

TESIS DE GRADO

TESISTA:

ROSMAR ANTONIO VILLEGAS MENDOZA

TITULO:

**“ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL BOFEDAL HUAYCHUTA
EN EL VOLCÁN SAJAMA”**

TESIS DE GRADO

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL BOFEDAL ACHUTA EN EL VOLCÁN SAJAMA

AGRADECIMIENTOS.....	2
CAPITULO I.....	3
GENERALIDADE.....	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 UBICACIÓN Y ACCESO.....	4
1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	5
CAPITULO II.....	10
GEOLOGÍA REGIONAL.....	10
2.1 INTRODUCCIÓN.....	10
2.2 ESTRATIGRAFÍA Y MAGMATISMO.....	10
2.3 GEOMORFOLOGÍA.....	12
2.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	13
2.5 ELABORACIÓN DEL MAPA FOTOGEOLOGICO REGIONAL.....	14
CAPITULO III.....	21
GEOLOGIA LOCAL.....	21
3.1 GEOLOGIA DEL VOLCAN SAJAMA.....	21
3.2 UNIDADES LITOLÓGICAS.....	23
3.3 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS.....	27
3.4 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	43

CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA.....44

4.1 DELIMITACION 3D DEL ACUIFERO.....44

4.2 PROSPECCION GEOFISICA.....47

4.3 ELABORACION DEL MAPA PIEZOMETRICO.....63

CAPITULO V.....72

MAPEO GEOQUIMICO- HIDROGEOLOGICO Y MUESTREO DE CALIDAD DE AGUAS...72

5.1 MAPEO GEOQUIMICO- HIDROGEOLOGICO.....72

5.2 MUESTREO DE CALIDAD DE AGUAS.....77

CAPITULO VI.....97

CONCLUSIONES.....97

ANEXOS.....100

BIBLIOGRAFIA.....101

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a mi madre por su amor y apoyo incondicional, a la ONG AGUA SUSTENTABLE por brindarme la oportunidad de ser parte de este proyecto y a la UMSA por ser la fuente de conocimientos.

GENERALIDADES

1.1 Introducción

El presente estudio tiene el carácter de dirigido y está incluido en el proyecto mayor: **“ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN COMUNIDADES ANDINAS BOLIVIANAS QUE DEPENDEN DE GLACIARES TROPICALES”** que fue creado y es ejecutado por la ONG “Agua Sustentable”, la cual se constituye como centro de apoyo a la gestión sustentable del agua y medio ambiente en Bolivia.

Sus objetivos son el contribuir a la reducción de los impactos del cambio climático en Bolivia de manera participativa y sostenible, en el marco del fortalecimiento del Estado y del reconocimiento de los derechos económicos, sociales, culturales y ambientales de mujeres y hombres bolivianos e implementar una estrategia participativa de adaptación a los efectos del cambio climático, con énfasis en la retracción de los glaciares tropicales de Bolivia en el Parque Nacional Sajama y Mururata y los glaciares del Illimani, que tienen un impacto en los municipios de Turco, Curahuara de Carangas y Palca, promoviendo la sostenibilidad de los sistemas productivos, sistemas de agua potable y la sostenibilidad del medio ambiente, basándose en la generación de conocimiento, el diseño y/o ejecución de proyectos de adaptación específicos, y la construcción de políticas públicas a nivel local y nacional.

El proyecto será desarrollado en dos diferentes ecosistemas de las tierras altas asegurando que el trabajo de campo y las actividades proporcionen una amplia visión sobre la variabilidad de Los Andes. Los resultados de trabajos anteriores serán combinados con nuevas evaluaciones, junto con alianzas estratégicas para producir un resultado completo. En ambas zonas, existe una alianza con la **Universidad Mayor de San Andrés** (actor clave en la investigación sobre el cambio climático en Bolivia) para apoyar a los asistentes universitarios de investigación a desarrollar su trabajo de posgrado dentro del proyecto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar el estudio hidrogeológico del bofedal Achuta ubicado en la falda sudoeste del volcán Sajama.

1.2.2 Objetivos específicos

- Conocer la geología física, geomorfología, estratigrafía, geología estructural de la zona de estudio y sus implicaciones en la hidrogeología.
- Conocer las características hidrogeológicas del bofedal Achuta.
- Conocer el régimen hidrogeológico de la zona de estudio.

1.3 Ubicación y acceso

1.3.1 Ubicación

El área de estudio está ubicada al NE de la población de Sajama. Pertenece al departamento de Oruro, la provincia Sajama, en el municipio de Sajama.

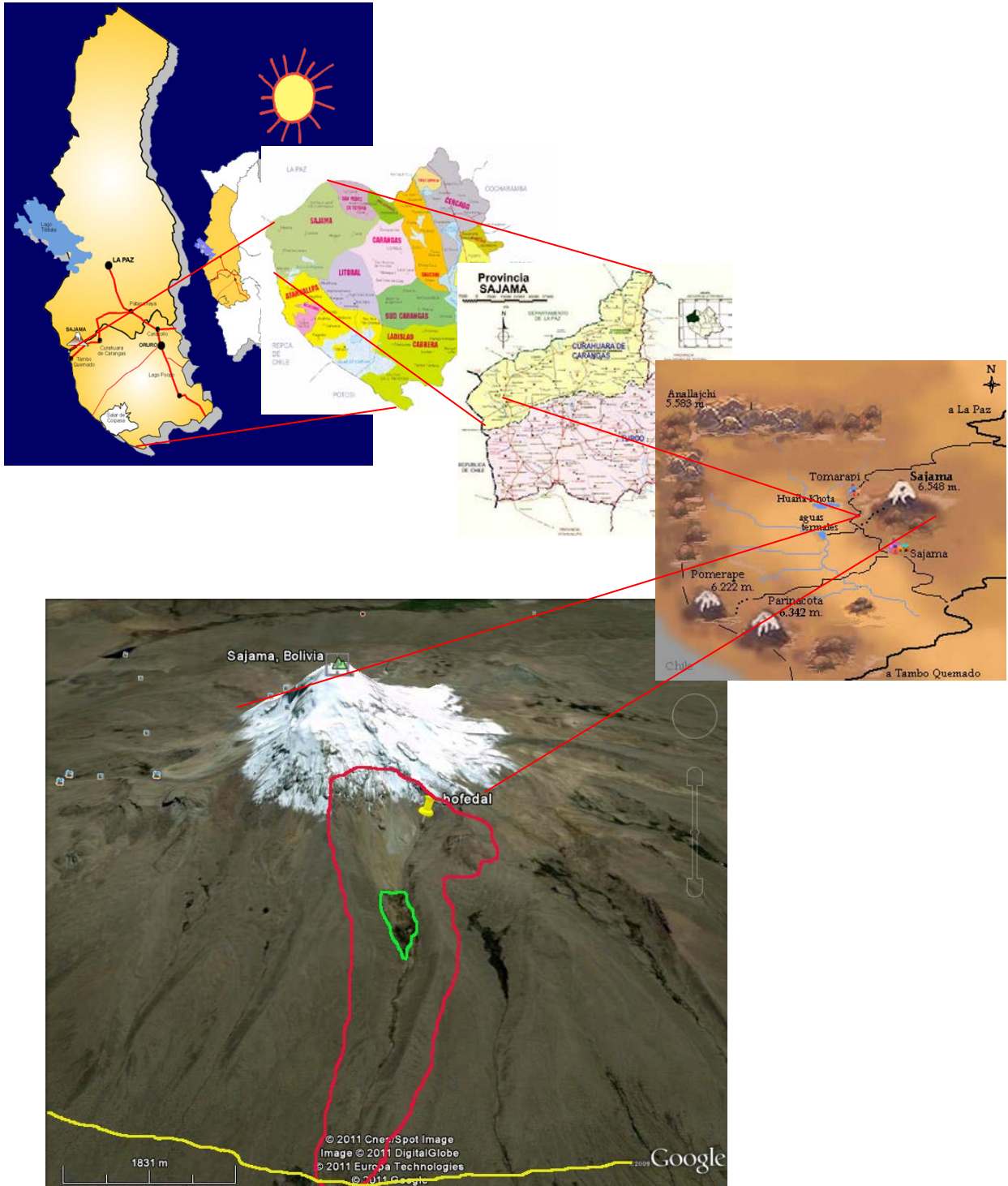
El área de estudio está ubicada en el valle glaciar Achuta en las faldas del nevado Sajama, donde se ubica el bofedal del mismo nombre. Está limitado al norte por el nevado Sajama, al noreste por el cerro Tiraguagua, al este por el cerro Achuta y el cerro Jasasuni, al sur por la Pampa Tinalchaka y al oeste por la loma Jachcha Khara Hulchinca.

El área de estudio abarca las hojas topográficas Nevado Sajama (5839) y una pequeña sección de la hoja 5838

1.3.2 Accesibilidad

Para acceder a la población de Sajama se utiliza la carretera La Paz – Oruro. En la población de Patacamaya distante a unos 190 kilómetros de Sajama aproximadamente, se debe tomar un desvío que es la carretera hacia la población de Tambo Quemado zona fronteriza con la República de Chile. En este camino carretero existe otro desvío que conduce al municipio de Sajama, cabe indicar que existen varias vías de acceso a la población de Sajama. Para llegar al área de estudio se debe desviar hacia una senda de difícil acceso hasta llegar al bofedal Achuta donde se ubica el área de estudio, distante a unos 14 kilómetros a partir de la carretera principal.

MAPA DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



	Limite del área de tesis
	Limite del bofedal
	Vía de acceso

1.4 Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos y alcances esperados, se siguió la siguiente metodología:

- **Selección y procesamiento de bibliografía**
 - Una parte esencial de éste proyecto fue el estudio y la evaluación de la información geológica publicada o inédita disponible.
 - Para cumplir satisfactoriamente éste cometido se realizó previamente la revisión exhaustiva de la información geológica de trabajos anteriores y de esta forma facilitar la interpretación del área de estudio a partir de datos de campo.
- **Interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales del área de estudio.**
 - En el caso de la interpretación fotogeológica se contó con el material necesario, que consistió de fotografías aéreas e imagen satelitales de la zona a estudiar.
 - El trabajo que se realizó fue la fotointerpretación, que consiste en la descripción de la geología e hidrografía observada aprovechando la enorme ventaja que ofrecen las imágenes de registrar con la mayor exactitud y precisión todos los detalles geológicos e hidrográficos.
 - Sabiendo que este estudio es de carácter hidrológico y de análisis geológico se realizó la fotointerpretación con énfasis en la:
 - ❖ Separación de áreas cubiertas y afloradas
 - ❖ Delimitación de fotounidades geológicas
 - ❖ Delimitación de rasgos geomorfológicos
 - ❖ Delimitación de rasgos estructurales: rumbo e inclinación de estratos, pliegues, fallas, diaclasas, lineamientos, etc
 - ❖ Interpretación de diseño de drenajes a partir de la ubicación de ríos principales y secundarios

- Y para finalizar se revisó la información proveniente de trabajos anteriores y se separó de los datos aportados por la fotointerpretación, con el fin de proporcionar una información renovada. Fue un trabajo geológico donde coexistieron los datos de campo con la información fotointerpretada. Como resultado de éste trabajo se obtuvieron los mapas fotogeológico regional de Sajama y geológico de Achuta (área de estudio).
- **Mapeo geológico**
 - Descripción geológica

El mapeo geológico o trabajo de campo consiste en el contacto físico del observador con el terreno, e implica la observación, descripción e interpretación de la geología en general.

 - ❖ Descripción de las características generales de los afloramientos se realizó mediante la siguiente metodología:
 - ✚ Dimensiones, orientación y su estado (rocas intemperizadas o invadidas por la vegetación)
 - ✚ La descripción sistemática de las rocas con la ayuda de mapas, diagramas, perfiles, etc. Junto con la escala y la orientación estará la descripción de las características acerca del aspecto general, tales como: color, cohesión, composición mineral, textura, etc.
 - ❖ Descripción del aspecto y relación entre rocas diferentes con la ayuda del siguiente conjunto de actividades:
 - ✚ Identificación y descripción de secuencias estratigráficas, espesor de los diferentes conjuntos, relación de los conjuntos estratigráficos con respecto a la estructura y edad aproximada: la delimitación de contactos geológicos.
 - ❖ En síntesis, durante el mapeo geológico, se determinó la naturaleza de las rocas presentes, sus relaciones mutuas, la sucesión geológica, y la distribución de formaciones o geoformas reconocidas.
 - ❖ Los documentos utilizados para almacenar esta información fueron la libreta de campo y los mapas en borrador, estos fueron constantemente actualizados con la adquisición de nuevos datos.

- **Mapeo geomorfológico**

- ❖ En síntesis se procedió con la misma metodología utilizada en el mapeo geológico, usando como la base la descripción, delimitación e interpretación de las geoformas observadas.
- ❖ Como producto final de este trabajo se realizó un mapa geomorfológico y se relacionó las geoformas descritas con la potencial ocurrencia de agua subterránea.

- **Mapeo estructural**

- ❖ El mapeo estructural consiste en realizar las mediciones de inclinación y dirección de flujo de las coladas de lava, clasificación de estructuras geológicas, medición de estrías y direcciones de movimiento, etc.
- ❖ Se estudiaron las fracturas y diaclasas, tomando en cuenta si son diaclasas abiertas o cerradas, la longitud y profundidad de las fracturas/diaclasas, su densidad por metro cuadrado, sus rumbos y buzamientos y si se entrecortan o son paralelas y se analizará su relación con la formación de acuíferos.

- **Materiales utilizados para el mapeo geológico**

- ❖ Los materiales utilizados para esta tarea fueron los convencionales:
 -  Cateador
 -  Brújula
 -  Libreta de campo
 -  Mapa o Base topográfica y Mapa de campo (borrador)
 -  GPS
 -  Cámara digital

- **Caracterización hidrogeológica**

- Delimitación 3D del acuífero

- ❖ Se realizó la delimitación 3D del acuífero, con ayuda de la construcción de perfiles en 2D obtenidos a partir de la prospección geofísica. Otras herramientas indispensables fueron las bases topográfica y geológica del área de estudios usados como referencia, la observación de fotografías aéreas e imágenes satelitales y la interpretación realizada en campo y gabinete.

- ❖ A través de la observación de imágenes satelitales y fotografías aéreas, y a partir de una interpretación geológica en campo, se ubicaron los puntos de sondeo geoeléctrico, y se los dispuso en líneas imaginarias de tal forma que se puedan generar secciones 2D del acuífero para cada línea.

➤ **Prospección geofísica**

- ❖ El método utilizado en este estudio geofísico, es aquel relacionado a la medición de diferentes resistividades a partir del sistema de Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.), método denominado también como Geoeléctrico, con un dispositivo de cuatro electrodos dispuestos en forma lineal.
- ❖ Un sondeo eléctrico consiste en establecer una curva de variación de las resistividades aparentes con la profundidad en un terreno o suelo, a través de medidas en superficie realizados con ayuda de un dispositivo de cuatro electrodos denominados como AMNB.
- ❖ Este método permitió identificar las capas y/o niveles y la litología que los constituye. Además se dio a conocer la variación de la profundidad del acuífero a lo largo del bofedal y se pudo estimar las variaciones en su forma. Y posteriormente generar en gabinete un diseño 3D con la ayuda del programa de software AUTOCAD.

- **Elaboración del mapa piezométrico**

➤ **Conceptos básicos**

- ❖ Para la elaboración de los mapas piezométricos se debe considerar que una superficie piezométrica es el lugar geométrico que recoge todos los niveles piezométricos de un acuífero.
- ❖ La condición necesaria y suficiente para que un acuífero tenga una única superficie piezométrica es que el flujo sea horizontal, o lo que es lo mismo que la "h" o potencial hidráulico no varíe con la profundidad. Si el flujo no es horizontal, entonces con la profundidad varía la h, luego hay infinitos mapas de la superficie piezométrica.
- ❖ El lugar geométrico de los puntos de un acuífero que tienen idéntico potencial hidráulico (igual h) o energía, se denominan isopiezas. Por lo tanto, una isopieza es una equipotencial.

- En el campo (inventario de puntos de agua)
 - ❖ Esta es una labor fundamental que consistió en recorrer el terreno recogiendo datos de pozos instalados. Fue muy importante la correcta medición "*in situ*" del nivel del agua en el pozo y anotar todas las características del pozo así como las circunstancias de la medición (niveles estáticos o dinámicos o congelamiento).
 - ❖ La medición de los niveles piezométricos se llevo a cabo en lapsos de cada 15 y 30 días. Para cada punto obtenido se elaboró un cuadro resumen o tablas donde se expresó la localización de cada punto de agua, la medición de la altura piezométrica, además de un registro de las principales características y anomalías observadas. Estas tablas sirvieron para el posterior inventario de datos y diseño final del correspondiente mapa piezométrico.
 - ❖ Adicionalmente, se hizo la nivelación del terreno con la ayuda del equipo de estación total para así obtener las alturas reales del terreno.
 - ❖ Simultáneamente se obtuvieron muestras de agua para posteriores análisis químicos así como la medición de parámetros físico-químicos del agua (temperatura, pH, conductividad, TDS y alcalinidad), esta información será ampliada en el apartado de muestreo geoquímico y calidad de aguas.

- En gabinete (confección del mapa de isopiezas)
 - ❖ Con el inventario se obtuvo el valor absoluto del nivel del agua en cada piezómetro por lo que se está en condiciones de elaborar el mapa de isopiezas.
 - ❖ El trazado de las isopiezas fue similar a como se trazan las curvas de nivel a partir de valores de la topografía y hay que tener en cuenta que las isopiezas son perpendiculares a los bordes impermeables, y paralelas a los permeables o de nivel constante. Las líneas de flujo se trazan perpendiculares a las líneas equipotenciales o isopiezas. Por lo tanto las curvas de nivel ayudarán a trazar las líneas equipotenciales aún en lugares donde no hay datos, inflexionando y curvando las isopiezas todo lo que haga falta.

- **Mapeo geoquímico hidrogeológico y muestreo de calidad de aguas**

- Conceptos básicos

- ❖ Requirió un cierto conocimiento previo del acuífero y de las interacciones agua-medio desde el punto de vista químico e isotópico.
- ❖ La incorporación de los constituyentes al agua es debida a su elevado poder disolvente y a sus propiedades de combinación. Esta disolución comienza incluso antes de que se incorpore al sistema de flujo subterráneo propio de cada acuífero. Los factores que influyen en la disolución de sales solubles son:
 - a. superficie de contacto
 - b. longitud del trayecto recorrido
 - c. concentración de sales en la roca
 - d. tiempo de contacto
 - e. temperatura
 - f. presión

- En el campo (medición de parámetros físicos-químicos-biológicos)

- ❖ A este respecto, todas las aguas existentes en el sistema acuífero fueron de interés hidrogeoquímico y debieron ser consideradas. Ello incluye el agua de los acuíferos en estudio, y de las aguas de superficie que pueden intervenir en la recarga (ríos) o ser el resultado de descarga (manantiales, pozos, ojos de agua).
- ❖ Básicamente, el estudio se centró en el análisis de los componentes físico-químicos (generalmente inorgánicos), además del componente biológico como dato adicional (aunque son frecuentes, aparecen en concentraciones por lo común mucho menores que los constituyentes inorgánicos).
- ❖ La medición de parámetros (pH, conductividad, salinidad, TDS y temperatura) se realizaron de forma manual a lo largo de todo el afluente que nace del nevado, el material utilizado para este propósito fue un medidor de pH/mV/T y otro medidor adicional de conductividad/TDS/T.
- ❖ También se tomaron muestras representativas de agua del afluente principal y del bofedal para su análisis en laboratorio.

➤ En gabinete (interpretación de datos)

- ❖ Posteriormente se realizó la interpretación de los resultados obtenidos tanto en campo como de las muestras analizadas en laboratorio.
- ❖ La interpretación se basó en el método internacional aprobado de los índices de calidad de agua (ICA).

GEOLOGIA REGIONAL

2.1 Introducción

Para entender la geología del área de estudio, se necesita realizar primeramente un enfoque de las características geológicas regionales dominantes y el origen de las estructuras observadas.

La región que incluye al volcán Sajama está ubicada en la faja volcánica occidental de los Andes Centrales. Forma parte del arco magmático Cenozoico-Cuaternario de margen continental activo y a la zona de subducción de la Placa de Nazca.

Las rocas más antiguas descritas en la región corresponden a los granitos gneísicos y gneis del cerro Uyarani localizado al sureste del Complejo Volcánico Chullcani, colindante meridional del volcán Sajama. Estas rocas forman parte del macizo de Arequipa – Huarina y es probable establecer que constituye el basamento cristalino de la franja de la zona volcánica occidental de la parte septentrional de los Andes bolivianos.

Los afloramientos volcanogénicos Plio-Pleistocenos al reciente suprayacentes a las unidades previas y que involucran a los centros volcánicos Sajama, Parinacota, Pomerape y otros estrato – volcanes (Chullcani, Condoriri, Asu Asuni, etc.) y a la Caldera de Turaquiri, constituyen eventos magmáticos póstumos de Ciclo Andino caracterizados por ser de afinidad calcoalcalina con altos contenidos de potasio, producto del fraccionamiento y asimilación de magmas originados a grandes profundidades (aproximadamente 70 km).

La intensa actividad tectomagmática en la región de Sajama – Payachatas está reflejada por fases efusivas y explosivas representadas por edificios volcánicos y planicies ignimbríticas que abarcan aproximadamente un 95 % del área, constituyendo el resto de los depósitos glaciales, eólicos, aluviales y coluviales, en su mayoría de edad Holocena.

2.2 Estratigrafía y magmatismo

La actividad volcánica registrada en el área de estudio pertenecería a los periodos de tiempo que abarcan desde el Mioceno Superior hasta el Pleistoceno. Los eventos volcánicos más antiguos están representados por la caldera volcánica Turaquiri y los volcanes Chullcani, Anallajchi, Asu Asuni, Oke Okeni, Huarmisilla y Chingurate acaecidos desde Mioceno Superior hasta el Plioceno. Los volcanes más jóvenes el

Pomerape, Parinacota y Sajama serían precisamente de edad pleistocena. (Galarza, 2002)

Las unidades litológicas presentes en el área están constituidas principalmente por rocas ígneas de carácter efusivo, intrusivas y explosivas, además de rocas piroclásticas de edad miocena al reciente; también algunos depósitos glaciales, aluviales y coluviales de edad holocena y finalmente un basamento constituido por rocas precámbricas según Galarza o como asegura Ávila por un substrato constituido por rocas volcánicas mesozoicas.

Precámbrico

La unidad litológica más antigua de la región está ubicada hacia el lado sur-este del volcán Chullcani, concretamente en el cerro Uyarani, donde afloran roca gneísicas de color gris a rojizo, con bandeamiento metamórfico y con estructuras de tipo “boudinage”. (Galarza, 2002)

Mioceno Superior - Plioceno

Está constituida por unidades litológicas de ambiente volcánico asociadas a fases de la evolución de los estratovolcanes de composición calcoalcalina. Aunque también se puede añadir lo mencionado por Ávila que afirma que durante este periodo se depositaron efectivamente rocas de carácter volcánico junto con areniscas y conglomerados de ambiente fluvial, evidenciados por las formaciones Mauri y Abaroa.

Galarza hace hincapié en la descripción de los depósitos encontrados sintetizándolos en orden cronológico partiendo que en la base del Complejo Volcánico Chullcani, al sur del volcán Sajama afloran depósitos piroclásticos correspondientes a la unidad tobas Khalani, la cual es considerada como una de las unidades volcánicas más antiguas del área.

Pleistoceno

La actividad volcánica reciente de la región en cuestión, está representada principalmente por los volcanes Quisi Quisini, Sajama, Pomerape y Parinacota. Los cuales se caracterizaron por depositar principalmente lavas andesíticas, acompañadas minoritariamente por lavas dacíticas y depósitos piroclásticos.

Las lavas Quisi Quisini localizadas al suroeste del volcán Sajama. Son secuencias volcánicas de composición andesítica a dacítica de coloraciones grisáceas a gris oscuras, las cuales se hallan dispuestas radialmente a partir del centro de efusión más

conspicuo por donde cruza un lineamiento estructural de dirección NNW. LA extensión superficial abarca aproximadamente 90 km².

Las secuencias volcánicas del área de estudio del volcán Sajama, fueron depositadas sobre la ignimbrita Pérez, tienen una extensión aproximada de 600 km², según Ahlfeld (1960) su composición corresponde a una andesita con tridimita, aunque también existen coladas dacíticas en la parte occidental del volcán.

Las lavas Pumata ubicadas al sureste del volcán Condoriri y al noreste del volcán Sajama, diferenciándose como una colada de lava ácida, que sobreyace a las lavas andesíticas.

Los edificios volcánicos Parinacota y Pomerape, conocidos por su génesis y evolución magmática sincrónica, se encuentran en la parte oeste de la región, marcan uno de los eventos de actividad volcánica mas reciente. Sobreponiéndose al norte del volcán Pomerape se encuentran las lavas Parinacota de composición andesítica.

