestras fueron recolectadas cerca al canal , y la posible recarga parece haber tenido lugar por precipitación sobre las tierras altas. lo que indica que el movimiento del agua subterránea es superficial a intermedio. Sin embargo, tienen concentraciones relativamente más altas de Na y la recarga parece haber tenido lugar por precipitación sobre las tierras altas.

Las fuentes de agua de las áreas de menor elevación se recolectaron entre los 3300 a 3400 próximos al río Colca están cubiertas con unidades dominadas por depósitos coluviales-aluviales. En estas unidades el movimiento del agua es lento, lo que, junto con la presencia de minerales solubles, potencia los efectos de la interacción roca-agua dando lugar a concentraciones relativamente más altas de los cationes Na^+ , K^+ .

Los valores de TDS de las muestras de agua subterránea entre 215 y 573 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica que existe una circulación de agua subterránea de intermedia y un tiempo de residencia relativamente mayor.

El bajo gradiente hidráulico del agua subterránea en la llanura (Figura 23) indica una velocidad lenta del agua subterránea, lo que conduce a un tiempo de residencia más prolongado y a una de la interacción roca-agua. En el área de descarga se encontraron aguas subterráneas ricas en bicarbonato y sodio, así como concentraciones más altas de sulfato; lo que indica que también hay una recarga circulante rápida de precipitación.

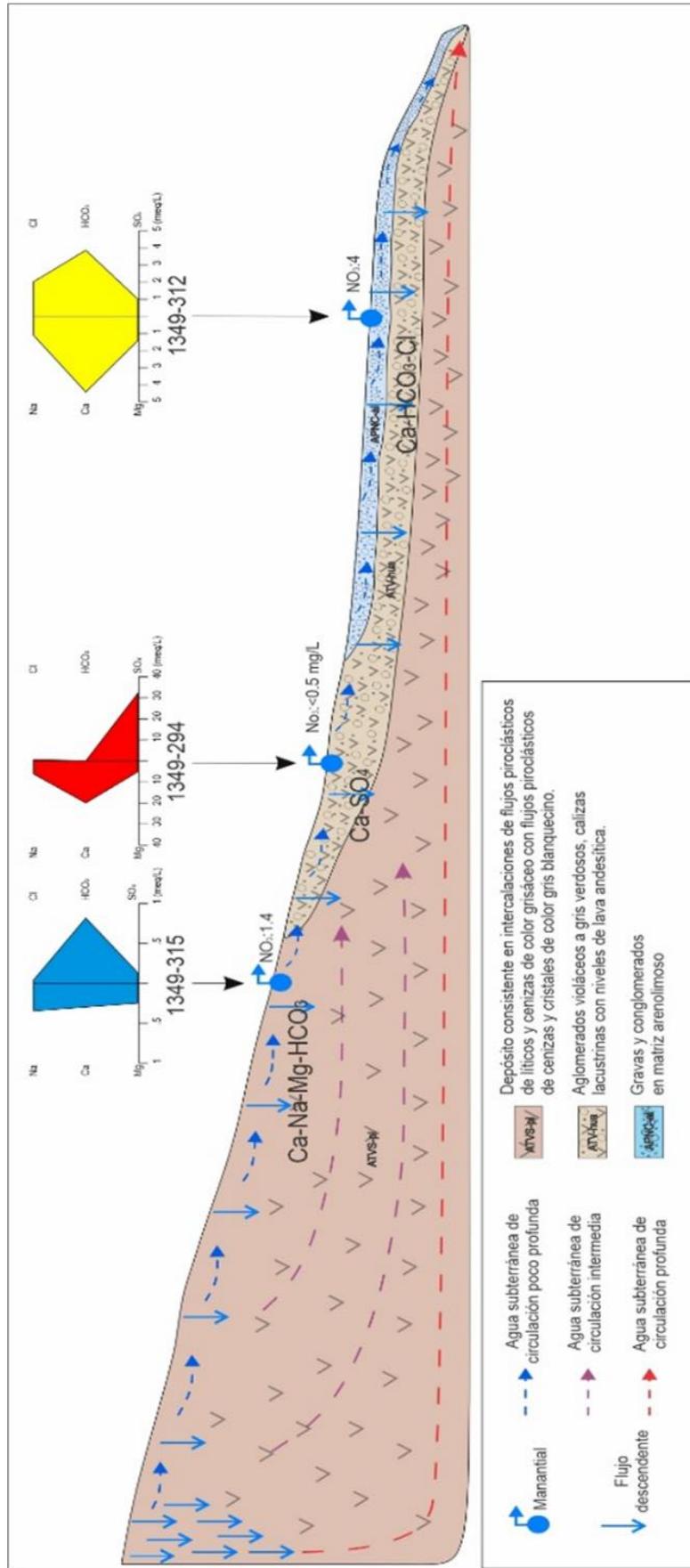


Figura 23. Sección de evolución química del agua.

El agua subterránea puede infiltrarse en taludes y aumentar o acumular presión intersticial desde abajo, favoreciendo el desencadenamiento de deslizamientos superficiales. Además, por debajo de los horizontes también se forman zonas húmedas (Figura 24) que también pueden favorecer el desencadenamiento de deslizamientos, especialmente durante lluvias intensas o de larga duración.



Figura 24. Evidencias de zonas húmedas

La ubicación del deslizamiento ocurre entre la unidad hidrogeológica de acuitardos y acuíferos porosos no consolidados el cual está pobremente soldado y compuesto de material tobáceo que fácilmente se meteoriza a minerales arcillosos y coluviales. La caracterización hidroquímica nos indica que las aguas que circulan dentro de los acuitardos descargan sus aguas en dirección a la masa del deslizamiento, lo que influye en las fluctuaciones del nivel del agua subterránea a largo plazo.

El tiempo de residencia del agua es corto, la interacción agua/suelo/roca es baja y el agua está poco mineralizada principalmente en las zonas de evidencias de agua, además se evidencia el flujo del agua superficial constante (Fotografía 8), debido a la actividad agrícola por el riego por inundación, con canales sin revestimiento o acequias (Figura 25), estos principalmente sobre las unidades no consolidadas que permiten la filtración del agua lo que satura y aumenta la carga del terreno, por lo tanto, la principal causa de los deslizamiento no solo se debe a la interacción activa agua/suelo/roca, sino también a la topografía con pendiente pronunciada y la presión formada durante las precipitaciones extraordinarias y extremas las cuales aumentan la cantidad de agua superficial y conduce a un aumento en el peso de los materiales sueltos y meteorizados (aumentando su esfuerzo cortante).



Fotografías 8 Bocatoma del canal 9, dotación de agua para riego.



Figura 25. Riego por inundación, con canales sin revestimiento o acequia .

6. GEOFÍSICA

6.1. Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos son indirectos permiten obtener información sobre las propiedades físicas de los distintos tipos de materiales con lo que se podrá deducir su distribución en el substrato. Los métodos geofísicos más utilizados en estudios geotécnicos son de resistividad eléctrica y sísmica.



Figura 26 trabajo y equipos utilizados en la etapa de geofísica .

6.1.1. Resistividad-2D

Se basa en la existencia de variaciones de las propiedades eléctricas, en especial la resistividad de las distintas formaciones del subsuelo, teniendo como objetivo determinar la distribución en profundidad (resistividades y espesores) de los niveles geoelectrónicos. Esta técnica, proporciona conjuntamente información lateral y en profundidad. El sistema consta de un resistímetro o unidad básica, un selector de electrodos y un juego de cables multiconectores que permiten utilizar hasta 48 electrodos conmutables de forma totalmente automática a través del selector de electrodos y controlado

por la unidad básica de control. Estos equipos también permiten realizar medias de la resistividad utilizando dispositivos más simples, como los sondeos eléctricos verticales (S.E.V. o en inglés Vertical Electrical Sounding V.E.S.) o las calicatas eléctricas (en inglés resistivity profiling). Asimismo, la aplicación del Método I.P. en modo de tiempo.

El método de la Tomografía Eléctrica se caracteriza por el estudio de las variaciones de parámetros físicos de las rocas o de los suelos, que dependen de factores que afectan la resistividad de los materiales como la porosidad, resistividad por agua en los poros y conductividad en los granos minerales.

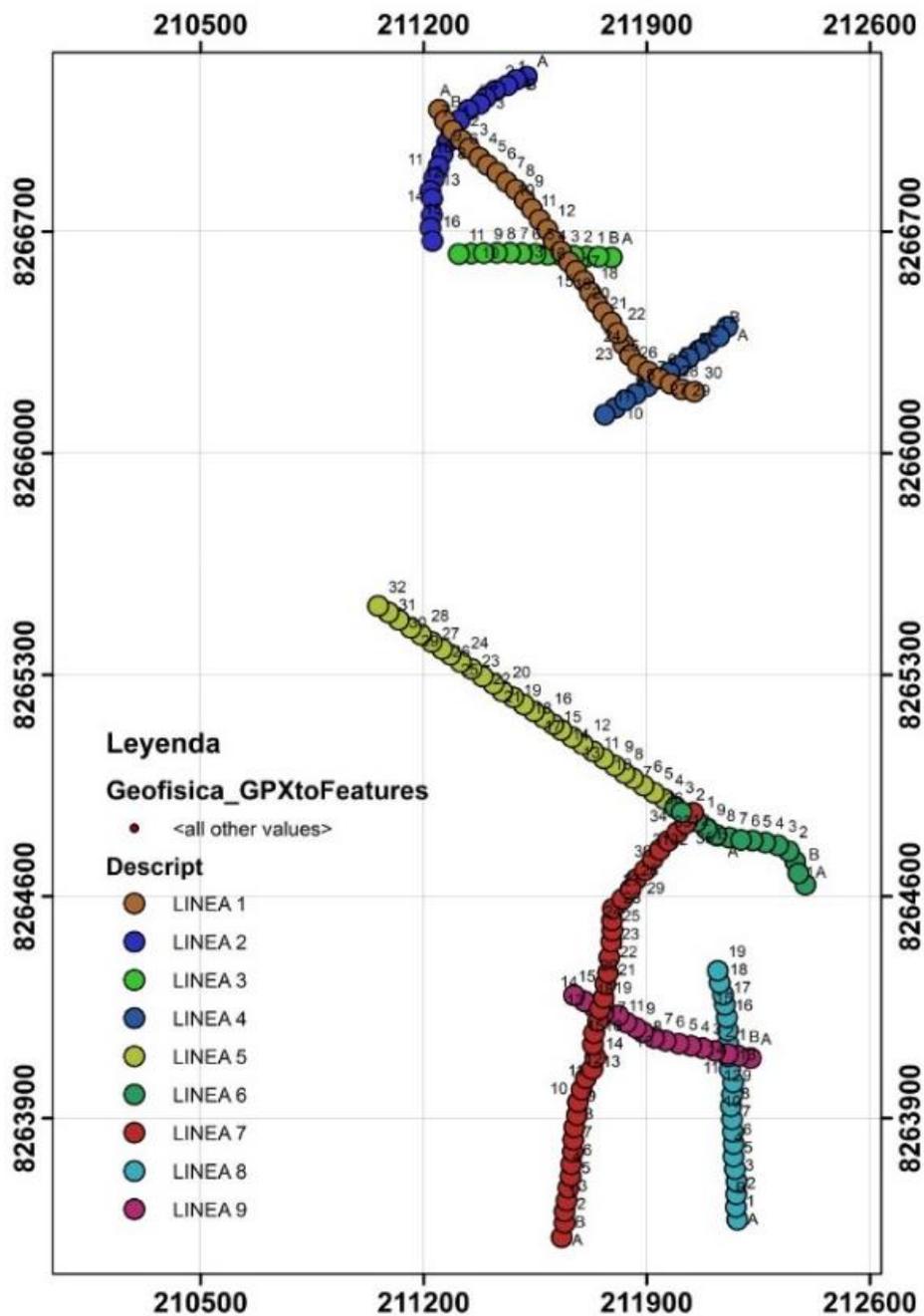


Figura 27. Distribución de las líneas de tomografía Eléctrica.



Figura 28. Ubicación de las Líneas de Tomografía Eléctrica.

El método dispone de diferentes configuraciones (Polo-Dipolo, Slumberger, Wenner, Polo-Polo) y para el presente estudio se aplicó la configuración Dipolo-Dipolo – 2D (Figura 29), con emplazamientos de 13 electrodos, espaciados de 40 m entre los electrodos, con una longitud total de datos en una corrida de 480 m y que se va empalmando a más distancia según el objetivo, este método ofrece ventajas como:

- Alcanzan mejor resolución en profundidad y su penetración es levemente más profunda a fin de observar con mayor detalle el subsuelo.
- Colecta datos de resistividad en 2D, usando un sistema de adquisición para 10 canales.

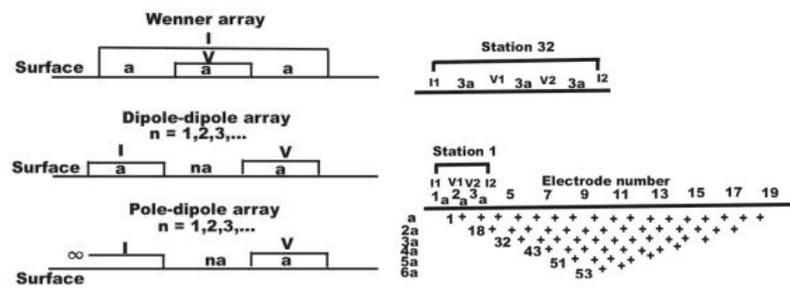


Figura 29. Configuraciones electrodicas de la tomografía **Eléctrica** como el de Dipolo-Dipolo utilizado en el presente estudio.

En los trabajos de campo se desarrollaron nueve (9) líneas geofísicas de diferentes longitudes haciendo un total de 7.68 km de líneas y que se detalla en el cuadro 13 y espaciados cada 40 m, aplicando la configuración dipolo-dipolo. Las líneas ejecutadas fueron:

Cuadro 13. Resumen de las líneas de Tomografía Eléctrica-Achoma-Arequipa.

Perfiles de Tomografía Eléctrica.	Coordenadas				Longitud (m)
	Inicio		Fin		
	Este	Norte	Este	Norte	
LTM-01	211247	8267086	212050	8266196	1,240
LTM-02	211525	8267192	211226	8266672	680
LTM-03	211791	8266620	211310	8266630	480
LTM-04	212153	8266400	211767	8266124	480
LTM-05	212121	8264795	211058	8265518	1,320
LTM-06	212397	8264640	211990	8264882	560
LTM-07	211633	8263528	212045	8264866	1,480
LTM-08	212183	8263584	212124	8264369	800
LTM-09	212226	8264090	211671	8264289	640
LTM-10 -Unida	212397	8264640	211058	8265518	1,720
				TOTAL	7,680

La información de campo registrada se procesó, se analizó e interpreto en gabinete; las características físicas de las formaciones geológicas fueron correlacionada con la información geológica existente. La información es procesada por un software especializados de I.P - Tomografía Eléctrica, RES2INV, con conocimiento de los parámetros geo-resistivos y la geología, amplio sustento teórico, y experiencia para su interpretación, siendo esta etapa la más compleja, para llegar a resultados óptimos, como producto final se obtienen secciones, perfiles representando a las zonas anómalas de interés y/o la geometría subterránea del corte geológico del área estudiada.

6.2. Resultados e interpretación de las secciones de tomografía eléctrica - deslizamiento de Achoma

6.2.1. SECCIÓN LT-1

Se realizó una sección paralela al drenaje del río Colca con dirección NW a SE, utilizando la componente dipolo-dipolo (D-D). La longitud total de la sección fue de 1240 m, con separación de electrodos cada 40 m. El tiempo de inyección de corriente fue de 1 segundo y un mínimo de 3 mediciones repetidas en cada punto con el fin de obtener una desviación estándar <3% para cada valor de resistividad aparente.

La tomografía da como resultado una profundidad máxima de penetración de modelado de 100 m. La figura 30, muestra una variación lateral de la resistividad. A partir de los 900 m hasta los 1240 m se puede observar una cobertura de resistividades bajas a moderadas a esta zona se le denomina “zona de mayor concentración de humedad y/ mayor conductividad y por ende con probable

contenido de agua". Sin embargo, el nivel freático se encuentra entre 90 a 100 m de profundidad.

Las resistividades bajas están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o probable presencia de agua con valores menores a 24.4 Ohm-m, mientras las que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas a la presencia de limos, arenas y fragmentos rocosos en estado poco húmedo.

El material cuaternario inconsolidado, con muy poca humedad y de moderada resistividad tienen valores de entre 79 a 100 Ohm-m y corresponden a las arenas, gravas y el material limo arenoso.

Las resistividades moderadas a altas mayores a 100 Ohm-m, corresponden a material cuaternario en estado seco poco consolidado conformado por gravas, arenas y fragmentos rocosos y se localizan mayormente entre los puntos 195 a 800 y hasta profundidades de entre 8 m a 45 m. (Figura 30).

Se puede observar también el nivel freático podría encontrarse a una profundidad mayor a 100 m, como se puede observar en los perfiles transversales a la línea LT-1.

Figura 30 Arriba: El perfil de tomografía eléctrica muestra resistividades que indican variaciones laterales de los materiales y una "zona de discontinuidad" en 840. Abajo: La interpretación geofísica, junto con la información geológica de superficie, revela que las discontinuidades en el material cuaternario se deben a diferencias en compactación y humedad. A mayor profundidad, es probable que se encuentre el nivel freático, identificado por una zona de muy baja resistividad.

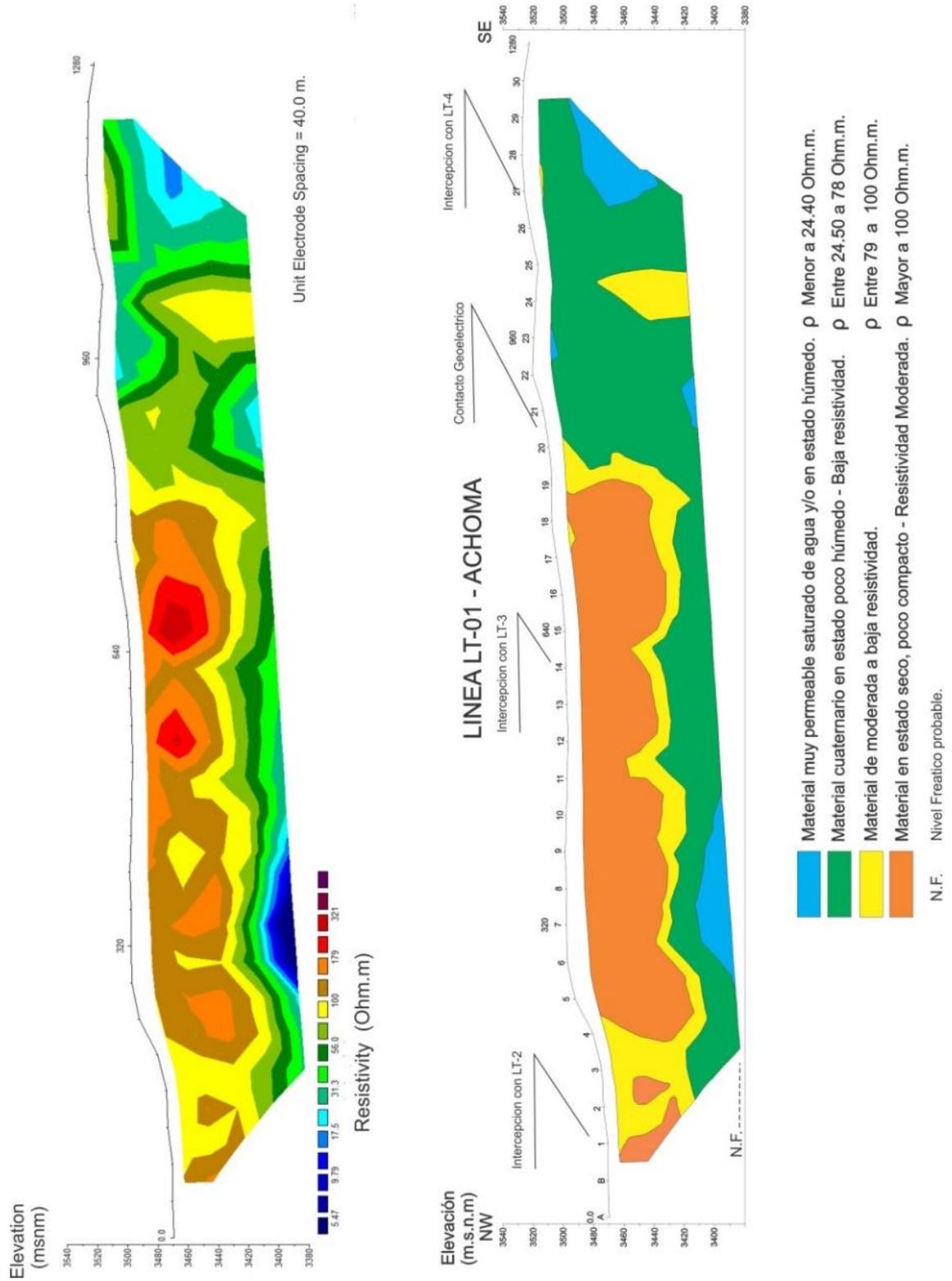


Figura 30. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-1.