Las lavas Khota Khotani de color gris marrón oscuro y de composición andesítica basáltica se encuentran al noreste del volcán Sajama, presentándose a manera de bloques marcando uno de los eventos más jóvenes de la región.

Ávila (1968) finalmente asegura que el vulcanismo pleistoceno concluiría con un episodio de efusiones basálticas que afloran en las proximidades de la laguna Chungara y pertenecen a la formación Taracollo

Holoceno

En las partes más bajas de la región se hallan distribuidos los depósitos glaciales constituidos por morrenas y lahares; circos y valles glaciares en las partes más altas. Y en menor medida se encuentran los depósitos de origen aluvial y coluvial.

2.3 Geomorfología

La morfología actual de la región estudiada, es principalmente producto de procesos endógenos, siendo el más importante el volcanismo, el cual ha modelado la superficie construyendo complejos volcánicos y planicies ignimbríticas.

Los puntos topográficos más altos son los edificios volcánicos Pomerape, Parinacota y Sajama, los cuales conservan la mayoría de sus rasgos geológicos debido a su reciente actividad tectónica y constituyen un contraste topográfico con las planicies ignimbríticas.

El volcán Parinacota ubicado al oeste del área, constituye un buen ejemplo de volcanismo reciente, evidenciado por conservar su conducto principal.

Dentro de los procesos exógenos, la glaciación es el agente modelador más importante llegando a formar circos, aretes y valles colgados en las partes más altas de los edificios volcánicos. Otro tipo de depósitos que se pueden encontrar en el área de estudio son las morrenas laterales, frontales y de fondo, éstas se ubican en las partes más bajas del área circundantes o próximas a los volcanes.

Diseño de drenaje

Los diseños de drenaje predominantes son los de tipo radial, dendrítico y rectangular. El diseño radial se presenta en los edificios volcánicos, teniendo como centro las partes más altas de los volcanes. El diseño de drenaje rectangular está relacionado al dominio estructural ejercido por los lineamientos ENE – WSW en el sector sur del área de estudio. (Galarza, 2002)

Mientras que el diseño dendrítico suele acompañar a los otros dos tipos de drenaje, acomodándose a las formas de la naturaleza.

2.4 Geología estructural

En el Altiplano se pueden distinguir dos dominios estructurales: uno oriental y otro occidental. El primero, donde los depósitos terciarios descansan sobre un sustrato paleozóico deformado y otro occidental caracterizado por el basamento precámbrico limitado por la falla San Andrés. Esta falla separa a los depósitos volcanosedimentarios de los volcánicos y se extiende hacia el sur del área por el lado oeste de la localidad de Curahuara de Carangas, por debajo de la ignimbritas Pérez, por esta razón se le asigna a ésta estructura (falla San Andrés) una edad anterior a las de las ignimbritas Pérez, periodo que corresponde a las últimas fases de deformación andina, permaneciendo activa durante el Mioceno Superior. Galarza (2002)

Es importante mencionar que la ocurrencia de los edificios volcánicos en la región en general está asociada a la intersección mínima de dos lineamientos, en su mayoría; un lineamiento principal que intersecta con lineamientos menores, estas intersecciones generalmente coinciden con centros de efusión principal.

El lineamiento Sajama con dirección NNW, de menor extensión regional, pero de gran importancia en la evolución volcánica del área, se encuentra asociado al emplazamiento de los volcanes Chullcani, Sajama y Anallajchi. Al oeste de dicho lineamiento, cerca a la frontera con la república de Chile, un lineamiento con dirección

NE controla el emplazamiento de los volcanes Pomerape, Parinacota, y Condoriri, edificios volcánicos ubicados en el arco volcánico actual.

Además Galarza ubica otros lineamientos muy importantes en la zona ubicados hacia el sur del volcán Sajama, en la parte meridional del volcán Chullcani se intercepta el lineamiento Sajama con el lineamiento Payachatas. Este último se extiende hacia el norte con una dirección NW y se encuentra asociado a los volcanes Chullcani, Quisi Quisini y Pomerape. Otros lineamientos menores, pero de igual importancia en la evolución volcánica del área de dirección EW se encuentran asociados a los volcanes Chullcani, Sajama, Anallajchi, Turaquiri, y Asu Asuni.

2.5 Elaboración del mapa fotogeológico regional

Tomando en cuenta los estudios geológicos realizados anteriormente, se decidió aportar con un estudio propio de la geología regional utilizando como herramienta la interpretación fotogeológica en base a la observación y análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales.

➤ Unidades geológicas fotointerpretadas

A continuación se describirán las unidades geológicas fotointerpretadas, para entender cómo se realizó este trabajo, se mencionarán algunos criterios y terminología básicos utilizados para la descripción.

Color y tonalidad

Para realizar un mapa fotogeológico, se deben observar características o rasgos muy notorios como el color y la tonalidad de las fotografías aéreas o imágenes satelitales utilizadas. En las fotografías observaremos tonalidades grises, blanco y negro, mientras que en las imágenes satelitales observaremos tonalidades multicolores.

Las tonalidades y colores nos sugieren ciertos tipos de rocas y van relacionados con rasgos tan importantes como la textura.

Textura

La textura es un rasgo muy importante para la correcta descripción, y va directamente relacionada con el diseño de drenaje observado.

- ✓ Rocas de grano grueso o con **textura áspera** presentan diseños de drenaje con densidades bajas. Las rocas que podemos encontrar con estas características son areniscas, conglomerados, rocas ígneas, **coladas de lava**, etc.

- ✓ Rocas de grano fino o con **textura suave** desarrollan diseños de drenaje fino y con alta densidad de drenaje. Las rocas relacionadas a este tipo son las lutitas, limolitas o **material inconsolidado**.

Delimitación de unidades fotointerpretadas

Como ya es de conocimiento general, el área de estudio pertenece a un ámbito geológico de origen volcánico caracterizado por la emanación de materiales de distinta composición a lo largo de su actividad con la posterior remodelación del paisaje por eventos de origen glaciar, fluvio-glaciar y coluvio-fluvial. Debido a este panorama, se han encontrado rocas con diversas y distintas texturas, colores y tonalidades, y se han utilizado los términos citados anteriormente para describir las unidades geológicas.

A continuación se detallarán las características fotogeológicas de cada unidad diferenciada, y se ordenarán de acuerdo a su antigüedad:

✓ Terciario

Como unidades geológicas más antiguas, se tienen las ubicadas al norte y noroeste del mapa fotogeológico. Estas unidades pertenecerían al periodo Neógeno correspondiente al sistema Terciario, y se habrían depositado hace 3 millones de años aproximadamente.

Se pudo distinguir tres unidades con distintos rasgos fotogeológicos, y estas son:

❖ Tu 10

Esta unidad ha sido identificada como un conjunto de coladas de lava marrones claras de relieve áspero.

❖ Tu 9

Esta unidad ha sido identificada como un conjunto de coladas de lava gris oscuras de relieve muy áspero.

❖ Tu 8

Esta unidad ha sido identificada como un conjunto de coladas de lava marrones claras de relieve suave.

Es importante señalar que las unidades mencionadas se depositaron anteriormente al evento principal del nevado Sajama.

✓ Cuaternario

Durante este periodo se depositaron la mayor parte de las unidades diferenciadas, y están vinculadas principalmente a emanaciones del volcán Sajama. Y son las siguientes:

❖ Qu 1

En esta unidad se observaron coladas de lava marrones rojizas con relieve áspero, es la unidad de extensión más grande dentro del mapa fotogeológico, limita la superficie del Sajama con depósitos cuaternarios más recientes y contiene a todas las unidades que serán descritas a continuación.

❖ Qu 2

En esta unidad se observaron coladas de lava grises marrones con relieve suave, estos afloramientos están repartidos esencialmente en la parte sur y sureste del volcán Sajama.

❖ Qu 3

En esta unidad se observaron coladas de lava grises oscuras de relieve muy áspero, estos afloramientos están ubicados en los cerros Huisalla, Huincurata y Kohuiri Tarakkollu, y al suroeste del volcán Sajama.

❖ Qu 4

En esta unidad se observaron coladas de lava rosáceas de relieve áspero, afloran exclusivamente en el cerro Chucarero y están al oeste del volcán Sajama.

❖ Qu 5

En el cerro Chancara se observó una unidad constituida por coladas de lava grises oscuras de relieve suave, esta unidad está ubicada al noreste del volcán Sajama.

❖ Qu 6

En el cerro Huayna Potosí se observó una unidad constituida por coladas de lava grises marrones claras a gris oscuras, esta unidad está ubicada al noreste del volcán Sajama.

❖ Qu 7

Al noroeste del volcán Sajama afloran un conjunto de coladas de lava marrones rojizas de relieve áspero.

✓ Depósitos inconsolidados del Cuaternario

Dentro de este grupo tenemos tres conjuntos:

- ❖ Depósitos glaciares morrénicos
Estos depósitos se encuentran en las partes más bajas del volcán, ubicados en las laderas de los valles. Están presentes principalmente en el flanco oeste del volcán. Fotogeológicamente se observan como promontorios alargados de color gris oscuro. El material que los constituye son bloques, gravas y arcillas.
- ❖ Depósitos coluvio-fluviales
Estos depósitos están ubicados en los límites externos del volcán. Fotogeológicamente se observan como secciones semiplanas acompañadas por la presencia de ríos con diseño de drenaje pinado a subdendrítico. El material que los constituye son cantos, gravas, arenas, limos y arcillas.
- ❖ Depósitos fluviales
Estos depósitos están ubicados en las proximidades de los ríos principales, que se observan al sudoeste y este del mapa fotogeológico. El material que los constituye son cantos, gravas, arenas limos y arcillas.

➤ Estructuras geológicas

En la interpretación fotogeológica se observaron algunos rasgos lineales, que son denominados lineamientos. Estos lineamientos tienen las siguientes direcciones preferenciales:

- ✓ Lineamiento WSW
- ✓ Lineamiento WNW
- ✓ Lineamiento WNSE o lineamiento Sajama, el cual es paralelo a la falla San Andrés que es de carácter regional.
- ✓ Y otro lineamiento menor con la misma dirección del lineamiento Sajama.

➤ Diseño de drenaje

En general, el área de estudio está dominada por dos diseños de drenaje distintos, el área correspondiente al volcán Sajama como tal tiene un diseño de drenaje radial, éste tipo representa a un conjunto de ríos que fluyen desde un centro común hacia afuera, en este caso el nevado Sajama es el centro común y los ríos fluyen hacia los lados.

El segundo tipo de diseño, domina la mayor parte del área estudio, corresponde al diseño dendrítico a pinado, las formas de éste diseño vistas desde arriba, son

observadas como ramificaciones de plantas o un tronco de árbol desprovisto de hojas.

Ambos diseños de drenaje señalan un control litológico en el área de estudio, dejando claro la baja incidencia del control estructural.

Existe una clasificación que divide los tipos de diseño de drenaje en dos: drenaje destruccional y drenaje construccional. Dentro de ésta clasificación, los dos diseños fotointerpretados son de tipo destruccional o erosional, es decir, se desarrollan por la acción erosiva sobre rocas o material consolidado, y se caracteriza por ocupar extensiones importantes, y están claramente sujetos a las características litológicas y geomorfológicas del área de estudio.

Características del drenaje

Cada diseño de drenaje puede ser descrito en términos de sus principales características, ellas son:

a. Grado de integración

En el caso del área del nevado Sajama, que tiene un diseño radial se la simbolizará como área I, y al área que tiene un diseño dendrítico a pinado se la simbolizará como área II.

En el área I, los ríos se encuentran en algunos casos desarticulados, y es dificultoso predecir la dirección en la que fluyen. Por lo tanto, el grado de integración del área I es medio.

En el área II, los ríos se hallan mejor integrados, constituyendo una red medianamente homogénea de drenaje, ya que existe una comunicación clara entre ríos tributarios y principales en la parte sur del área de estudio. Mientras que en el norte, el contacto entre ríos se hace más difuso. Por lo tanto el grado de integración del área II es medio a bueno.

b. Grado de uniformidad

En el área I, los ríos presentan en general homogeneidad en sus formas y distribución, mostrando un claro dominio de ríos independientes fluyendo por los valles que nacen, y que se reparten a lo largo del radio del volcán. Por lo tanto, el grado de uniformidad en el área I es bueno.

En el área II, existe una clara división de subdiseños individuales, en la parte SE, los ríos son más densos, mientras que en la parte central y oeste los ríos se hacen más escasos y de longitud

mayor. Por lo tanto, el grado de uniformidad en el área II es malo a medio.

c. Densidad

En el área I, el drenaje en general presenta una densidad baja, los ríos principales están bien definidos y existen escasos ríos tributarios.

En el área II, el drenaje tiene una densidad alta, que se acentúa en los límites del volcán que está relacionado con los depósitos de coluvio fluvial y disminuye hacia el este y norte del área de estudio, donde claramente existe un predominio de los depósitos aluviales. La densidad de drenaje en el área II es media a alta.

d. Orientación

En el área I, los ríos presentan una orientación variada debido a que el diseño de drenaje es radial, es decir, a partir de un centro común fluyen ríos en diferentes direcciones.

En el área II, los ríos fluyen con una dirección preferencial N-NW

e. Grado de control

Como se mencionó anteriormente el grado de control en ambos casos es litológico y geomorfológico.

f. Angularidad

La angularidad está definida como el cambio abrupto de los ángulos formados por los ríos, vinculada al control estructural. Debido a la carencia de un control estructural claro, no se puede definir la angularidad.

g. Angulo de junta

El ángulo de junta se define como el ángulo formado entre el río principal y los ríos tributarios. Para las áreas I y II, el ángulo de junta es menor a 90°.

➤ Conclusiones

En el presente informe se presenta como principal actividad la fotointerpretación de una sección del área correspondiente a la hoja topográfica Nevado Sajama. Dicha interpretación fotogeológica proporcionó las siguientes conclusiones:

✚ En el área de estudio se diferenciaron 10 unidades litológicas, de las cuales 7 corresponden o están involucradas al vulcanismo del volcán Sajama que reflejan los distintos episodios eruptivos reflejado por el depósito de coladas de lava de distintos colores y texturas, que indican diferentes composiciones, éstas se depositaron durante el periodo Pleistoceno correspondiente al sistema Cuaternario, 3 fueron definidas como las unidades más antiguas, las cuales se depositaron previamente a la actividad volcánica del Sajama, lo hicieron durante el periodo Neógeno perteneciente al sistema Terciario. Más tarde, durante el sistema Cuaternario desde el periodo Holoceno al reciente, se depositaron los sedimentos correspondientes a la actividad glaciar, coluvio-fluvial y fluvial.

✚ Los principales diseños de drenaje observados son: en el área I, perteneciente al volcán Sajama el diseño es radial. En el área II, perteneciente al área de estudio restante el diseño es dendrítico a pinado. Estos diseños son de carácter destruccional, es decir, que crearon la erosión del terreno y modelaron el paisaje progresivamente hasta lo que se puede observar en la actualidad.

✚ Los lineamientos observados tienen las siguientes direcciones:

- ❖ Lineamiento WSW
- ❖ Lineamiento WNW
- ❖ Lineamiento WNSE o lineamiento Sajama, el cual es paralelo a la falla San Andrés que es de carácter regional.
- ❖ Y otro lineamiento menor con la misma dirección del lineamiento Sajama.

Estos lineamientos podrían ser fallas o diaclasas vinculadas a la tectónica regional que controla el fallamiento San Andrés.

✚ Según la observación fotogeológica, las litologías distinguidas y los diseños de drenaje observados se puede concluir que el control es claramente litológico y geomorfológico en el área de estudio.

GEOLOGIA LOCAL

3.1 Geología del volcán Sajama

A manera de introducción, se dará a conocer la geología local del área de estudio describiendo brevemente algunos estudios realizados por otros autores anteriormente.

Morfología del volcán Sajama

La morfología del volcán Sajama se puede resumir de la siguiente manera:

- Geomorfológicamente es un volcán compuesto, caracterizado por presentar coladas de lava, domos, cúmulos de lava y conductos volcánicos alineados en dirección WSW y WNW. La parte central del nevado se caracteriza por su morfología empinada, conformada principalmente por potentes coladas de lava. Además señala que la forma actual del volcán está influenciada principalmente por la actividad glacial pleistocena representada por aretes, circos glaciales y valles colgados en las partes altas y valles y lagunas glaciales en las partes más bajas, todos productos de la erosión glaciaria. Mientras que las morrenas frontales, laterales y de fondo son expresiones producidas por la acumulación de depósitos glaciales. La actividad fluvial estaría vinculada al deshielo de los glaciares que originan cursos de agua en las partes más altas de los principales nevados de la región. Luego, Galarza acota que en las partes este y sur del nevado se desarrollan extensos bofedales producto de la existencia de los cursos de agua.

Unidades litológicas

Las unidades litológicas identificadas por Galarza (2002) y que afloran en el área de estudio serán mencionadas de forma resumida a continuación:

- Lavas de composición andesítica
 - **Lavas Aychuta** afloran en las partes más distales del volcán, son las de mayor extensión en el área de estudio presentando un grosero bandeamiento.
 - **Lavas Sayara** se ubican en la parte central del volcán Sajama, se pueden diferenciar 2 miembros: el primero constituido por la intercalación de flujos bandeados de color gris y marrón oscuro y el otro muy similar al

primer miembro diferenciándose por que la lava de color marrón se presenta en forma de clastos lenticulares.

- **Lavas Colquen Wilqui** son coladas de lava de color gris a gris oscuro, que se constituye por coladas de lava conformadas en bloques apilados. Tienen una composición andesítica porfírica de grano medio a fino.

- Lavas de composición dacítica

- **Lavas Huayñata** afloran en la parte central del volcán Sajama, tienen un área aproximada de 16 km², se disponen en forma divergente al conducto central, se sobreponen a las lavas Sayara en la parte oeste y sur y consisten de potentes coladas de lava con bandeamiento fluidal.

Evolución de la génesis del volcán

Durante el Pleistoceno el magmatismo se caracterizó por tener una constante e intensa actividad que continuó con la formación de varios estratovolcanes, de carácter principalmente efusivo aunque con episodios explosivos de composición preferentemente andesítica. Entre los principales estratovolcanes construidos tenemos al Sajama y los Payachatas.

Se puede señalar claramente que Ávila (1968) enfatiza su trabajo en la explicación genética del volcán Sajama describiendo la evolución de su formación de la siguiente manera:

- Primera Fase: Se formó un cono, caracterizado por la efusión de lavas y cenizas de forma alternada.
- Segunda Fase: Se produce una gran erupción que depositó enormes coladas de lavas andesíticas, alrededor del cono.
- Tercera Fase: Se produce una erupción de menor magnitud que las anteriores, procedente de los conos adventicios (cerros Huisalla y Kahuilli – Taracollo) situados en la parte occidental. Estos conductos se habrían formado a expensas de una o más diatremas vinculadas al conducto central.
- Cuarta fase: Se caracteriza por una gran explosión que provocó la voladura de una considerable parte de la ladera septentrional.
- Quinta Fase: Cesan las erupciones, tanto efusivas como explosivas. Simplemente se evidencian algunas solfataras en el flanco NW produciendo la presencia de pequeños depósitos de azufre sin importancia económica.

3.2 Unidades litológicas

Durante el mapeo geológico a detalle realizado por mi persona, se pudieron evidenciar los siguientes afloramientos:

❖ Unidades geológicas observadas

✚ Unidad 1 (AI)

En esta unidad geológica se observaron un conjunto de andesitas que se caracterizan por presentar un bandeamiento bicolor. El primero consiste de una andesita de color marrón claro, el cual contiene fenocristales de plagioclasa y feldespatos. El segundo, está presente como un flujo de lava de color gris oscuro de la misma composición.



Fig. 1 Andesita bandeada correspondiente a la unidad 1, mapeada en el cerro Achuta

Además es importante señalar que esta unidad es la más abundante en el área de estudio, sin embargo la ubicación de afloramientos importantes se hace dificultosa debido a que en la mayoría del trayecto se halla cubierto por clastos rodados y vegetación.

✚ Unidad 2 (AII)

Esta unidad geológica de extensión reducida, es una andesita de color gris oscuro con alto contenido de fenocristales de plagioclasa y

feldespatos, junto con pequeños cristales de mica (biotita), además esta roca presenta una gran cantidad de poros.

✚ Unidad 3 (AIII)

Esta unidad es la más reducida, y consiste de un pequeño afloramiento de andesitas de color gris claro con un incremento en la cantidad de micas oscuras (biotitas) y una reducción en la cantidad de plagioclasas y feldespatos con relación a las otras unidades.

✚ Unidad 4 (AIV)

Esta unidad consiste de una toba de flujo de color gris claro a blanquecino con alto contenido de plagioclasas y micas oscuras (biotitas), aflora infrayaciendo a un depósito de morrenas y a A1.



Fig. 2 Toba de flujo blanquecina correspondiente a la unidad 4

✚ Unidad 5 (AV)

En un pequeño conjunto de andesitas que presentan una alteración de color anaranjado que le da una apariencia de brecha. Presenta fenocristales de plagioclasa junto con biotitas. Infrayace a la unidad 6, la cual presenta 2 miembros.



Fig. 3 La unidad 5 infrayace a la unidad 6 que tiene 2 miembros



Unidad 6 (AVI)

Esta unidad está conformada por 2 miembros, el inferior (miembro 1) es una andesita de color gris oscuro con fenocristales de plagioclasa y cristales de biotita acicular y el superior (miembro 2) es una andesita de color marrón grisáceo con fenocristales de plagioclasa y feldespatos.



Fig. 4 La unidad 6 que tiene 2 miembros compuestos de andesita

✚ Unidad 7 (AVII)

La unidad 7 está constituida por unas andesitas muy consolidadas, de color gris claro con alto contenido de fenocristales de plagioclasa y feldespato y biotitas.

Esta unidad presenta una pseudoestratificación con una dirección de 030/31 hacia el NE.

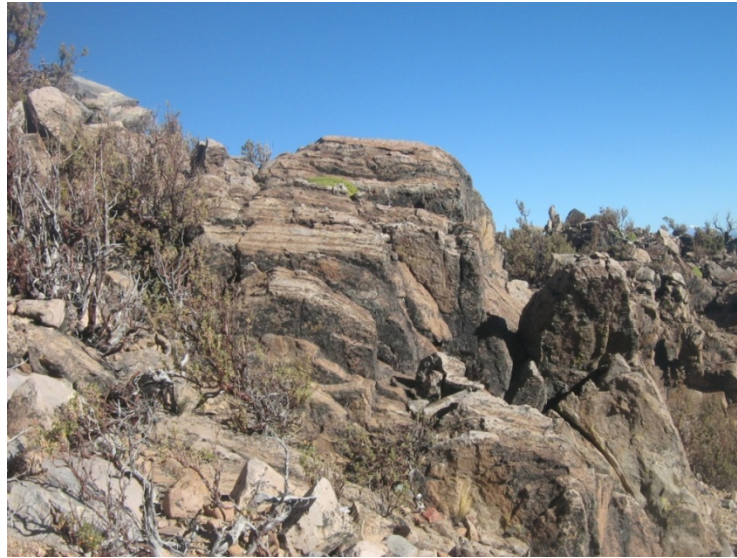


Fig. 5 Conjunto de andesitas con pseudoestratificación correspondientes a la unidad 7

Síntesis geológica

Observando la litología de las unidades mapeadas en el área de estudio se puede señalar que existen similitudes con relación a estudios anteriores.

La síntesis del mapeo geológico nos brinda los siguientes datos:

- ✚ Las unidades geológicas mapeadas tienen un predominante composición andesítica.
- ✚ Se caracterizan por ser de afinidad calcoalcalina, es decir por presentar alto contenido de plagioclasas y feldespatos potásicos (minerales ricos en potasio y sodio).
- ✚ Son secuencias volcánicas de coloraciones grisáceas a gris oscuras, las cuales se hallan dispuestas radialmente a partir del centro de efusión.
- ✚ La sucesión de unidades geológicas da a entender que existieron diferentes episodios eruptivos durante el periodo Plioceno-Pleistoceno.

- ✚ Se constituyeron en eventos magmáticos al finalizar el Ciclo Andino, probablemente vinculados a la Fase Quechuana durante el Plioceno-Pleistoceno, caracterizados porque su origen sería producto del fraccionamiento y asimilación de magmas originados a grandes profundidades (aproximadamente 70 km).
- ✚ Las características observadas en las unidades volcánicas presentes, expresan fases efusivas y explosivas representadas por edificios volcánicos y planicies ignimbríticas que abarcan aproximadamente un 95 % del área.
- ✚ Existen otros depósitos inconsolidados de origen glaciar, fluvio-glaciar y fluvial pertenecientes al Holoceno-Reciente, que se constituyen en materia del mapeo geomorfológico y que serán descritos más ampliamente en el apartado de unidades geomorfológicas.

3.3 Unidades geomorfológicas

Descripción general del área de estudio y conceptos básicos

La geomorfología del área de estudio está modelada principalmente por procesos glaciares, y en menor importancia por procesos fluviales y fluvioglaciares.