6.2.2. SECCIÓN LT-2

Se realizó una sección transversal al drenaje del río Colca con dirección NE a SW y a la línea LT-1 utilizando la componente dipolo-dipolo (D-D). La longitud total de la sección de 680 m, separando los electrodos cada 40 m. El tiempo de inyección de corriente fue de 1 segundo y un mínimo de 3 mediciones repetidas en cada punto con el fin de obtener una desviación estándar <3% para cada valor de resistividad aparente.

La tomografía da como resultado una profundidad máxima de penetración de modelado de 100 m. La figura 31, muestra una variación lateral de la resistividad. A partir de los 160 hasta los 680 m se puede observar una cobertura de resistividades moderadas, zona denominada "zona resistiva de mayor concentración de resistividades moderadas sin contenido de agua". Sin embargo, el nivel freático se encuentra entre 90 a 100 m de profundidad.

Las resistividades bajas están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o agua con valores menores a 24.4 Ohm-m, mientras las que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas la presencia de limos, arenas y fragmentos rocosos en estado poco húmedo.

El material cuaternario inconsolidado, con muy poca humedad y de moderada resistividad tienen valores de entre 79 a 100 Ohm-m y corresponden a las arenas, gravas y el material limo arenoso. Las resistividades moderadas a altas mayores a 100 Ohm-m, corresponden a material cuaternario en estado seco poco consolidado conformado por gravas, arenas y fragmentos rocosos y se localizan mayormente entre los puntos 160 a 680 hasta profundidades de 60 m. (Figura 31). Se puede observar también que el nivel freático podría encontrarse a una profundidad mayor a 100 m, como se observa en los perfiles transversales a la línea LT-2.

Figura 31 Arriba: El perfil de tomografía eléctrica muestra resistividades con variaciones laterales y una "zona de discontinuidad" en 160. Abajo: La interpretación geofísica y la información geológica de superficie indican que las discontinuidades en el material cuaternario (moderadas resistividades) contactan con material de baja resistividad al inicio de la línea.

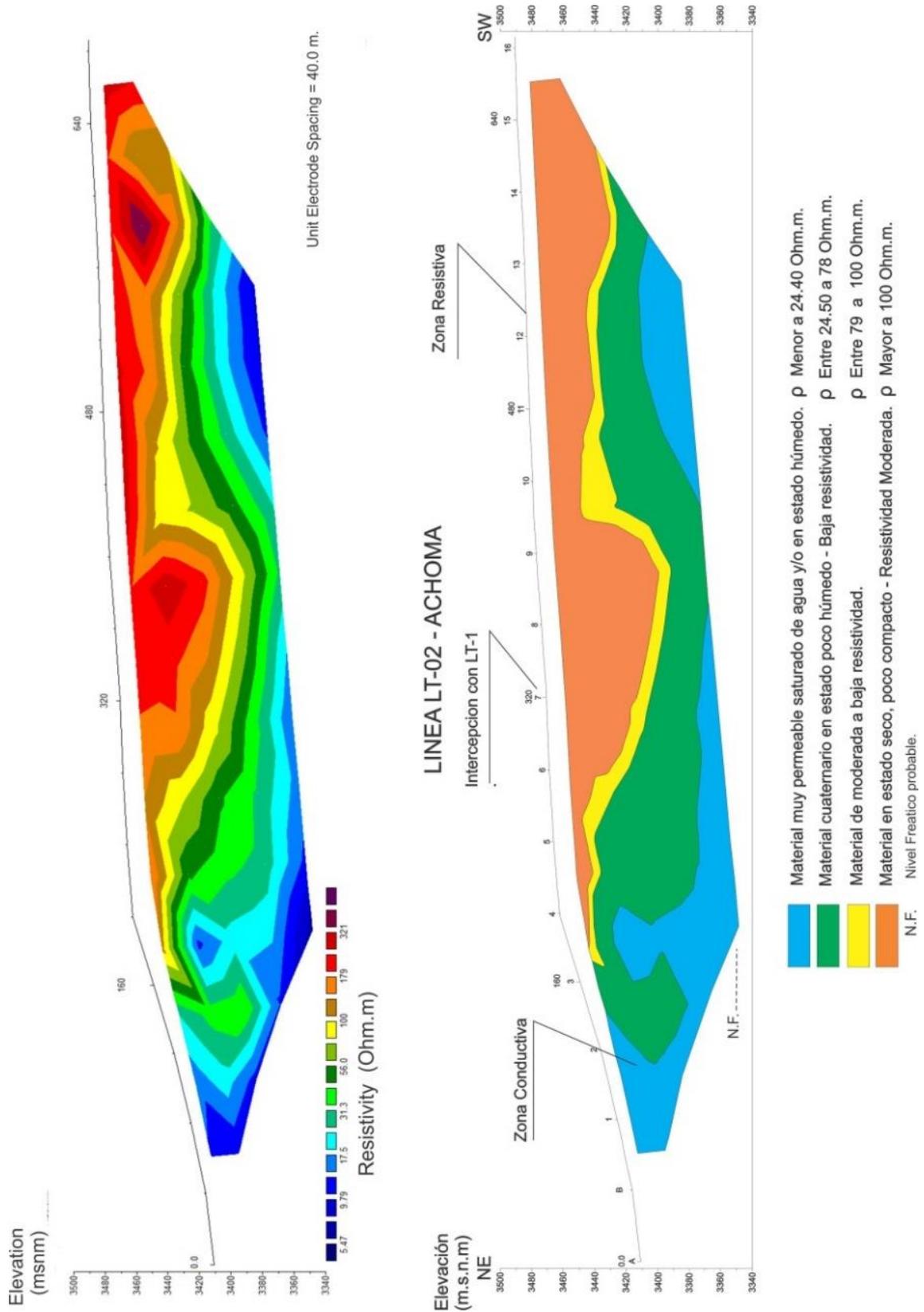


Figura 31. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-2.

6.2.3. SECCIÓN LT-3

Se realizó una sección casi transversal al drenaje del río Colca con dirección E a W utilizando la componente dipolo-dipolo (D-D). La longitud total de la sección de 480 m, separando los electrodos cada 40 m, el tiempo de inyección de corriente fue de 1 segundo y un mínimo de 3 mediciones repetidas en cada punto con el fin de obtener una desviación estándar <3% para cada valor de resistividad aparente.

La tomografía da como resultado una profundidad máxima de penetración de modelado de 100 m. La figura 32, muestra una variación perpendicular de la resistividad. A lo largo de todo el perfil se puede observar una cobertura de resistividades moderadas a esta zona se le denomina “zona resistiva”. Sin embargo, el nivel freático se encuentra entre 90 a 100 m de profundidad.

Las resistividades bajas están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o agua con valores menores a 24.4 Ohm-m, mientras las que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas la presencia de limos y arenas y fragmentos rocosos en estado poco húmedo. El material cuaternario inconsolidado, con muy poca humedad y de moderada resistividad tienen valores de entre 79 a 100 Ohm-m y corresponden a las arenas, gravas y el material limo arenoso; Las resistividades moderadas a altas mayores a 100 Ohm-m, corresponden a material cuaternario en estado seco poco consolidado conformado por gravas, arenas y fragmentos rocosos de diferente tamaño y se localizan mayormente a lo largo de todo el perfil desde una profundidad de 7 m hasta los 55 m. (Figura 32). Se puede observar también el nivel freático podría encontrarse a una profundidad mayor a 100 m, como se puede observar en los perfiles transversales a la línea LT-3.

Figura 32 Arriba: Perfil de tomografía eléctrica donde se observan resistividades que caracterizan los diferentes materiales con aparente variación perpendicular y donde existe una “zona resistiva” casi uniforme a lo largo del perfil. Abajo: Interpretación del perfil geofísico con la información geológica de superficie, podemos ver las discontinuidades casi uniformes de forma perpendicular del material cuaternario (moderadas resistividades a bajas resistividades), se observa en profundidad el decaimiento de la resistividad y zona más conductiva (nivel freático).