Los rasgos geomorfológicos observados son producto de la interacción de 2 tipos de procesos:

- Procesos endógenos Son aquellos procesos que se gestan a cierta profundidad por debajo de la corteza terrestre.
- Procesos exógenos Son aquellos procesos que se originan por encima de la superficie terrestre, y están vinculados a agentes erosivos como la lluvia, viento y el hielo.

Procesos glaciares

Las enormes masas de hielo se desplazan lentamente por efecto de la gravedad produciendo un desgaste en las paredes de los valles por los que se desliza. En su recorrido, la masa de hielo va incorporando partículas de roca de variados tamaños a sí misma. Estas rocas incorporadas a la masa actúan como partículas abrasivas arrancando material y puliendo la base y las paredes de los valles.

Estas geoformas se formaron a lo largo de diferentes periodos de glaciación, los cuales se desarrollaron durante lapsos del tiempo geológico en los que grandes extensiones de la Tierra se cubrieron de hielo.

Las glaciaciones vinculadas al área de estudio son las ocurridas durante el Pleistoceno Superior-Holoceno.

Producto de los procesos glaciares se tienen las siguientes geoformas:

- Geoformas de acumulación de material
Se forman por la acumulación de material glaciar, dentro de este grupo se tiene a las morrenas que pueden ser de tres tipos:
 - Morrenas de fondo
Se ubican en el lecho del valle glaciar, tienen una pendiente baja, topografía suave y una composición heterogénea
 - Morrenas laterales
Vistas de perfil presentan formas arqueadas y vistas en planta tienen formas alargadas, de composición heterogénea y de distintas extensiones.
 - Morrenas terminales
Vistas de perfil se ven como crestas arqueadas y vistas en planta como pequeñas colinas en forma de media luna
La ubicación de las morrenas en el terreno indica el avance de la masa glaciar, es decir, que las morrenas terminales ubicadas a mayor distancia del volcán Sajama son las mas antiguas.
De esta manera las ubicadas en las proximidades serían las morrenas más jóvenes.
- Geoformas de Erosión
Son producidos por la acción erosiva de los propios glaciares, dentro de este grupo se tiene a las siguientes geoformas:
 - Circos glaciares
Son estructuras muy importantes ya que en éstas se acumula el hielo, tienen forma de tazón con paredes escarpadas en tres lados, pero abiertas por el lado que desciende el valle.
 - Aristas y horns

Son estructuras en forma de crestas sinuosas de bordes agudos o picos piramidales y agudos. Se forman por el aumento de tamaño de los circos producido por arranque y acción del hielo.

Los horns, se forman cuando existen varios circos que rodean una sola montaña. Este es el caso del Sajama.

Las aristas en cambio se forman por el encuentro de dos glaciares paralelos.

Procesos periglaciares

Se producen en zonas aledañas a glaciares o zonas donde antiguamente existieron glaciares. Las diferentes formas que se encuentran en estos sectores, son producto de los cambios de temperatura diurnos y nocturnos, que dan lugar al resquebrajamiento de las rocas. Estas alternancias de expansión y contracción provocan desplazamiento incluso en las superficies llanas. De esta manera se forman polígonos, suelos estriados, pavimentos de piedras y suelos abollados.

➤ Coluvios

Corresponden al conjunto de material suelto-resquebrajado. Estos depósitos se encuentran distribuidos en las faldas de las serranías. Se forman por los cambios bruscos de temperatura, que dilatan y contraen las rocas, haciendo que se resquebrajen y se dividan. Posteriormente estos materiales son transportados por gravedad.

Procesos fluviales

Son aquellos que se producen debido a la acción del agua sobre la superficie de la Tierra. En el área de estudio este proceso actúa principalmente en zonas de pie de monte, las cuales constituyen una transición entre la montaña y la llanura.

Existen dos tipos de geoformas dentro de este grupo: Geoformas de erosión y geoformas de acumulación. En el caso del área de estudio se tienen únicamente las geoformas de erosión que vienen a ser las terrazas.

➤ Terrazas

Son geoformas que se forman debido a la erosión causada por un curso de agua, como lo indica su nombre en vista de perfil tienen la apariencia de terrazas o gradas que se forman en los lindes de los lechos de los ríos. Están compuestos por material heterogéneo

Procesos fluvioglaciares

Son depósitos que se forman por la interacción de procesos fluvial y glacial. El material transportado por el hielo se acumula y luego es retransportado por los riachuelos, formando este tipo de depósitos

➤ Abanicos fluvioglaciares

Son geoformas asociadas a procesos glaciares y fluviales. Como lo indica su nombre tienen forma de abanico y descienden pendiente abajo aprovechando locaciones con cambios abruptos de pendiente.

Presentan un relieve homogéneo, están constituidos por material relativamente homogéneo lo que los constituye en grandes reservorios de agua.

Unidades geomorfológicas mapeadas

➤ Procesos glaciares

- Geoformas formadas por la acumulación de material



Morrenas

De manera general estos depósitos están constituidos por material inconsolidado proveniente de la misma roca volcánica, por esta razón se pueden observar clastos de distintas composiciones y variados tamaños. Estos clastos se hallan “flotando” en una mátrix arcillosa que se habría formado por la lixiviación de los feldespatos potásicos y plagioclasas sódicas, que están presentes abundantemente en las rocas volcánicas de composición andesítica y dacítica.

Este tipo de depósito se encuentra extendido en gran parte del área de estudio, cubriendo la mayoría de los afloramientos de lavas y tobas mencionadas anteriormente, inclusive en las partes altas como ser los cerros Tiraguagua y Achuta.



Fig. 6 Depósito de morrenas ubicado a las faldas del cerro Tiraguagua y probable nivel del hielo glaciar inexistente en la actualidad.

❖ **Morrenas terminales**

Las morrena terminales se constituyen como depositos de till que se forman al final de una glaciar. Este tipo de morrena se forma cuando el hielo se está fundiendo y evaporando cerca del hielo extremo del glaciar a una velocidad igual a la del avance hacia delante del glaciar desde su región de alimentación. Aunque el extremo glaciar está estacionario, el hielo sigue fluyendo depositando sedimento a manera de cinta transportadora. En el área de estudio, estas morrenas se encuentran inmersas dentro del bofedal y limitando su inicio.

❖ **Morrenas de fondo**

Cuando la ablación supera a la acumulación, el glaciar empieza a retroceder, a medida que lo hace, el proceso de sedimentación de la cinta transportadora continúa dejando un depósito de till en forma de llanuras onduladas, estas capas suavemente onduladas son las morrenas de fondo. En el área de estudio estas morrenas se encuentran a las faldas del nevado revelando signos de

retroceso glaciar y en menor medida se distribuyen dentro los límites del bofedal.

❖ Morrenas laterales

Este tipo de morrena se produce por el deslizamiento del glaciar respecto a las paredes del valle en el que está confinado, de esta manera los sedimentos se acumulan en forma paralela a los laterales de valle. En el área de estudio se encuentran dispuestas paralelamente a la dirección del valle glaciar, pudiendo ser claramente identificadas incluso en fotografías aéreas e imágenes satelitales. Con una longitud cercana a los 5 km, y aflorando incluso en las partes más altas de las laderas del valle, cubriendo subsuperficialmente a los afloramientos de rocas volcánicas.



Fig. 7 Morrena terminal testigo del retroceso de la masa glaciar del Nevado Sajama

- Geoformas de erosión o formadas por la transformación del terreno

✚ Circos glaciares

Son estructuras muy importantes ya que en éstas se acumula el hielo, tienen forma de tazón con paredes escarpadas en tres lados, pero abiertas por el lado que desciende el valle.

Estos se ubican en las partes más altas del nevado Sajama, formando las típicas paredes escarpadas.

Horns y Aristas

Son estructuras en forma de crestas sinuosas de bordes agudos o picos piramidales y agudos. Se forman por el aumento de tamaño de los circos producido por arranque y acción del hielo. Como se menciona se encuentran limitando los circos glaciares por el encuentro de dos glaciares paralelos., presentando formas empinadas alineadas en forma secuencial.

Los horns, se forman cuando existen varios circos que rodean una sola montaña. Se pudo evidenciar la presencia de varios circos glaciares presentes en las otras laderas del nevado Sajama, y los horns están presentes acumulados en forma semiparalela a las laderas escarpadas de los circos glaciares.



Fig. 8 Vista frontal del nevado Sajama, donde se observan circos glaciares limitados por aristas, además de horns paralelos a las laderas de los circos.



Circo glaciar



Horns



Aristas

➤ Procesos periglaciares



Coluvio fluvial

Estos depósitos son los más recientes, inclusive algunos continúan en actividad. Son muy frecuentes en el área de estudio, cubriendo de forma superficial depósitos más antiguos. Se forman debido a los cambios abruptos de pendiente y a la acción congelamiento – deshielo.



Fig. 9 Grupo de coluvios fluviales contiguos depositados sobre material más antiguo, en este caso una morrena o lava.

➤ Procesos fluviales



Terrazas

Se ubican hacia el sur del área de estudio, su presencia está restringida, ya que el principal agente modelador es el glaciar. Aparecen esporádicamente en los bordes del riachuelo Achuta, su topografía es suave, están constituidas

por solamente un nivel, es decir, que suelen no tener su correspondiente al otro lado del río.

➤ Procesos fluvio-glaciares

✚ Abanicos fluvio-glaciares

Se encontró este tipo de depósito muy restringido y estrictamente relacionado a la actividad fluvio-glacial correspondiente a las partes más proximales a las faldas del nevado Sajama.

Se caracterizan por presentar forma de abanicos, el material se desparrama hacia fuera debido al cambio abrupto de pendiente, Presentan en general un relieve homogéneo, están constituidos por material también homogéneo lo que los constituye en grandes reservorios de agua y su alimentación está íntimamente relacionado a la acción del hielo – deshielo.



Fot. 32 Se observa la interacción de los diferentes tipos de morrenas junto con los depósitos fluvio-glaciales

	Morrenas de fondo
	Abanico fluvio-glacial
	Morrenas terminales
	Morrenas laterales

Evolución geomorfológica

El área de estudio posee una geología dominada por el ambiente volcánico pero también existe una gran influencia causada por la fuerza modeladora de origen glaciar, la cual se constituye en la más importante dentro de la evolución geomorfológica no solo en el área de estudio sino a nivel regional.

- Procesos de formación. Geoformas de origen glaciar
 - En el proceso de descenso de la masa glaciar a través del valle glaciar, la presión ejercida por el peso y el avance de esta masa actuó como un agente importante de erosión generando fracturas y diaclasas paralelas a la superficie de erosión. Como las superficies de la rocas fueron desgastadas están se expandieron y fracturaron. Debido a la remoción de cantidades significativas de roca infrayacente por erosión glaciar se generaron el desgaste y desarrollo de fracturas. Este proceso ha sido expuesto para explicar la presencia de diaclasas paralelas a las superficies erosionadas tales como las observadas en los lados del valle. La erosión glaciar por consiguiente pudo generar la fracturación del lecho de roca y acelerar la tasa de erosión.

En el siguiente esquema se puede observar el proceso de desgaste y erosión del lecho de roca, que origina fracturas mientras la masa glaciar avanza. Además se puede notar las variables de presión: peso (normal stress) y la de avance (shear stress)

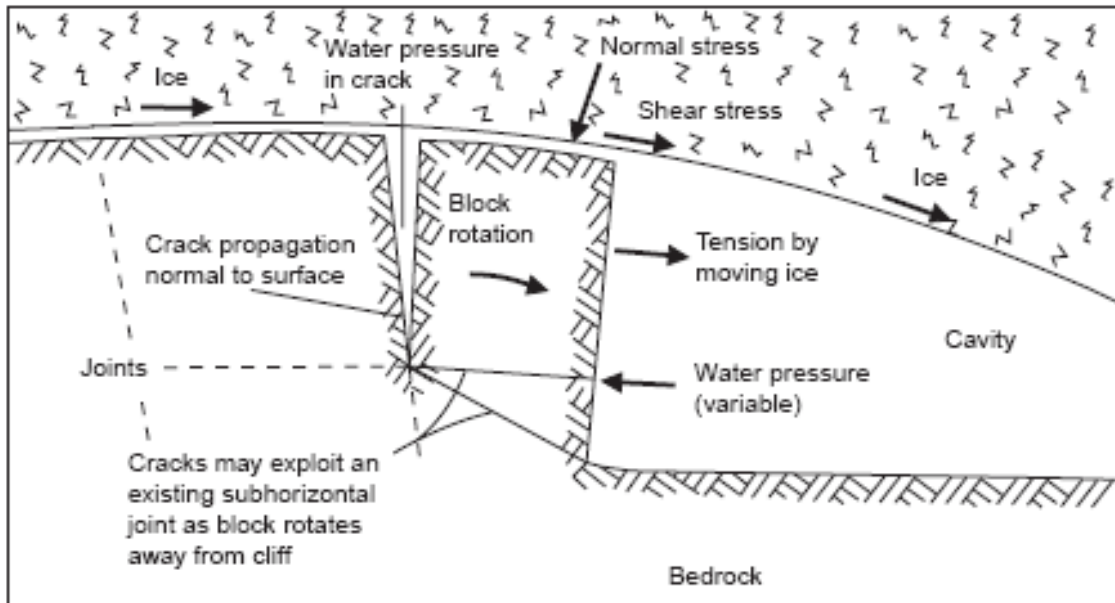


Figure 5.6 Schematic diagram of the processes involved in glacial quarrying. Fluctuations in subglacial water pressure are important in the development of bedrock fractures, and blocks are rotated out of the rock face by the passage of ice.

- Analizando la descripción anterior podemos asociar el proceso de erosión entre algunas estructuras geológicas con geoformas glaciares. En la siguiente imagen podemos observar estos grupos divididos de la siguiente manera:
El grupo A, conformado por geoformas de pendiente abrupta desgastada, todas tienen en común la formaciones de caracteres lineales como diaclasas, foliación y “pseudo – estratificación”. Estos rasgos pueden ser observados en el área de estudio en las rocas volcánicas y son responsables de la posterior infiltración de agua superficial.

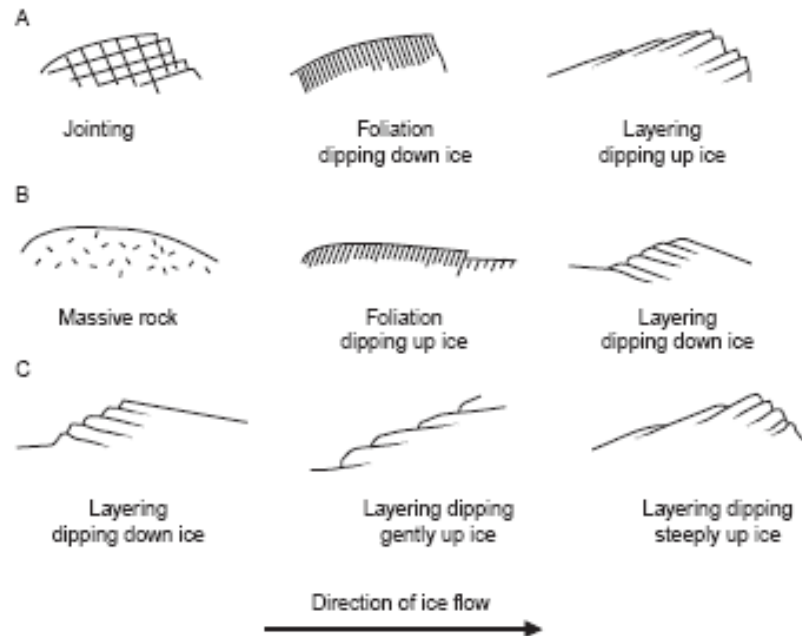


Figure 6.8 Schematic representation of the relationships between geological structure and roche moutonnée morphology. (A) Quarried lee-side slopes. (B) Abraded lee-side slopes. (C) Abraded and quarried lee-side slopes. [Modified from: Chorley *et al.* (1984) *Geomorphology*, Methuen, figure 17.18, p. 449]

El grupo B, conformado por geoformas de pendiente abrupta abrasionada, esto indica un proceso erosivo más agresivo, que tiene como productos las rocas masivas, la foliación de alto buzamiento y la “pseudo-estratificación” de bajo buzamiento. Esto también, lo observamos en las rocas volcánicas de nuestra área de estudio.

Y finalmente, el grupo C, que incluye ambos procesos de desgaste y abrasión, y sus productos presentan de hecho un grado erosivo aún mas alto.

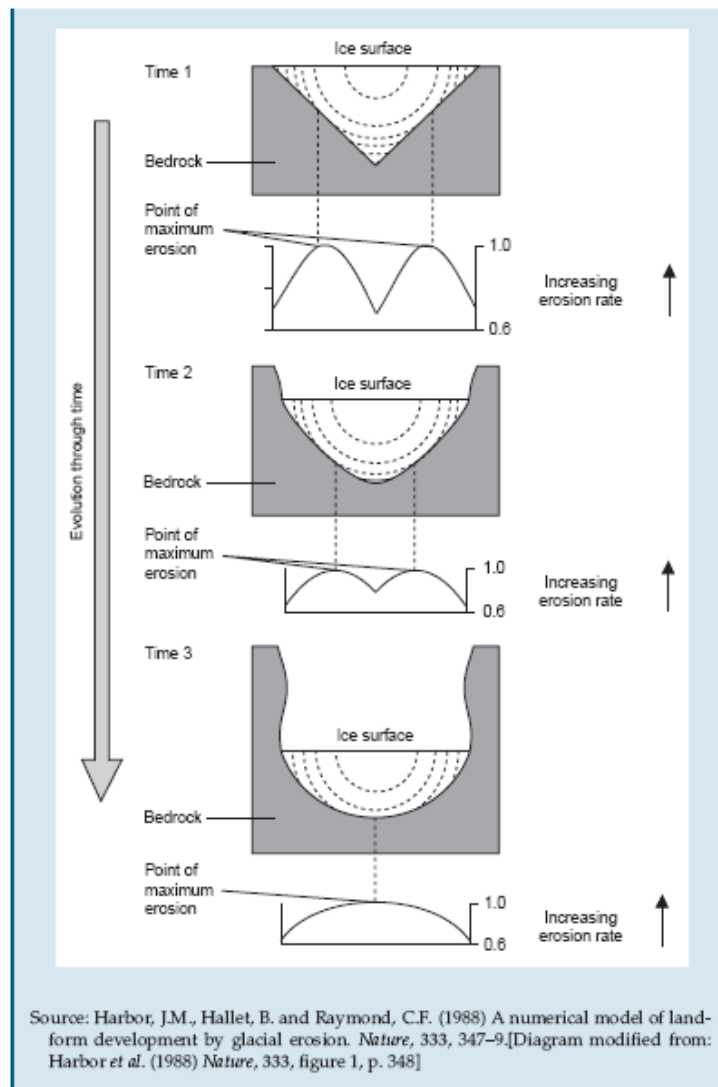
- En el siguiente esquema se observa la evolución erosiva glacial de un valle. recordemos que nuestra área de estudio está ubicada dentro de un valle glaciar.

Este desarrollo tiene como variables de control: el tiempo (la flecha que va en descenso) y el incremento de la erosión (la flecha hacia arriba).

- ✚ En la primera etapa se observa un vista de perfil de valle glaciar, mostrando su típica forma de “V”, cuando el periodo de máxima erosión ocurre en los dos puntos medios a lo

largo del valle, entonces se inicia el proceso de curvatura del valle.

- La segunda etapa o etapa intermedia. A medida que la forma del valle va cambiando, las variables de velocidad (tiempo) y erosión ejercidas sobre el glaciar van cambiando también. Los picos de erosión se reducen en magnitud, y comienzan a migrar hacia el centro del valle.
- La tercera etapa o etapa final, el valle tiene la característica forma en “U”. En esta etapa, la erosión se concentra en el centro del valle y la morfología del valle permanece relativamente constante a medida que el valle queda inscrito en el paisaje.



- Ahora, es necesario hablar de los depósitos que se forman por acumulación de material, en el caso de nuestra área de estudio son las morrenas.

Existen muchos tipos de movimiento de masa de hielo que pueden remobilizar depósitos supraglaciares, aunque es posible reconocer 3 tipos principales:

- 1) Flujos móviles. Estos son delgados, abundantes y rápidos. Son bastante erosivos y muestran una pobre selección de tamaño de grano o sedimento, donde las partículas mas grandes suelen acomodarse en la base del flujo. Dichas partículas están usualmente fuertemente orientadas en la dirección del flujo.
- 2) Flujo semiplástico. Estos son anchos y presentan lenguas de material suelto que se mueve muy lentamente, también son muy erosivos. Pueden presentar selección de tamaño de grano, donde las partículas mas grandes suelen acomodarse en la base del flujo, puede ocurrir selección en la parte superior del flujo. Este tipo de flujo usualmente proviene de la fracturación de material y fluye pendiente – abajo.
- 3) Reptación o flujo lento. Movimiento pendiente – abajo de los sedimentos, esto no es visible al ojo humano. esto ocurre generalmente en sistema de drenaje no conectados o en sistemas mas o menos continuos. Las partículas raramente están orientadas según la dirección e flujo.

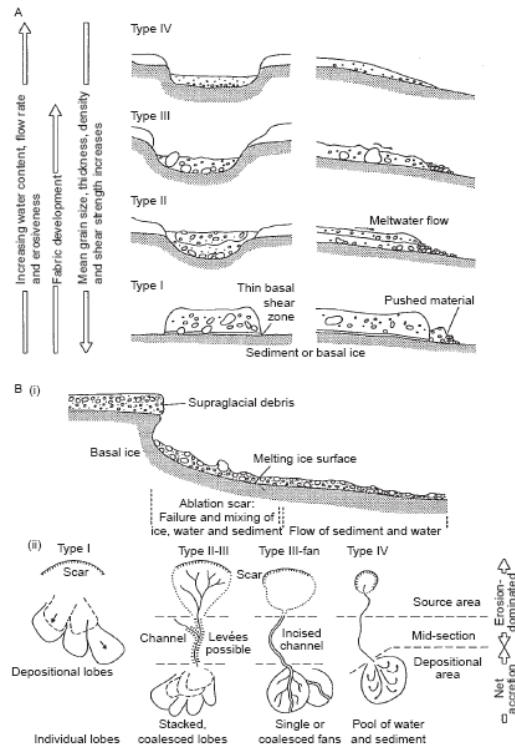


Figure 8.10 The characteristics of flow tills at the Matanuska Glacier (Alaska). (A) Variation of flow type with water content. (B) Morphology of the source and depositional area of different types of flow. [Modified from: Lawson (1982) *Journal of Geology* 90, figures 3, 5 & 13, p. 282, 287 & 296]

Dependiendo del tipo de flujo podemos tener los diferentes tipos de depósito que son mostrados en la figura. Esto depende de factores como el incremento del contenido de agua, el ritmo de flujo y erosión. Así como, por el desarrollo de la fábrica o el conjunto de rasgos morfológicos de un grupo de sedimentos (flechas hacia arriba).

Y también por la disminución o mala selección de grano, por el espesor, densidad y el incremento de la fuerza de ruptura (flechas hacia abajo).

Por la morfología de la fuente y el área de deposición de los diferentes tipos de flujo.

En la figura podemos observar, las etapas de deshielo glaciar y los productos que quedan como remanentes. Comenzando e izquierda a derecha, tenemos un depósito supraglaciar acompañado de una base de hielo, al lado tenemos la superficie de derretimiento glaciar, que comprende los procesos de fracturación de material y mezcla de agua, hielo y

sedimento. Yal lado derecho, tenemos el producto final que consiste del flujo del conjunto agua-sedimento.

En la parte inferior se observa varios tipos de sistemas de drenaje, mostrando su zona de origen o fuente; zona media y la zona de deposición.

➤ Evolución geomorfológica del área de tesis

Las rocas más antiguas del área de estudio son las coladas de lava y tobas de flujo provenientes del entonces volcán activo Sajama. Estos depósitos se fueron acumulando en los alrededores del volcán de acuerdo a las generaciones eruptivas a las que pertenecen formando un paisaje casi netamente volcánico.

Antes de la glaciación los valles de montaña, como es el caso del Sajama, tienen una forma de V, producida por la erosión del agua. Sin embargo, durante la glaciación los valles se ensacharon y ahondaron, lo que dio lugar a la creación de un valle glaciar en forma de U.

A medida que el glaciar fluyó sobre la superficie fracturada del lecho de roca, ablandó y levantó bloques que incorporó al hielo. De esta manera, sedimentos de todos los tamaños entraron a formar parte de la carga glaciar.

La abrasión ocurrió cuando el hielo y la carga de fragmentos rocosos se deslizaron sobre el lecho de roca y funcionaron como una lija que alisó y pulió la superficie situada debajo.

Una vez que este material fue incorporado al glaciar, fue transportado por varios cientos de metros o incluso kilómetros antes de ser depositado. De esta manera, se desarrollaron las morrenas con sus peculiares formas de llanuras suavemente onduladas.

Con la interacción de la glaciación, ocurrió una remodelación del paisaje que también esculpió las paredes del volcán creando circos glaciares que son zonas de acumulación del hielo glaciar en forma de tazón con un lado abierto, además de crestas y horns, que se constituyen en formas puntiagudas formadas por la unión de varios circos contiguos.