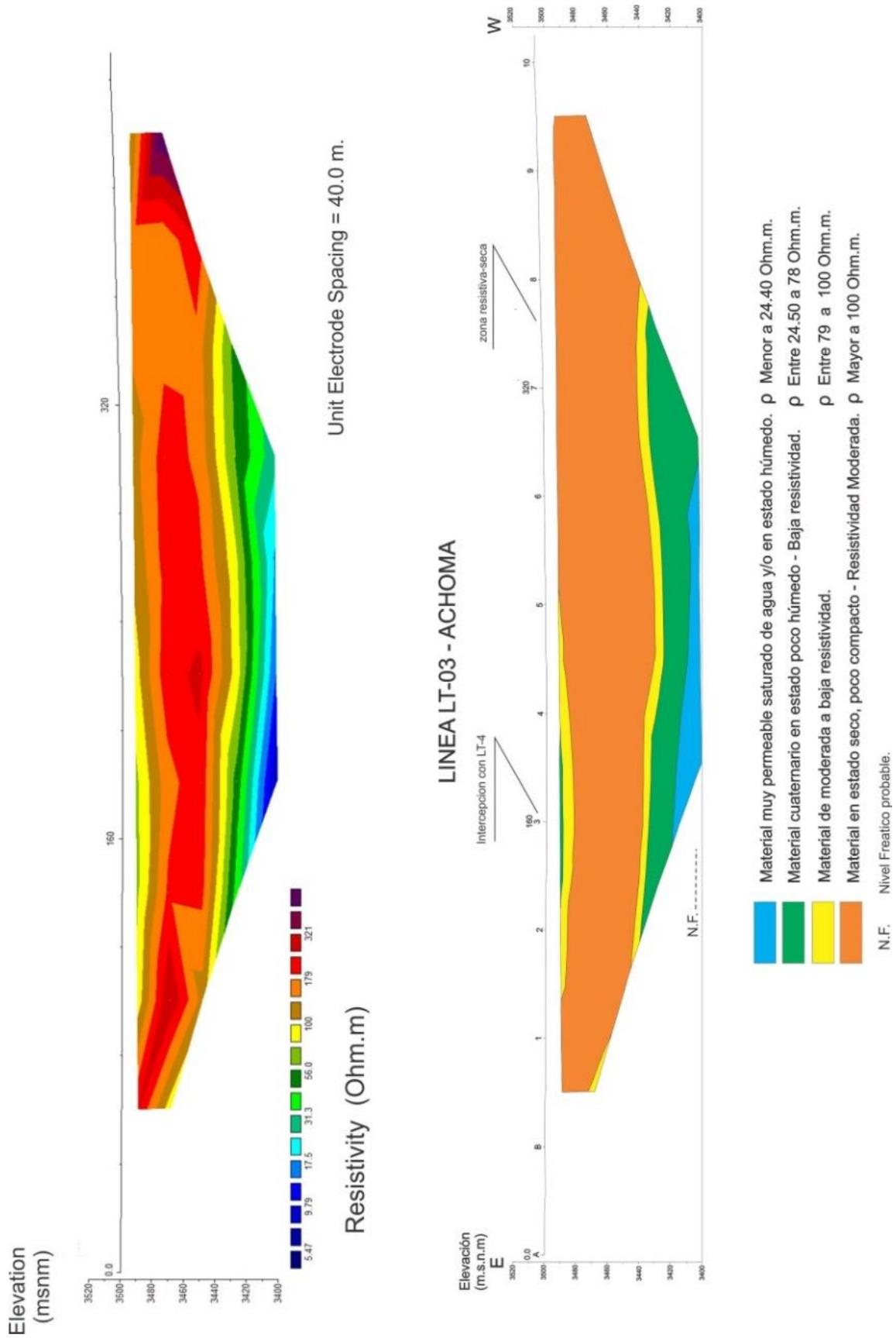


Figura 32. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-3

6.2.4. SECCIÓN LT-4

Se realizó una sección casi transversal al drenaje del río Colca con dirección NE a SW utilizando la componente dipolo-dipolo (D-D). La longitud total de la sección de 480 m, separando los electrodos cada 40 m. El tiempo de inyección de corriente fue de 1 segundo y un mínimo de 3 mediciones repetidas en cada punto con el fin de obtener una desviación estándar <3% para cada valor de resistividad aparente.

La tomografía da como resultado una profundidad máxima de penetración de modelado de 100 m. La figura 33, muestra una variación ligera entre los puntos 240 a 300 m muestra en superficie una delgada capa de resistividad moderada (poco compacto, seco). A partir de los 240 m hasta los 480 m se puede observar a 20 m de profundidad una zona de baja resistividad correspondiente a una zona conductiva a esta zona se le denomina "zona de mayor concentración de humedad y/ mayor contenido de agua". Sin embargo, el nivel freático se encuentra a más de 100 m de profundidad.

Las resistividades bajas están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o agua con valores menores a 24.4 Ohm-m, mientras las que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas la presencia de limos, arenas y fragmentos rocosos en estado poco húmedo, este rango de valores se manifiesta mayormente en casi todo el largo del perfil. El material cuaternario inconsolidado, con muy poca humedad y de moderada resistividad tienen valores de entre 79 a 100 Ohm-m y corresponden a las arenas, gravas y el material limo arenoso. Las resistividades moderadas a altas mayores a 100 Ohm-m, corresponden a material cuaternario en estado seco poco consolidado constituido de gravas, arenas, limos y fragmentos rocosos. Se puede observar también que el nivel freático podría encontrarse a una profundidad mayor a 100 m, como se puede observar en los perfiles transversales a la línea LT-1.

Figura 33 Arriba: El perfil de tomografía eléctrica muestra una "zona conductiva" entre 280 y 405 metros a una profundidad de aproximadamente 20 metros. Abajo: La interpretación geofísica indica que predomina material cuaternario poco húmedo y, a mayor profundidad, se encuentra el nivel freático con resistividades muy bajas, con una posible aportación hídrica hacia el suroeste.

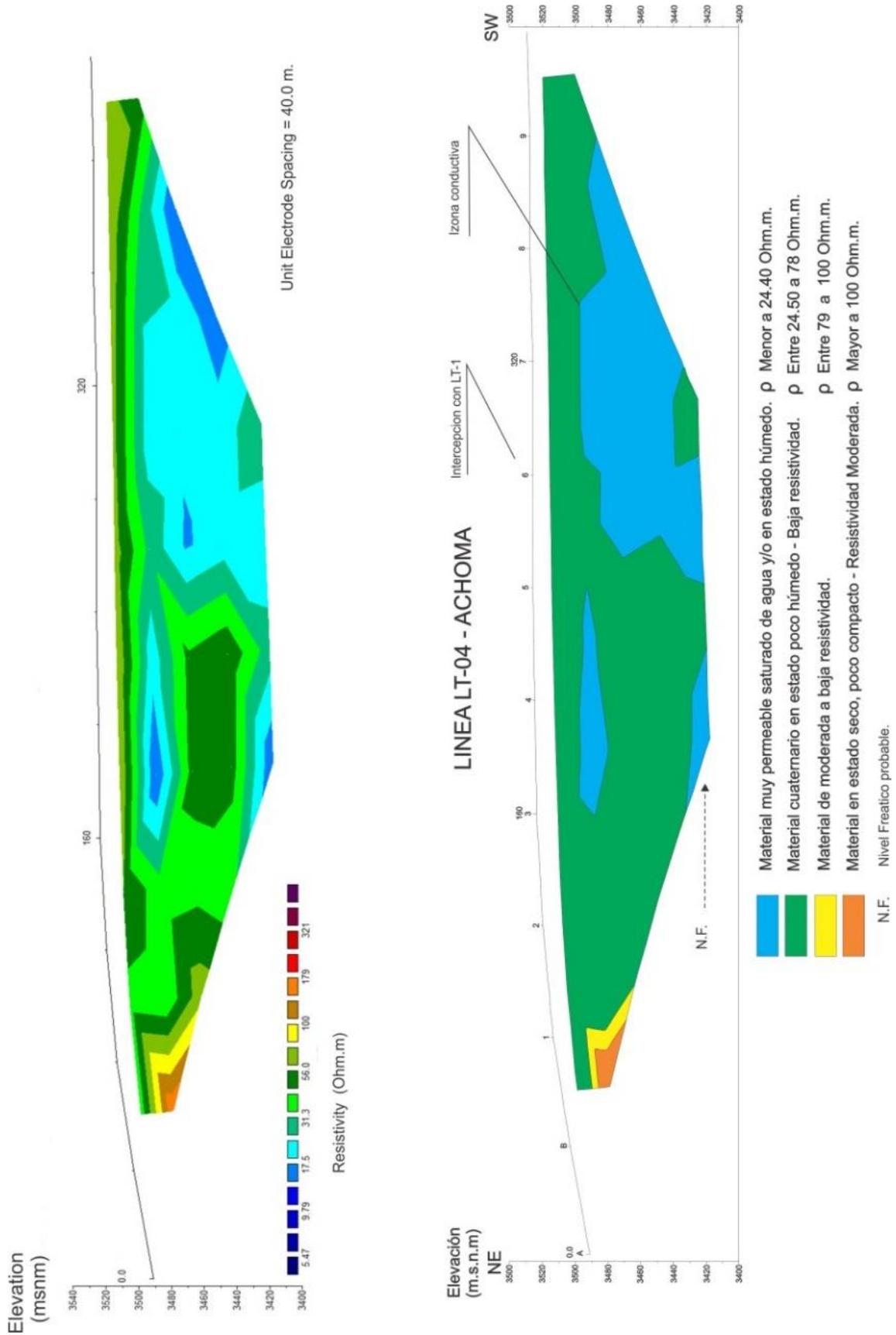


Figura 33. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-4

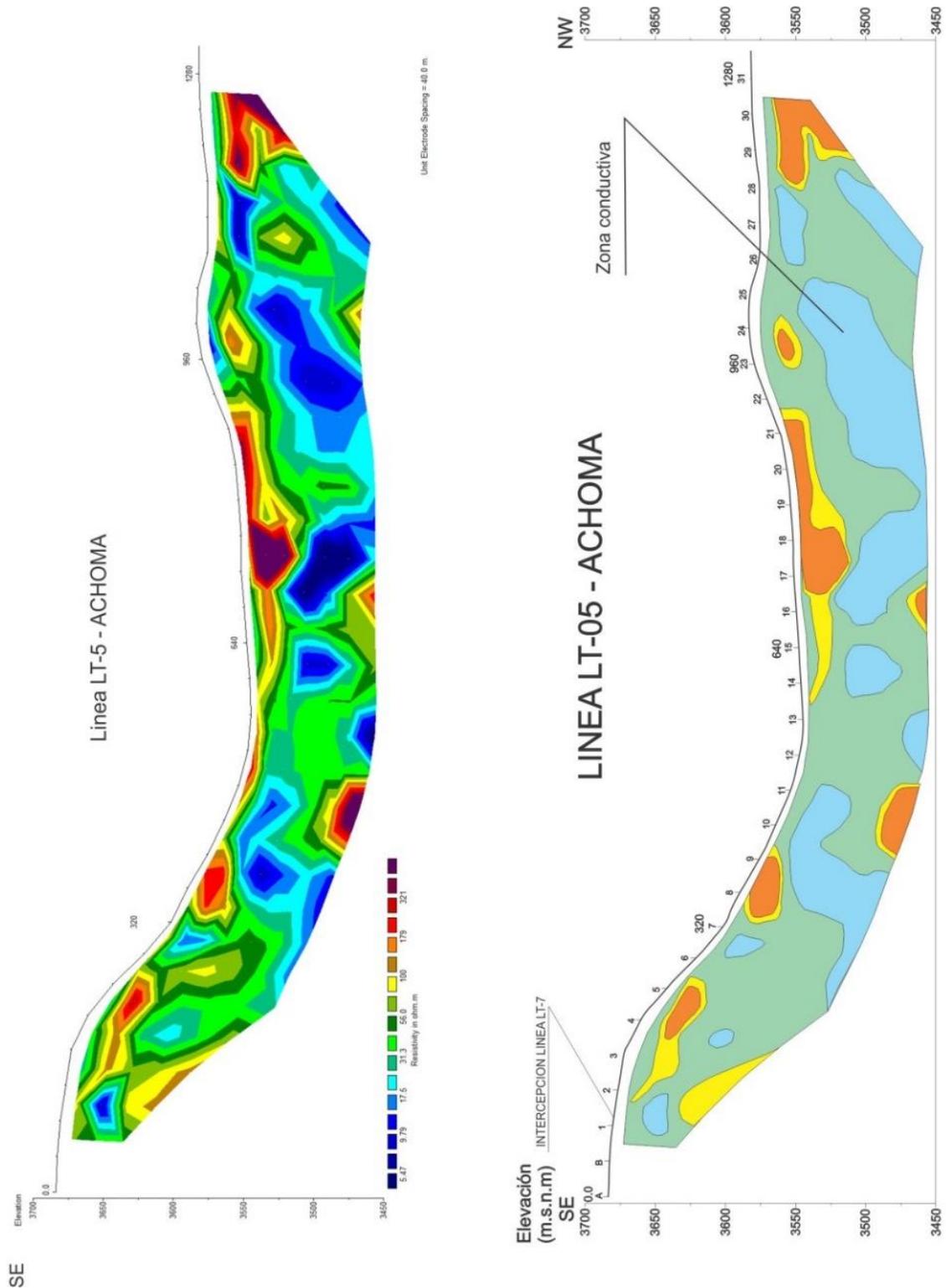
6.2.5. SECCIÓN LT-5

Se realizó una sección paralela al drenaje del río Colca con dirección SE a NW, utilizando la componente dipolo-dipolo (D-D). La longitud total de la sección de 1320 m, con separación de electrodos cada 40 m. El tiempo de inyección de corriente fue de 1 segundo y un mínimo de 3 mediciones repetidas en cada punto con el fin de obtener una desviación estándar <3% para cada valor de resistividad aparente.

La tomografía da como resultado una profundidad máxima de penetración de modelado de 100 m. La figura 34, muestra una variación lateral de la resistividad. Se ha determinado dos zonas muy conductivas de muy baja resistividad, la primera a partir de los 280 m hasta los 490 y la otra zona entre 650 a 1050 m con una geoforma irregular y a profundidades de entre 20 a 40 m, asimismo se muestran algunos focos anómalos conductivos de menor extensión cerrados y en algunos casos abiertos a mayor profundidad.

Las resistividades bajas están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o agua con valores menores a 24.4 Ohm-m, mientras que las resistividades bajas que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas a la presencia de material conductivo (fragmentos rocosos), en estado poco húmedo. El material de moderada a baja resistividad tiene valores de entre 79 a 100 Ohm-m y están circundando a las zonas más resistivas. Las resistividades moderadas a altas mayores a 100 Ohm-m, corresponden a material estado seco y poco compacto. (Figura 34). Se puede observar que a lo largo de todo el perfil se presentan de forma puntual cinco halos de profundidades someras y dos a profundidades mayores a 60 m.

Figura 34 Arriba: El perfil de tomografía eléctrica muestra dos "zonas conductivas" entre 280 y 490 m y entre 650 y 1050 m, a profundidades de 20 a 50 m. Abajo: La interpretación geofísica indica que el material de baja resistividad y poco húmedo prevalece a lo largo de todo el perfil, con una cobertura delgada.



LEYENDA

- Material muy permeable saturado de agua y/o en estado húmedo. ρ Menor a 24.40 Ohm.m.
- Material cuaternario en estado poco húmedo - Baja resistividad. ρ Entre 24.50 a 78 Ohm.m.
- Material de moderada a baja resistividad. ρ Entre 79 a 100 Ohm.m.
- Material en estado seco, poco compacto - Resistividad Moderada. ρ Mayor a 100 Ohm.m.

Figura 34. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-5.

6.2.6. SECCIÓN LT-6

Se realizó una sección paralela a la línea LT-5, con dirección SE a NW utilizando la componente dipolo-dipolo (D-D). La longitud total de la sección de 560 m, separando los electrodos cada 40 ms. El tiempo de inyección de corriente fue de 1 segundo y un mínimo de 3 mediciones repetidas en cada punto con el fin de obtener una desviación estándar <3% para cada valor de resistividad aparente.

La tomografía da como resultado una profundidad máxima de penetración de modelado de 100 m. La figura 35, muestra una variación lateral de la resistividad. A partir de los 360 m hasta los 460 m se puede observar una anomalía de baja resistividad que corresponde a un cuerpo conductivo con probable contenido de agua. Asimismo, se ha determinado una anomalía abierta hacia el sector noroeste de entre 650 m hasta el final de la línea entre 15 a 50 m de profundidad.

Las resistividades bajas están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o agua con valores menores a 24.4 Ohm-m, mientras que las resistividades bajas que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas la presencia de material conductivo (fragmentos rocosos), en estado poco húmedo.

El material de moderada a baja resistividad tiene valores de entre 79 a 100 Ohm-m y están circundando a las zonas más resistivas. Las resistividades moderadas a altas mayores a 100 Ohm-m, corresponden a material estado seco y poco compacto. (Figura 35). Se puede observar respecto a este último rango tres zonas bien marcadas entre 240 a 640 m. donde se acuña una bolsonada de material muy conductivo, en este perfil se intercepta la línea LT-7 en el punto 480.

Figura 35 Arriba: El perfil de tomografía eléctrica muestra "zonas de discontinuidades" de 240 a 600 m. Abajo: La interpretación geofísica, junto con la información geológica de superficie, revela una anomalía de baja resistividad entre 360 y 460 m, indicando un cuerpo conductivo con probable contenido de agua y/o mayor humedad.

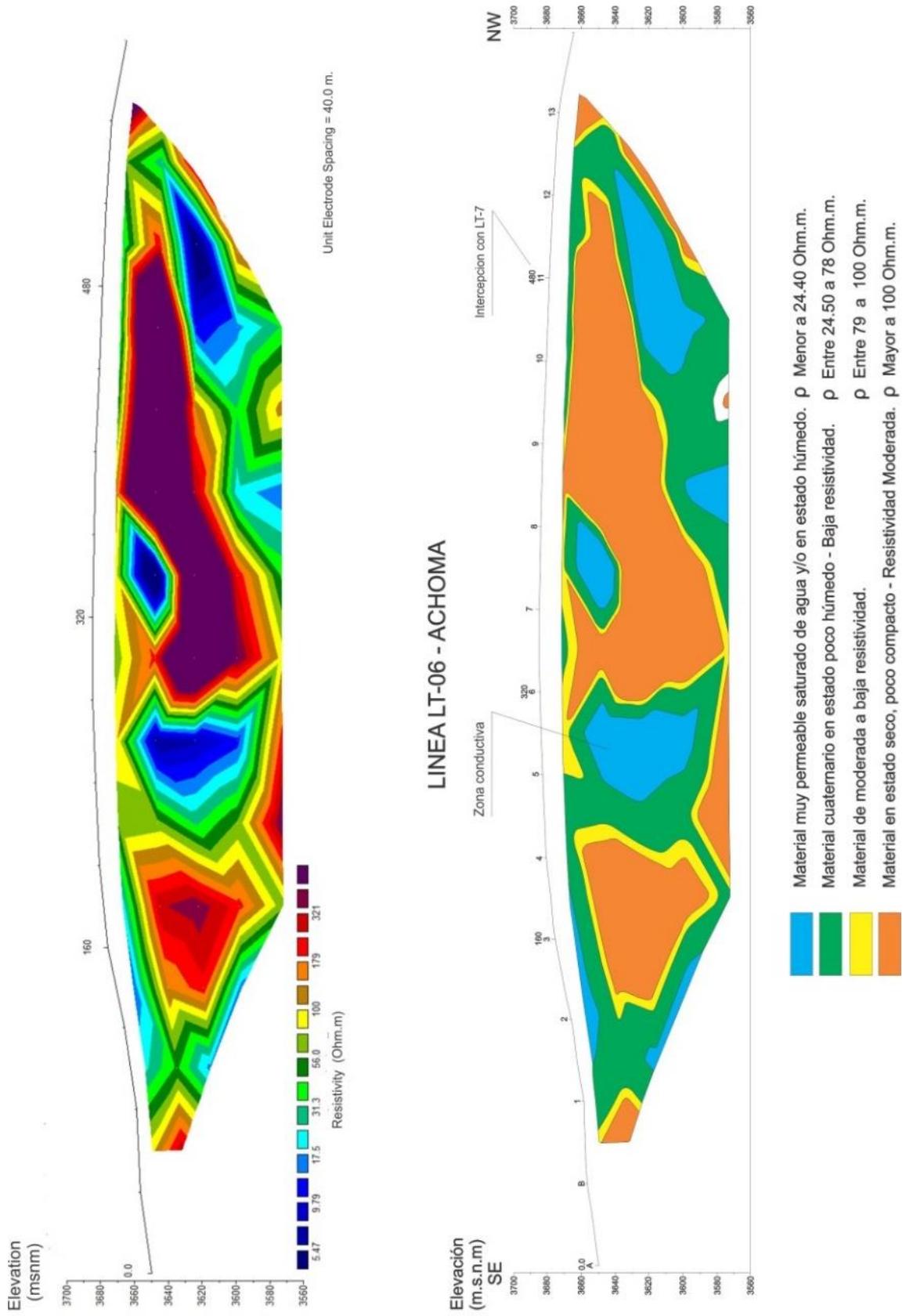


Figura 35. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-6.

6.2.7. SECCIÓN LT-7

Se realizó una sección transversal a las líneas LT-5 y LT-6, con dirección SW a NE utilizando la componente dipolo-dipolo (D-D). La longitud total de la sección de 1,480 m, separando los electrodos cada 40 m. El tiempo de inyección de corriente fue de 1 segundo y un mínimo de 3 mediciones repetidas en cada punto con el fin de obtener una desviación estándar <3% para cada valor de resistividad aparente.

La tomografía da como resultado una profundidad máxima de penetración de modelado de 100 m. La figura 36, muestra una variación lateral de la resistividad. A partir de los 80 m hasta los 440 m se puede observar una anomalía de baja resistividad que corresponde a un cuerpo conductivo con probable contenido de agua. Asimismo, se ha determinado otras anomalías intercaladas a lo largo de todo el perfil de buena conductividad a profundidades de entre 10 a 22 m hasta el final de la línea.

Las resistividades bajas están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o agua con valores menores a 24.4 Ohm-m, mientras que las resistividades bajas que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas la presencia de material conductivo (fragmentos rocosos) en estado poco húmedo. El material de moderada a baja resistividad tiene valores de entre 79 a 100 Ohm-m y están circundando a las zonas más resistivas. Las resistividades moderadas a altas mayores a 100 Ohm-m corresponden a material estado seco y poco compacto. (Figura 36). Se puede observar respecto a este último rango zonas bien marcadas entre 440 a 720 m. se muestra a profundidad somera, mientras que los otros a profundidades mayores a 18 m. en este perfil se intercepta la línea LT-9 en el punto 750 m y la línea LT-1 en 1440 m.

Figura 36 Arriba: El perfil de tomografía eléctrica muestra una amplia "zona conductiva" de muy baja resistividad entre 80 y 440 m. Abajo: La interpretación geofísica, junto con la información geológica de superficie, revela que las discontinuidades del material muy conductivo están en contacto con material de moderada resistividad a partir de 480 m, focalizándose estos últimos a profundidades de 10 a 22 m.