Después del cese de la glaciación, se iniciaron nuevos procesos. Esta vez, vinculados a la acción combinada de agentes como el agua, la pendiente y el clima. Los procesos de remoción en masa y caída de bloques por gravedad se hicieron más frecuentes, esto también debido a las formas escarpadas dejadas previamente por la glaciación.

Es por eso, que se pueden observar algunos que continúan activos en la actualidad y siguen remodelando el paisaje principalmente en las paredes del valle, los coluvios fluviales que cubren las partes basales de estas paredes.

Y existe además un conjunto minoritario de sedimentos correspondientes a actividad fluvio – glaciar ubicados en los alrededores de los cursos de agua principales.

3.4 Geología estructural

Algunos autores en anteriores plantean una breve descripción acerca de la geología estructural aseverando que los edificios volcánicos presentes en la región estarían asociados a la intersección de al menos dos importantes lineamientos. Uno de ellos es mencionado como el lineamiento Sajama con dirección NNW, de extensión regional menor, pero de gran importancia evolutiva dentro del área, asociado de igual forma a otros volcanes como Chullcani y Anallajchi. Al Oeste de este lineamiento, existe otro con dirección NE controlando el emplazamiento de un conjunto de volcanes conformados por Pomerape, Parinacota y Condoriri. Por último, se evidenció la existencia de otro lineamiento de no menos trascendencia ubicado al sur del Sajama llamado Payachatas, el cual se extiende hacia el norte con dirección NW

Haciendo una comparación entre ambos puntos de vista podemos señalar que la explicación de Galarza (2004) enfatiza su propuesta al control dado por dos dominios estructurales en el Altiplano: uno oriental y otro occidental. El primero, donde los depósitos terciarios descansan sobre un sustrato paleozóico deformado y otro occidental caracterizado por el basamento precámbrico limitado por la falla San Andrés. Entre tanto que Ávila (1968) formula un conjunto de hipótesis de aparentes controles estructurales vinculados a las fases orogénicas Andina y Quechuana sin entrar en detalle.

La actividad tectónica que genera la existencia de lineamientos estructurales es muy importante para el desarrollo y almacenaje de acuíferos, debido a que el agua en su recorrido en superficie va infiltrándose a través de ranuras y fracturas provocadas por los esfuerzos tectónicos.

En zonas donde la litología es de origen predominantemente volcánico, las rocas suelen fracturarse debido a la dureza de sus constituyentes, respondiendo a un comportamiento frágil/dúctil, esto quiere decir que las rocas tienen una mayor tendencia a fracturarse cuando son sometidas a un esfuerzo tectónico, sin embargo también pueden deformarse dúctilmente para formar estructuras como pliegues por

ejemplo. Por otro lado las rocas que poseen un comportamiento más dúctil, es decir que tienen una mayor tendencia a la deformación y después a la fractura son características de litologías como limos y arcillas.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA

4.1 Caracterización del acuífero

4.1.1 Conceptos básicos. Generalidades

➤ **Factores que afectan la capacidad de infiltración**

a. Precipitación

La precipitación de tipo pluvial es la más efectiva, el granizo es menos y la nival es la menos efectiva.

Este factor también depende de su intensidad:

- ❖ Si es escasa, se evapora rápido o no se acumula en la superficie o es retenida por el suelo disminuyendo la infiltración.
- ❖ Si es moderada, satisface las mermas/retenciones y permite la infiltración.
- ❖ Si es excesiva, satura rápidamente los conductos de infiltración y se convierte en escorrentía superficial

b. Cobertura vegetal

- ❖ Frondosa, presentan una interrupción por vegetación elevada y fomentan la evaporación. La humedad en los bosques permite una infiltración continua.
- ❖ Escasa, permite la llegada de la precipitación al suelo.

c. Tipo de suelo

- ❖ Porosos (franco arenosos), permiten mucha infiltración luego de que son saturados.
- ❖ Menos porosos (arcillosos húmedos), no permiten la infiltración y generan encharcamiento, escorrentía superficial y/o evaporación.

d. Cobertura y uso del suelo

- ❖ Expuestos (agrícolas en descanso), permiten que la precipitación llegue al suelo y se infiltre; también los suelos arados.
- ❖ Cubiertos (urbanos o agrícolas en uso), interceptan la precipitación ya sea por pisos de cemento o por superficies agrícolas en crecimiento y listas para su cosecha.

e. Topografía

- ❖ Abrupta, fomenta la escorrentía superficial rápida y evita la infiltración.
- ❖ Llana, fomenta el encharcamiento y la infiltración
- f. Tipo de suelo
 - ❖ Maciza, no permite el flujo del agua al subsuelo y fomenta la escorrentía superficial.
- g. Época del año
 - ❖ Verano, si es cálido fomenta la evaporación; si es húmedo permite la infiltración.
 - ❖ Invierno, si es frío fomenta la congelación; si es seco fomenta la evaporación; si es húmedo fomenta la infiltración.
- h. Temperatura cuando llueve

No toda la precipitación pluvial generada en la atmósfera llega hasta la superficie, parte de ella se evapora durante la precipitación. Asimismo, a mayor temperatura, será mayor la temperatura del piso por lo que la evaporación será mayor.

En general se puede decir que a mayor temperatura, mayor evaporación, por ende menor precipitación.
- i. Flujo preferencial

Existen casos donde el suelo está suelto (arado), presenta grietas de disecación (suelos arcillosos secos) o la roca es fracturada (roca volcánica) y el agua de la precipitación no es absorbida por el suelo, sino que fluye directamente hasta mayores profundidades. A este fenómeno se llama “flujo preferencial” y es muy común en zonas semiáridas y áridas.

➤ **Características hidrogeológicas de las rocas**

- a) Rocas con muy bajo potencial para almacenar agua subterránea

Se caracterizan por ser rocas impermeables, altamente consolidadas, poco porosas, y en algunos casos no es relevante que el material sea pelítico ya que pese a la presencia de fracturas en este material, debido a las características dúctiles

de las pelitas las fracturas suelen ser muy superficiales y no afectan la roca a mayor profundidad.

Esta clasificación incluye también a terrenos de pendiente abrupta ($> 45^\circ$) en los cuales la infiltración es escasa y de hecho se posibilita la esorrentía.

b) Rocas con bajo potencial para almacenar agua subterránea

Dentro este grupo se incluyen a rocas pelíticas y arenitas, consolidadas, poco porosas e impermeables. Estas presentan permeabilidad secundaria generada a partir de fracturas y fallas, que originaron manantiales o vertientes permitiendo la circulación del agua.

Además es necesario incluir a éste grupo, a los depósitos coluviales y a los suelos estriados. Estos se caracterizan por ser materiales sueltos, superficiales, desarrollados sobre roca, lo cual restringe la posibilidad de la infiltración del agua.

c) Rocas con un potencial medio para almacenar agua subterránea

Se incluye en este grupo a sedimentos clásticos no consolidados a poco consolidados, como las morrenas. Estos depósitos se caracterizan por ser heterogéneos, por esta razón impiden la infiltración del agua y no permiten un desarrollo importante de acumulación de agua subterránea.

d) Rocas con un potencial alto para almacenar agua subterránea

Pertenecen a esta clasificación geoformas compuestas por sedimentos clásticos poco consolidados, en que la heterogeneidad litológica y la pendiente suave dieron lugar a que la permeabilidad sea buena. Dentro de esta clasificación entran las morrenas de fondo, los flujos de till, las turberas y bofedales ubicadas en las proximidades de los glaciares y en algunas morrenas en las que se encuentran ojos de agua, lo cual nos sugiere que en estos depósitos los acuíferos son continuos, de extensión variable y que en la parte superficial son libres o freáticos.

- e) Rocas con un potencial muy alto para almacenar agua subterránea

Dentro de esta clasificación se tienen las tasas de infiltración mas elevadas y corresponde a las geoformas con alta porosidad, bajo grado de consolidación, topografía suave (pendiente $<5^\circ$) y una granulometría más homogénea que permite el libre flujo. A este grupo pertenecen las terrazas, turberas, bofedales, abanicos aluviales.

4.2 Prospección geofísica

4.2.1 Conceptos básicos. Generalidades. Objetivos

La prospección geofísica, es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, que son aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda y estudio de sustancias útiles como ser: petróleo, agua subterránea, minerales, riesgos, carbón, etc., por medio de observaciones en la superficie de la tierra. (Ernesto Orellana).

La zona de estudio, se encuentra formado por una serie de morrenas compuestas por materiales de tamaño heterogéneo, angulosos a subangulosos, en la parte central de la cuenca, se tiene la presencia de un bofedal compuesto por arenas y gravas en la parte central y arcillas a arcillo limosas en la parte basal y superficial. El objetivo de ésta prospección es conocer la geometría y la profundidad del bofedal, de ésta manera se programaron una serie de sondeos eléctricos verticales.

La penetración de la corriente en subsuelo está en función al espaciamiento de los electrodos de corriente AB, por lo tanto se ha efectuado una extensión de estos hasta una distancia máxima de 320 metros, lo cual ha permitido una investigación del subsuelo de más de 50 metros de profundidad.

Para una mejor interpretación de los datos se ha realizado una doble lectura de los datos, para cada cambio en la separación de los electrodos. El registro de los datos en campo, se lo realizo en planillas electrónicas, los cuales han sido introducidos en un ordenador para su posterior análisis.

4.2.2 Ubicación geográfica de los puntos

Nº S.E.V.	ESTE	NORTE	ELEVACION (m.s.n.m.)	Obs.
1	512587	7992843	4578	ACHUTA-01
2	512586	7992899	4588	ACHUTA-02
3	512580	7993045	4579	ACHUTA-03
4	512551	7993047	4583	ACHUTA-04
5	512541	7992978	4583	ACHUTA-05
6	512558	7992866	4581	ACHUTA-06

4.2.3 Metodología técnica y dispositivos

El método utilizado en este estudio geofísico, es aquel relacionado a la medición de diferentes resistividades a partir del sistema de Sondeos Eléctricos Verticales S.E.V., método denominado también como Geoelectrico, con un dispositivo de cuatro electrodos dispuestos en forma lineal.

Un sondeo eléctrico consiste en establecer una curva de variación de las resistividades aparentes con la profundidad en un terreno o suelo, a través de medidas en superficie realizados con ayuda de un dispositivo de cuatro electrodos denominados como AMNB.

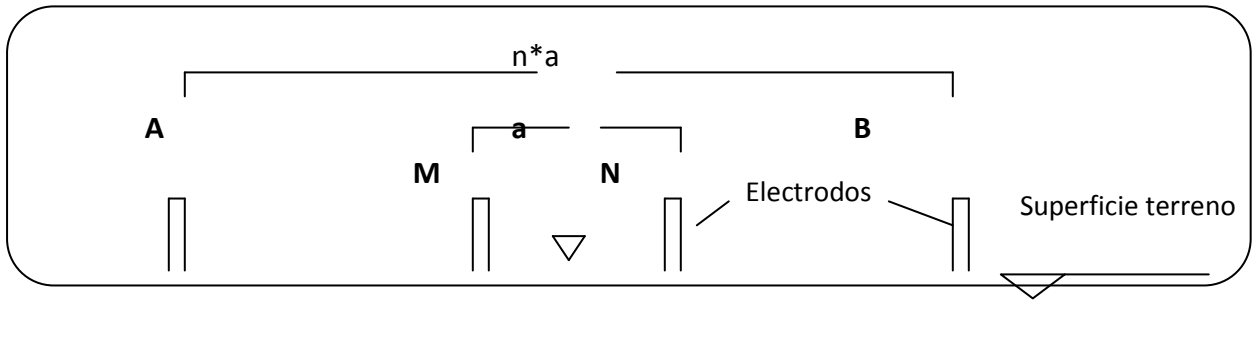
La profundidad de investigación puede regularse variando las distancias entre los electrodos de corriente A, B, como se indica en la figura.

Este método nos ayuda a determinar las características litológicas y estructurales del sub-suelo, determinando los contactos e interfaces, así como las profundidades en las que se encuentran las discontinuidades litológicas, en base a la transmisión de corriente eléctrica de alto voltaje introducida en el subsuelo.

➤ Dispositivo Schlumberger

Para este tipo de estudios se utiliza el diseño electródico Schlumberger, que es un dispositivo rectilíneo y simétrico, con centro común en el punto "O"; los

cuatro electrodos que se utilizan, están alineados, y es el centro común de AB y MN como se muestra a continuación, (Figura N° 1.)



AB, MN = Electrodos de Cobre.

Fig. 1 Diseño Electrónico Schlumberger

Básicamente se ha utilizado el diseño Schlumberger para cada punto o sitio de sondeo, que nos permita investigar las características litológicas de la cubierta y de las rocas en profundidad.

➤ Equipos e Instrumental

Para la ejecución de los sondeos, se ha utilizado un Geo-receptor marca JP, con una sensibilidad de 0.01 milivoltios y de 0.01 miliamperios, de registro digital; un Geo-transmisor JP-600 de 2.5 Amperios y 500 Voltios; accesorios como batería de 12 V, tester, cables de conexión, electrodos (barras) de Cu.



Fig. 2. Equipo e instrumento geofísico utilizado en la campaña

4.2.4 Interpretación de las curvas de sondeo

Para la interpretación se ha utilizado el método de Punto Auxiliar mediante el empleo de los diagramas de composición de Ebert, los mismos que consisten en un conjunto de curvas “maestras” de interpretación principal y un conjunto de cuatro sistemas de curvas o Diagramas de interpretación auxiliares.

Simultáneamente y una vez introducidos los datos de campo en la computadora, se efectúa una interpretación mediante procesamiento y el análisis de las curvas utilizando el programa 1X1D de Interpex Limited., el mismo que permiten el ajuste de las curvas de campo con las curvas teóricas, mediante un proceso iterativo.

Los resultados del procesamiento y el ajuste de curvas de sondeo, se adicionan en cuadros y gráficos en el Anexo adjunto al presente informe; así mismo se han obtenido las columnas geo-eléctricas interpretadas, donde se indican los valores de las resistividades obtenidas, así como las profundidades a las interfaces entre los diferentes estratos.

4.3 Resultado de los sondeos geoelectricos (SEV's) - Bofedal Achuta

➤ Sondeo Geoelectrico: ACHUTA-01

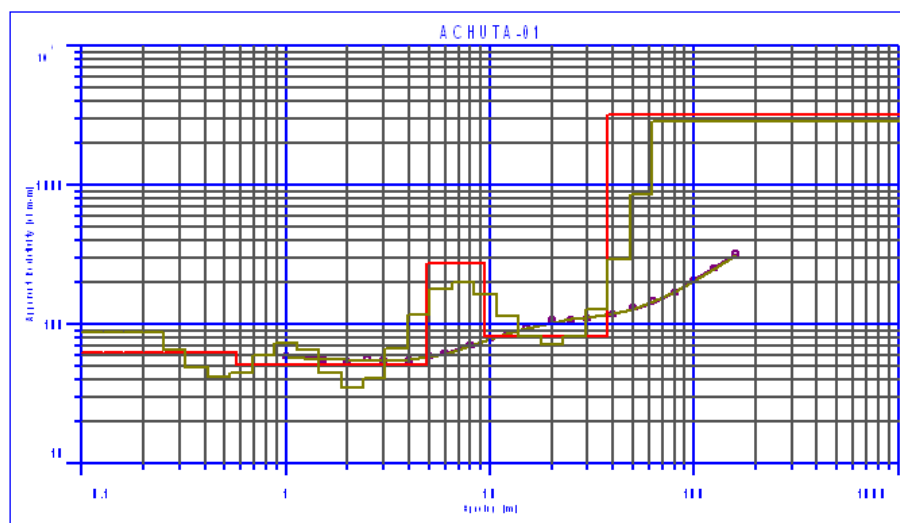


Fig. 3 Curva generada con datos de campo.

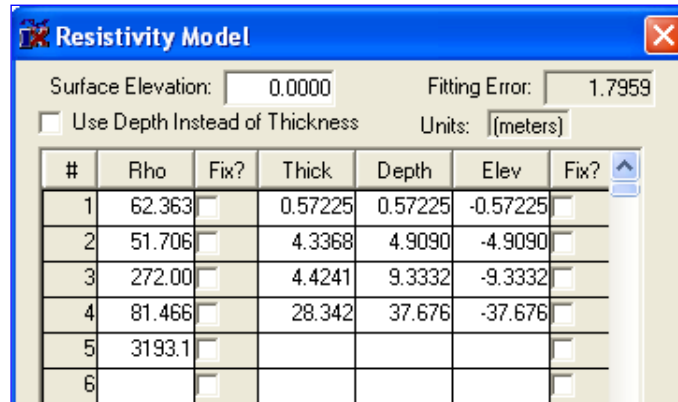


Fig. 4 Resultados obtenidos mediante software.

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
62.36	0.57		Limo arcilloso con arenas seco a húmedo
51.70	4.33	4.90	Arenas con algo de gravas saturado
272.00	4.42	9.33	Gravas gruesas con arenas saturadas
81.46	28.34	37.67	Posibles tobas
3193.1			Basamento rocoso

De acuerdo al sondeo realizado en este sector, se observó la presencia de 5 capas y/o niveles (Figuras N° 3 y 4). Un primer nivel que está conformado por limos arcillosos con arenas secos a húmedos, con una resistividad de 62.36 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0.57 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con algo de gravas saturado, con una resistividad de 51.70 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 4.90 metros; posteriormente se tiene un nivel de gravas gruesas con arenas saturadas, con una resistividad de 272.0 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 9.33 metros; seguidamente se tiene otro nivel de posibles unidades tobáceas, con una resistividad de 81.46 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 37.67 metros; por último se tiene la

presencia de otro nivel considerado como basamento rocoso, con una resistividad de 3193.1 Ohm-m.

➤ Sondeo Geoelectrico: ACHUTA-02

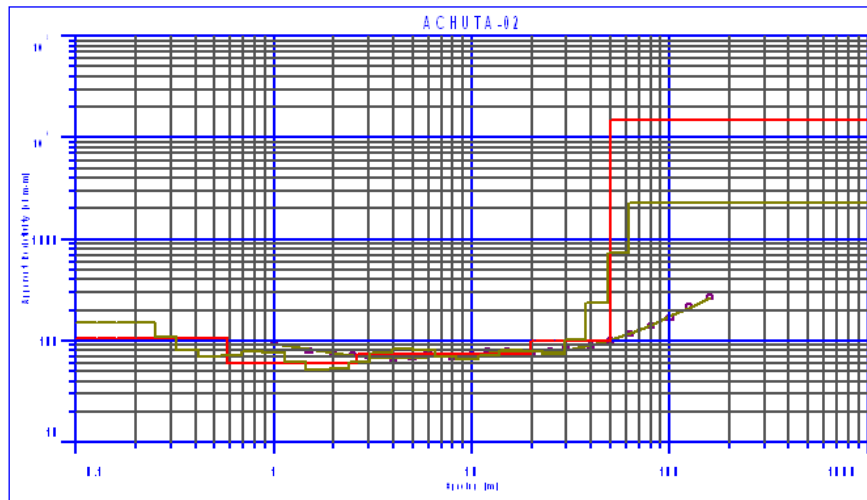


Fig. 5 Curva generada con datos de campo.

Resistivity Model						
Surface Elevation: 0.0000			Fitting Error: 0.0000			
☐ Use Depth Instead of Thickness			Units: (meters)			
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	106.42	☐	0.58141	0.58141	-0.58141	☐
2	59.802	☐	2.0167	2.5981	-2.5981	☐
3	73.040	☐	17.318	19.916	-19.916	☐
4	100.39	☐	30.348	50.263	-50.263	☐
5	15045.	☐				☐
6		☐				☐

Fig. 6 Resultados obtenidos mediante software.

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
106.42	0.58		Limo arenoso con arcillas seco a húmedo
59.80	2.01	2.59	Arenas con algo de gravas saturado
73.04	17.31	19.91	Gravas con arenas saturadas
100.39	30.34	50.26	Posibles tobas
15045			Basamento rocoso

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 5 capas y/o niveles (Figuras Nº 5 y 6). Un primer nivel que está conformado por limo arenoso con arcillas seco a húmedo, con una resistividad de 106.42 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0.58 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con algo de gravas saturado, con una resistividad de 59.80 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 2.59 metros; seguidamente se tiene la presencia de gravas con arenas saturadas, con una resistividad de 73.04 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 19.91 metros; posteriormente se tiene la presencia de otro nivel de posibles unidades tobaceas, con una resistividad 100.39 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 50.26 metros; por último se tiene la presencia de basamento rocoso, con una resistividad de 15045 Ohm-m.

➤ Sondeo Geoelectrico: ACHUTA-03

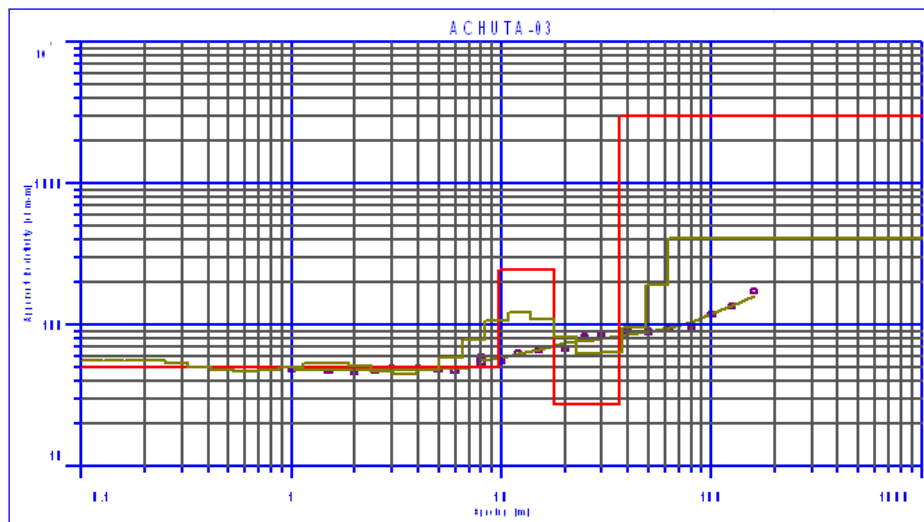


Fig. 7 Curva generada con datos de campo.

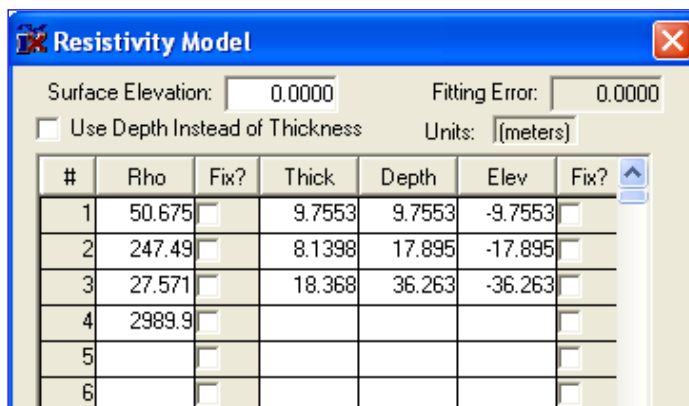


Fig. 8 Resultados obtenidos mediante software.

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
50.67	9.75		Arenas con algo de gravas saturado
247.49	8.13	17.89	Gravas con arenas saturadas
27.57	18.36	36.26	Posibles tobas
2989.9			Basamento rocoso

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 4 capas y/o niveles (Figuras Nº 7 y 8). Un primer nivel que está conformado por arenas con algo de gravas saturado, con una resistividad de 50.67 Ohm-m y alcanza una profundidad de 9.75 metros; el siguiente nivel que se tiene son gravas con arenas saturadas, con una resistividad de 247.49 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 17.89 metros; seguidamente se tiene la presencia de posibles unidades tobaceas, con una resistividad de 27.57 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 36.26 metros; por último se tiene la presencia de basamento rocoso, con una resistividad de 2989.9 Ohm-m.

➤ Sondeo Geoelectrico: ACHUTA-04

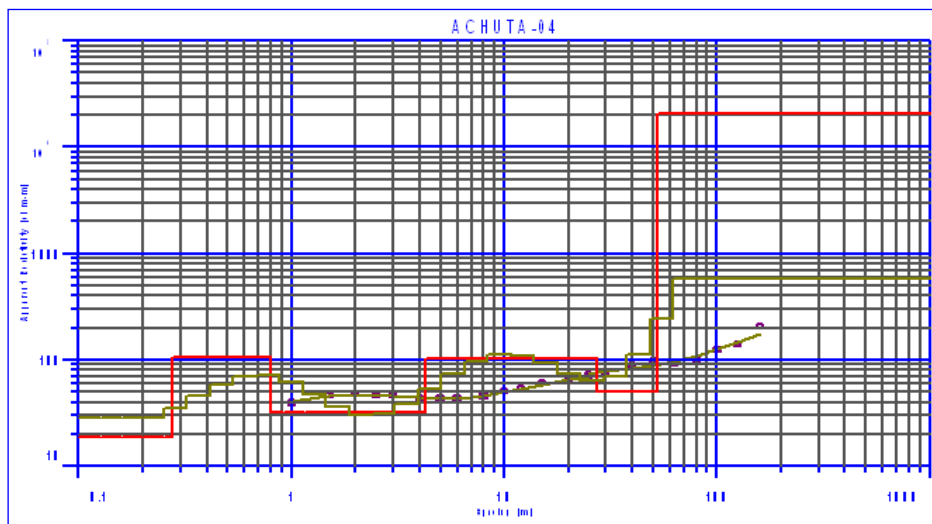


Fig. 9 Curva generada con datos de campo.



Resistivity Model

Surface Elevation:

0.0000

Fitting Error:

0.0000

☐ Use Depth Instead of Thickness

Units:

(meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	19.012	☐	0.27316	0.27316	-0.27316	☐
2	106.69	☐	0.52439	0.79755	-0.79755	☐
3	32.443	☐	3.4517	4.2493	-4.2493	☐
4	101.19	☐	22.965	27.215	-27.215	☐
5	50.894	☐	25.197	52.412	-52.412	☐
6	20559.	☐				☐
7		☐				☐

Fig.10 Resultados obtenidos mediante software.

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
19.01	0.27		Limo arcilloso húmedo
106.69	0.52	0.79	Arenas con gravas húmedas a saturadas
32.44	3.45	4.24	Limo arcilloso con algo de arena saturado
101.19	22.96	27.21	Gravas con arenas saturadas
50.89	25.19	52.41	Posibles tobas
20559			Basamento rocoso

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 6 capas y/o niveles (Figuras Nº 9 y 10). Un primer nivel que está conformado por limo arcilloso húmedo, con una resistividad de 19.01 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0.27 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con gravas húmedas a saturadas, con una resistividad de 106.69 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 0.79 metros; seguidamente se tiene la presencia de limo arcilloso con algo de arena saturado, con una resistividad de 32.44 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 4.24 metros; para pasar luego a otro nivel de gravas con arenas saturadas, con una resistividad de 101.19 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 27.21 metros; seguidamente se tiene la presencia de otro nivel de posibles unidades tobaceas, con una resistividad de 50.89 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 52.41 metros; por último se tiene la presencia de basamento rocoso, con una resistividad de 20559 Ohm-m.

➤ Sondeo Geoelectrico: ACHUTA-05

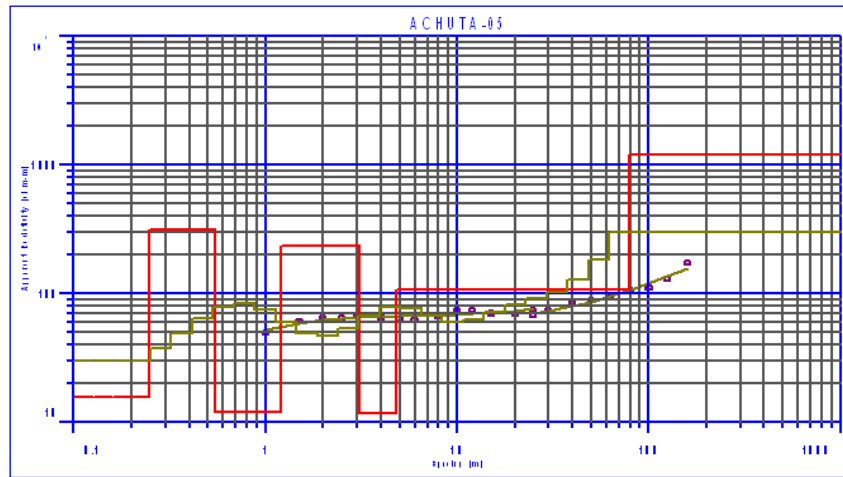


Fig. 11 Curva generada con datos de campo.



Resistivity Model

✕

Surface Elevation:

0.0000

Fitting Error:

0.0000

☐ Use Depth Instead of Thickness

Units:

[meters]

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	15.693	☐	0.24910	0.24910	-0.24910	☐
2	316.70	☐	0.29984	0.54894	-0.54894	☐
3	11.920	☐	0.66157	1.2105	-1.2105	☐
4	235.54	☐	1.8777	3.0882	-3.0882	☐
5	11.782	☐	1.6856	4.7738	-4.7738	☐
6	107.27	☐	74.006	78.780	-78.780	☐
7	1207.8	☐				☐
8		☐				☐

Fig. 12 Resultados obtenidos mediante software.

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
15.69	0.24		Limo arcilloso húmedo
316.70	0.29	0.54	Gravas gruesas con arenas saturadas
11.92	0.66	1.21	Limo arcilloso saturado
235.54	1.87	3.08	Gravas gruesas con arenas saturadas

11.78	1.68	4.77	Limo arcilloso saturado
107.27	74.00	78.78	Posibles tobas
1207.8			Basamento rocoso

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 7 capas y/o niveles (Figuras Nº 11 y 12). Un primer nivel que está conformado por limos arcillosos húmedos, con una resistividad de 15.69 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0.24 metros; el siguiente nivel que se tiene son gravas gruesas con arenas saturadas, con una resistividad de 316.70 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 0.54 metros; seguidamente se tiene la presencia de limo arcilloso saturado, con una resistividad de 11.92 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 1.21 metros; para luego pasar a otro nivel de gravas gruesas con arenas saturadas, con una resistividad de 235.54 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 3.08 metros; seguidamente se tiene la presencia de limo arcilloso saturado, con una resistividad de 11.78 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 4.77 metros; el siguiente nivel posiblemente corresponde a unidades tobaceas, con una resistividad de 107.27 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 78.78 metros; por último se tiene la presencia de basamento rocoso, con una resistividad de 1207.8 Ohm-m.

➤ Sondeo Geoelectrico: ACHUTA-06

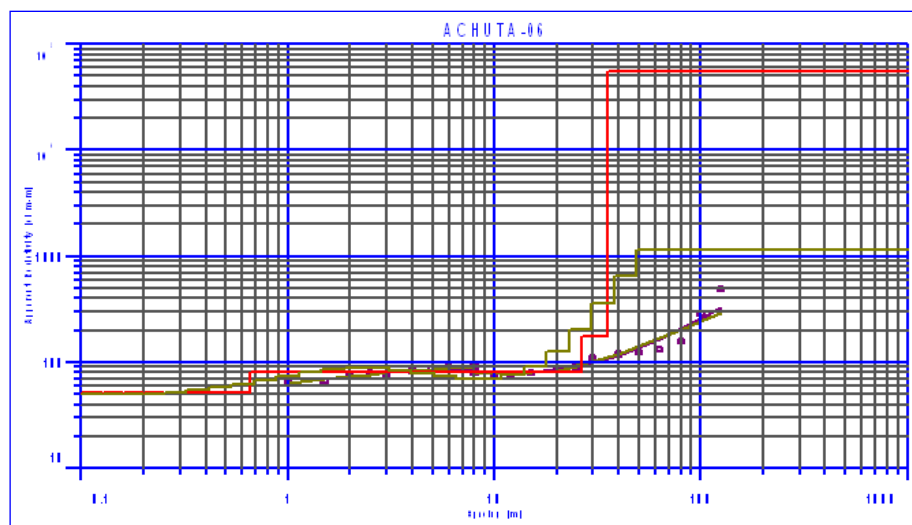


Fig. 13 Curva generada con datos de campo.

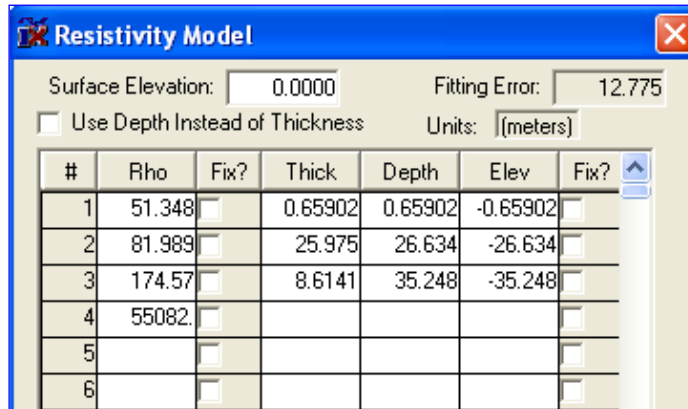


Fig. 14 Resultados obtenidos mediante software.

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
51.34	0.65		Arenas limosas saturadas
81.98	25.97	26.63	Arenas con gravas y limos saturados
174.57	8.61	35.24	Posibles tobas
55082			Basamento rocoso

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 4 capas y/o niveles (Figuras N° 4 y 5). Un primer nivel que está conformado por arenas limosas saturadas, con una resistividad de 51.34 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0.65 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con gravas y limos saturados, con una resistividad de 81.98 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 26.63 metros; seguidamente se tiene la presencia de posibles unidades tobaceas, con una resistividad de 174.57 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 36.24 metros; por último se tiene la presencia de basamento rocoso, con una resistividad de 55082 Ohm-m.

➤ Conclusiones

De acuerdo a los sondeos realizados en el bofedal de Achuta, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- La toma de datos no fue complicada, puesto que el ambiente de depositación es bastante homogéneo, y con bastante contenido areno

limoso, lo que favoreció el flujo de corriente, salvo en los sectores donde los materiales se encuentran secos, en este caso los datos fueron difíciles de obtener.

- El ambiente geológico se encuentra conformado por arenas, limos, gravas y arcillas, todos estos materiales se encuentran saturados a semisaturados, no se tiene aun la calidad de las aguas, pero se asumen son de buena calidad.
- Es evidente que en todos los sondeos realizados, el basamento rocoso fue detectado con una característica bastante evidente, siendo que al final de las curvas los valores de resistividad van en continuo aumento.
- La secuencia de depositación varia entre arcillas y arenas con gravas, hasta el lecho del bofedal, se asume la posible existencia de unidades tobaceas en la base del bofedal que estarían controlando la formación del mismo.
- En el caso del primer sondeo, la base del bofedal en este sector se encontraría a una profundidad promedio de 9 a 10 metros, el basamento rocoso se encontraría a una profundidad de 37 a 38 metros.
- En el caso del segundo sondeo la base del bofedal se encontraría a una profundidad de 19 a 20 metros, y el basamento rocoso se encontraría a una profundidad de 50 metros.
- En el caso del tercer sondeo, la base del bofedal se encuentra a una profundidad de 17 a 18 metros, y el basamento rocoso se encontraría a una profundidad de 36 a 37 metros.
- En el cuarto sondeo, la base del bofedal se encuentra a una profundidad de 27 a 28 metros, y el basamento rocoso se encontraría a una profundidad de 52 metros.
- En el quinto sondeo, la base del bofedal se encontraría a una profundidad de 5 metros, estando el basamento rocoso a una profundidad de 78 metros.
- En el sexto sondeo, la profundidad de la base del bofedal se encontraría a una profundidad de 22 metros, y el basamento rocoso se encontraría a una profundidad de 35 metros.

SONDEO ELECTRICO VERTICAL

Proyecto/Estudio SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES EN EL BOFEDAL DE ACHUTA															
Fecha 6 de septiembre de 2012													Croquis		
operador Ing. ANDRES OSCO															
Observaciones															
Sondeo N° 1							Sondeo N° 2								
EST.	AB/2	MN	V (mV)	I (mA)	K	Ohm-m	EST.	AB/2	MN	V (mV)	I (mA)	K	Ohm-m		
1	1	1	7300	290	2.36	59.3	1	1	1	5700	140.0	2.36	95.9		
2	1.5	1	2680	300	6.28	56.1	2	1.5	1	1780	140.0	6.28	79.9		
3	2	1	1160	250	11.78	54.7	3	2	1	1130	170.0	11.78	78.3		
4	2.5	1	940	310	18.85	57.2	4	2.5	1	1120	290.0	18.85	72.8		
5	3	1	620	310	27.49	55.0	5	3	1	1020	400.0	27.49	70.1		
6	4	1	460	410	49.48	55.5	6	4	1	610	460.0	49.48	65.6		
7	5	1	280	370	77.75	58.8	7	5	1	310	350.0	77.75	68.9		
8	6	1	230	420	112.31	62	8	6	1	200	300.0	112.31	74.9		
9	8	1	130	370	200.28	70.4	9	8	1	72	210.0	200.28	68.7		
10	8	5	720	370	36.29	70.6	11	8	5	400	210.0	36.29	69.1		
11	10	5	380	280	58.91	79.9	12	10	5	411	330.0	58.91	73.4		
12	12	5	290	300	86.55	83.7	13	12	5	175	190.0	86.55	79.7		
13	15	5	130	190	137.45	94.0	14	15	5	160	280.0	137.45	78.5		
14	20	5	100	230	247.40	107.6	15	20	5	87	290.0	247.40	74.2		
15	25	5	80	290	388.77	107.2	16	25	5	66	320.0	388.77	80.2		
16	25	10	165	290	188.50	107.2	18	25	10	134	330.0	188.50	76.5		
17	30	10	89	220	274.89	111.2	19	30	10	114	360.0	274.89	87.0		
18	40	10	55	230	494.80	118.3	20	40	10	33	180.0	494.80	90.7		
19	50	10	2.5	14.6	777.55	133.1	21	50	10	6	46.0	777.55	101.4		
20	63	10	27.3	230.0	1239.05	147.1	22	63	10	7	74.0	1239.05	117.2		
21	80	10	2.2	26.2	2002.77	168.2	23	80	10	22.5	320.0	2002.77	140.8		
22	100	10	2.8	42.5	3133.75	206.5	26	100	10	2	37.0	3133.75	169.4		
23	125	10	7.3	142.0	4900.90	251.9	28	125	10	0.15	3.4	4900.90	216.2		
24	160	10	0.2	5.0	8034.64	321.4	29	160	10	0.3	8.8	8034.64	273.9		

SONDEO ELECTRICO VERTICAL

Proyecto/Estudio SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES EN EL BOFEDAL DE ACHUTA													
Fecha 6 de septiembre de 2012							Croquis						
operador Ing. ANDRES OSCO													
Observaciones													
Sondeo N° 3							Sondeo N° 4						
EST.	AB/2	MN	V (mV)	I (mA)	K	Ohm-m	EST.	AB/2	MN	V (mV)	I (mA)	K	Ohm-m
1	1	1	9760	470	2.36	48.9	1	1	1	9050	540.0	2.36	39.5
2	1.5	1	3670	480	6.28	48.0	2	1.5	1	3900	530.0	6.28	46.2
3	2	1	1500	380	11.78	46.5	3	2	1	2130	520.0	11.78	48.3
4	2.5	1	1050	420	18.85	47.1	4	2.5	1	1220	500.0	18.85	46.0
5	3	1	700	390	27.49	49.3	5	3	1	840	490.0	27.49	47.1
6	4	1	360	360	49.48	49.5	6	4	1	410	470.0	49.48	43.2
7	5	1	230	370	77.75	48.3	7	5	1	200	360.0	77.75	43.2
8	6	1	190	450	112.31	47	8	6	1	150	390.0	112.31	43.2
9	8	1	94	350	200.28	53.8	9	8	1	120	520.0	200.28	46.2
10	8	5	583	360	36.29	58.8	10	8	5	640	510.0	36.29	45.5
11	10	5	292	310	58.91	55.5	11	10	5	440	510.0	58.91	50.8
12	12	5	270	370	86.55	63.2	12	12	5	290	470.0	86.55	53.4
13	15	5	163	340	137.45	65.9	13	15	5	220	500.0	137.45	60.5
14	20	5	33	120	247.40	68.0	14	20	5	130	500.0	247.40	64.3
15	25	5	34	160	388.77	82.6	15	25	5	86	480.0	388.77	69.7
16	25	10	72	170	188.50	79.8	16	25	10	183	470.0	188.50	73.4
17	30	10	128	420	274.89	83.8	17	30	10	128	460.0	274.89	76.5
18	40	10	80	440	494.80	90.0	18	40	10	69	380.0	494.80	89.8
19	50	10	53	460.0	777.55	89.6	19	50	10	8	64.0	777.55	97.2
20	63	10	30	400.0	1239.05	92.9	20	63	10	27	360.0	1239.05	92.9
21	80	10	0.1	2.1	2002.77	95.4	21	80	10	5	100.0	2002.77	100.1
22	100	10	1.3	34.2	3133.75	119.1	22	100	10	0.3	7.6	3133.75	123.7
23	125	10	5	180.0	4900.90	136.1	23	125	10	0.04	1.4	4900.90	140.0
24	160	10	0.3	13.9	8034.64	173.4	24	160	10	0.3	11.8	8034.64	204.3

SONDEO ELECTRICO VERTICAL

Proyecto/Estudio SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES EN EL BOFEDAL DE ACHUTA													
Fecha 6 de septiembre de 2012											Croquis		
operador Ing. ANDRES OSCO													
Observaciones													
Sondeo N° 5							Sondeo N° 6						
EST.	AB/2	MN	V (mV)	I (mA)	K	Ohm-m	EST.	AB/2	MN	V (mV)	I (mA)	K	Ohm-m
1	1	1	11090	530	2.36	49.3	1	1	1	11900	440.0	2.36	63.7
2	1.5	1	5110	530	6.28	60.6	2	1.5	1	3800	360.0	6.28	66.3
3	2	1	2930	530	11.78	65.1	3	2	1	2450	380.0	11.78	76.0
4	2.5	1	1840	530	18.85	65.4	4	2.5	1	1550	370.0	18.85	79.0
5	3	1	1230	500	27.49	67.6	5	3	1	1000	360.0	27.49	76.4
6	4	1	650	490	49.48	65.6	6	4	1	640	380.0	49.48	83.3
7	5	1	400	490	77.75	63.5	7	5	1	400	360.0	77.75	86.4
8	6	1	250	450	112.31	62.4	8	6	1	290	360.0	112.31	90.5
9	8	1	130	380	200.28	68.5	9	8	1	100	220.0	200.28	91.0
10	8	5	690	380	36.29	65.9	10	8	5	463	210.0	36.29	80.0
11	10	5	610	480	58.91	74.9	11	10	5	247	190.0	58.91	76.6
12	12	5	430	500	86.55	74.4	12	12	5	270	310.0	86.55	75.4
13	15	5	240	470	137.45	70.2	13	15	5	163	280.0	137.45	80.0
14	20	5	134	480	247.40	69.1	14	20	5	104	300.0	247.40	85.8
15	25	5	110	580	388.77	73.7	15	25	5	123	530.0	388.77	90.2
16	25	10	211	580	188.50	68.6	16	25	10	260	530.0	188.50	92.5
17	30	10	150	560	274.89	73.6	17	30	10	81	200.0	274.89	111.3
18	40	10	57	330	494.80	85.5	18	40	10	53	220.0	494.80	119.2
19	50	10	31	270.0	777.55	89.3	19	50	10	45	280.0	777.55	125.0
20	63	10	13	170.0	1239.05	94.8	20	63	10	14	130.0	1239.05	133.4
21	80	10	8	150.0	2002.77	106.8	21	80	10	0.8	10.0	2002.77	160.2
22	100	10	5	140.0	3133.75	111.9	22	100	10	1	11.0	3133.75	284.9
23	125	10	0.2	7.6	4900.90	129.0	23	125	10	0.1	1.0	4900.90	490.1
24	160	10	0.12	5.6	8034.64	172.2	24	160	10			8034.64	#DIV/0!

4.3 Elaboración del mapa piezométrico

4.3.1 Conceptos básicos. Generalidades

➤ Definición de pozo o piezómetro

Un pozo para abastecimiento de agua es un hueco profundizado en la tierra para interceptar acuíferos o mantos de aguas subterráneas.

➤ Funcionalidad

El método más directo, y generalmente más confiable, para realizar el control en profundidad relacionado al muestreo de aguas subterráneas es la instalación de pozos de monitoreo, perforados a propósito a una profundidad dada con un filtro situado a un intervalo de profundidad conocido. Una vez que el pozo es instalado correctamente, ofrece la posibilidad de obtener muestras representativas de aguas subterráneas.

➤ Metodología de instalación

En el área de estudio se utilizó la técnica de instalación de piezómetros sencillos, los cuales se constituyen en las alternativas más simples y de uso más frecuente para el monitoreo de pozos. Básicamente consisten de un tubo-forro plano de plástico, con la parte inferior perforada o ranurada con un intervalo continuo (5 cm) para permitir la entrada del agua a una profundidad dada (en nuestro caso de 1.30 m). Los filtros utilizados para recubrir los tubos fueron de plástico de ranura cuadrículada.

Después de la perforación, se montó la tubería del pozo con su filtro y se bajó a la profundidad deseada. Luego se construyó un tapón y un área de concreto (solo para el pozo N°6) como protección sanitaria para prevenir el ingreso de agua superficial.

El desarrollo lógico para la medición de los parámetros indicadores esenciales y de los determinantes inestables es la medición directa dentro de la columna del pozo. El día 15 de febrero se realizó la inspección ocular de todos los pozos construidos en anteriores salidas de campo, posteriormente se procedió a hacer la medición de niveles del agua en todos los pozos.

Se seleccionó este método porque es el más apropiado para el monitoreo de pozos. Se tomaron en consideración los objetivos y los límites financieros del proyecto.

La utilidad principal de esta actividad es la obtención de datos estadísticos que representan las variaciones del nivel del agua (ascensos y descensos) durante un lapso de tiempo (en nuestro caso 7 meses), considerando las variantes climáticas (lluvia, sequia, etc.) como agentes controladores.

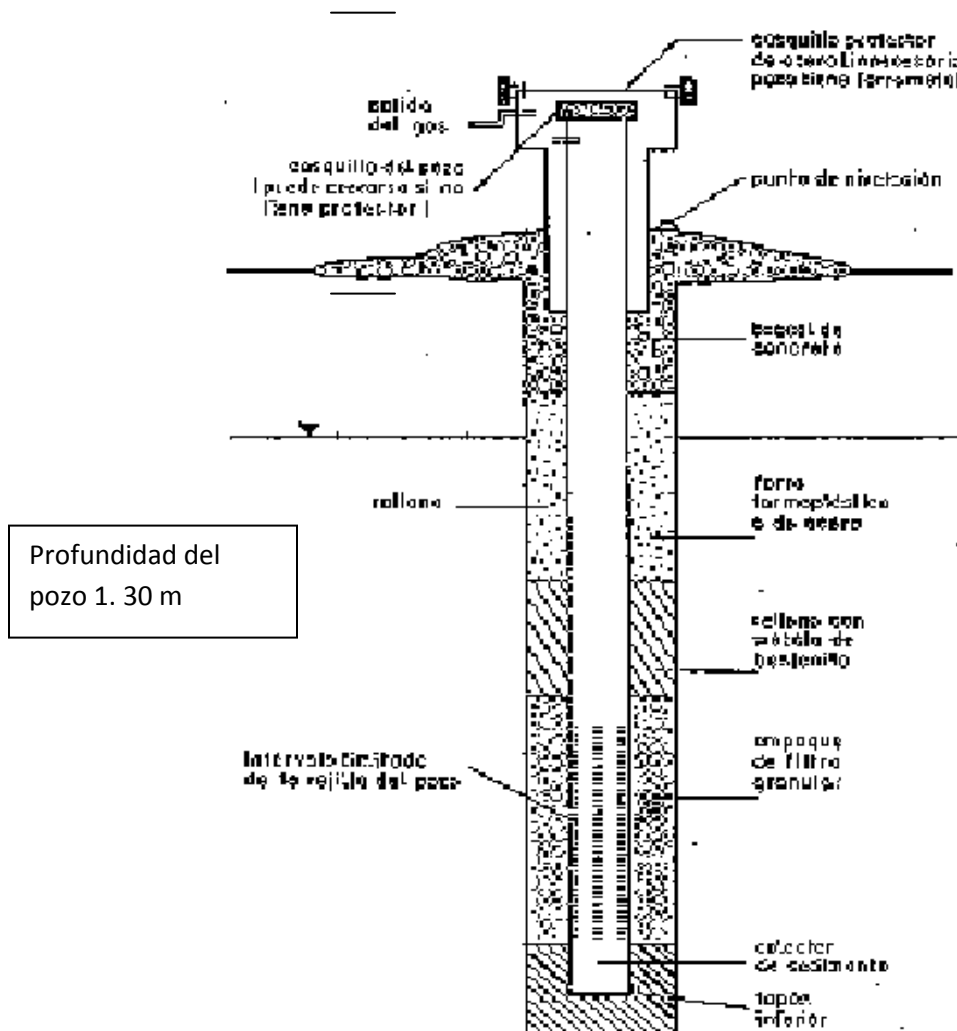


Fig. 15 Esquema de un tubo de pozo típico de monitoreo de nivel simple

4.3.2 Perforación de pozos

A continuación se resume en una tabla la descripción tipo de un piezómetro al momento de la perforación.

Piezómetro	
Distancia (profundidad en cm)	Material encontrado
20	Arena arcillosa color marrón c/tamaño de grano fino a medio. Se observó la presencia de algunas raíces de plantas.
40	Arena arcillosa color marrón c/tamaño de grano fino a medio. Se observó la presencia de algunas raíces de plantas
60	Arena con mátrix arcillosa con un tamaño de grano medio, la presencia de raíces se reduce.
80	Arena de grano medio junto con una mátrix arcillosa, el contenido de raíces se reduce
88 cm profundidad a la q se halló el agua	
100	Arena de grano medio a grueso junto con arcilla
110	Arcilla de color negro conjuntamente con arena de color marrón de grano medio
120	Arcilla negra

4.3.3 Consideraciones del comportamiento piezométrico

➤ Fluctuaciones del nivel piezométrico

La observación de las variaciones de nivel piezométrico en un cierto punto proporciona información sobre la respuesta del acuífero a procesos de recarga o de extracción, así como sobre la tendencia en el almacenamiento.

En la figura siguiente se esquematiza la evolución del nivel piezométrico en un punto en el que se observa unas variaciones en dientes de sierra, que se

pueden relacionar con periodos secos y húmedos, por ejemplo, y una tendencia (marcada con línea de trazos) que indica un descenso progresivo de niveles, que podría relacionarse con un proceso de sobreexplotación (explotación superior a la recarga).

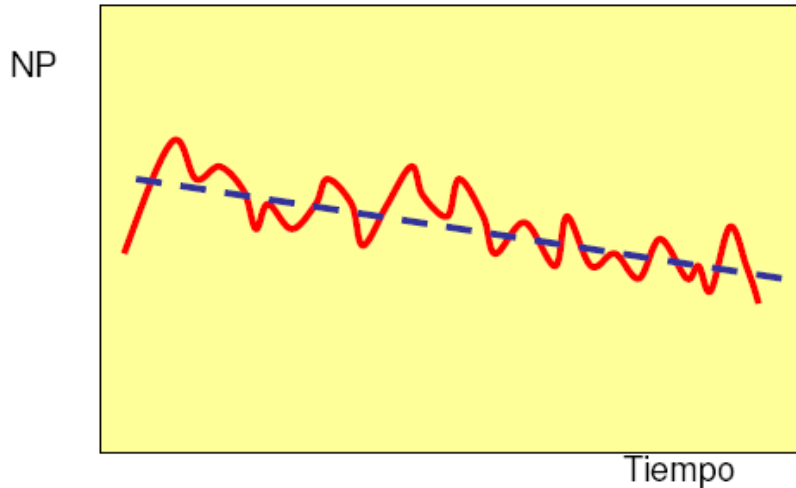


Fig. 16 Variaciones del nivel piezométrico respecto al tiempo

➤ Superficies piezométricas

Es el lugar geométrico de los puntos que señalan la altura piezométrica de cada una de las porciones de un acuífero referidas a una determinada profundidad. Se las representa mediante líneas de igual altura piezométrica, llamadas **líneas isopiezas**.

En los acuíferos libres, la superficie piezométrica coincide, a grandes rasgos, con la superficie freática, es decir, con el límite de saturación. En los acuíferos confinados la superficie piezométrica es más elevada que el techo de los mismos. En los acuíferos permeables por fisuración y/o karstificación y, en general, en acuíferos muy heterogéneos, puede ser una superficie discontinua.

➤ Mapas piezométricos

Se refieren a una fecha dada. La equidistancia depende de la precisión y la densidad de las medidas, de los valores del gradiente hidráulico, de la escala del mapa y de la precisión de la nivelación. En general, es del orden del metro (0.5, 1 ó 2 m.) para los mapas 1:10.000 y 1:25.000; y de 5 ó 10 metros para los

1:50.000 y 1:100.000.

El fundamento del método es interpolar valores entre puntos cercanos y trazar líneas que unan puntos de igual piezometría. En cada línea isopieza debe figurar su valor.

El sentido del flujo del agua, por las razones ya comentadas anteriormente, es desde líneas de mayor altura piezométrica hacia líneas de menor altura piezométrica, en la dirección de la máxima pendiente, es decir, perpendicularmente a las mismas. Así, es posible, dibujar flechas que indican el sentido del flujo.

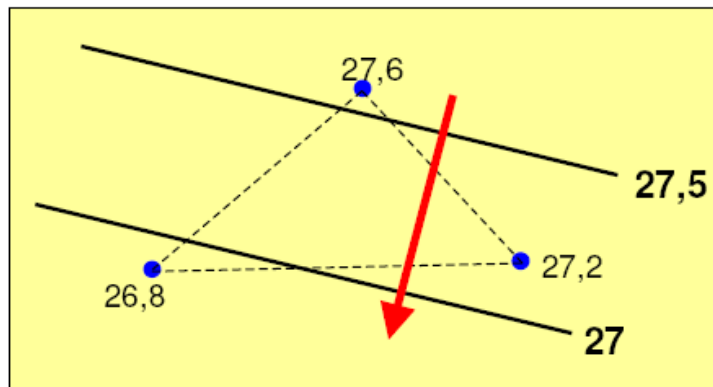


Fig. 17 Esquema que muestra las isopiezas o líneas equipotenciales

Los mapas piezométricos permiten:

- Conocer el sentido del flujo
- Diferenciar áreas de recarga y descarga Identificar divisorias hidrogeológicas
- Manifestar relaciones río – acuífero
- Mostrar diferencias de parámetros hidrodinámicos

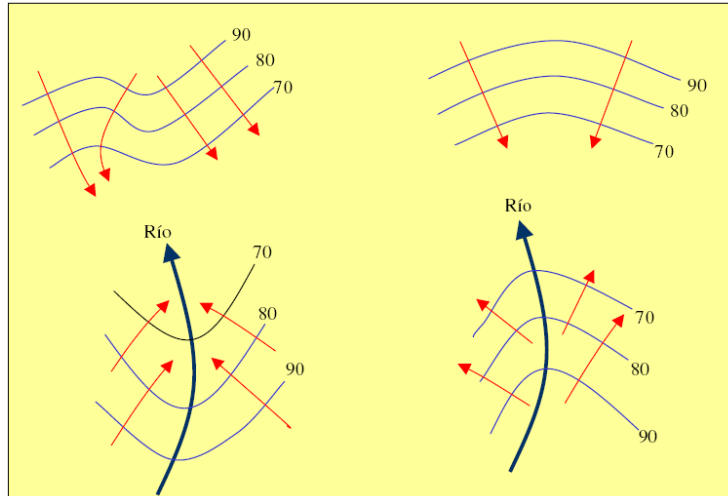
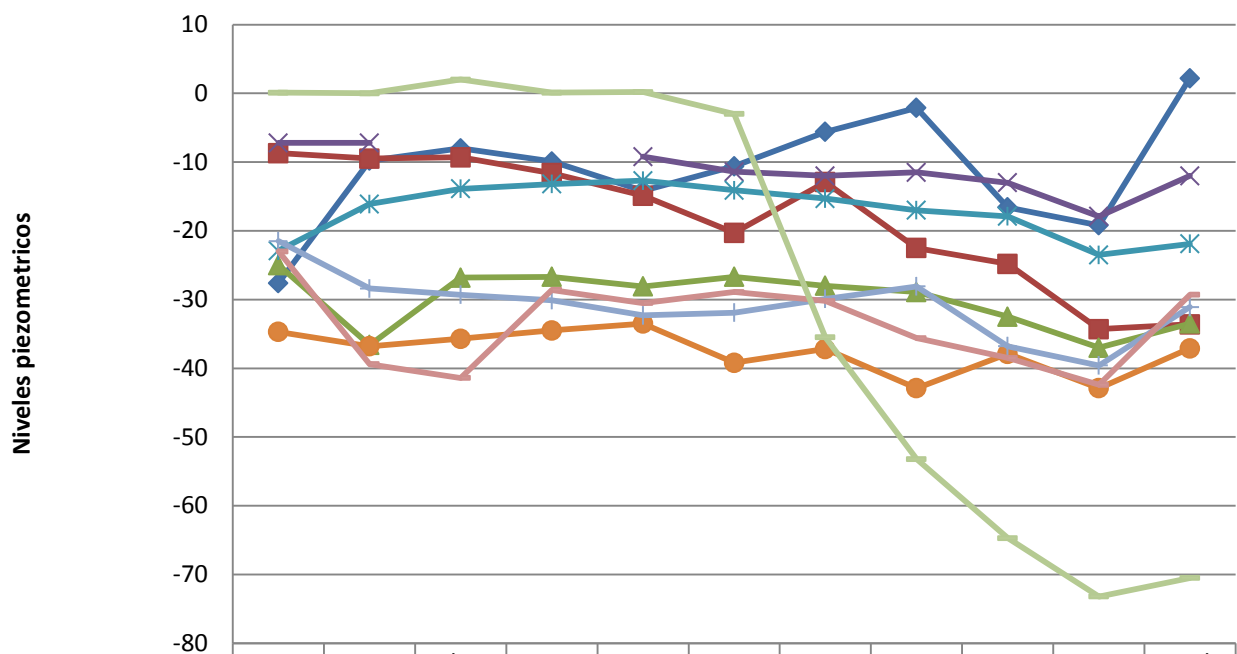


Fig. 18 Esquema que muestra ejemplos de secciones de mapas piezométricos mostrando direcciones de flujo

➤ Resultados

El mapa piezométrico se elaboró siguiendo la metodología antes descrita considerando los datos recolectados durante el lapso de diciembre de 2011 a octubre de 2012. En las siguientes tablas se observan las mediciones realizadas cada 15 días (2 veces al mes), junto con los datos de nivelación.

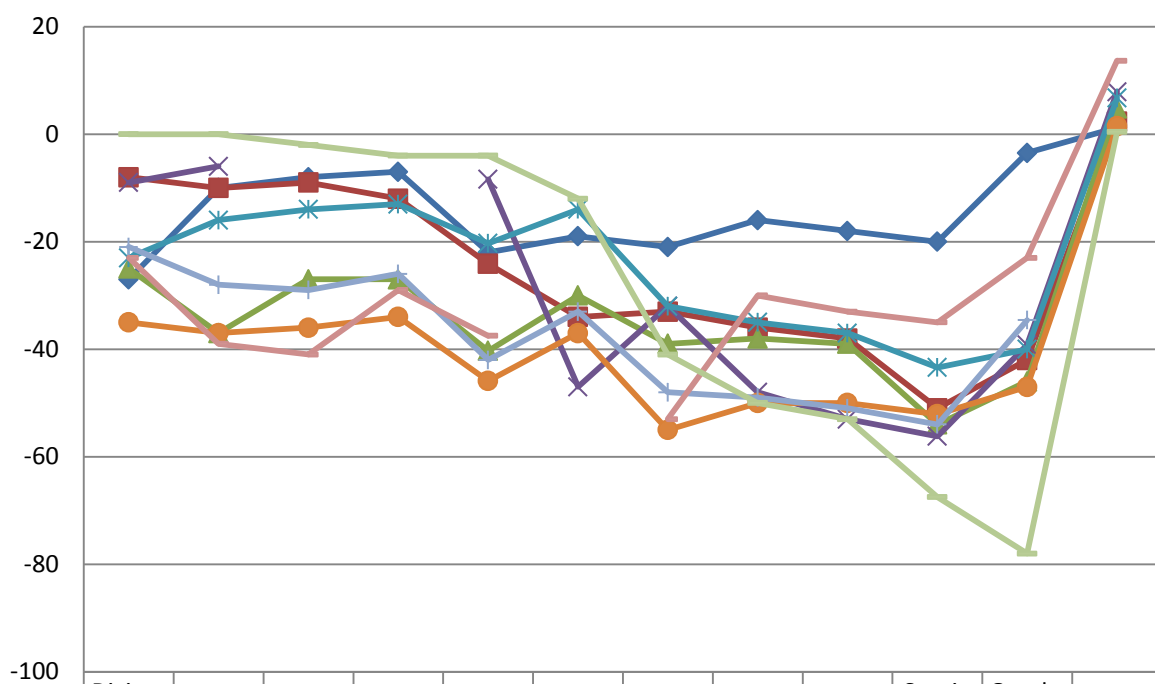
Curva de rendimiento mensual



	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Piezómetro 1	-27,6	-9,8	-8	-9,9	-14,2	-10,6	-5,6	-2,1	-16,6	-19,2	2,2
Piezómetro 2	-8,7	-9,5	-9,3	-11,6	-14,9	-20,3	-12,9	-22,5	-24,8	-34,3	-33,6
Piezómetro 3	-25	-36,6	-26,8	-26,7	-28,1	-26,7	-28	-28,9	-32,5	-37	-33,5
Piezómetro 4	-7,2	-7,2			-9,2	-11,4	-12	-11,5	-13	-17,9	-12
Piezómetro 5	-22,9	-16,1	-13,9	-13,2	-12,7	-14,1	-15,3	-17	-17,9	-23,5	-21,9
Piezómetro 6	-34,7	-36,8	-35,7	-34,5	-33,5	-39,2	-37,2	-42,9	-37,9	-42,9	-37,1
Piezómetro 7	-21,5	-28,4	-29,3	-30,1	-32,3	-31,9	-29,9	-28,1	-36,8	-39,6	-31,1
Piezómetro 8	-23	-39,4	-41,4	-28,6	-30,5	-28,9	-30,2	-35,6	-38,5	-42,4	-29,3
Piezómetro 9	0,1	0	2	0,1	0,2	-3	-35,5	-53,2	-64,7	-73,2	-70,5

Curva de rendimiento quincenal

Niveles piezométricos



Piezómetro 1	-27	-10	-8	-7	-22	-19	-21	-16	-18	-20	-3,5	1,229
Piezómetro 2	-8	-10	-9	-12	-24,1	-34	-33	-36	-38	-51	-42	2,322
Piezómetro 3	-25	-37	-27	-27	-40,3	-30	-39	-38	-39	-54	-46	4,787
Piezómetro 4	-9	-6			-8,4	-47	-32	-48	-53	-56,2	-39,2	7,884
Piezómetro 5	-23	-16	-14	-13	-20,3	-14	-32	-35	-37	-43,4	-40	6,732
Piezómetro 6	-35	-37	-36	-34	-45,9	-37	-55	-50	-50	-52,1	-47	1,499
Piezómetro 7	-21	-28	-29	-26	-42	-33	-48	-49	-51	-54	-34,6	
Piezómetro 8	-23	-39	-41	-29	-37,5		-53	-30	-33	-35	-23	13,654
Piezómetro 9	0	0	-2	-4	-4	-12	-41	-50	-53	-67,5	-78	0,404

MAPEO GEOQUÍMICO HIDROGEOLÓGICO Y MUESTREO DE CALIDAD DE AGUAS

5.1 Mapeo geoquímico-hidrogeológico

5.1.1 Generalidades. Conceptos básicos

➤ Interacción geoquímica – hidrogeología

Los conocimientos geoquímicos brindan al hidrólogo o hidrogeólogo una valiosa información acerca de la calidad de las aguas para los diferentes usos, éste aspecto está regulado a través de normas. En el caso de las aguas subterráneas, los fundamentos de la geoquímica son utilizados además, para obtener información en relación al tiempo de residencia del agua en el acuífero, las características de sus flujos, su estructura interna y su grado de contaminación.

La geoquímica se ocupa tanto de los problemas relacionados con los métodos de muestreo, monitoreo y análisis químico-físico, como de las regularidades de la distribución de los elementos, del proceso de adquisición de la composición química de las aguas; así como de su evolución y deterioro de su calidad.

El modo en que las aguas adquieren su composición química es un proceso complejo, donde intervienen factores de tipo químico-físico, geológico, geomorfológico, hidrogeológico, climático, microbiológico y ambiental.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, la calidad de las aguas está gobernada por los procesos de evaporación y evapotranspiración, captura selectiva de los iones por la vegetación, la generación de CO₂ mediante los procesos de respiración y descomposición de la materia orgánica, el intemperismo y disolución de los silicatos y minerales evaporíticos (rocas salinas, sulfatos y carbonatos), procesos de adsorción e intercambio iónico, procesos de oxidación- reducción, mezcla de aguas, y la contaminación.

De manera general se puede sintetizar que:

- El agua en la naturaleza nunca se encuentra en estado puro
- El agua de lluvia contiene: CO₂, O₂, N₂ y otras partículas. En general se encuentra poco mineralizada.

- Aguas superficiales y subterráneas: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , Br^- , SiO_2 , Fe^{2+} . Disuelven sales contenidas en el terreno por lo tanto las aguas subterráneas son más mineralizadas.

➤ Muestreo, análisis químico y control de la calidad de las aguas

El agua subterránea no posee una composición uniforme, ésta varía con la profundidad de manera que, de acuerdo a los objetivos del trabajo hidrogeológico, el muestreo debe hacerse en condiciones estáticas a través de un perfil de pozos. Como la composición químico-física depende además del ciclo hidrológico y de la actividad del hombre, la frecuencia del muestreo debe establecerse de manera tal, que se reflejen esos efectos sobre la calidad de las aguas.

En condiciones estáticas, las muestras deben ser tomadas a diferentes profundidades con un batómetro o como se realizó en el presente trabajo mediante mediciones manuales extrayendo las muestras con una botella de plástico y luego se enviaron a los laboratorios para su análisis. Además se realizó "in situ", sondeos de conductividad y salinidad y mediciones de temperatura, pH, y TDS.

De acuerdo a la metodología establecida, el principal requisito exigido es que la muestra debe ser representativa del lugar de origen. Los principales tipos de muestreo para el caso de muestras acuosas son:

- Muestras simples: son aquellas muestras tomadas en un tiempo y lugar determinado para su análisis individual. (tipo de muestreo utilizado para el presente estudio)
- Muestras compuestas: son las obtenidas por mezcla y homogeneización de muestras simples recogidas en el mismo punto y en diferentes tiempos.
- Muestras integradas: son las obtenidas por mezclado de muestras simples recogidas en puntos diferentes y simultáneamente.

➤ Procesos de interacción agua – roca.

Mediante el proceso de intemperismo y disolución de las rocas (rocas salinas, sulfatos, carbonatos y silicatos), éstas liberan sus iones al agua a través de reacciones cinéticas de diferentes escalas de tiempo. Otros minerales como los carbonatos, requieren del aporte del CO_2 de la atmósfera

del suelo por donde drenan las aguas. El tiempo de estos procesos cinéticos es del orden del recorrido de los flujos desde la zona de alimentación hasta la zona de emisión del acuífero. Los minerales silíceos, por otra parte, se disuelven muy lentamente y ejercen un efecto menor en la química del agua.

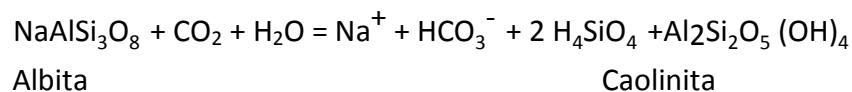
La composición mineralógica de las rocas (litología) determina en gran parte la composición de macro y microcomponentes del agua. Así por ejemplo las aguas que drenan terrenos carbonatados poseen altos contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} , cuya relación iónica depende de la proporción de calizas y dolomías presentes. En los acuíferos desarrollados en areniscas, dominan Ca^{2+} , Mg^{2+} o Na^+ en dependencia del tipo de silicato. Los iones predominantes serán Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} o NO_3^- en dependencia de la litología presente, la profundidad del agua y la ocurrencia o no de procesos de contaminación.

Para sintetizar se puede señalar lo siguiente:

- Por lo general las aguas subterráneas varían su composición química absoluta en un cierto intervalo entre los períodos secos (máxima concentración) y los períodos húmedos (mínima concentración), pero tienden a presentar **un mismo patrón hidrogeoquímico cuando la litología controla el modo de adquisición de la composición química de las aguas** (este es el caso del área de estudio, por tal razón se escogió realizar una medición única y no varias mediciones periódicas).

➤ Principales reacciones químicas comunes en un ambiente hidrológico - hidrogeológico

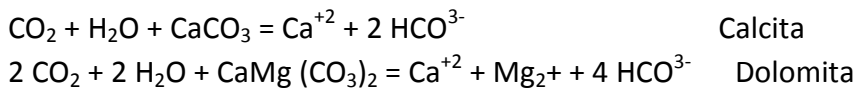
- Disolución incongruente de minerales
Cuando la disolución de un mineral da lugar a iones y moléculas no solubles, la disolución es incongruente. Este tipo de disolución es común en el proceso de intemperismo de los silicatos, donde la disolución de estos minerales se hace a expensas de la precipitación de un mineral de tipo arcilloso, por ejemplo la caolinita.



En el proceso de intemperismo en los terrenos kársticos también se suelen producir disoluciones incongruentes cuando están presentes dos

minerales carbonatados, tales como calcita y dolomita o la calcita y el yeso. En estos casos las aguas pueden disolver uno de los minerales y precipitar el otro.

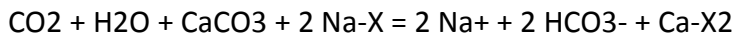
Un agua al moverse por un terreno calcáreo se puede saturar en calcita. Sin embargo, esta agua puede encontrarse insaturada respecto a la dolomita. Si en esas condiciones hace contacto con rocas con alto contenido de dolomita, se produce la disolución de este último mineral con la precipitación del primero.



Por efecto de ion común (Ca^{2+} y HCO_3^-), a medida que se produce la disolución de la dolomita, estos iones en exceso tenderán a recombinarse dando lugar a la precipitación del CaCO_3 . Como resultado de este proceso el agua presentará una composición peculiar (patrón hidrogeoquímico) diferente a la que adquieren las aguas al drenar por separados calizas y dolomías.

- Procesos de intercambio iónico

Los suelos y los acuíferos contienen abundantes minerales, tales como las arcillas (presentes en las morrenas), que son capaces de producir reacciones de adsorción e intercambio iónico. Este tipo de proceso, puede producirse a partir de la reacción de disolución de la calcita con un agua que contiene una cierta pCO_2 , en presencia de una resina de intercambio iónico.



Mediante este proceso se alcanza un elevado contenido de NaHCO_3 , ya que a medida que los iones de Ca^{2+} son liberados del cristal de calcita, pasan a la interfase líquido-sólido donde son capturados por la resina, lo que impide que se produzca la precipitación del CaCO_3 poco soluble.

- Procesos de mezcla de aguas

Mediante mezcla de aguas de diferente naturaleza hidrogeológica,

se producen reacciones químicas que pueden dar lugar a la disolución o precipitación de minerales. Estos procesos se producen porque, por lo general, dichas aguas presentan diferencias en sus presiones de CO_2 , los potenciales de oxidación-reducción, el pH, etc., y como resultado de ello se obtiene un agua de calidad diferente a la que se debía esperar de la simple unión de los componentes de la mezcla por separado.

Entre los cambios más significativos que se originan cuando se mezclan aguas diferentes se pueden citar los siguientes: disolución incongruente de minerales por efecto de ion común, precipitación de minerales de hierro (férrico) por formación de una mezcla más oxidada, aumento o disminución de la solubilidad por cambios de pH, aumento de la solubilidad por efecto salino o de fuerza iónica, incremento de la corrosión de las calizas debido al denominado efecto de mezcla de agua (mixing corrosion).

- Procesos de oxidación-reducción

Entre los procesos de oxidación-reducción que alteran la composición química de las aguas subterráneas podemos señalar los siguientes: oxidación de los metales Fe^{2+} y Mn^{2+} con precipitación de los hidróxidos correspondientes (por mezcla con un agua más oxigenada oxidación de las piritas que elevan el contenido de SO_4^{2-} , reducción de sulfatos con producción de malos olores (H_2S); nitrificación del nitrógeno orgánico en las aguas (producción de NO_2^- y NO_3^-). Algunos de estos procesos, son catalizados por los microorganismos y la simulación química de los mismos, requiere la inoculación de sepas, la acción de la luz, un medio de cultivo adecuado y un determinado pH.

- Intemperismo de los silicatos

Se ha demostrado que en determinadas condiciones experimentales, la velocidad de reacción (en términos de la variación de la sílice liberada) presenta un comportamiento lineal en el tiempo, indicativo de un mecanismo mediante el cual las reacciones químicas están controladas por fenómenos superficiales y no por el transporte de los productos de la reacción.

Entre los parámetros que juegan un papel notable en estos procesos se

encuentran el pH y la temperatura. Por lo general la solubilidad de un mineral silíceo se va incrementando hasta un valor de pH, a partir del cual la solubilidad se hace menor. A altas temperaturas se favorece la disolución de los minerales silíceos, de ahí el elevado contenido de SiO₂ encontrado en las aguas termales procedentes del drenaje profundo.

5.1.2 Metodología de muestreo utilizada y resultados obtenidos

- Técnica de muestreo. Condiciones de muestreo. Materiales utilizados.
 - Elección de la técnica de muestreo basado en la caracterización geoquímica
- Siguiendo los patrones de muestreo establecidos, se utilizó el tipo de muestreo simple, el cuál consistió en la toma sistemática de muestras en un tiempo y lugar determinado para su análisis individual.

El mapeo geoquímico se basó en la toma de muestras de aguas, se escogió este tipo de muestreo porque está más limitado a la ocurrencia de elementos solubles. Una distribución anómala de elementos en aguas subterráneas y meteóricas se denomina **anomalía hidrogeoquímica**. Como generalmente los elementos son transportados en forma disuelta en las aguas naturales, los elementos más aptos para la exploración geoquímica de aguas son los elementos relativamente móviles.

Por otra parte, es importante señalar que dicha anomalía hidrogeoquímica estaría directamente vinculada a la existencia de una anomalía precedente en las rocas volcánicas del área de estudio. El tipo de **anomalía de corrosión o lixiviación**, que consiste en un halo de corrosión causado por fluidos, que pasan por vetas, fracturas y intersticios de la roca y cuyos metales disueltos subsecuentemente son precipitados o absorbidos. Este tipo de transporte se denomina infiltración.

La ubicación, las dimensiones y la intensidad de una anomalía de corrosión dependen de los factores siguientes:

-  Corrido del fluido mineralizado: Zonas de fracturas o de alta porosidad en la roca figuran zonas permeables, que favorecen un

recorrido rápido en comparación al corrido a lo largo de bordes de granos o en poros de rocas macizas. En el área de estudio se tiene un alto índice de fracturación en las rocas causado por 2 factores muy importantes:

1. En las rocas volcánicas se suelen formar zonas de debilidad donde la roca tiende a fracturarse o a rajarse debido al cambio brusco de temperatura. Cabe señalar que las rocas al salir expulsadas a superficie están en estado incandescente y sufren movimientos de contracción internos debido a la adecuación de estos cuerpos a la temperatura superficial, estas contracciones causan el fracturamiento.
2. Ya que el área de estudio posee una gran influencia de los procesos glaciares, las rocas presentes pueden experimentar un fenómeno conocido como porosidad secundaria, que consiste en la adquisición de fracturas o diaclasas provocadas en respuesta a los esfuerzos causados por el movimiento de la masa glaciar.

 La influencia de precipitación, absorción, intercambio iónico y de otros procesos al transferir los elementos indicadores de su forma disuelta en el fluido hidrotermal hacia una fase sólida en la roca.

- Condiciones de muestreo y materiales utilizados

Para el muestreo de aguas superficiales y aguas subterráneas, se midieron los siguientes parámetros y se usaron los siguientes equipos:

 pH: La medida del pH se llevó a cabo a temperatura ambiente con ayuda de un pH- metro.

 Conductividad: La medida de la conductividad se realizó a temperatura ambiente con un conductímetro.

 TDS (sólidos totales disueltos): La medida de TDS se realizó a temperatura ambiente con el medidor de TDS/conductímetro.

 Salinidad: La medida de salinidad se la efectuó a temperatura ambiente con el medidor de salinidad/pH-metro.

Los materiales usados para la toma de muestras representativas 1 y 2 y para la medición de parámetros «in situ», fue la siguiente:

✚ Botellas toma-muestras: se tomó directamente mediante la botella o recipiente, luego se cerró herméticamente y se envió al laboratorio para su posterior análisis.

✚ Para las determinaciones «in situ» se empleó la toma de muestras de agua superficial o subterránea en un envase de plástico.

Para la mantención efectiva de las muestras, se siguió la siguiente metodología:

✚ Para los parámetros físico-químicos se utilizaron envases de plástico, ya que son los que se suele utilizar preferentemente debido a que algunos cationes metálicos pueden dejar residuos adsorbidos sobre las paredes de los recipientes de vidrio.

✚ El tiempo máximo de almacenamiento de la muestra antes de su análisis depende de los parámetros a determinar: así, por ejemplo, hay ciertos análisis que requieren su determinación lo antes posible (CO_2 , Cl_2 , DBO, O_2 , sulfitos, etc.), mientras que en el caso de las muestras que son objeto del presente estudio se mantuvieron durante 4 días en condiciones refrigeradas (cerca a 4°C) y en oscuridad.

✚ En el presente estudio se encontró una limitación de tipo procedimental, ya que como norma general las muestras simples suelen ser poco representativas y solo proporcionan información puntual de la situación en un momento y lugar dados, pudiendo ser utilizadas en estudios previos o en muestras muy homogéneas.

- Resultados obtenidos

Mediante la siguiente tabla 1 se resume el mapeo geoquímico-hidrogeológico, tomando en cuenta el número de muestras registradas,

coordenadas, parámetros medidos y ubicación de muestreo.

Nº de punto	coordenadas	hora	pH / t	mV /t	Conductividad / t	TDS / t
1	0511110 7989874	9:30	5.31 /6.6°	119.2 /6.1°	603 μ S / 6.4°	303 ppm / 6.0°
2	0511313 7990096	9:45	4.98 /7.2°	134.7 /7.1°	596 μ S / 4.3°	295 ppm / 4.1°
3	0511508 7990334	9:55	4.67 /7.9°	135 / 7.9°	594 μ S / 5.9°	295 ppm / 6.1°
4	0511709 7990705	10:17	5.33 /11.2°	114.3/11.4°	584 μ S / 8.6°	286 ppm / 9.0°
5	0511911 7990986	10:39	5.11 /12.4°	130.5/12.0°	580 /13.0°	603 ppm/11.7°
6	0512095 7991203	11:05	4.99 /13.4°	138.1/13.7°	574 /13.0°	293 ppm/12.9°
7	0512103 7991243	11:10	6.11/13.3°	73.2/13.1°	432 /11.2°	208 ppm/12.0°
8	0512112 7991404	11:24	5.02/15.0°	133/15.4°	578 /14.2°	295 ppm/13.6°
9	0512182 7991604	11:38	4.99/14.4°	136.9/14.7°	595 /14.0°	293 ppm/14.3°
10	0512236 7991812	11:53	4.92/16.8°	141.2/16.8°	579 /16.11°	293 ppm/16.1°
11	0512293 7992005	12:08	4.74/17.1°	148.5/17.0°	585 /16.3°	291 ppm/16.1°
12	0512444 7992220	12:21	4.8/ 17.0°	146.1/17.6°	577 /17.4°	290 ppm/17.6°
13	0512617 7992458	12:37	4.94/ 18.2°	141.1/17.8°	582 /16.7°	286 ppm/17.5°
14	0512594 7992666	12:50	4.85/14.2°	138/15.1°	574 /14.7°	291 ppm/14.2°
15	0512620 7992728	13:01	4.86/14.9°	142/14.6°	578 /13.8°	277 ppm/15.1°
16	0512603 7992785	13:13	4.97/14.6°	136.7/14.9°	569 /13.9°	290 ppm/13.3°
17	0512610 7992817	13:27	7.1/8.2°	18.5/7.1°	253 /5.3°	124 ppm/6.3°
18*	0512582 7992803	13:39	6.83/8.6°	37.4/9.1°	650 /7.0°	331 ppm/6.5°
19	0512597 7993006	13:53	4.93/12.9°	143.1/12.8°	597 /12.2°	294 ppm/12.4°
20	0512553 7993017	14:05	7.1/15.3°	26.0/15.4°	615 /15.1°	316 ppm/14.6°
21	0512641	14:17	7.21/6.2°	25.0/5.7°	250 /5.8°	121 ppm /6.9°

	7993082					
22	0512589 7993252	14:31	4.94/10.7°	135.9/10.6°	590 /9.5°	295 ppm/9.6°
23*	0512635 7993574	14:44	6.75/6.0°	42.7/6.1°	443 /5.1°	214 ppm/6.1°
24 24	0512572 7993597	14:52	5.96/8.7°	88.2/8.8°	234 /8.7°	117 ppm/8.5°
25	0512635 7993700	15:02	5.95/8.6°	70.1/8.4°	205 /8.3°	102 ppm/8.5°
26	0512695 7993797	15:10	6.83/8.9°	31.4/9.0°	51.4 /8.8°	25.7 ppm/8.7°
27	0512703 7993890	15:26	6.86/10.0°	38.4/9.9°	48.9 /8.8°	24.3 ppm/8.7°
28	0512735 7993999	15:35	7.02/10.6°	22.3/10.8°	44.8 /12.1°	23.8ppm/10.8°
29	0512755 7994149	15:49	7.35/10.0°	13.4/10.2°	48.4 /9.6°	23.8 ppm/9.7°
30	0512773 7994252	15:56	7.32/9.8°	13.5/9.8°	49.2 /8.8°	24.9 ppm/8.7°
31	0512897 7994411	16:11	7.39/8.1°	10.8/8.3°	51.9 /8.2°	25.5 ppm/8.6°
32	0513075 7994661	16:27	7.55/8.7°	-6.4/8.7°	58.4 /9.4°	30.0 ppm/8.8°
33	0512514 7993852	16:33	3.56/9.6°	181.0/9.5°	988 /9.1°	569 ppm/9.2°
34	0512526 7993734	16:41	3.97/10.2°	176.6/10.0°	1077 /9.6°	523 ppm/10.1°
35	0512549 7993627	16:49	4.12/10.2°	158.2/10.1°	786.2/ 9.8°	436 ppm/9.6°
36	0512566 7993529	16.:58	4.8/10.4°	144.4/10.4°	577 /9.8°	294 ppm/9.7°

	Ojos de agua
	Inicio y final del bofedal
	Piezómetros (izquierda)
*	Piezómetros (derecha)
	Coyuntura de ríos
	Rio lado derecho
	Rio lado izquierdo

5.2 Muestreo de calidad de aguas

5.2.1 Generalidades. Conceptos básicos

- Fiabilidad de un análisis de agua

- Metodología para un exitoso análisis de calidad de agua

La evaluación de la calidad de agua se realiza mediante el análisis de laboratorio dirigido a conocer cualitativa y cuantitativamente las características físicas, químicas y biológicas más importantes que pueden afectar su uso real y potencial.

A fin de garantizar la confiabilidad de los resultados que arrojan los análisis de laboratorio, las técnicas y procedimientos deben ser en lo posible, lo más cuidadosamente desarrollados y evaluados. Además se debe establecer un conjunto de normas y procedimientos para la correcta captación, traslado y preservación de muestras de agua.

- Metodología para captación y muestreo de aguas superficiales y subterráneas

Los procedimientos para la captación de muestras varían según los análisis que se efectúan y de las condiciones del cuerpo de agua; ellas deben ser representativas del cuerpo de agua muestreado, el número de sitios muestreados, la frecuencia de muestreo, el tamaño de las muestras individuales y las técnicas de captación.

El criterio generalizado, es el de captar varias muestras individuales del tamaño que las normas permitan y en el mayor número de sitios muestreados, para así obtener una muestra compuesta que represente mejor la fuente de agua bajo análisis.

La frecuencia de muestreo, igualmente afecta el grado de representatividad, cuando el intervalo seleccionado no permita la detección de cambios importantes de las características de calidad de aguas, por lo que es recomendable establecer una frecuencia mínima de muestreo.



Selección del tipo de muestreo en aguas superficiales

Ríos y corrientes Se debe partir de la necesidad de definir la calidad de agua a lo largo de la sección transversal del río en el punto y en el momento que se hace el muestreo. Si las características físico-químicas son homogéneas a lo largo de la sección transversal, se considera que una muestra tomada en un punto de la sección es representativa y por lo tanto define la calidad de agua. Si por el contrario, las características del agua no son uniformes a lo largo de la sección transversal, teóricamente se puede obtener una muestra que represente la composición total de la corriente.



Selección del sitio de muestreo en aguas subterráneas

Cuando se quiere estudiar la calidad de agua del acuífero, las muestras se tomarán directamente en el pozo a diferentes niveles de profundidad.

- Descripción de los parámetros medidos en laboratorio



Determinaciones físicas

Los análisis físicos miden y registran aquellas características de agua que pueden ser observadas por los sentidos. Estas características son: color, olor, sabor, turbiedad, temperatura, residuos, conductividad específica.

- ❖ Color

Su determinación consiste en la comparación visual de las muestras con una serie de patrones de soluciones coloreadas de clorplatinato de potasio, cloruro de cobalto y ácido clorhídrico.

- ❖ Turbiedad

La turbiedad de una suspensión mide la capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso producido por la presencia de material insoluble. La turbiedad es función tanto de la concentración como del tamaño de la partícula del material y se expresa en “unidades de turbiedad”.

- ❖ Conductividad

Es una medida de la capacidad de un líquido para transmitir la corriente eléctrica; es un parámetro relacionado con la cantidad de iones presentes en el líquido y con la temperatura a la cual se efectúa la determinación.

- ❖ Sólidos

La determinación de sólidos es importante para evaluar la calidad del agua y para controlar los procesos de tratamiento de aguas potables y residuales.

Los sólidos se clasifican en filtrables y no filtrables, a su vez, cada uno de estos se dividen en volátiles y no

volátiles. La porción volátil representa la material orgánico y la no volátil el material inorgánico presente.

❖ Temperatura

Normalmente las mediciones de temperatura pueden efectuarse con cualquier buen termómetro centígrado de mercurio. Debe ser siempre registrada en el campo y hasta obtener una lectura constante.

 Determinaciones químicas

Los análisis químicos tienen como objetivo fundamental determinar la concentración de las sustancias e naturaleza mineral y orgánica que pueden afectar la calidad del agua, proporcionando información sobre posible contaminación o mostrando variaciones producidas por el tratamiento a que pueden ser sometidas las mismas.

Los resultados de los análisis químicos normalmente se indican en partes por millón (p.p.m.), o también se puede indicar en miligramos de sustancia o elemento por litro de muestra. El pH se expresa en cifras absolutas de 0 a 14, con un decimal.

❖ Aniones

Alcalinidad Se determina la capacidad de un agua para neutralizar el ácido titulándose con un ácido fuerte a los puntos de equivalencia del ácido carbónico y bicarbonato. La alcalinidad de un líquido se clasifica como alcalinidad total o consumo de ácido para alcanzar el pH= 4.5 y la alcalinidad fenoltaleínica o consumo de ácido para alcanzar el pH=8.3

❖ Cloruro

Se determina generalmente mediante análisis volumétrico con un potenciómetro (medidor de pH), con una solución de nitrato de plata usando un electrodo de vidrio y otro de plata. El punto final del análisis volumétrico es la lectura del instrumento en la cual haya ocurrido el mayor cambio de voltaje.

❖ Dureza

La dureza del agua es debida a iones metálicos bivalentes que son capaces de reaccionar con el jabón para formar precipitados y con ciertos aniones presentes en el agua para formar incrustaciones. Los principales aniones bivalentes son el calcio y el magnesio.

❖ Calcio

Se usa el método de análisis volumétrico, que se basa en que cuando el ADTA se agrega a un agua que contenga tanto calcio como magnesio, se combina en primer lugar con el calcio que se tiene presente.

❖ Magnesio

En la mayoría de los casos se determina como la diferencia entre la dureza total y la determinación del calcio.

❖ pH

Es el logaritmo del recíproco de la concentración del ion hidrógeno, o más precisamente, de la actividad del ión hidrogeno, en moles por litro. En el agua un número constante de moléculas se ionizan de manera que el producto de las concentraciones de los iones (H^+) y (OH^-) es 10^{-14} (K_i), la cual es constante de disociación del agua.

En el agua pura existe el mismo número de iones (H^+) y (OH^-) o sea 10^{-7} . La adición de ácidos o bases desplaza este equilibrio hacia uno u otro sentido, el pH mide esta característica de lagua.

La escala práctica del pH comprende del 0, muy ácido a 14, muy alcalino, con el valor medio de 7 que corresponde a neutralidad.

 Determinaciones biológicas

Algunos procedimientos que se usan para el aislamiento, identificación y enumeración son difíciles y complicados, además que se requiere mayor volúmen de muestra y mayor tiempo de procesamientos.

Los indicadores biológicos más usados para estos fines son los

llamados organismos coliformes, cuya presencia, además de estar asociada con posibles riesgos para la salud, e utilizada como indicador de eficiencia del tratamiento al cual es sometida el agua.

El estimado o determinación de los organismos coliformes se realiza empleando la técnica de los tubos múltiples de fermentación y el cotaje total de colonias.

❖ **Cotaje total de colonias**

Tiene por objeto determinar el contenido bacterial de la muestra de agua por unidad de volumen (ml) bajo condiciones de cultivo. Es utilizado como un análisis auxiliar en el control de la potabilidad de lagua y puede dar información importante cuando se evalúa la calidad de un sistema de distribución y la efectividad de los procedimientos de purificación.

❖ **Presencia o ausencia (análisis de coliformes)**

Este método es una modificación simplificada del método de tubos múltiples de fermentación, obteniéndose los resultados en menos de 48 horas, además de que permite efectuar grandes cantidades de análisis por unidad de tiempo.

5.2.2 Resultados e interpretación de los análisis de laboratorio

➤ **Calidad de agua para consumo humano y animal**

- **Uso humano**

En general las normas que rigen la calidad de las aguas de consumo humano están establecidas en cada país, por la autoridad sanitaria competente, teniendo en cuenta que estos límites se fijan con un margen de seguridad amplio.

Características físicas:

Turbidez	Máx	3 N.T.U.
Color	Máx	5 escala Pt-Co
Olor		Característico

Características químicas:

pH (excepto aguas carbonatadas)	RANGO	6.0 – 9.0
Sustancias Inorgánicas		
amoníaco	MÁX (mg/l)	0.20
aluminio residual	MÁX (mg/l)	0.20
arsénico	MÁX (mg/l)	0.05
cadmio	MÁX (mg/l)	0.01
cianuro	MÁX (mg/l)	0.10
cinc	MÁX (mg/l)	5.00
cloro residual	MÁX (mg/l)	0.5
Cloruro	MÁX (mg/l)	350
Cobre	MÁX (mg/l)	2
Cromo	MÁX(mg/l)	0.05
Fluoruro	MÁX (mg/l)	2
Hierro	MÁX (mg/l)	2
Manganeso	MÁX (mg/l)	0.10
Mercurio	MÁX (mg/l)	0.001
Nitratos	MÁX (mg/l)	45
Nitritos	MÁX (mg/l)	0.10
Plata	MÁX (mg/l)	0.05
Plomo	MÁX (mg/l)	0.05
sólidos disueltos totales	MÁX (mg/l)	1500
Sulfatos	MÁX (mg/l)	500

Internacionalmente se fijan los siguientes parámetros físicos y químicos para el agua de bebida:

Parámetro	Unidad de Medida	Valor Aceptable	Límite Tolerable
Aluminio	mg/l	< 0.10	0,20
Cloruros	mg/l	< 250	400
Cobre	mg/l	< 1	1.5
Color	U.C.	< 6	15
Detergentes	mg/l	< 0.2	0.2 (p)
Dureza (CO ₃ Ca)	mg/l	80 – 200	500

Hierro	mg/l	< 0.10	0.2
Manganeso	mg/l	< 0.05	0.1
pH	-	pHs +/- 0.5	pHs +/- 0.5
Sabor y Olor	-	No ofensivo para la mayoría de los usuarios	-
Sólidos Disueltos	mg/l -	50-1000	2000
Sulfatos	mg/l	< 200	400
Turbiedad	U.N.T.	< 1	< 2
Zinc	mg/l	< 5	5
Arsénico	mg/l	--	< 0.10 (p)
Cadmio	mg/l	--	< 0.005
Cromo	mg/l	--	< 0.05
Cianuro	mg/l	--	< 0.1
Fluoruro	mg/l	--	Ver Resolución
Mercurio	mg/l	--	< 0.001
Nitrato + Nitrito	mg/l	--	< 45
Nitrito	mg/l	--	< 0.1
Plata	mg/l	--	< 0.045
Plomo	mg/l	--	< 0.05
Selenio	mg/l	--	< 0.01

U.C. Unidad de Color en escala Platino-Cobalto

U.N.T. Unidad Nefelométrica de Turbiedad

(p) Provisorio

Parámetros Microbiológicos Básicos:

PARÁMETRO	LÍMITE TOLERABLE	
MÉTODO TUBOS MÚLTIPLES	MÉTODO MEMBRANA FILTRANTE	
COLIFORMES TOTALES	< 2,2 NMP/100 ml	Cero en 100 ml
COLIFORMES FECALES	< 2,2 NMP/100 ml	Cero en 100 ml

UFC = Unidades Formadoras de Colonias

NMP = Número Máximo Probable

- Calidad del agua para consumo animal

En vista de la complejidad en la determinación de la aptitud del agua para bebida, ya que no se pueden establecer límites fijos o absolutos para clasificarla como apta o no, conviene analizar algunas razones:

- ✚ Animales habituados a aguas de bajo tenor salino, llevados a lugares de aguas de alto tenor, sufrirán más que aquellos que ya están acostumbrados.
- ✚ Si se ofrecen dos clases de agua, una salina y otra no, evitarán la salina.
- ✚ Los animales pueden consumir agua de alto tenor salino durante pocos días sin sufrir daños, si luego se les da agua con bajo contenido de sal.
- ✚ Si el contenido de sales aumenta, también aumenta el consumo de líquidos.
- ✚ Un cambio brusco de un agua de baja salinidad a otra de alto tenor salino causa más problemas que si el cambio fuera gradual.
- ✚ Existe una variación anual en el consumo de agua, es decir que, los animales beben más en las estaciones cálidas que en el invierno.
- ✚ El estado del forraje influye sobre el consumo de agua ya que mientras más succulento es, menor es la necesidad de ella. Independientemente del animal y la pastura, existe una variación anual en el tenor salino del agua que hay que tener en cuenta.

➤ Control de los análisis de aguas

Los análisis físico - químicos de aguas pueden controlarse mediante cálculos sencillos que, salvo excepciones, se adecuan a la mayoría de las muestras de agua. Las causas que pueden hacer que los cálculos no cierren en algunas muestras son:

- Elevada salinidad
- Elevado contenido de Carbonatos y Bicarbonatos con respecto a los Cloruros.
- Elevado contenido de Sulfatos, con respecto a los Cloruros.

Controles:

- Sumatoria de Cationes (meq/l) = Sumatoria de Aniones (meq/l)
- Sumatoria de Cationes (meq/l) = Conductividad/100 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- Sumatoria de Aniones (meq/l) = Conductividad/100 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)/1,57= Sólidos Disueltos Totales (mg/l)

- Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) $\times 0,64$ = Sólidos Disueltos Totales (mg/l)

Nota: la mayoría de los análisis de agua presentan sus resultados en (mg/l), pero como los cálculos precedentes usan las concentraciones en (meq/l), resulta útil la siguiente tabla de conversión de cada miliequivalente de sustancia a los miligramos de las mismas.

1 meq Calcio = 20,040 mg	1 meq Carbonatos = 30,005 mg
1 meq Magnesio = 12,160 mg	1 meq Bicarbonatos = 61,018 mg
1 meq Sodio = 22,997 mg	1 meq Bicarbonato de Calcio = 81,05 mg
1 meq Potasio = 39,096 mg	1 meq Sulfato de Calcio = 68,07 mg
1 meq Cloruro de Sodio = 58,45 mg	1 meq Sulfato de Magnesio = 60,19 mg
1 meq Sulfatos = 48,030 mg	1 meq Sulfato de Sodio = 71,02 mg
1 meq Cloruros = 35,457 mg	

➤ Resultados

Para analizar los datos de laboratorio se tomaron dos muestras tipo para realizar una comparación entre ellas, y la posterior detección de datos anómalos o signos de contaminación. Los resultados de los análisis de laboratorio son los siguientes:

Nº de muestra 1

Datos de muestreo	Datos de recepción
Fecha: 2012/10/19 Hora: 9:30	Volumen de muestra: 2 litros
Punto: Arroyo	Tipo de recipiente: botella de plástico
Lugar: Bofedal Achuta	Estado de la muestra: refrigerada
Fuente: Agua superficial	Temperatura: 1,0 °C
Localidad: Sajama	
Provincia: Sajama Depto: Oruro	
Temperatura: 6,1 °C	

	Análisis físico	
--	------------------------	--

Nº	Parámetro analizado	Método	Unidades	Resultado
1	Color verdadero	Colorimétrico	UCV	0,30
2	Turbiedad	Nefelométrico	UNT	2,88
3	Sólidos disueltos total	Gravimétrico	mg/l	508,00
Análisis químico				
Nº	Parámetro analizado	Método	Unidades	Resultado
1	Conductividad	Potenciométrico	µS/cm	526,4
2	pH (T = 25,0 C)	Potenciométrico		3,92 *
3	Calcio	Volumétrico	mg Ca /l	80,14
4	Magnesio	Volumétrico	mg Mg /l	7,29
5	Dureza total	Volumétrico	mg CaCO /l	230,00
6	Alcalinidad total	Volumétrico	mg CaCO /l	0,00
	de bicarbonato	Volumétrico	mg CaCO /l	0,00
	de carbonato	Volumétrico	mg CaCO /l	0,00
	de hidróxido	Volumétrico	mg CaCO /l	0,00
7	Hierro total	Absorción atómica	mg Fe /l	0,29
8	Manganeso total	Absorción atómica	mg Mn /l	0,45 *
9	Sulfato	Espectrofotométrico	mg SO /l	282,3
10	Cloruro	Volumétrico	mg Cl /l	5,95
11	Sodio	Absorción atómica	mg Na /l	10,2
OBSERVACIONES: * Parámetros químicos analizados fuera de los valores establecidos por la norma boliviana NB-512				
Análisis biológico				
Nº	Parámetro analizado	Método	Unidades	Resultado
1	Bacterias coliformes totales	M.F.	U.C.F./100 ml	$5,0 \times 10^1$

Nº de muestra 2

Datos de muestreo	Datos de recepción
Fecha: 2012/10/19 Hora: 9:30	Volumen de muestra: 2 litros
Punto: Bofedal	Tipo de recipiente: botella de plástico
Lugar: Bofedal Achuta	Estado de la muestra: refrigerada
Fuente: Agua superficial	Temperatura: 1,0 °C
Localidad: Sajama	
Provincia: Sajama Depto: Oruro	

Temperatura: 10,4 °C	
----------------------	--

Análisis físico				
Nº	Parámetro analizado	Método	Unidades	Resultado
1	Color verdadero	Colorimétrico	UCV	0,20
2	Turbiedad	Nefelométrico	UNT	0,66
3	Sólidos disueltos total	Gravimétrico	mg/l	83,00
Análisis químico				
Nº	Parámetro analizado	Método	Unidades	Resultado
1	Conductividad	Potenciométrico	µS/cm	53,62
2	pH (T = 25,0 C)	Potenciométrico		6,78
3	Calcio	Volumétrico	mg Ca /l	4,01
4	Magnesio	Volumétrico	mg Mg /l	1,94
5	Dureza total	Volumétrico	mg CaCO /l	18,00
6	Alcalinidad total	Volumétrico	mg CaCO /l	9,00
	de bicarbonato	Volumétrico	mg CaCO /l	9,00
	de carbonato	Volumétrico	mg CaCO /l	0
	de hidróxido	Volumétrico	mg CaCO /l	0
7	Hierro total	Absorción atómica	mg Fe /l	< 0,05
8	Manganeso total	Absorción atómica	mg Mn /l	< 0,05
9	Sulfato	Espectrofotométrico	mg SO /l	16,04
10	Cloruro	Volumétrico	mg Cl /l	< 0,25
11	Sodio	Absorción atómica	mg Na /l	2,80
OBSERVACIONES: * Parámetros químicos analizados fuera de los valores establecidos por la norma boliviana NB-512				
Análisis biológico				
Nº	Parámetro analizado	Método	Unidades	Resultado
1	Bacterias coliformes totales	M.F.	U.C.F./100 ml	$6,0 \times 10^2$

➤ Cálculo de combinaciones hipotéticas

El cálculo de las combinaciones hipotéticas de los iones presentes, para deducir las concentraciones de las distintas sales es rápido y sencillo. Según los resultados de los análisis se obtuvo:

- Muestra 1

-  Sulfatos: $282.30 \text{ mg/l} / 48 = 5.9$
-  Cloruros: $5.95 \text{ mg/l} / 35.5 = 0.17$
-  Bicarbonatos: 0

- ✚ Calcio: $80.14 \text{ mg/l} / 20 = 4.00$
- ✚ Magnesio: $7.29 \text{ mg/l} / 12 = 0.6$
- ✚ Sodio: $10.20 \text{ mg/l} / 23 = 0.44$

Cálculo del bicarbonato

En el caso de la muestra 1 no existe bicarbonato.

Cálculo del sulfato de calcio, sulfato de magnesio y sulfato de sodio

El calcio se une con los sulfatos y forma sulfato de calcio.

$$\text{Sulfatos} - (4) = 5.9 - 4 = 1.9$$

Es decir que se forman 4 meq/l de sulfato de calcio y quedan 1.9 meq/l de sulfatos para combinarse con el sodio y el magnesio.

Luego se calcula el sulfato de magnesio formado y del resto de los sulfatos se estima que es todo sulfato de sodio. La presencia de sulfato de potasio es desestimada.

$$1.9 - \text{magnesio} = 1.9 - 0.6 = 1.3$$

Es decir que se forman 0.6 meq/l de sulfato de magnesio y 1.3 meq/l de sulfato de sodio.

Cálculo del cloruro de sodio

Finalmente la estimación del cloruro de sodio presente se calcula del resto de sodio que no formó sulfato de sodio.

$$\text{Sodio} - 1.3 = 0.44 - 1.3 = 0.86$$

Y como hay 0.86 meq/l de cloruros, toda esa cantidad, es cloruro de sodio.

Resumiendo se calcularon las siguientes concentraciones:

- ✚ Bicarbonato de Calcio: 0
- ✚ Sulfato de Calcio: $4 \text{ meq/l} \times 68,07 = \mathbf{272.28 \text{ mg/l}}$
- ✚ Sulfato de Magnesio: $0.6 \text{ meq/l} \times 60,19 = \mathbf{36.11 \text{ mg/l}}$
- ✚ Sulfato de Sodio: $1.3 \text{ meq/l} \times 71,02 = \mathbf{93.33 \text{ mg/l}}$
- ✚ Cloruro de Sodio: $0.86 \text{ meq/l} \times 58,45 = \mathbf{50.27 \text{ mg/l}}$

➤ Interpretación de resultados para el consumo animal

La sumatoria total de sales para la muestra 1 da 451.99 mg/l, este resultado sería excelente para el consumo de bovinos según parámetros de USA. Para regímenes latinoamericanos sería deficiente para animales de cría debido a que el valor de contenido de sales es menor a 1g/l, en cambio para animales criados

en invernadero sería satisfactoria.

➤ Interpretación de resultados para el consumo humano

Según la tabla de parámetros internacionales aceptados, se tiene la siguiente relación:

Parámetro	Unidad de medida	Valor aceptable	Limite tolerable	Valor de la muestra
Color verdadero	UCV	< 0.10	0.20	0.30
Turbiedad	UNT	<1	<2	2.88
Sólidos disueltos totales	mg/l	50 -1000	2000	508
pH	-	pHs +/- 0.5	pHs +/- 0.5	3.92
Dureza total	mg/l	80 - 200	500	230
Hierro total	mg/l	< 0.10	0.2	0.29
Manganeso total	mg/l	< 0.05	0.1	0.45
Sulfato	mg/l	< 200	400	282.30
Cloruro	mg/l	<250	400	5.95

Las cifras que están con color rojo representan a los valores que exceden los límites tolerables.

- Muestra 2

- ✚ Sulfatos: $16.04 \text{ mg/l} / 48 = 0.33$
- ✚ Cloruros: $0.25 \text{ mg/l} / 35.5 = 0.007$
- ✚ Bicarbonatos: $9 \text{ mg/l} / 61 = 0.15$
- ✚ Calcio: $4.01 \text{ mg/l} / 20 = 0.2$
- ✚ Magnesio: $1.94 \text{ mg/l} / 12 = 0.16$
- ✚ Sodio: $2.80 \text{ mg/l} / 23 = 0.12$

Cálculo del bicarbonato

Todo el bicarbonato es tomado por el calcio para formar bicarbonato de calcio.

$$\text{Calcio} - \text{bicarbonatos} = 0.2 - 0.15 = 0.05$$

Luego se forman 0.15 meq/l de bicarbonato de calcio y quedan 0.05 meq/l de calcio.

Cálculo del sulfato de calcio, sulfato de magnesio y sulfato de sodio

El calcio restante, se une con los sulfatos y forma sulfato de calcio.

$$\text{Sulfatos} - (0.05) = 0.33 - 0.05 = 0.28$$

Es decir que se forman 0.05 meq/l de sulfato de calcio y quedan 0.28 meq/l de sulfatos para combinarse con el sodio y el magnesio.

Luego se calcula el sulfato de magnesio formado y del resto de los sulfatos se estima que es todo sulfato de sodio. La presencia de sulfato de potasio es desestimada.

$$0.28 - \text{magnesio} = 0.28 - 0.16 = 0.12$$

Es decir que se forman 0.16 meq/l de sulfato de magnesio y 0.12 meq/l de sulfato de sodio.

Cálculo del cloruro de sodio

Finalmente la estimación del cloruro de sodio presente se calcula del resto de sodio que no formó sulfato de sodio.

$$\text{Sodio} - 0.12 = 0.12 - 0.12 = 0$$

No se llega a formar cloruro de sodio.

Resumiendo se calcularon las siguientes concentraciones:

-  Bicarbonato de Calcio: $0.15 \times 81.05 = 12.16 \text{ mg/l}$
-  Sulfato de Calcio: $0.05 \text{ meq/l} \times 68.07 = \mathbf{3.40 \text{ mg/l}}$
-  Sulfato de Magnesio: $0.16 \text{ meq/l} \times 60.19 = \mathbf{9.63 \text{ mg/l}}$
-  Sulfato de Sodio: $0.12 \text{ meq/l} \times 71.02 = \mathbf{8.52 \text{ mg/l}}$
-  Cloruro de Sodio: 0

➤ Interpretación de resultados para el consumo animal

La sumatoria total de sales para la muestra 2 da 33.71 mg/l, este resultado sería excelente para el consumo de bovinos según parámetros de USA. Para regímenes latinoamericanos sería deficiente para animales de cría debido a que el valor de contenido de sales es menor a 1g/l, en cambio para animales criados en invernadero sería satisfactoria.

➤ Interpretación de resultados para el consumo humano

Según la tabla de parámetros internacionales aceptados, se tiene la siguiente relación:

Parámetro	Unidad de medida	Valor aceptable	Limite tolerable	Valor de la muestra
Color verdadero	UCV	< 0.10	0.20	0.20
Turbiedad	UNT	<1	<2	0.66
Sólidos disueltos totales	mg/l	50 -1000	2000	83
pH	-	pHs +/- 0.5	pHs +/- 0.5	6.78
Dureza total	mg/l	80 - 200	500	18
Hierro total	mg/l	< 0.10	0.2	< 0.05
Manganeso total	mg/l	< 0.05	0.1	< 0.05
Sulfato	mg/l	< 200	400	16.04
Cloruro	mg/l	<250	400	< 0.25

Las cifras que están con color rojo representan a los valores que exceden los límites tolerables.

- Denominación de las aguas según su contenido en sales (International Desalination Association,IDA)
- 🚰 Agua pura TDS < 500 mg/L
 - 🚰 Agua de río de baja concentración 500 mg/L < TDS < 3.000 mg/L
 - 🚰 Agua de salobre 3.000 mg/L < TDS < 20.000 mg/L
 - 🚰 Agua marina 20.000 mg/L < TDS < 50.000
 - 🚰 Salmuera TDS > 50.000 mg/L
 - 🚰 Agua residual Agua procedente de núcleos urbanos o de industrias

TDS o STD = sólidos totales disueltos

De acuerdo a los resultados obtenidos en la muestra 1, se tiene un valor de TDS (sólido disuelto total) de 508,00. Este es un valor que corresponde a un agua de río de baja concentración (500 mg/L < TDS < 3.000 mg/L)

En cambio, la muestra 2 tiene un valor de TDS de 83,00 correspondiente a un

agua pura (TDS < 500 mg/L)

➤ Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos de la interpretación se puede concluir:

- La muestra 2, tomada de aguas superficiales tiene valores satisfactorios de calidad de aguas, y sería apta para el consumo humano y animal.
- En cambio, la muestra 1 presenta un exceso en los límites tolerables en 5 parámetros. De los cuales 3 son indicadores de una posible anomalía. El pH, el contenido de hierro total y manganeso total y la cantidad de sulfato indicarían un alto contenido de sulfato de hierro y manganeso que serían causantes de una contaminación en el área de estudio.
- La muestra 1 no sería apta para el consumo animal, ya que según parámetros de medición latinoamericanos sería deficiente para animales de cría.
- Se considera también, no apta para el consumo humano debido a que excede el límite tolerable de al menos 5 parámetros.

CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente estudio son las siguientes:

- En el área de estudio la actividad volcánica, está representada principalmente por los volcanes Sajama, Pomerape y Parinacota. Los cuales se caracterizaron por depositar principalmente lavas andesíticas, acompañadas minoritariamente por lavas dacíticas y depósitos. La sucesión de unidades geológicas da a entender que existieron diferentes episodios eruptivos durante el periodo Plioceno-Pleistoceno.
- En las partes más bajas de la región, se hallan distribuidos los depósitos glaciales constituidos por morrenas; los circos y valles glaciares en las partes más altas. Y en menor medida se encuentran los depósitos de origen aluvial y coluvial.
- La ocurrencia de los edificios volcánicos en la región en general está asociada a la intersección mínima de dos lineamientos estructurales; un lineamiento principal que intersecta con lineamientos menores, estas intersecciones generalmente coinciden con centros de efusión principal.
- Las unidades geológicas mapeadas tienen un predominante composición andesítica. Se caracterizan por ser de afinidad calcoalcalina, es decir por presentar alto contenido de plagioclasas y feldespatos potásicos (minerales ricos en potasio y sodio).
- Las unidades geomorfológicas mapeadas corresponden en primer orden a depósitos de origen glaciar, periglaciar, fluvial y fluvio glaciar.
- En el caso de la prospección geofísica, es evidente que en todos los sondeos realizados, el basamento rocoso fue detectado por la repetición de una característica bastante notoria, siendo que al final de las curvas los valores de resistividad van en continuo aumento. La secuencia de depositación varía entre arcillas y arenas con gravas, hasta el lecho del bofedal, se asume la posible existencia de unidades tobaceas en la base del bofedal que estarían controlando la formación del mismo.
- En general, el área de estudio está dominada por dos diseños de drenaje distintos, el área correspondiente al volcán Sajama como tal tiene un diseño de

drenaje radial. El segundo tipo de diseño, domina la mayor parte del área estudio, corresponde al diseño dendrítico a pinado. Ambos diseños de drenaje señalan un control litológico en el área de estudio, dejando claro la baja incidencia del control estructural.

- La observación de las variaciones de nivel piezométrico en un cierto punto, o sea en un piezómetro, proporciona información sobre la respuesta del acuífero a procesos de recarga y de descarga, así como sobre la tendencia en el almacenamiento.
- Los mapas piezométricos permiten:
 - Conocer el sentido del flujo.
 - Manifestar relaciones río – acuífero.
 - Mostrar diferencias de parámetros hidrodinámicos.
- Los resultados del mapa piezométrico indican coherencia con la existencia de ríos, y muestran las zonas de recarga y descarga de tal forma que coincide con la topografía.
- En el muestreo geoquímico-hidrogeológico se realizó la elección de la técnica de muestreo basado en la caracterización geoquímica siguiendo los patrones de establecidos, utilizando el muestreo simple, el cuál consiste en la toma sistemática de muestras en un tiempo y lugar determinado para su análisis individual.
- Para el muestreo de aguas superficiales y aguas subterráneas, se midieron los parámetros: pH, conductividad, salinidad y TDS.
- Se tomaron dos muestras tipo para el área de estudio y los resultados de los análisis en laboratorio señalan que la muestra 1 tiene un valor de TDS (sólido disuelto total) de 508,00. Este es un valor que corresponde a un agua de río de baja concentración ($500 \text{ mg/L} < \text{TDS} < 3.000 \text{ mg/L}$). En cambio, la muestra 2 tiene un valor de TDS de 83,00 correspondiente a un agua pura ($\text{TDS} < 500 \text{ mg/L}$).
- La interpretación de los resultados se la hizo de acuerdo a parámetros establecidos por la normativa latinoamericana.

- La muestra 2, tomada de aguas superficiales tiene valores satisfactorios de calidad de aguas, y sería apta para el consumo humano y animal.
- La muestra 1 presenta un exceso en los límites tolerables en 5 parámetros. De los cuales 3 son indicadores de una posible anomalía. El pH, el contenido de hierro total y manganeso total y la cantidad de sulfato indicarían un alto contenido de sulfato de hierro y manganeso que serían causantes de una contaminación en el área de estudio. Por lo tanto no sería apta para el consumo animal, ya que según parámetros de medición latinoamericanos sería deficiente para animales de cría y se considera no apta para el consumo humano debido a que excede el límite tolerable de al menos 5 parámetros.

ANEXOS

A continuación se presentan como anexos los siguientes mapas:

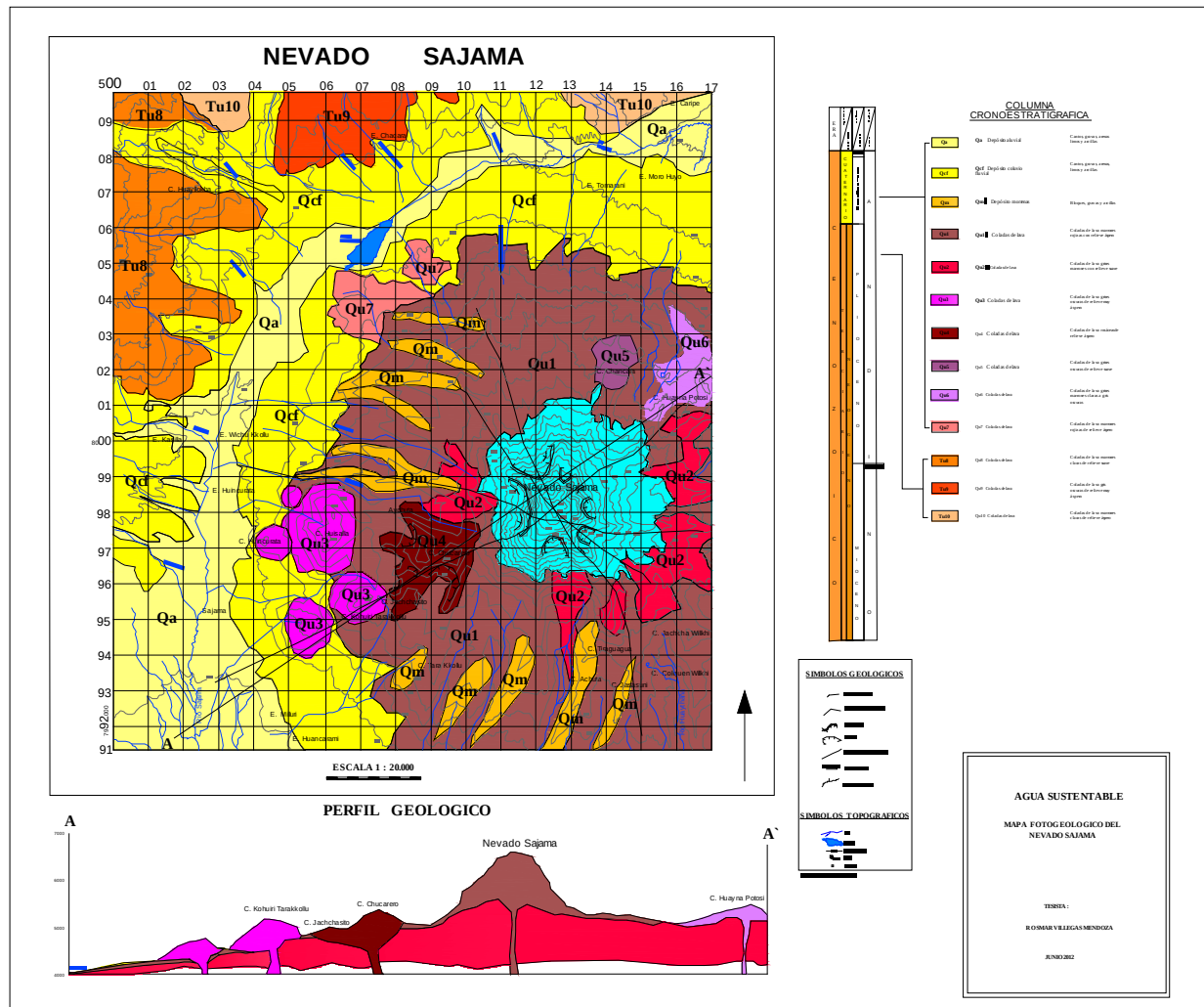


FIG. 1 MAPA FOTOGEOLOGICO REGIONAL DE SAJAMA

FIG. 2 MAPA GEOLOGICO DE LA QUEBRADA ACHUTA

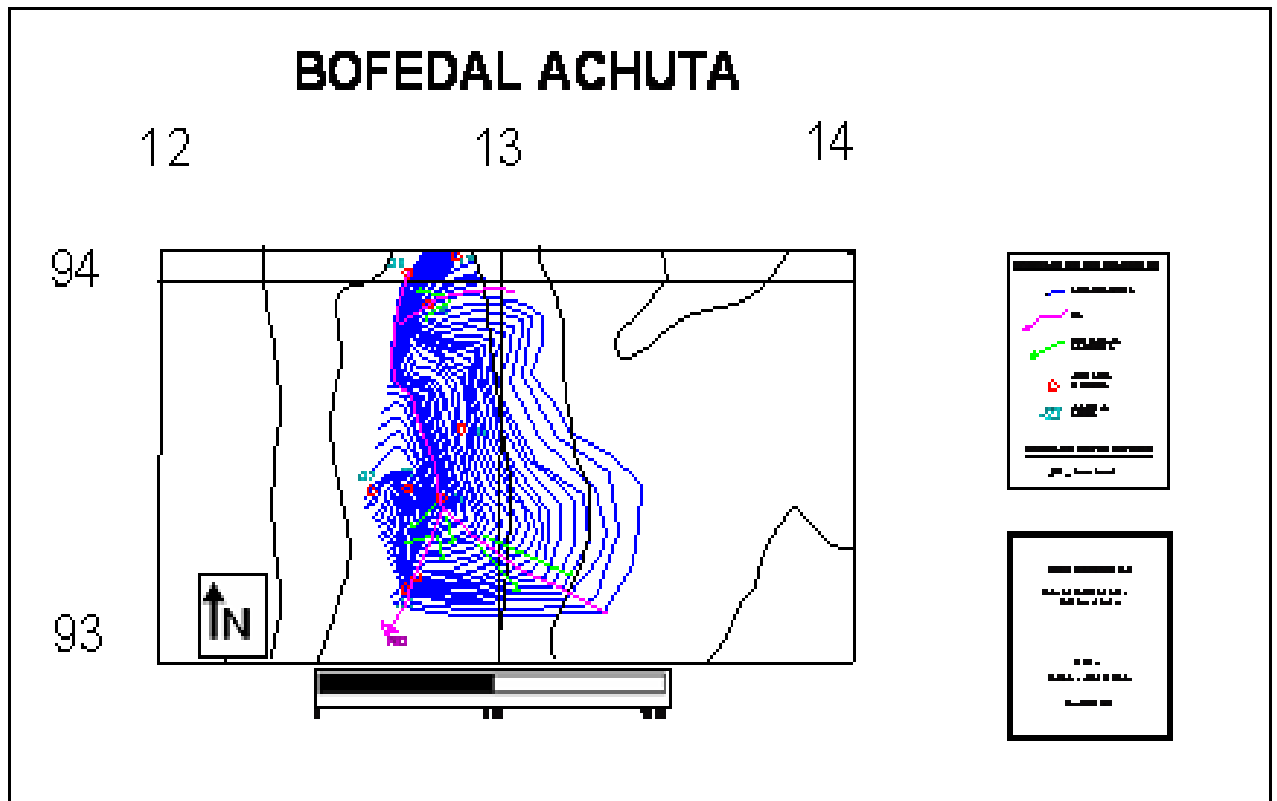


FIG. 4 MAPA PIEZOMETRICO DEL BOFEDAL ACHUTA

BIBLIOGRAFIA

- Ahlfeld, F., Branisa L., 1960. Geología de Bolivia. La Paz, Bolivia. Instituto boliviano de petrología. Pp 132 – 135 y 193.
- Ávila, W., 1968. Geología del cuadrángulo de Sajama. La Paz, Bolivia. Tesis de grado. Servicio Geológico de Bolivia. pp. 51.

- Carafa, T., 2009. Evaluación ecológica de bofedales de la cuenca circundante al nevado Illimani. La Paz, Bolivia. Agua sustentable. pp 2 – 7.
- Fagundo J.1997. Geoquímica de las aguas. Centro Nacional de Investigaciones Científicas. pp. 1-6.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M., 2002. Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Washington, D.C., USA. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco N Mundial. pp 2 – 33.
- Galarza, I., 2002. Geología y Petrología del volcán Sayama. La Paz, Bolivia. Tesis de grado inédito. pp. 44.
- Guevara A., 1996. Control de calidad de agua. Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. pp. 8-44.
- Gutiérrez, M.; Márquez, J.; Materón, H.; Rojas, H., 2004. Modelación de acuíferos para el aprovechamiento sostenible del agua subterránea. Cali, Colombia. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle. Vol. I, núm. 1, , pp. 38-49.
- Heras, R., 1981. Métodos de cálculo de balance hídrico. Madrid, España. Instituto de hidrología de España / Unesco. pp. 10 - 20.
- Hoffmann, D., 2008. Consecuencias del retroceso glaciar en la Cordillera boliviana. La Paz, Bolivia. Instituto Boliviano de la Montaña. pp.77 – 84.
- Sirvas, F., 1964. Estudio de la región: Tambo Mauri – Berenguela. Tesis de grado inédito. pp. 33 – 34.
- Torres, E., 1964. Estudio geológico de la región de Santiago de Machaca – Tambo Victoria. Tesis de grado inédito. pp. 18.
- Torres, P., 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. pp. 80 -92.
- Villarroja, F., 2006. Apuntes de Hidrogeología. Madrid, España. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense. pp. 11 – 19.