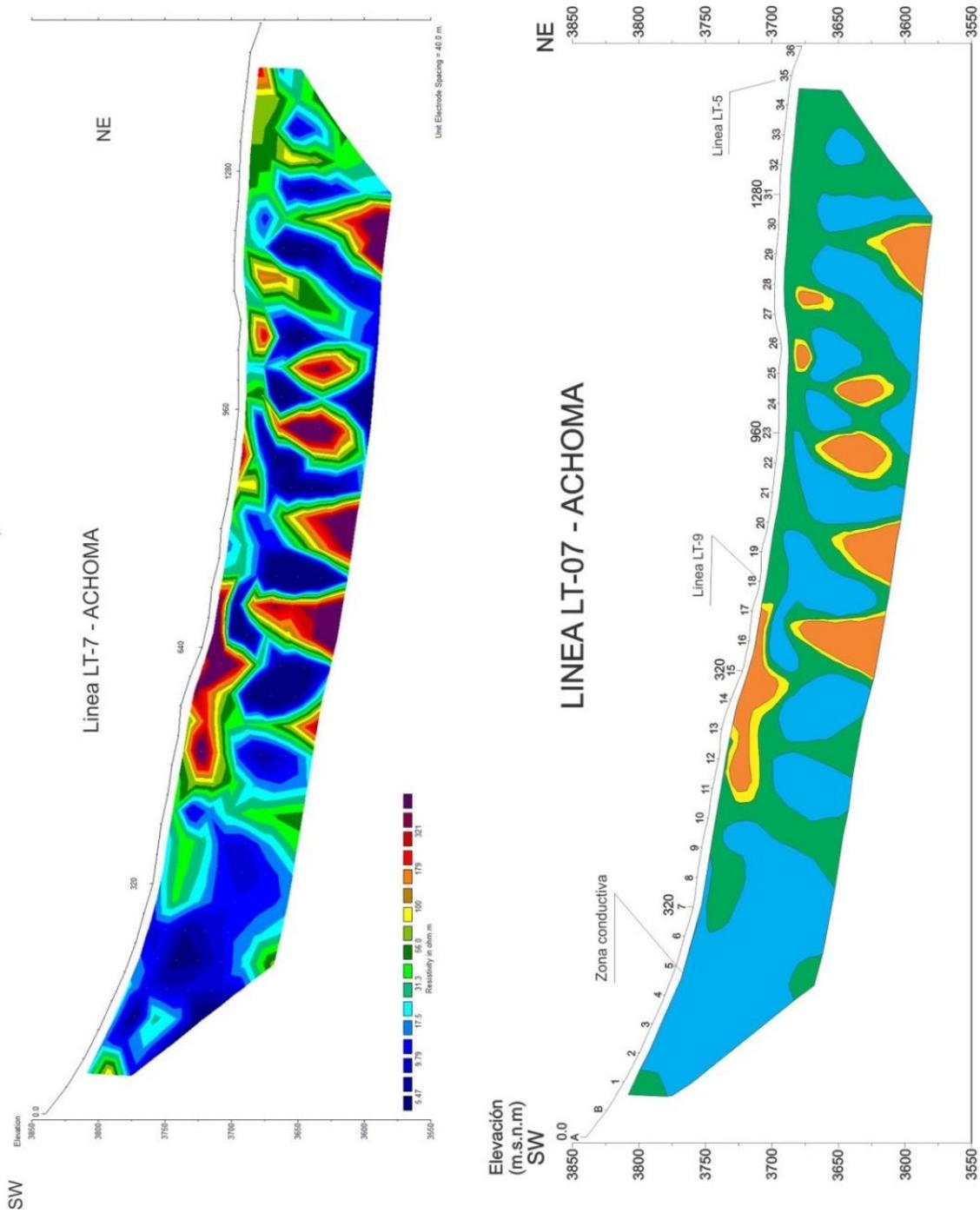


Figura 36. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-7

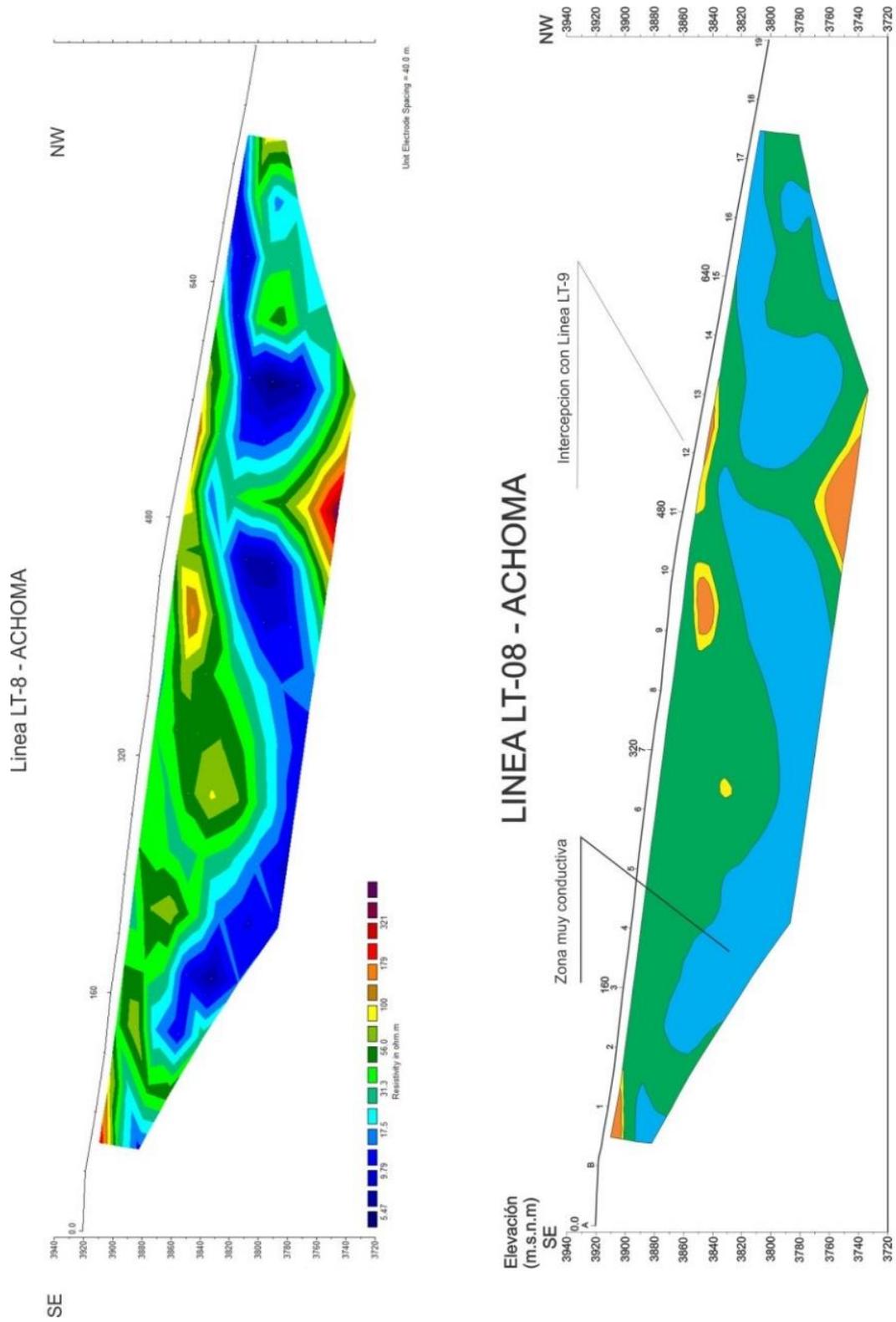
6.2.8. SECCIÓN LT-8

Se realizó una sección casi paralela a la línea LT-7, con dirección SE a NW utilizando la componente dipolo-dipolo (D-D). La longitud total de la sección de 800 m, separando los electrodos cada 40 m. El tiempo de inyección de corriente fue de 1 segundo y un mínimo de 3 mediciones repetidas en cada punto con el fin de obtener una desviación estándar <3% para cada valor de resistividad aparente.

La tomografía da como resultado una profundidad máxima de penetración de modelado de 100 m. La figura 37, muestra una variación lateral de la resistividad. Se ha determinado dos sectores uno en 120 m y otro en 520 m separando en tres zonas conductivas, como se puede observar son sectores de muy baja resistividad que corresponde a cuerpos conductivos con probable contenido de agua y/o humedad. Asimismo, se ha determinado dos anomalías abiertas hacia el sector sureste y noroeste entre 20 a 30 m de profundidad.

Las resistividades bajas están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o agua con valores menores a 24.4 Ohm-m, mientras que las resistividades bajas que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas la presencia de material conductivo (fragmentos rocosos) en estado poco húmedo. El material de moderada a baja resistividad tiene valores de entre 79 a 100 Ohm-m y están circundando a cuatro zonas más resistivas. Las resistividades moderadas a altas mayores a 100 Ohm-m, corresponden a material estado seco y poco compacto. (Figura 37). Se puede observar respecto a este último rango cuatro zonas bien marcadas y puntuales. En este perfil se intercepta la línea LT-9 en el punto 520.

Figura 37 Arriba: El perfil de tomografía eléctrica muestra resistividades con variación lateral y dos "zonas de discontinuidad" en los puntos 120 m y 520 m. Abajo: La interpretación geofísica, junto con la información geológica de superficie, indica que las discontinuidades de material de muy bajas resistividades están en contacto con material de baja resistividad y hay cuatro focos puntuales de material poco compacto y seco



LEYENDA

- Material muy permeable saturado de agua y/o en estado húmedo. ρ Menor a 24.40 Ohm.m.
- Material cuaternario en estado poco húmedo - Baja resistividad. ρ Entre 24.50 a 78 Ohm.m.
- Material de moderada a baja resistividad. ρ Entre 79 a 100 Ohm.m.
- Material en estado seco, poco compacto - Resistividad Moderada. ρ Mayor a 100 Ohm.m.

Figura 37. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-8.

6.2.9. SECCIÓN LT-9

Se realizó una sección perpendicular a las líneas LT-7 y a la línea LT-8, con dirección SE a NW utilizando la componente dipolo-dipolo (D-D). La longitud total de la sección de 560 m, separando los electrodos cada 40 m. El tiempo de inyección de corriente fue de 1 segundo y un mínimo de 3 mediciones repetidas en cada punto con el fin de obtener una desviación estándar <3% para cada valor de resistividad aparente.

La tomografía da como resultado una profundidad máxima de penetración de modelado de 100 m. La figura 38 muestra una variación lateral de la resistividad principal en el punto 560 donde encontramos un contacto geoelectrico y a partir de este punto hacia el sector NW los valores son moderados a altos y hacia el sector SE disminuyen dentro del mismo se presentan zonas muy puntuales de baja resistividad y se puede apreciar la presencia de dos sectores de muy baja resistividad entre los puntos de 80 a 330 m., de 470 a 570 m y yacen a profundidades de entre 10 a 35 m.

Las resistividades bajas están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o agua con valores menores a 24.4 Ohm-m, mientras que las resistividades bajas que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas la presencia de material conductivo (fragmentos rocosos) en estado poco húmedo. El material de moderada a baja resistividad tiene valores de entre 79 a 100 Ohm-m y están bordeando a zonas más resistivas. Las resistividades moderadas a altas mayores a 100 Ohm-m, corresponden a material estado seco y poco compacto. (Figura 38). Se puede observar respecto a este último rango de valores moderados y material en estado seco poco compacto (Zona resistiva), se presenta bien marcado a partir del punto 560 (contacto geoelectrico) hacia el sector NW del perfil. Esta línea tomográfica se intercepta con la línea LT-8 en el punto 80 y con la línea LT-7 en el punto 12 es decir en 530 m.

Figura 38 Arriba: El perfil de tomografía eléctrica muestra resistividades con variación lateral y una "zona de discontinuidad" en 560 m. Abajo: La interpretación geofísica, junto con la información geológica de superficie, revela que las discontinuidades de material de muy baja a baja resistividad están en contacto con material de moderada a alta resistividad, que se expande hacia el NW del perfil. Hacia el SE, el material es conductivo, con tres zonas muy conductivas que probablemente contienen agua.

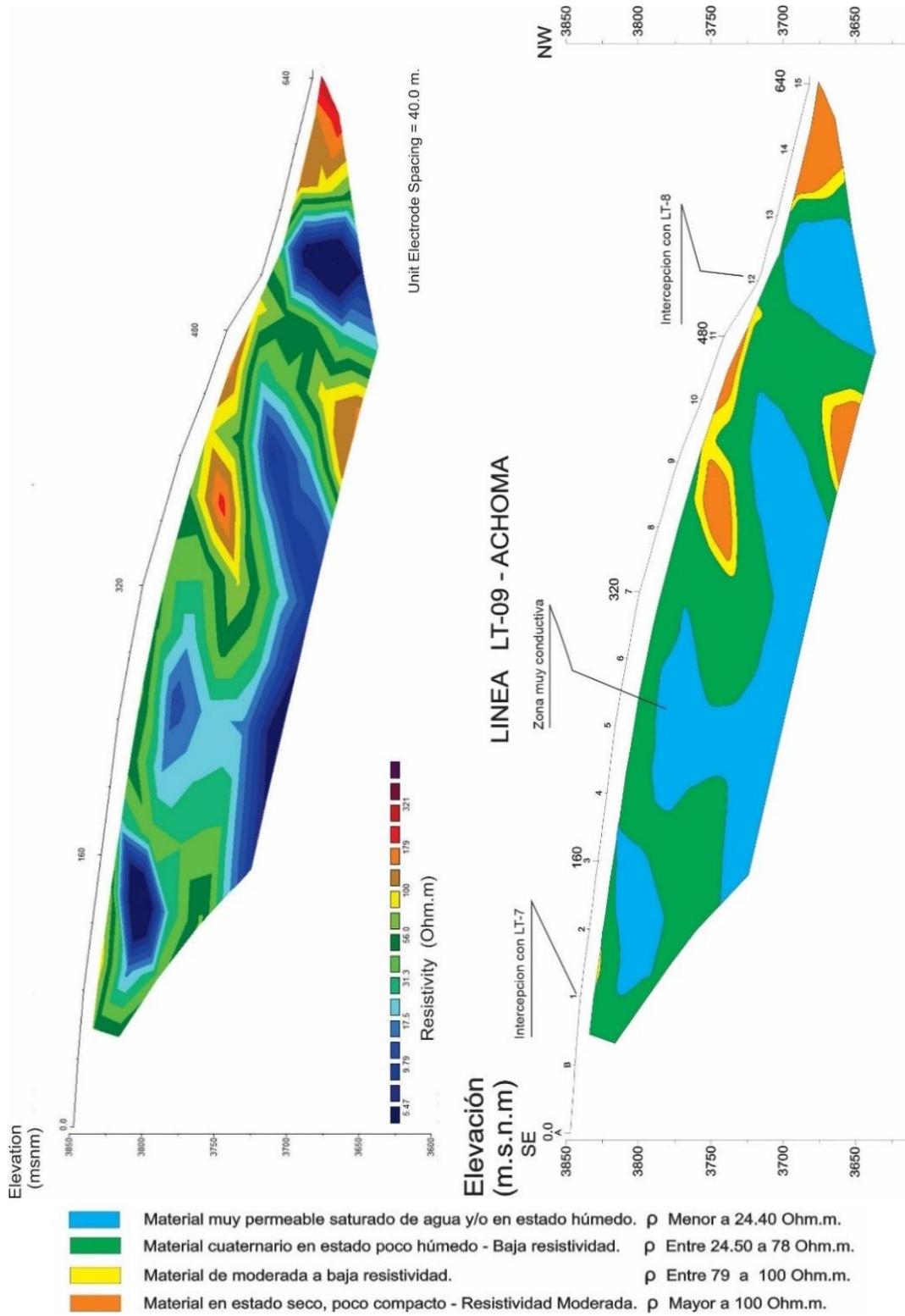


Figura 38. Configuración Dipolo-Dipolo línea LT-9.

7. CONCLUSIONES

1. En el reconocimiento hidrogeológico para evaluar el comportamiento de los flujos de aguas subterráneas en los alrededores del distrito de Achoma, se identificaron las siguientes unidades hidrogeológicas: **Acuíferos Fisurados Volcánico-Sedimentarios Barroso** (AFVS-b). y en las cercanías del deslizamiento, se encontraron los **Acuíferos Sedimentarios Colca** (AFS-col) y **acuíferos porosos no consolidados aluviales, fluviales, coluviales y glaciares fluviales** (APNC-al, APNC-fl, APNC-c y APNC-gfl). También se logró diferenciar los **Acuitardos Volcánico Sedimentario Tacaza** (ATVS-t) que predomina en la zona, mientras que el **Acuitardo Volcánico Barroso** (ATV-br1) tiene menos relevancia y se encuentra frente al deslizamiento de Achoma.
2. El fracturamiento intenso en rocas favorece en crear zonas débiles, y acelera la infiltración del agua, que puede ser responsable de la acumulación de alta presión hidrostática, que resulta en la disminución de las tensiones normales efectivas en la masa rocosa que da lugar a deslizamientos de tierra.
3. Los depósitos no consolidados, como conglomerados, capas de arena y limoarcillitas, se ven afectados por el riego por inundación y la falta de revestimiento en los canales, en áreas no controladas, lo que provoca infiltraciones y deterioro del suelo. Además de la topografía, una de las principales causas del deslizamiento, son las precipitaciones extraordinarias entre los meses de enero y marzo, por lo que la recarga de agua subterránea depende de la intensidad de la lluvia, la permeabilidad de las unidades hidrogeológicas y la pendiente del terreno que controla la infiltración de agua, lo que conduce a un aumento del peso de los materiales sueltos y meteorizados.
4. Se identificaron y catalogaron 44 fuentes de agua, incluyendo manantiales, manantiales captados y puntos de control, además se confirmó un alto número de filtraciones y evidencias de flujo de agua a lo largo de ciertas capas, lo que condiciona la aparición de manantiales y filtraciones.
5. Se muestrearon 33 fuentes para su respectivo análisis químico lo que permitió conocer las características hidroquímicas del agua subterránea, identificando valores bajos en TDS y bicarbonato (Ca-Na-HCO₃ y Ca-HCO₃), que indican un régimen hidrogeológico rápido que recibe una cantidad relativamente alta de agua de precipitación que fluye en los acuitardos y acuíferos. Además, el agua subterránea muestra un cambio sistemático en las facies hidroquímicas a lo largo de la dirección del flujo de agua subterránea desde la parte alta hacia la parte baja.
6. Se identificaron dos sistemas de flujo de agua subterránea: poco

profundo/local e intermedio-profundo. La caracterización química indica que los acuíferos superficiales a intermedios provocan el flujo de agua subterránea hacia la masa del deslizamiento, lo que influye en las fluctuaciones del nivel del agua subterránea a largo plazo debajo del deslizamiento y como consecuencia, en su estabilidad.

7. El levantamiento de datos geofísico de campo constituido de nueve Líneas de Tomografía Eléctrica indica que el área está cubierta por sedimentos no consolidados y rocas volcánicas muy descompuestas y débiles, susceptibles de deslizarse cuando se saturan, La heterogeneidad de los materiales geológicos y la presencia de capas impermeables pueden resultar en la acumulación de presión hidrostática en su interfaz, lo que puede desencadenar deslizamientos.
8. Se han identificado 4 horizontes geoelectricos: El primer horizonte corresponde a resistividades bajas que están relacionadas con material con granulometría fina y/o mayor contenido de humedad y/o agua con valores menores a 24.4 Ohm-m. El segundo horizonte con resistividades bajas que van entre 24.5 a 78 Ohm-m están relacionadas la presencia de material conductivo en estado poco húmedo. El tercer horizonte lo conforma el material de moderada a baja resistividad que tiene valores de entre 79 a 100 Ohm-m y están circundando a las zonas más resistivas. El cuarto horizonte con resistividades moderadas a altas con valores mayores a 100 Ohm-m, corresponden a material en estado seco y poco compacto.
9. Se presentan cuerpos y/o zonas muy conductivas, probablemente con contenido de agua y/o mayor grado de humedad. Estas zonas se presentan con mayor extensión en la parte alta del deslizamiento desde la parte inicial de la línea LT-7 y final de la línea LT-8 y continúan alternadamente hacia abajo. En la intercesión de las Líneas LT-8 y LT-9 hacia el sector norte, se ha determinado una zona muy conductiva que merece ser verificada.
10. Asimismo, se han encontrado zonas conductivas importantes en la parte final de la línea LT-4 y comienzo de la línea LT-2, que bien se puede correlacionar con zonas muy húmedas y/o con contenido de agua.
11. Por la distribución de las variaciones de resistividad encontradas en las líneas de tomografía eléctrica en la parte alta del deslizamiento, se asume que siguen dirección de sureste al noroeste, casi perpendicular al drenaje del río Colca, el mismo que se pueden relacionar al flujo de agua de regadío de agricultura del área colindante.
12. Del análisis de la interpretación de las líneas de tomografía eléctrica se ha determinado un posible nivel freático a más de 100 m de profundidad solo en la parte baja cerca del deslizamiento de Achoma en las líneas LT-1, LT-2, LT-3 y LT4 que merecen ser corroboradas.

8. RECOMENDACIONES

1. Realizar el revestimiento o impermeabilización de los canales del sistema de riego, ya que en sectores es evidente que el riego por inundación está generando mayor infiltración de agua, lo que afecta el terreno, siendo un factor desencadenante en los movimientos en masa, por sobresaturación.
2. Implementar otros métodos de riego con el riego por goteo o aspersión, a fin de minimizar la infiltración.
3. Contemplar la construcción de reservorios de agua, con el fin de tener un control de las dotaciones de agua a las zonas agrícolas para reducir la infiltración de agua.
4. Se recomienda que mediante prospecciones directas tales como: perforaciones con diamantina, calicatas, SPT, etc. A fin de tener un control litológico-geofísico, ya que los métodos geofísicos empleados corresponden a ensayos indirectos, basados en la emisión y recepción de ondas eléctricas que tiene un grado de aproximación aceptable, sin embargo, este grado de aproximación de las características de los estratos reportados, debe ser corroborado con información complementaria
5. Es fundamental implementar sistemas de monitoreo permanente del deslizamiento.



ING. JERSY MARIÑO SALAZAR
Director (e)
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET



Ing. Josemanuel F. Cárpio Fernández
CIP 170590

Anexo I

ID	Código	Este	Norte	Tipo de Fuente	HCO3-	Cl-	SO4=	Ca	K	Mg	Na
1	1349-281	213108	8260761	Manantial	15	0.4	2.5	2.1	1.8	0.6	2
2	1349-282	211899	8260908	Manantial	28	0.6	2.4	2.2	3.3	1	5
3	1349-285	207999	8258426	Manantial	26	0.7	4.2	3.4	3	1.5	3.2
4	1349-286	214163	8261037	Captación	15	0.4	2.2	2	1.7	0.5	1.9
5	1349-288	213935	8267613	Punto de control	220	210.2	81.1	35.6	13.8	8.1	169.2
6	1349-289	212808	8263848	Punto de control	75	85.9	20.1	17.3	4.2	3.9	58.2
7	1349-290	212808	8263848	Punto de control	75	86.1	19.9	16.9	4.1	3.8	57.7
8	1349-291	211343	8267756	Punto de control	210	183.9	84.6	40.3	14.1	9.2	154.6
9	1349-292	211590	8263925	Punto de control	78	86.8	20.3	17.9	4.2	3.9	61.3
10	1349-293	211645	8264281	Manantial	191	1.6	276.9	115.9	10.5	22.3	40.9
11	1349-294	211547	8264031	Manantial	1	21.4	1545.5	399.5	9.4	61.9	142.9
12	1349-295	211538	8264617	Punto de control	95	73.9	213.6	87.6	6.3	14.6	71.6
13	1349-298	212828	8266260	Manantial	206	65.2	43.2	84.7	9.3	16	21.3
14	1349-299	212758	8266346	Manantial	202	65	38.1	82.3	9.4	15.3	21.7
15	1349-300	212651	8266374	Manantial	197	65	41.8	75.6	9.2	14.7	20.5
16	1349-302	212570	8266266	Manantial	202	64.1	67.6	89.8	10.6	16.7	25.8
17	1349-305	212395	8266137	Manantial	234	101.7	227.4	149.3	16.2	40.6	35.1
18	1349-306	212314	8266058	Manantial	251	99.5	297.5	155.4	24.3	44.7	49.2
19	1349-308	212400	8265903	Manantial	204	100	263.2	125.7	15.5	35.9	64.5
20	1349-309	212254	8266456	Manantial	257	116.2	177	132.1	7	29.2	55.8
21	1349-310	212546	8266546	Punto de control	183	74.2	173.6	111.5	14	27.2	43.7
22	1349-311	212802	8266619	Punto de control	183	56.8	39.9	73.7	10.2	14.8	24.5
23	1349-312	212675	8266537	Manantial	236	71.9	47.9	88.7	11.8	17.2	25.6
24	1349-313	208541	8263024	Manantial	50	1.7	6.4	6.3	5.4	3.2	8.2
25	1349-315	208545	8263058	Manantial	50	1.6	6.4	5.9	5.1	3	7.9
26	1349-317	210636	8263040	Manantial	119	5.3	21.4	18.4	10	7.8	17.8
27	1349-318	211592	8263925	Punto de control	75	88.8	16.9	17.9	4.4	4.1	62.6
28	1349-286	214163	8261037	Captación	15	0.4	2.3	2	1.7	0.6	2.2
29	1349-282	211899	8260908	Manantial	28	0.6	2.5	2.2	3.5	1	5.2
30	1349-319	211924	8260953	Manantial	28	0.6	2.9	2.5	3.8	1.1	4.9
31	1349-309	212254	8266456	Manantial	262	124	176.7	127.2	7.1	29.8	53.5
32	1349-320	212207	8266474	Punto de control	140	100.3	104.6	67.9	8.5	15.8	63.8
33	1349-308	212400	8265903	Manantial	207	99.4	252.5	119.7	15.7	36.3	60.1

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar R., Manrique N., García B., (2018), Inspección geológica en la quebrada Sipina para la construcción de la Represa Carpalli. Región Arequipa, provincia Caylloma, distrito Achoma, Informe Técnico; N° A6793, INGEMMET.
- Albalagan R. (1992). Terrain evaluation and landslide hazard zonation for environmental regeneration and land use planning in mountainous terrain. Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, USA. pp 861-871.
- Anderson, M. and Richards, K. (1987), Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology.
- Araujo G., (2017), Área de influencia del deslizamiento de Siguas y geodinámica del Valle. Región Arequipa, provincia Caylloma y Arequipa, distrito Majes y San Juan de Siguas. Informe Técnico; N° A6772, INGEMMET.
- Arias, F. (2006 a). El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica (5ª ed.). Caracas: Episteme.
- Alva, J. (1994). Análisis de estabilidad de taludes. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú.
- Benavente C.; Delgado G.; García B.; Aguirre E. (2017). Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica.
- Carpio, J.; Machaca, D. & Quispe, B. (2021) - Estudio hidrogeológico de la intercuenca Ramis (0179). INGEMMET, Boletín, Serie H: Hidrogeología, 9, 139 p., 2 mapas.
- Carpio, J. & Peña, F. (2020) - Hidrogeología de la cuenca del río Tambo (1318) regiones Arequipa, Moquegua y Puno. INGEMMET, Boletín, Serie H: Hidrogeología, 7, 288 p., 2 mapas.
- Cerpa L. & Paniagua M. (2009). Carta Geológica del Perú: Mapa Geológico del Cuadrángulo de Chivay, Hoja 32-s, Cuadrante I, escala 1:50 000. Mapa publicado por Ingemmet.
- Corominas I., Dulcet, J. (2004). Ingeniería del terreno. España: Arias Montano.
- Cruden D., & Varnes D. (1996). Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides: investigation and mitigation (special report). Whashington: National Research Council, Transportation and Research Board.
- FCIHS (2009) – Hidrogeología. Comisión docente del Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona España. 768 p.
- García, W. (1966), Deslizamiento en el cerro Quehuisa en los distritos de Lari y Madrigal (Provincia de Caylloma, departamento de Arequipa), Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional; N° 13, INGEMMET.
- INGEMMET (2020) – Deslizamiento de Achoma ocurrido el 18 de junio del 2020 Informe Técnico N° A7066-INGEMMET. Lima. 29 p.
- INGEMMET (2021)- Evaluación de peligros geológicos de movimientos en masa en los

- distritos de Achoma (Sector Collpane), Yanque (Sector Chacapi9, e Ichupamapa (Sectores de Anasaya, Urinsaya y Linde), Lima 47 p.
- IRIS INSTRUMENTS (2006). "Resistivity Imaging Magnetic Resonance, Induced Polarization, Electromagnetics, Data Loggers" en Catálogo Environmet engineering groundwater mineral exploration. Orleans. France. p 45.
- Leroueil, S., & Locat, J. (1997). Landslide stages and risk assessment issues in sensitive clays and other soft sediments. Rotterdam: Cruden & Fell.
- Martínez, E.; Martínez, P. & Castaño, S. (2006). Fundamentos de Hidrogeología. Madrid, España. Mundi-Prensa, 81 p. 284 p.
- Martínez, M. (2015). La construcción del conocimiento científico del riesgo de desastre: epistemología, teorías y metodología de los estudios desde una perspectiva geográfica. Tesis de Doctoral. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bogotá, D.C.
- Medina, J. (1991). Fenómenos geodinámicos: estudio y medidas de tratamiento. Lima: Soluciones Prácticas.
- Meinzer, O. (1923) - The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 489, 321 p
- Meinzer, O. (1923) - Outline of groundwater Hydrology, with definitions. In USGS. Water Supply Paper, 489 p.
- Moslyn, G., & Small, J. (1987). Methods of stability analysis. En G. R. Moslyn, & J. C. Small, Soil Slope Instability and Stabilisation (págs. 71-120). Rotterdam: Walker & Fell.
- PALACIOS, O.; DE LA CRUZ, O; DE LA CRUZ, N. (1993). "Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al oeste del Lago Titicaca-Sur del Perú – Proyecto Integrado del Sur. Boletín N° 42 –Serie "A" – Carta Geológica Nacional del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Diciembre 1993. Lima-Perú.
- Santamaría Peña, J., & Sanz Méndez, T. (2011). Fundamentos de la fotogrametría. Universidad de la Rioja.
- Segura, B., & Obamdo. (2011), Susceptibilidad al Deslizamiento en el Corredor Siquirres-Turrialba. Revista Geológica de América Central
- Skinner, B., & Porter, S. (1992). The dynamic earth: an introduction to physical geology. New York: John Wiley & Sons.
- Suárez, D. (1998). Deslizamientos y estabilidad en taludes en zonas tropicales. Colombia: Universidad Santa Fé.
- Svetlana M., (2005) Universidad Politécnica de Madrid; artículo de investigación de Tesis Doctoral, "Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada"
- Vílchez M., (2010), Inspección de Peligros Geológicos en los Sectores de Santa Bárbara y Potocchi, Distrito, Provincia y Región de Huancavelica. Informe Técnico. Área geología Ambiental del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET.