

## ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LOS BOFEDALES DE LA SUB CUENCA DE LOS RÍOS CAÑO Y PUTANI (CUENCA RÍO MAURI)

---

### CAPÍTULO 1

#### 1. CONSIDERACIONES GENERALES

##### 1.1 INTRODUCCIÓN

El presente estudio se realizó con carácter de Trabajo Dirigido, en el marco del proyecto "Fortalecimiento de planes locales de investigación y adaptación al cambio climático en el Altiplano Boliviano - Cambio Climático y Agua" el cual es llevado a cabo por el **Centro de Apoyo a la Gestión Sustentable del Agua y el Medio Ambiente "Agua Sustentable"**, en un trabajo conjunto con el Herbario Nacional, auspiciada por la IDRC (International Development Research Centre) - CRDI (Centre de Recherches pour le Développement International). El estudio de los bofedales en la sub cuenca de los Ríos Caño y Putani perteneciente a la cuenca del Río Mauri, tomando interés en la parte correspondiente al territorio boliviano, ya que dicha cuenca es compartida con los vecinos países de Perú y Chile.

Para iniciar el estudio se presentaron interrogantes:

- ¿Cuál es la cantidad y calidad del agua almacenada en los bofedales en las sub cuencas de los Ríos Caño y Putani?
- ¿Cuál es la velocidad y caudal del curso de las aguas y su aporte al ciclo hidrogeológico?

En las últimas décadas se ha registrado una disminución de agua e incluso sequias en varias regiones del país, en particular en el Altiplano boliviano, lo que motiva a tomar interés en el estudio de aguas subterráneas como un recurso alternativo para beneficiar a las comunidades que son afectadas por este fenómeno asociado al cambio climático.

Este estudio se realizó con el objetivo de contribuir al Plan de Adaptación al Cambio Climático desarrollado por el proyecto, para reducir la vulnerabilidad de las comunidades de la cuenca del río Mauri y desaguadero. El plan pretende desarrollar una estrategia participativa de

adaptación a los efectos del cambio climático, promoviendo la sostenibilidad de los sistemas productivos, sistemas de agua potable y sostenibilidad del medio ambiente. Actualmente no se conoce la cantidad, ni la calidad de las aguas de los bofedales, por lo que no se tienen conocimiento de la mejor forma de aprovechamiento y protección de este recurso. Por ello es importante el estudio de los patrones de comportamiento del agua subterránea de los bofedales para conocer el origen, geometría del acuífero, movimiento, régimen y reservas, y contribuir en la reducción del impacto ambiental y adaptación a los efectos del cambio climático. Así también el presente estudio pretende delimitar áreas favorables para el aprovechamiento de agua subterránea en calidad y cantidad aceptable para uso doméstico, crianza de ganado ovino y camélido, la principal actividad económica en el área.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

- Realizar el estudio hidrogeológico de los bofedales de los Ríos Caño y Putani, afluentes del Río Mauri, para contribuir al planteamiento de estrategias de adaptación de los bofedales al cambio climático y formas para su aprovechamiento sostenible junto con los recursos hídricos de la zona.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar la geología, geomorfología, geofísica, estratigrafía y geología estructural de los bofedales y sus inmediaciones e integrarla bajo criterios hidrogeológicos.
- Conocer la hidrogeología del área de estudio y sus características como origen, geometría del acuífero, movimiento, régimen y reservas.
- Evaluar los cambios físicos de los bofedales como consecuencia de las condiciones climáticas cambiantes en el área.
- Determinar las propiedades físicas y químicas, así como la cantidad y calidad del agua.

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo de la historia de la tierra han sucedido numerosas modificaciones en el clima, niveles del mar, cinturones de vegetación, poblaciones de animales, suelos y formas de relieve (Goudie, 1992), pero es durante el Cuaternario donde podemos detectar con más precisión estos continuos cambios ambientales, que se manifiestan en ocasiones en muy cortos periodos de tiempo.

Para épocas recientes, estos cambios ambientales, resultan de tres causas básicas: geológicas, climáticas y antrópicas, el problema del conocimiento preciso de los factores que desencadenan estos cambios surge de la interacción entre estas causas, ya que con frecuencia actúan conjuntamente y resulta difícil conocer la aportación de cada una de ellas a las modificaciones ambientales. (Gutiérrez, 2008)

Por tanto el presente estudio de los bofedales intenta identificar la adaptación de estos a los cambios climáticos y así determinar los factores que los afectan.

El Altiplano boliviano y las montañas que lo rodean, cuna de civilizaciones antiguas, constituye una región importante de Bolivia. Los pueblos han vivido con recursos naturales proporcionados por el Lago Titicaca y terrenos circundantes. A medida que se alejan del lago, los recursos decrecían y las poblaciones disminuían. Las condiciones de vida de su población se hacen muy complicadas debido a las duras condiciones climáticas existentes con frecuentes sequías, heladas, granizadas e inundaciones, por la gran altitud en que se encuentran y por el aprovechamiento inadecuado de los recursos disponibles. (Cardozo, 2004)

Los habitantes del Altiplano tienen bajos niveles de vida y confrontan condiciones de pobreza y extrema pobreza. Se dedican principalmente a la ganadería y agricultura de subsistencia y con frecuencia, debido a la falta de oportunidades se ven obligados a emigrar hacia las ciudades de Oruro y El Alto. (Cardozo, 2004). Puesto que la principal actividad en la región es crianza de ganado que se desarrolla en bofedales, este estudio busca apoyar a las comunidades en su aprovechamiento y protección ante los efectos del cambio climático.

En el área de estudio se tienen varios bofedales que conforman acuíferos, los cuales fueron cambiando sus propiedades con el transcurso de los años. Existen pocos estudios geológicos e hidrogeológicos de bofedales realizados en nuestro país (Solíz, 2011) por lo que es importante realizar el estudio de los bofedales para contribuir en el entendimiento sobre el comportamiento del agua subterránea en los bofedales, sus propiedades y capacidad de almacenamiento, movimiento, flujo, reservas de agua subterránea que está directamente influida por factores geológicos e hidrogeológicos. Por su importancia económica y su valor

como ecosistema de gran biodiversidad, son zonas estratégicas de adaptación al cambio climático de la que dependen las poblaciones aledañas. Este estudio pretende contribuir con información para el mejor aprovechamiento y protección de los bofedales a través del plan de adaptación a los efectos del cambio climático, en beneficio de las poblaciones aledañas, permitiendo mejores oportunidades de vida.

Los bofedales son humedales de altura y se considera una pradera nativa poco extensa con permanente humedad, donde las planicies almacenan aguas provenientes de precipitaciones pluviales, y principalmente afloramientos superficiales de aguas subterráneas.

#### **1.4. METODOLOGÍA DEL TRABAJO**

Con el fin de cumplir los objetivos se siguió la siguiente metodología de trabajo:

##### **1.4.1. PRIMERA FASE - TRABAJO DE GABINETE (PRE CAMPO).**

###### **1.4.1.1. REVISIÓN Y RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En esta primera fase de trabajo se realizaron todas las actividades previas al trabajo de campo:

- Recopilación bibliográfica: Se obtuvo toda la información posible de estudios anteriores en el área de trabajo como ser publicaciones científicas, informes, reportes, tesis de grado, información geológica publicada e inédita, etc.
- Recopilación cartográfica: Consistió en la obtención de mapas temáticos tales como topográficos escala 1:50.000 (Hojas 5741 I - 5741 III); Mapa geológico escala 1:100.000 (Hoja 5741-Charaña).
- Interpretación de imágenes satelitales: Se realizó la interpretación mediante imágenes satelitales para realizar un reconocimiento de la geología y geomorfología del área de estudio a escala regional para la elaboración de un mapa fotogeológico y fotogeomorfológico preliminar que sirvió como base previo al trabajo de campo.
- Análisis de información recopilada: En esta etapa se analizó la información bibliográfica existente con criterio hidrogeológico de tal manera que permitió entender la relación geología/geomorfología/bofedales y ocurrencia de aguas subterráneas.
- Preparación para el trabajo de campo: Para la preparación a la siguiente fase se hizo uso de todos los medios recopilados tales como

información, mapas existentes y generados, para la planificación del trabajo de campo, así como también reunir todos los materiales, equipos y herramientas para lograr un buen desempeño en la etapa en campo.

#### **1.4.2. SEGUNDA FASE - TRABAJO DE CAMPO**

Esta fase de trabajo comprende varias etapas:

##### **1.4.2.1. MAPEO GEOLÓGICO**

El mapeo geológico realizado en campo consiste en corroborar y verificar el mapa geológico existente, lo cual incluye las etapas de observación, descripción para finalmente realizar la interpretación geológica que fue plasmada sobre el mapa geológico.

Se realizó una descripción general de los afloramientos en el área de estudio siguiendo la metodología siguiente:

- Reconocimiento de dimensiones, orientación y estado de afloramientos rocosos, así como también de geoformas que modelan el paisaje actual.
- Descripción y clasificación de rocas basados en la observación mediante lupa, identificando propiedades físicas de las rocas como ser color, composición mineralógica, estructuras, cohesión, textura, etc., para posteriormente clasificarlas con la ayuda de diagramas, perfiles, mapas, etc., todo esto fue registrado en la libreta de campo y en los mapas borradores, los cuales fueron constantemente actualizados conforme se realizó los trabajos de campo y se obtuvieron nuevos datos, los cuales constituyeron como la base para la elaboración de los mapas finales y las etapas siguientes.

##### **1.4.2.2. MAPEO GEOMORFOLÓGICO**

El mapeo geomorfológico sigue la misma metodología descrita anteriormente en el mapeo geológico, utilizando como base la descripción, delimitación e interpretación de las geoformas estudiadas y que se encuentran modelando la morfología del paisaje actual.

En este mapeo se obtuvo como producto final el mapa geomorfológico con énfasis en las geoformas de mayor potencial de ocurrencia de aguas subterráneas. (Ver Mapa Anexo 2 – Mapa Geomorfológico Charaña)

#### **1.4.2.3. MAPEO ESTRUCTURAL**

En la elaboración del mapeo geológico fue muy importante realizar las mediciones de inclinaciones, direcciones de flujos de las coladas de lavas, clasificación de estructuras geológicas tanto a escala regional, como local, mediciones de estrías, direcciones de movimientos, etc.

Se prestó mayor atención al estudio de las fracturas y diaclasas, debido a que estas permiten el paso del agua superficial hacia el agua subterránea, y pueden encontrarse abiertas, cerradas, además de controlar la longitud y profundidad de dichas estructuras, su densidad por metro cuadrado, rumbos y buzamientos, y ver cuál es la relación e interacción entre estas estructuras y finalmente ver la relación de estas con la formación del acuífero. (Ver Mapa Anexo 1 – Mapa Geológico Charaña)

#### **1.4.2.4. INSTALACIÓN DE PIEZÓMETROS**

Para posibilitar el monitoreo del nivel freático en el área de estudio fue necesario realizar la instalación de piezómetros. Esto permite conocer la altura a la cual se encuentra el agua subterránea y el monitoreo mensual que se lleva a cabo en estos permite conocer las fluctuaciones de la altura a la cual se encuentra el agua.

#### **1.4.2.5. MONITOREO DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO**

Se realizó un inventario de fuentes de agua, lo cual consiste en la recopilación de datos de piezómetros ya instalados, donde se realiza la medición "in situ" del nivel del agua en el piezómetro.

Esto fue facilitado por la existencia de piezómetros ya instalados en el área durante el mes de octubre de 2013 en el marco del mismo estudio, por lo que se realizó este control para conocer variaciones en diferentes meses del año. Para cada piezómetro se elaboró un cuadro resumen donde se indica la ubicación, altura piezométrica en cada medición, características principales, y anomalías observadas, con lo cual se realizó el inventario de datos y diseño final del mapa piezométrico.

#### **1.4.2.6. MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA, PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y CAUDAL DEL AGUA EN LOS BOFEDALES**

En cada campaña de campo además del monitoreo del nivel piezométrico, se procedió a monitorear parámetros físicos y químicos del agua (temperatura, pH y conductividad eléctrica).

En este procedimiento además del agua existente en los acuíferos se debió incluir al agua superficial ya que estos intervienen en la recarga del acuífero o en algunos casos puede ser agua de descarga en caso de tratarse de manantiales, pozos u ojos de aguas.

Así también se realizó el monitoreo del caudal del agua que se encuentra en los cursos de aguas superficiales de los bofedales para saber las variaciones mensuales y estacionales. Esto se realizó un molinete el cual posibilita conocer la velocidad del agua y midiendo la profundidad y el ancho del lecho del río se calcula el caudal.

#### **1.4.2.7. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA**

El método geofísico que se empleó en este estudio, es el S.E.V. (Sondeo Eléctrico Vertical), que es un método Geoeléctrico, a partir del cual se estimaron resistividades de las rocas/sedimentos que se encuentran por debajo de la superficie. El método utiliza mediante un equipo conectado a electrodos ubicados en forma lineal que permiten generar perfiles lineales a distintas profundidades. Como resultado se genera una curva de variación de resistividades aparentes que revelan la profundidad del suelo o roca, y permiten conocer la disposición de estos e identificar capas, niveles, litología y por tanto conocer las variaciones en profundidad y espesor del acuífero en el bofedal y estimar variaciones estructurales y morfológicas de estos.

### **1.4.3. TERCERA FASE - TRABAJO DE GABINETE (POST CAMPO)**

En esta fase de trabajo se realizaron las siguientes etapas:

#### **1.4.3.1. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA**

##### **1.4.3.1.1. DELIMITACIÓN 3D DEL ACUÍFERO**

Para realizar esta delimitación se requirió la elaboración de perfiles transversales 2D, que fueron construidos a partir de la prospección

geofísica, por el método S.E.V. Además, se utilizó de otro tipo de elementos complementarios tales como bases topográficas y geológicas mediante observación tanto en campo como en gabinete. Se realizó el análisis de imágenes satelitales, donde se dispuso de líneas imaginarias en el terreno donde se generaron secciones 2D del acuífero, con lo cual se pudo realizar el cálculo del volumen de cada uno de los bofedales estudiados y así también conocer la cantidad de agua subterránea existente en cada uno de estos.

#### **1.4.3.1.2. ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO**

Se elaboró el mapa piezométrico de cada bofedal estudiado para cada mes en el que se realizó el monitoreo del nivel piezométrico con el fin de conocer el nivel en el que se encuentra la superficie freática en el área de estudio y sus variaciones.

#### **1.4.3.1.3. INTERPRETACIÓN DE NIVELES FREÁTICOS**

Durante la etapa de gabinete se procedió a procesar toda la información obtenida en campo para tener el inventario completo del nivel del agua subterránea y se procedió a la interpretación del comportamiento de los niveles freáticos/piezométricos identificando sus causas.

#### **1.4.3.1.4. MUESTREO Y MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS**

En la etapa de gabinete se realizó la interpretación de los resultados obtenidos en campo, así como también de las muestras de agua analizadas en laboratorio. Las cuales fueron realizadas por personal del Herbario Nacional, con el objetivo principal de reconocer agentes químicos que puedan tener efectos negativos en la calidad de las aguas subterráneas contenidas en los bofedales.

#### **1.4.3.1.5. ELABORACIÓN DEL MAPA GEOLÓGICO**

Habiendo realizado el trabajo de mapeo en campo, este debió ser plasmado en un mapa el cual contiene información geológica como ser litología, geomorfología, geología estructural, estratigrafía e información topográfica, que fue elaborado en base al mapa fotogeológico elaborado

en la etapa de gabinete previa al trabajo de campo, mapa geológico (existente, escala 1:100.000 - SERGEOTECMIN, 2012) y siendo de gran importancia el trabajo de campo realizado en una fase anterior (Escala 1:50.000). (Ver Mapa Anexo 1 – Mapa Geológico Charaña)

#### **1.4.3.1.6. ELABORACIÓN DEL MAPA HIDROGEOLÓGICO**

Para la elaboración del mapa hidrogeológico se conjuncionó la información geológica, siendo la más importante la litológica, geomorfológica, estructural, topográfica y de monitoreo piezométrico, que fueron interpretados bajo criterios hidrogeológicos.

Con la realización de este mapa se logró delimitar áreas en la zona de estudio con mayor o menos potencial de ocurrencia de agua subterránea. (Ver Mapa Anexo 3 – Mapa Hidrogeológico Charaña)

#### **1.4.3.1.7. REDACCIÓN DEL INFORME FINAL**

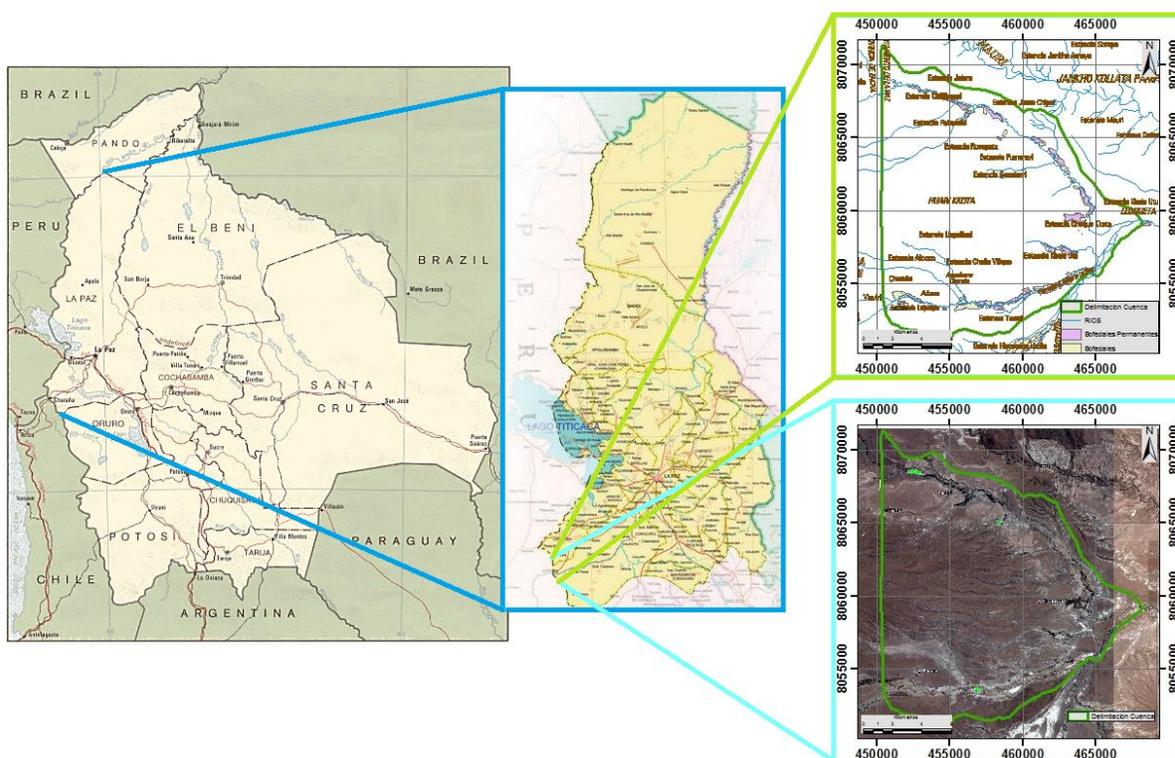
Por último se procedió a la redacción del presente documento, en el cual son plasmados los resultados del Trabajo Dirigido. Donde se presentan las conclusiones finales del estudio geológico e hidrogeológico de la subcuenca de los ríos Caño y Putani, así como también sugerencias para el aprovechamiento de los recursos hídricos en la región y su uso. Además de recomendaciones en un marco de desarrollo sostenible, con lo cual se pretende implementar y/o fortalecer estrategias de adaptación al cambio climático.

## CAPÍTULO 2

### 2. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 2.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD AL ÁREA DE ESTUDIO

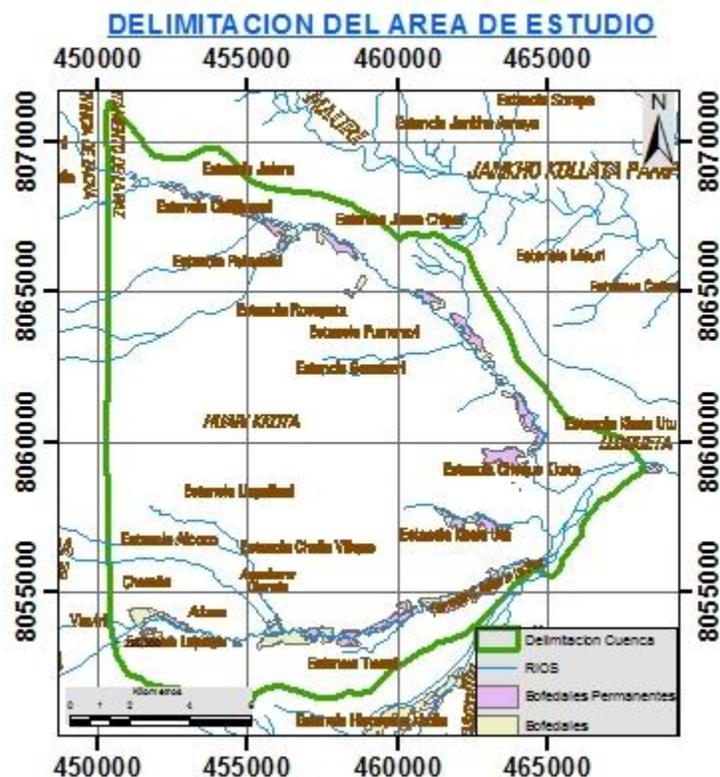
El área de estudio se encuentra ubicado al sur-oeste del departamento de La Paz, Provincia Pacajes; específicamente en la subcuenca de los Ríos Caño y Putani, pertenecientes a la cuenca del Río Mauri tomando como zona de estudio el área comprendida en territorio boliviano ya que dicha subcuenca continúa en los países vecinos de Chile y Perú. (Mapas 1 - 2).



Mapa 1. Mapa de la ubicación del área de estudio.

El área de estudio está caracterizado por ser una zona fronteriza, alejado de los grandes centros poblacionales, a aproximadamente 215 kilómetros de la ciudad de La Paz. El pueblo de Charaña fue la población base para los trabajos de campo, siendo la más importante localidad en la zona, capital de la quinta sección de la Provincia Pacajes, del departamento de La Paz, Bolivia. La población cuenta como acceso principal con la carretera Viacha - Berenguela - Charaña como acceso principal la cual fue utilizada para acceder al área de estudio. Como vía de acceso alternativa cuenta con la la carretera Challapata - Sajama - Río Blanco - Charaña y una tercera vía, actualmente abandonada y muy poco transitada, es la que une Viacha - Corocoro - Abaroa - Charaña. Además cuenta con una estación ferroviaria del

ferrocarril Arica - La Paz. A pesar de todo aquello no cuenta con gran actividad comercial, ni agrícola siendo la actividad más importante en la zona la de ganadería teniendo crianza de llamas, alpacas y ovejas.



Mapa 2. Delimitación del área de estudio.

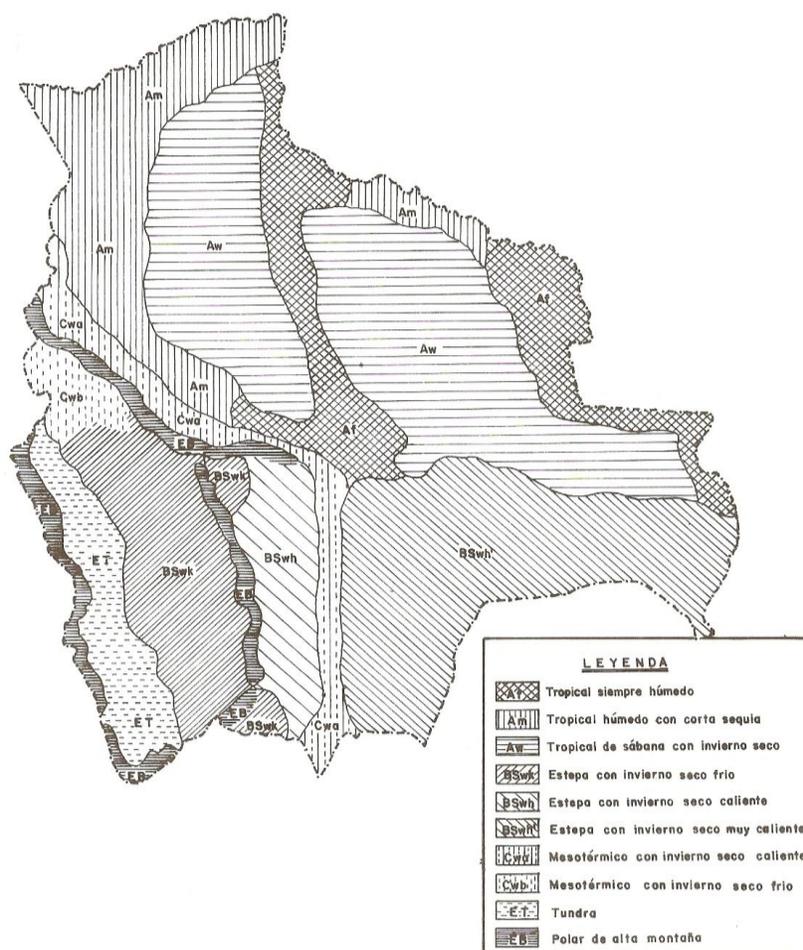
El área de estudio presenta una altura promedio entre los 4000 y 4200 m.s.n.m., hidrográficamente, la zona corresponde a una subcuenca de la cuenca mayor correspondiente al Río Mauri, el cual se constituye en el principal río tributario del Río Desaguadero, que a su vez corresponde a la cuenca endorreica central o lacustre del Altiplano.

## 2.2. CONDICIONES CLIMÁTICAS

A esta zona fronteriza se la considera una de las zonas más frías de Bolivia, registrándose las más bajas temperaturas, sin embargo, esta característica es muy común en el Altiplano y la Cordillera Occidental, reconociéndose que las condiciones son aún más intensas hacia el sur. Según estudios meteorológicos del SENAMHI, (2013): “Hay una variación notable entre las temperaturas diurnas y nocturnas, teniendo como temperatura promedio -15 a -20°C en épocas frías y temperaturas máximas de 25 a 30°C durante los meses más calientes, siendo este periodo entre Noviembre y Marzo; además se conoce que la región sufre de un carácter de fuerte irradiación solar e importantes precipitaciones en épocas de lluvia, entre los meses

de octubre y marzo, dato muy importante en este estudio hidrogeológico teniendo un promedio de 146mm en estas épocas. Las precipitaciones son muy escasas, siendo más comunes en épocas lluviosas durante los meses de Diciembre a Marzo, siendo el mes más importante el mes de Enero, y el periodo seco entre Mayo a Agosto presentando temperaturas mínimas durante el invierno, siendo este más intenso en los meses de Junio y Julio. Un factor que incide de gran manera en las condiciones climáticas en la región es la ocurrencia de fuertes vientos, los vientos de superficie son principalmente resultado de los patrones locales de relieve, los cuales son canalizados en direcciones específicas con dirección promedio SW, teniendo como velocidad promedio de 14.12 Km/h, por lo que los vientos son efectivamente erosivos”.

Según la clasificación de Köppen, el área de estudio se encuentra dentro de los climas fríos clasificados como ET, o clima de tundra la cual incluye los flancos más bajos de las cordilleras y gran parte del Altiplano. (Mapa 3).



Mapa 3. Climas de Bolivia - Clasificación de W. Köppen - Extraído del libro Geografía y Recursos Naturales de Bolivia de Ismael Montes de Oca, 1989.

Lo que se debe resaltar es que el régimen de lluvias en la región es muy irregular, lo que se convierte en un factor que dificulta de gran manera las actividades agrícolas. El aporte de agua por precipitación es muy escaso, debido q que el agua de escorrentía solo forma una capa delgada de agua que se evapora o se sublima rápidamente hacia la atmósfera. (SENAMHI, 2013).

### **2.3. ALCANCES Y LÍMITES DEL TRABAJO DIRIGIDO**

La subcuenca de los Ríos Caño y Putani es transfronteriza con Chile y Perú, por lo que el estudio se restringe al área en territorio Boliviano, considerando la parte baja de la cuenca, ya que la cabecera se encuentra en los países vecinos.

Como base del Trabajo Dirigido, se realizó el estudio geológico/geomorfológico, el cual está representado en un mapa geológico y el mapa geomorfológico, que sirvieron como documentos primarios base para una posterior elaboración del mapa hidrogeológico.

Paralelamente se llevó a cabo el monitoreo mensual de las fluctuaciones del nivel freático en piezómetros instalados en el mes de octubre de 2013 en el marco del estudio en curso.

Además se monitorearon mensualmente las propiedades físicas, químicas del agua existente en la zona, tales como conductividad, pH y temperatura.

A su vez se realizó un estudio geofísico en el área haciendo uso del método SEV (Sondeo Eléctrico Vertical), con la finalidad de conocer la geometría del bofedal/acuífero y las características del subsuelo para determinar las reservas de agua.

Todo este trabajo permitió generar insumos para la planificación de estrategias y acciones para la adaptación al cambio climático y formas de aprovechamiento sostenible del agua existente en los bofedales.

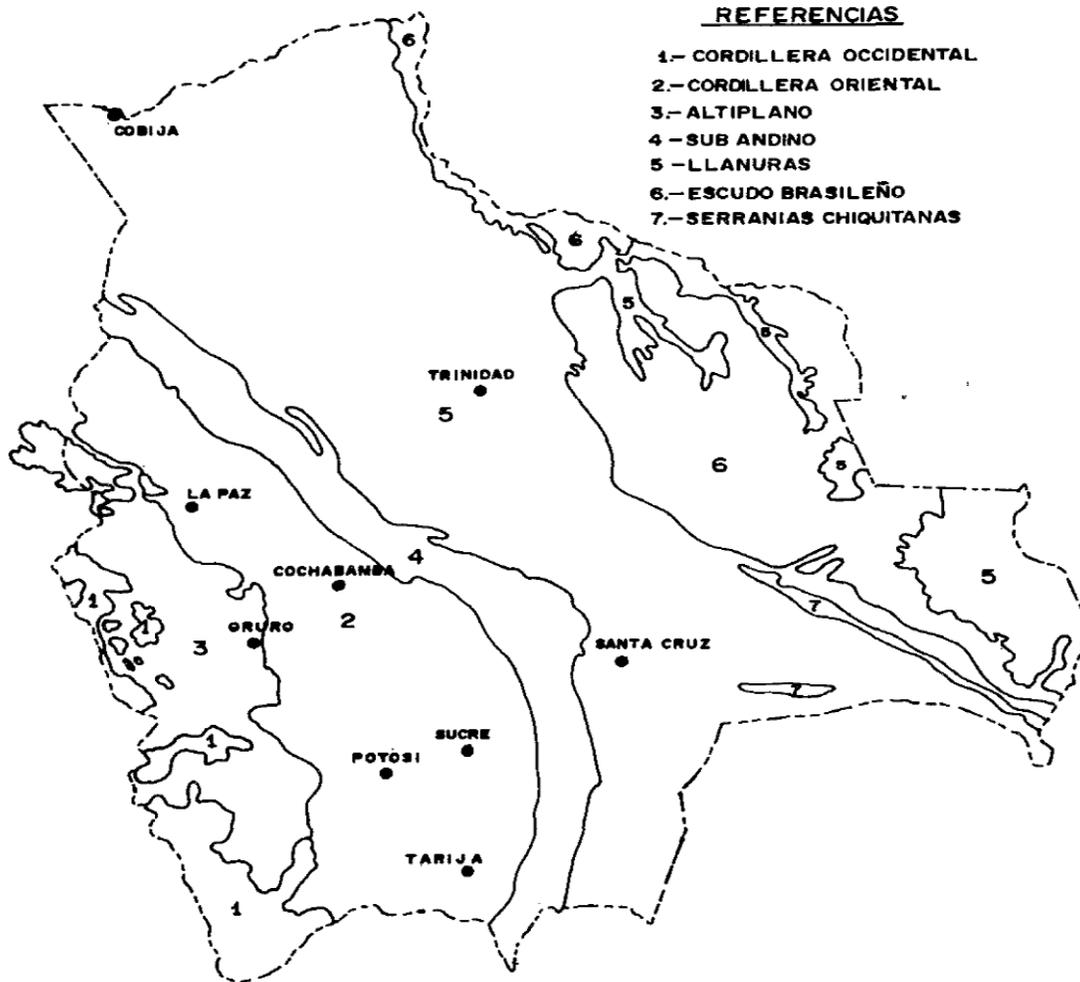
### CAPÍTULO 3

#### 3. GEOLOGÍA

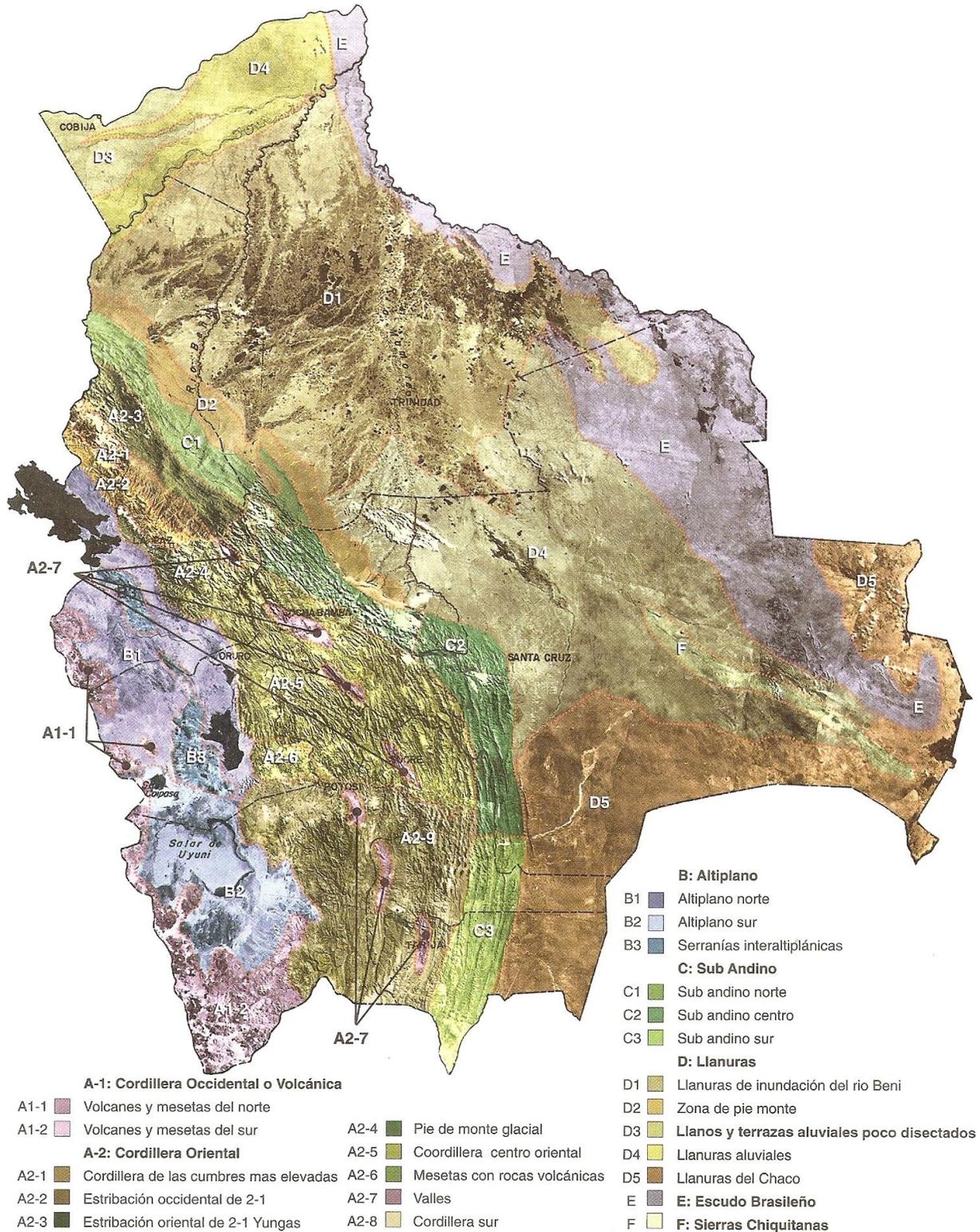
##### 3.1. GEOLOGÍA REGIONAL

##### 3.1.1. INTRODUCCIÓN

El territorio boliviano tiene una expresión de relieve muy variada y diversa, la cual está dividida en varias unidades o provincias fisiográficas (Mapa 4 - 5)



Mapa 4. Unidades Fisiográficas de Bolivia - - Extraído del libro Geografía y Recursos Naturales de Bolivia de Ismael Montes de Oca, 1989.



Mapa 5. Unidades fisiográficas de Bolivia - Extraído del libro Geografía y Recursos Naturales de Bolivia de Ismael Montes de Oca, 1989.

El área de estudio, está ubicado al pie de la zona fisiográfica denominada como Cordillera Occidental, siendo este parte del Altiplano Boliviano, la cual está definida por sus características geológicas y geomorfológicas.

El Altiplano comprende una cuenca continental del antepaís, de longitud aproximada 850 km y un ancho promedio de 130 kilómetros (ca. 110.000 km<sup>2</sup>), localizado entre elevaciones 3,600 y 4,100 m.s.n.m. Geomorfológicamente, consiste de una extensa planicie, interrumpida por serranías aisladas. (Arce-Burgoa, 2007).

La geología del Altiplano, está caracterizado por el predominio de rocas y sedimentos Cenozoicos, principalmente de edad Terciaria y Cuaternaria. Esta planicie está interrumpida por serranías aisladas de 4000 a 5300 m.s.n.m., conformado principalmente de afloramientos de rocas paleozoicas y mesozoicas. (Cardozo, 2004).

### 3.1.2. ESTRATIGRAFÍA Y MAGMATISMO

La primera división estratigráfica de la zona de estudio fue realizada por el Servicio Geológico de Bolivia (GEOBOL), entre ellos Montes de Oca, Sirvas y Torres, Murillo (1963). En la hoja Geológica N° 5741, donde se indican a presencia de las siguientes formaciones:

Cuaternario:

Depósitos Aluviales

Terrazas

Deslizamientos

Morrenas

Formación Huaricunca

Formación Charaña

Terciario:

Formación Pérez

Formación Cerke

Formación Mauri (seis miembros)

Formación Berenguela

Pre - Terciario:

Formación Abaroa

Sirvas y Torrez (1966) consideran la Formación Cerke de edad Cuaternaria, y no consideran a la Formación Charaña que había sido descrita anteriormente por Núñez (1964).

Ponce (1977), estableció que la Formación Abaroa es de edad Jurásica, piso Coloniano.

Ávila (1978), postula que las Ignimbritas Pérez se formaron por avalanchas de nubes ardientes, las cuales son producto de un volcanismo fisural, relacionadas con una tectónica de bloques controlados por fallas normales, ocurridas durante el Plioceno.

Blanco (1980), realizó un estudio sedimentológico y paleoecológico de la Formación Charaña, poniendo énfasis en la evolución de la flora diatomítica.

Lavenu (1986), realizó la datación de la Ignimbrita "Intra-Charaña", pero obtuvo resultados que no pudieron establecer un nivel cronológico válido para esta unidad.

### 3.1.3. GEOMORFOLOGÍA

La sub-cuenca del río Mauri, tiene una superficie aproximada de 10.200 Km<sup>2</sup>, de los que casi el 80% se caracteriza por la presencia de dos grupos de unidades morfológicas: la meseta volcánica, que cubre el 35% del área, y la montaña media y alta, que cubre el 40% aproximadamente. Ambos grupos están vinculados genéticamente a la actividad volcánica plio-cuaternaria que ha determinado gran parte de los relieves de la Cordillera Occidental. El diseño de drenaje de la sub-cuenca del Mauri es denso y está bien organizado; de tipo dendrítico en los relieves montañosos, se vuelve paralelo en la meseta. (Mapa 7) Dado el predominio de litologías volcánicas competentes, los valores de la erosión no son altos. En efecto, si se toma en cuenta que los relieves montañosos favorecen el proceso erosivo, los valores del 60% correspondientes a una erosión moderada y del 16% correspondientes a una erosión severa, pueden considerarse bajos. De cualquier manera se trata sobre todo de erosión lineal localizada a lo largo de las incisiones de los cursos de agua. También hay que citar la presencia de algunos valles importantes suspendidos en la parte alta de la sub-cuenca, los cuales contribuyen a frenar el proceso erosivo, porque crean zonas de estancamiento con lagunas y bofedales. Al contrario, es necesario recordar que los depósitos de los ríos están relativamente desarrollados y que existen importantes mantos detrítico-coluviales en los flancos de los mayores relieves volcánicos, los cuales, a pesar de que forman parte del paisaje montañoso, están constituidos por materiales menos cohesivos que las volcanitas. El aporte sólido del Mauri al Desaguadero debe considerarse proveniente sobre todo de la parte del curso aguas abajo de General Pérez, donde el río y sus afluentes drenan a través de la meseta volcánica, en gran parte degradada, erosionando prácticamente el substrato sedimentario terciario. Por lo demás, en esta misma zona de la sub-cuenca, la mayor parte de la vertiente norte está formada por relieves sedimentarios de la zona de Berenguela. En presencia de lluvias intensas y abundantes, el sistema drenante de la cuenca del Mauri tiene todas las características

como para hacer confluir las aguas masivas y velozmente aguas abajo, a 10 largo del curso principal y hasta el Desaguadero. (*Plan Director Binacional, 1993*).

Según el Plan Director Binacional, (1993), geomorfológicamente el área de estudio está caracterizado de la siguiente manera:

➤ **SUSTRATO GEOLÓGICO**

*El sustrato geológico, considerado esencialmente como litología y como posición estructural, es ampliamente el factor más importante, debido a sus múltiples aspectos y al hecho de que influye directa o indirectamente en todos los demás factores. En efecto, el tipo litológico determina la predisposición de un relieve con respecto al modelado y a la erosión; mientras que la posición vinculada a la deformación estructural o a los procesos de postura de los cuerpos rocosos, determina la entidad y la forma del relieve y, en consecuencia, la fuerza del ataque erosivo y las modalidades de escurrimiento de las aguas superficiales.*

*El papel que juega el sustrato geológico en la caracterización de las unidades geomorfológicas es complejo, pero puede decirse que, esencialmente, su actuación se realiza de dos maneras:*

- *Indirectamente, en cuanto la combinación de ciertas litologías con ciertas posiciones estructurales determina ciertas formas de relieve, aunque no específicamente.*
- *Directamente, cuando ciertos sustratos geológicos determinan formas características del relieve. Es el caso de las mesetas volcánicas, las terrazas lacustres, las acumulaciones de piedemonte o los depósitos aluviales.*

*En este segundo caso, las características del sustrato geológico se encuentran implícitamente definidas en la unidad geomorfológica. En el primer caso, en cambio, el sustrato geológico debe ser puesto en evidencia en los mapas, diferenciando posteriormente las unidades geomorfológicas sobre la base del mismo sustrato.*

- *Rocas volcánicas competentes, lavas, ignimbritas e intrusivas, que constituyen un sustrato resistente a la erosión, pero susceptible de ser cortado por escarpes abruptos y pendientes muy pronunciadas.*
- *Rocas volcánicas escasamente competentes, preponderantemente tobas o rocas volcánico-clásticas. En la mayoría de los casos se trata de series compuestas de sedimentitas y piroclastitas, cuyo comportamiento ante la erosión puede considerarse equivalente al de una serie de tobas. Se trata de rocas poco resistentes a la erosión y que contribuyen ampliamente al transporte sólido de los ríos. En compensación, dan lugar a un relieve de escasa energía, con pendientes suaves.*

- *Rocas sedimentarias, incluyendo en este grupo todas las rocas sedimentarias diagenizadas, del Paleozoico al Terciario, diversamente estructuradas, plegadas y falladas. Se ha podido hacer un único grupo de todas las rocas sedimentarias de este tipo, ya que la secuencia del Paleozoico al Terciario es relativamente monótona y está constituida por recurrencias de areniscas, lutitas con conglomerados subordinados y raras unidades carbonatadas. Por lo tanto, desde el punto de vista de su influencia en la morfología, estas rocas pueden considerarse estadísticamente homogéneas. En general, se trata de rocas erosionables, y en algunos casos muy erosionables, que definen las formas del relieve sobre todo en función de la estructura y el grado de alteración. En consecuencia, los relieves resultantes pueden ser redondeados, cuando la estructura es blanda o el manto de alteración espeso, o bien, incluso bastante disectados, cuando son muy estructurados.*
- *Coberturas cuaternarias, generalmente, estas rocas constituyen la base de unidades geomorfológicas distintas. Sin embargo, pueden formar parte del relieve coberturas cuaternarias de tipo detrítico, coluvial, lacustre, morrénico o fluvio-glacial. En estos casos, se han indicado y distinguido de las rocas sedimentarias o volcánicas que forman el substrato del relieve, ya que se trata de terrenos poco o para nada consolidados y fácilmente erosionables y, por lo tanto, condicionan el comportamiento de la unidad morfológica de la que forman parte. (Plan Director Binacional, 1993).*

#### ➤ **EROSIÓN**

*Cuando el factor erosión se considera por separado, en general, se trata de evaluar el grado del ataque erosivo real al que se ve sometido un paisaje y la evolución del fenómeno en términos de progreso del modelado, en un determinado contexto morfológico. Esto también se refleja en eventuales evaluaciones de las cantidades de material arrastrado y del transporte sólido de los ríos.*

*Una evaluación de la erosión de este tipo se efectúa, de manera sintética, observando directamente el estado de modelado de las formas del relieve y las huellas de procesos erosivos.*

- **Erosión negligible (clase 1).** *Las superficies son uniformes o poco accidentadas, planas o con pendientes débiles. El drenaje está escasamente desarrollado y poco profundos. Se notan amplias áreas sin trazas de incisiones o lesiones que hagan prever un progreso significativo del fenómeno erosivo.*

*En condiciones normales, en los valles aluviales se presenta una erosión limitada a lo largo del curso principal, laminar débil y eólica en los depósitos del valle. En las zonas de llanura, o terraza lacustre se presenta una erosión sobre todo eólica, con transporte limitado y a poca distancia, mientras que a lo largo de los cursos más grandes los ríos depositan.*

*En la estación de lluvias, con las avenidas, en los valles aluviales se presenta erosión concentrada en la cuenca y erosión laminar, y, localmente, depósito en las laderas. En las zonas de llanura se presentan inundaciones con depósito y redistribución de limos. En zonas de vertiente se puede presentar un inicio de erosión lineal limitado en el tiempo.*

*Los valores de la erosión clase 1 se concentran en alrededor de un 95% en las unidades geomorfológicas determinadas por los terrenos de cobertura y, en particular, en la llanura fluvio-lacustre, en las zonas inundables, en los valles aluviales y en la terraza fluvio-lacustre conservada; todas las unidades caracterizadas por superficies llanas y poco cortadas, a menudo en depresión.*

- **Erosión moderada (clase 2).** *Esta es la clase más difundida en las unidades de colina y montaña, con relieve incluso fuerte, pero vertientes uniformes y regulares y zonas de cumbre amplias y suaves. También en las zonas de meseta es la clase más difundida en los tres tipos de unidad y representa un estadio intermedio de evolución morfológica. En la terraza lacustre resulta muy frecuente en la unidad disectada, por lo que corresponde a las situaciones menos acentuadas de un estadio avanzado de evolución en un paisaje de escasa altura.*

*La clase 2 es característica de situaciones en las que se reconoce un estadio de erosión activa, pero las formas y huellas muestran que se trata de un proceso gradual sin efectos destructivos acelerados. Ha sido localizada la presencia de un diseño de drenaje desarrollado y organizado, con incisiones netas pero no profundas y presencia de depósitos en las áreas mayores.*

*Las vertientes son relativamente uniformes y regulares. Cuando están cubiertas por un manto coluvial, las incisiones pueden ser profundas, pero están localizadas.*

*En las vertientes la erosión es preponderantemente laminar; es lineal en las incisiones y con intensidad muy variable, pasando de casi nada durante la estación seca a relativamente intensa durante la estación de lluvias. En las unidades geomorfológicas con superficies más o menos llanas, como la terraza lacustre o la meseta, se presenta un componente de erosión eólica.*

- **Erosión severa (clase 3).** *A este nivel de erosión se reconocen situaciones de degradación avanzada en rápida evolución, por lo que se pueden hipotetizar situaciones de peligro, de fuerte transporte de materiales y de escasas posibilidades de aprovechamiento de las áreas afectadas, especialmente durante la estación de lluvias.*

*Aunque cada área afectada sea de extensión limitada, esta es una clase frecuente en todas las unidades geomorfológicas disectadas o degradadas y su frecuencia aumenta en las unidades de montaña y en las áreas de substrato sedimentario. En las unidades de montaña se notan huellas de erosión regresiva, que tienden a modificar las divisorias, disminuyendo las zonas de cumbre de pendiente suave. Por lo que concierne a la terraza lacustre, se nota un cierto equilibrio de frecuencias, en la unidad degradada, entre la clase 3 y la clase 2, lo cual indica una situación bastante compleja de relieve cortado e irregular y, por lo tanto, muy susceptible de evolución rápida. En la meseta la erosión de clase 3 se concentra sobre todo en las escarpes de las incisiones y en las zonas más degradadas.*

*Este nivel de erosión se reconoce por la presencia de un retículo hidrográfico denso, bien jerarquizado y con incisiones profundas; ausencia de depósitos en los cursos secundarios, vertientes con pendiente media o fuerte en colina o montaña y huellas de erosión regresiva; incisiones densas y profundas en las unidades de meseta o terraza y escasa presencia de mantos coluviales. De las áreas con erosión 3 puede esperarse una fuerte contribución al transporte sólido de los ríos, el cual puede volverse catastrófico en presencia de litologías poco competentes y en el caso de lluvias intensas*

- **Erosión muy severa (clase 4).** *Esta clase de erosión indica situaciones de extremo peligro y degradación. En zonas de vertiente o colina corresponde a una morfología de bad-lands, con erosión lineal en cárcavas, en pendiente*

*fuerte e irregular. En zonas de meseta o terraza corresponde a tramos de escarpaduras degradadas. La frecuencia más alta de esta clase se localiza en las unidades de colina disectada y de terraza fluvio-lacustre degradada. En ambos casos, hay que relacionar el alto valor de erosión con la presencia de rocas sedimentarias terciarias poco competentes. Las dimensiones de las áreas con erosión de clase 4 son limitadas.*

➤ **FORMAS DE RELIEVE**

*Las formas del relieve son el resultado de la historia evolutiva de la región, condicionada por los dos factores ya ilustrados, es decir, el substrato geológico y su grado de modelado. Por lo tanto, la consideración de las formas del relieve en la diferenciación de las unidades geomorfológicas interviene esencialmente como elemento de clasificación y jerarquización, a fin de crear unidades lo más homogéneas posible para los objetivos del estudio, respecto a las características morfológicas regionales del área.*

- *Tipo de relieve en relación a su origen o al substrato geológico que lo determina.*
- *Energía del relieve en términos de altura sobre el nivel de base.*
- *Tipo de superficie y condiciones de degradación.*

*El significado de cada una de estas características depende del resto de los factores asociados, con los que se combinan para determinar situaciones geomorfológicas definidas y con características homogéneas de comportamiento.*

➤ **CLIMA**

*A pesar de que su papel en la definición de las unidades geomorfológicas es solo indirecto, el clima constituye un factor muy importante porque condiciona la influencia de los factores del modelado y, por lo tanto, las formas del relieve.*

*Sin embargo, la influencia del clima debe tomarse en cuenta cuando se consideran las características de detalle y las implicaciones de cada una de las unidades geomorfológicas con respecto a la dinámica de las aguas, los riesgos de erosión e inundación y los recursos hídricos. Particularmente, en el región estudiada, donde el clima está bien definido y es muy severo.*

*Durante 8 meses del año, aproximadamente, es extremadamente seco y frío, con fluctuaciones diurnas muy fuertes y heladas frecuentes. Esto favorece la disgregación de las rocas, predisponiéndolas al arrastre y al transporte. En el breve periodo del verano, de diciembre a marzo, se concentra el 90% de las lluvias, que son breves y violentas y, por lo tanto, originan una escorrentía superficial también violenta, con fuerte erosión y alto transporte sólido, inundaciones y depósitos de materiales en los valles y llanuras.*

*Debido al tipo de clima en los sectores menos lluviosos, falta casi totalmente la protección vegetal y, por esta razón, durante la estación seca, la erosión causada por el viento, muy frecuente y a menudo fuerte, no debe descuidarse. En las vertientes más inestables se presenta también un movimiento continuo de materiales por efecto de la gravedad.*

*Por lo tanto, es necesario considerar que, a causa del clima, los normales factores modeladores del paisaje actúan con efectos extremos.*

*En conclusión podemos decir que, a nivel de los aspectos generales del conjunto que condicionan la evaluación de los fenómenos observados especialmente en términos de evolución a largo plazo, se puede observar lo siguiente:*

- El altiplano y las cordilleras que lo rodean son el resultado de una evolución estructural larga e intensa, que llega hasta tiempos más recientes, con fenómenos de levantamiento y vulcanismo activo.*
- En particular, el altiplano es el resultado del relleno de una fosa tectónica que puede ser localizada incluso en el Cretácico, que ha recibido grandes cantidades de materiales clásticos, en gran parte continental y vulcano-sedimentario, acumulado en espesores fuertes y poco cementados.*
- La actividad estructural reciente ha deformado estos depósitos, creando las serranías que se encuentran en el interior del altiplano, constituidas por materiales fácilmente erosionables, y zonas endorreicas de acumulación, sujetas a inundaciones y embalses de agua.*
- La actividad de levantamiento reciente y todavía en curso ha determinado una dinámica laboriosa de la hidrografía superficial, con variaciones en la forma y localización de las zonas deprimidas; en consecuencia, los depósitos recientes, poco consolidados, se ven expuestos a un ataque erosivo intenso. La misma*

*actividad de levantamiento ha favorecido el desarrollo de un retículo de drenaje bien organizado y muy denso, a lo largo del cual se exasperan los fenómenos tanto erosivos como de deposición, en efecto, a lo largo de todos los tramos fluviales se notan trazas de una acción erosiva continua, asociadas con áreas de depósitos y embalse de agua. Esta situación es consecuencia del régimen fluvial, el cual, durante la estación húmeda, presenta crecidas que determinan el transporte veloz de grandes cantidades de materiales, mientras que en la estación seca el agua tiende a embalsarse en las zonas llanas, incluso en el interior de los valles.*

- *El clima de todo el altiplano contribuye a acentuar los efectos de los fenómenos vinculados a la dinámica fluvial y a los procesos erosivos. En efecto, las lluvias son breves y violentas, concentradas en un periodo de poco más de tres meses. Esto determina una fuerte erosión y transporte sólido en los relieves e, igualmente, inundaciones y depósitos en las áreas deprimidas, resultado de eventos a menudo catastróficos. Durante el resto del año el clima es seco y frío, con heladas nocturnas, que favorecen la disgregación de las rocas, y vientos fuertes y frecuentes. Los efectos de estos fenómenos se ven acentuados por la ausencia casi total de una cobertura forestal.*

#### **3.1.4. MAPA FOTOGEOLÓGICO**

La metodología basada en la definición de unidades geológicas/geomorfológicas se adapta particularmente al empleo de los medios de percepción, siendo que se utilizaron imágenes satelitales y no así fotografías aéreas. En efecto, las unidades geomorfológicas son el resultado de una historia evolutiva y de la influencia combinada de varios factores. Por tanto, se expresan con una coherencia de paisaje fácilmente observable y diferenciable con la que ofrecen las imágenes de satélite y el uso de ciertos filtros para la definición del nivel de detalle de las unidades en consecuencia, la información de los mapas resultantes es coherente con la escala a la que ha sido utilizada por el autor del estudio para la interpretación.

Obviamente, la importancia y el papel de cada uno de los factores serán diversos para cada unidad, como también podrán ser definidas unidades geomorfológicas.

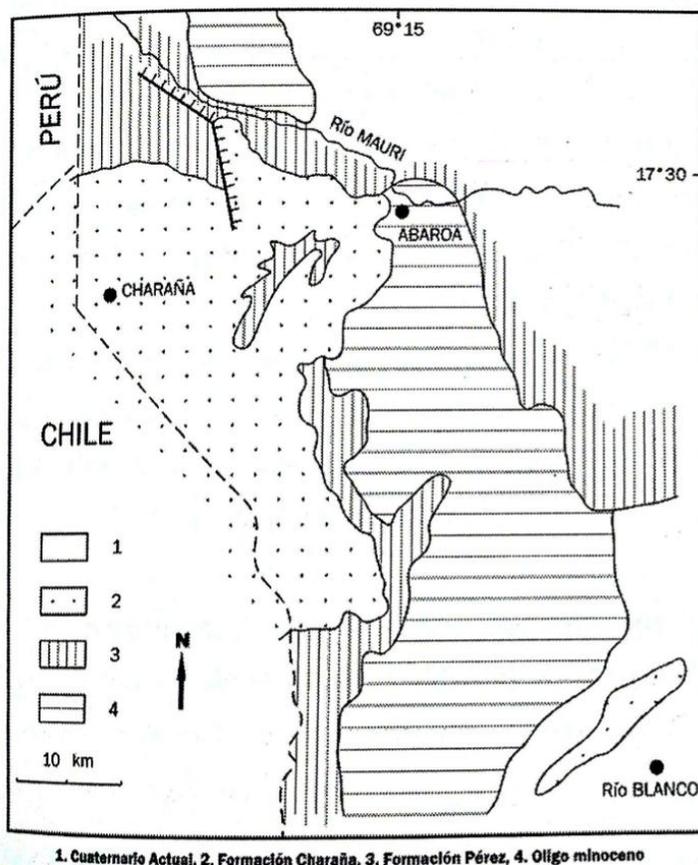
### 3.2 GEOLOGIA LOCAL

#### 3.2.1. INTRODUCCIÓN

La Cuenca de Charaña encierra depósitos lacustres más antiguos del cuaternario de Bolivia, la Formación Charaña. Esta formación descansa discordantemente sobre la formación Pérez.

De acuerdo a Blanco, 1980, "Las observaciones regionales, muestran que después de la consolidación de las Ignimbritas Pérez, la región de Charaña, conformaba una amplia superficie algo cóncava, un poco elongada de dirección SW-NE y pendiente hacia las inmediaciones de la Estación Abaroa, donde se piensa que ocurrió el desagüe de todo el sistema de drenaje de esta parte".

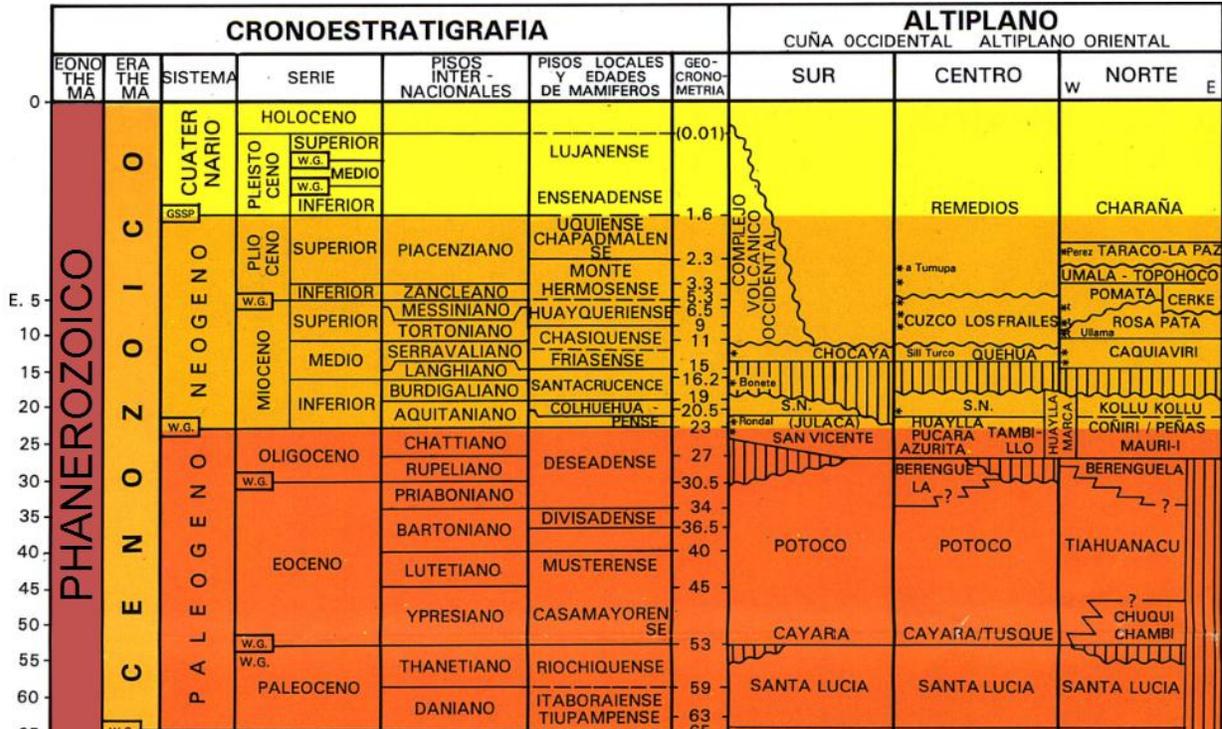
En consecuencia un desajuste de esta zona, ya sea por tectonismo o por taponamiento en la salida de las aguas, era suficiente para dar origen a un lago, ya que el resto de los límites, eran bien marcados por las partes altas de la ignimbrita en zonas cercanas a las inflexiones de los cerros y sus pie de montes, dando así, una configuración potencialmente endorreica y dando origen a los depósitos lacustres de la zona.



Mapa 6. Cuaternario de la cuenca de Charaña - Extraído del libro El Cuaternario de Bolivia y regiones vecinas de Argollo, Jaime, 2008.

### 3.2.2. ESTRATIGRAFÍA

En el área de estudio no se encontraron fósiles para conocer edades de las rocas, por lo que se hizo uso de la escala Cronoestratigráfica de Oller, 1996 (Columna Estratigráfica 1), para asignar edades a las formaciones geológicas.



Columna Estratigráfica 1. Columna Cronoestratigráfica de Oller, Jaime - 1996.

A continuación se presenta una descripción de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio de la más antigua a la más reciente:

#### 3.2.2.1. FORMACIÓN ABAROA

**Edad:** Mioceno Inferior. En el área de estudio esta es la formación más antigua, y se caracteriza por no tener correlación con ninguna otra existente en Bolivia.

**Localidad Tipo:** La Formación Abaroa se encuentra formando serranías a lo largo de la frontera con la República del Perú, y presenta sus mejores afloramientos en la estación Eduardo Abaroa del ferrocarril Arica–La Paz, el cual se encuentra fuera del área de estudio. (Suarez, 1998)

**Descripción litológica:** Litológicamente se encuentra constituida por oscuras lavas color marrón a negro, macizas, con abundantes fenocristales de plagioclasa blanca y máficos de hasta 5 mm., que se encuentran interestratificadas con bancos esporádicos sedimentarios de poca potencia, los cuales están compuestos principalmente por areniscas de color rojizo y conglomerados finos de color gris claro.

### 3.2.2.2. FORMACIÓN CERKE

**Edad:** Esta formación es considerada de edad Mioceno superior – Plioceno inferior. Una muestra de lava dio una edad de 7,6 Ma (Lavenu *et al.*, 1989).

**Localidad Tipo:** Volcán Cerke y alrededores. (Suarez, 1998)

**Descripción litológica:** De acuerdo a la descripción realizada en campo, las rocas de esta formación se componen de Lavas andesíticas, de color café oscura, textura ígnea porfídica, estructura maciza, con fenocristales de hasta 6 mm. de feldespatos y máficos, localmente existen estructuras de flujo. El espesor es de 80 a 100 m.

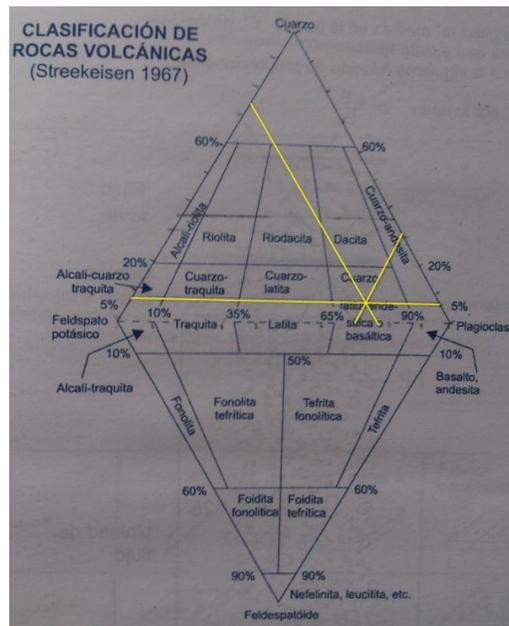


Figura 1. Diagrama Streekeisen de clasificación de rocas ígneas volcánicas. Elaboración propia.



Fotografía 1. Afloramiento de la Formación Cerke.

### 3.2.2.3. FORMACIÓN PÉREZ

**Edad:** Plioceno Superior.

**Localidad tipo:** Afloramientos próximos a la Estación General Pérez del ferrocarril Arica-La Paz. (Suarez, 1998)

**Descripción litológica:** En la zona de estudio esta formación está constituida exclusivamente por un manto horizontal de ignimbrita. El espesor del manto de ignimbrita varía entre 5 a 30 metros. Esta variación se debe sin duda a que se depositó sobre una superficie erosionada y en estado de madurez, o sea que en los altos de dicha superficie el espesor de la ignimbrita será menor que en las partes bajas de la misma. (Suarez, 1998)

Litológicamente acorde a la descripción en campo, esta formación es una ignimbrita de color rosáceo claro en superficie fresca y marrón blanquecino superficialmente. El manto de ignimbrita que constituye la formación Pérez, descansa sobre la formación Cerke y sobre la formación Pérez descansa la formación cuaternaria de Charaña.

Ignimbrita está formada por cristales de cuarzo, laminillas de biotita, la matriz es caolinítica y hay en ella abundantes clastos de piedra pómez.

Petrográficamente las rocas de la formación Pérez corresponden a la composición de las riódacítica, porque presentan gran cantidad de vidrio y fenoclastos de cuarzo, escasa ocurrencia de plagioclasa y biotita.



Fotografías 2 - 3. Afloramientos de la Formación Pérez.





Fotografías 4 – 5 - 6. Afloramientos de la Formación Charaña.

Entre otros depósitos Cuaternarios tenemos los siguientes:

#### **3.2.2.5. DEPÓSITOS Y TERRAZAS ALUVIALES**

Estos depósitos cuaternarios se encuentran conformados por sedimentos tales como cantos, gravas, arenas, arcillas y limos, los cuales se depositaron por acción fluvial y conforme perdió fuerza el agua produjo el depósito de estos materiales y conforman los depósitos aluviales actuales.

Las terrazas aluviales son testigos de antiguas llanuras aluviales, las cuales se encuentran en diferentes valles y quebradas que por lo general se comunican a ríos de curso permanente, tal es el caso del río Putani. El desarrollo de estos está asociado básicamente al tipo de material de aporte y al régimen de las corrientes de agua. En el primer caso el tipo de material transportado por el río le dio sus características litológicas, y en el segundo caso, se produjo la formación de estas dentro de terrazas Holocenas y a menor escala, por variaciones de las aguas e incluso por variaciones en el nivel freático, lo que en ciertas circunstancias favorece la formación de depósitos de turbas.

En la actualidad los ríos más importantes de la región ejercen poca influencia en la acumulación de materiales, debido a su bajo caudal, sin embargo estos desarrollaron llanuras aluviales, que en algunos casos son extensas tales como se aprecia en los ríos Caño, Putani, Uchusuma y sobre todo en el río Mauri.

### **3.2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

En el área de estudio no se encontraron estructuras a escala regional que afecten a las rocas y depósitos presentes.

Lo que si se tomó en cuenta y son de gran importancia para la acumulación de agua subterránea, sobre todo en los bofedales que son importantes en el presente estudio, son las fracturas que se encuentran afectando a las rocas, ya que estas producen porosidad secundaria en estas y permiten que haya flujo de agua desde la superficie hacia las aguas subterráneas, permitiendo la recarga de los acuíferos.

En el área se constató que la mayor parte está conformada por rocas volcánicas tales como lavas e ignimbritas las cuales no son rocas con porosidad alta, pero las fracturas producen que estas adquieran porosidad y permitan el flujo del agua.

Por tanto se realizaron medición de direcciones de estas fracturas y se encuentran representadas en el mapa geológico, (Ver Mapa Anexo 1 – Mapa Geológico Charaña), teniendo gran cantidad de estas en poca distancia horizontal en el terreno por lo que se consideró las de mayor importancia, llegándose a constatar que no tienen una dirección preferencial.



Fotografías 7 - 8 - 9. Fracturas en las rocas.

### 3.2.4. GEOMORFOLOGÍA

#### 3.2.4.1. INTRODUCCIÓN

La geomorfología de una región es el resultado de una historia evolutiva a la que contribuyen numerosos factores. Un mapa de unidades geomorfológicas es un documento en el que una región aparece subdividida en áreas homogéneas según la influencia de estos factores, o de una parte de los aspectos de dicha historia evolutiva. Esto significa que, aunque se tienda a aplicar metodologías y leyendas standard, siempre será necesario adaptar la leyenda de un mapa geomorfológico a las condiciones ambientales de la región considerada, así como a las exigencias de aplicación del estudio para el que se realiza el estudio.

En cualquier caso, el fundamento de la metodología son las unidades geomorfológicas, indicadas también como unidades fisiográficas o unidades de paisaje. Sin embargo, dados los múltiples factores que intervienen en la determinación de estas unidades, su definición podrá variar, modificándose igualmente los límites que existen entre estas, según el valor que se otorgue a cada uno de los factores, lo cual equivale a decir según el detalle con que sea considerado cada uno de estos.

El detalle en la representación de los elementos morfológicos y de las formas y procesos localizados también podrá variar en función de la importancia que estos revistan para los fines del estudio.

En el caso del presente estudio, dado que los objetivos principales del conciernen sobre todo a los recursos hídricos, la dinámica de las aguas tanto subterráneas y superficiales presentes en los bofedales correspondientes a los ríos Caño y Putani, y la erosión; en la elaboración de los mapas geomorfológicos se ha dado mayor importancia a los factores que influyen los fenómenos que tienen que ver con los problemas mencionados y que, por lo tanto, condicionan las respectivas evaluaciones.

El área de estudio presenta características geomorfológicas determinadas por las propiedades litológicas de las diferentes formaciones geológicas, donde se puede apreciar presenta un paisaje de relieve bajo con pocos desniveles, plano a ligeramente inclinado hacia el este, moderadamente disectado, donde se destacan amplias llanuras aluviales y fluvio lacustres.



Fotografía 10. Panorámica de Depósitos Cuaternarios.

El Río Putani es considerado como nivel de base local, en el cual se desarrollaron varios niveles de terrazas.

El área está conformado por una secuencia volcano - sedimentaria, conformado por tobas, ignimbritas, gravas, arenas, limos y arcillas, dicha secuencia adquiere una cierta resistencia a la erosión eólica y fluvial, la que combinada con una disposición horizontal en numerosas capas permite el desarrollo de amplias mesetas, las que posteriormente han sufrido la acción erosiva de los procesos fluviales y eólicos, de esta manera se han convertido en amplias superficies de erosión o pedimentos.

Como geoforma más antigua tenemos a las coladas de lava, las cuales se han preservado gracias a su resistencia a la erosión, permitiendo que aún estos afloren en diferentes lugares.

Posteriormente se continúa con los depósitos de coladas ignimbríticas, que se depositaron sobre las lavas, las cuales son materiales de corrientes expulsados del volcán (nubes ardientes). Las ignimbritas son de mala selección o es decir de distribución irregular de los tamaños de granos, heterogéneos y porosos.

Sobre estas, se depositaron sedimentos lacustres y tobas intercaladas, la cual constituye un manto de toba de grano grueso, areniscas tobáceas de grano medio y conglomerados finos, todo ello cubierto por una capa de caliza arenosa. Posteriormente a estos se tienen depósitos aluviales actuales por la acción fluvial que además generan terrazas aluviales, siendo por último la generación de los bofedales que son de gran importancia en el presente estudio.

### **3.2.4.2. AGENTES DE EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA**

El paisaje actual fue modelado por diferentes agentes y procesos que actuaron de manera combinada y de los cuales se los presenta a continuación:

Los principales factores que actuaron sobre la geomorfología del área de estudio son los de carácter litológico, estructural y climático.

#### **3.2.4.2.1. CONTROL LITOLÓGICO**

Este factor es el que ejerce mayor predominancia con respecto al resto, debido a que la cuenca se encuentra conformada por una secuencia volcano - sedimentaria con materiales

que presentan diferentes grados de resistencia a la erosión, los materiales se encuentran en posición subhorizontal lo que permite el desarrollo de amplias mesetas.

#### **3.2.4.2.2. CONTROL ESTRUCTURAL**

La Formación Charaña, unidad con mayor extensión en el área, no presenta una alta resistencia a la erosión, se encuentra depositada sobre las ignimbritas Pérez en posición subhorizontal, en este caso el control estructural es determinante para la formación de amplias mesetas. La Formación Charaña en la región norte de la población desarrolla un relieve ondulado caracterizado por pequeños desniveles con un drenaje de mayor densidad. (Torrez, 1999).

#### **3.2.4.2.3. CONTROL CLIMÁTICO**

El clima cambiante en la zona produce una disgregación mecánica en las rocas y este se encuentra asociado a otros factores.

#### **3.2.4.2.4. METEORIZACIÓN**

Los procesos de meteorización pueden ser físicos y/o químicos los cuales afectan a las rocas de manera superficial lo cual produce que las rocas sufran disgregación y/o desintegración.

#### **3.2.4.2.5. PROCESO FÍSICOS**

Se considera a estos como procesos mecánicos que son los más importantes, debido a que en el área de estudio hay acción importante de factores tales como el clima, altura.

#### **3.2.4.2.6. ACCIÓN TÉRMICA**

Por variaciones climáticas en la zona entre horarios diurnos y nocturnos que en promedio alcanzan los 25°C, generan que haya dilatación y contracción de las componentes de las rocas, lo que posteriormente va generando la disgregación mecánica de estas.

### 3.2.4.2.7. ACCIÓN DEL HIELO

Este es un agente aunque menor, pero que es otro de los agentes a tomar en cuenta. Aunque la precipitación es escasa en el área llega a tener un efecto importante, se pudieron apreciar en los meses más fríos durante el invierno que son los meses de Junio y Julio mayor acción del hielo debido a las bajas temperaturas lo cual tiene efecto en los bofedales y por lo tanto en el agua subterránea.



Fotografía 11. Agua superficial congelada en los bofedales -  
06 de Junio de 2014.

### 3.2.4.2.8. PROCESOS QUÍMICOS

Los procesos químicos no parecen jugar un papel importante en el modelado del paisaje, estando simplemente dentro de los controles climáticos. Es posible que su acción se reduzca a una débil alteración superficial de las rocas volcánicas, produciendo generalmente arcillas y colaborando en procesos mecánicos. Quizá sea más significativa, la acción de disolución de ciertos elementos que se encuentran en los minerales.

### 3.2.4.2.9. SALINIZACIÓN

La salinización se define como la concentración de sales solubles en el suelo, que en la mayoría de los casos interfiere con el crecimiento de las plantas y degrada el suelo, lo que es observado en los bofedales estudiados.



Fotografía 12. Panorámica de Bofedales y zonas salinizadas.

Varias son las causas de la salinización: una es el contenido natural de sales en el suelo y las rocas por introducción de aguas de lavado o removilización, por el uso de fertilizantes químicos. Otra es la drástica disminución del agua del suelo por evaporación, escorrentías o drenajes profundos. Un exceso de evaporación puede presentarse en zonas áridas, en general con baja vegetación o erosionadas. Los suelos salinizados resultantes se caracterizan por la formación de costras blancas de sales en su superficie y poseen un pH alto.

Los efectos generales de la salinización se muestran por la presencia de plantas enanas y raquídeas que son incapaces de absorber agua y, por el contrario, se deshidratan. A medida que el contenido salino aumenta, el raquitismo de la vegetación es mayor. La pérdida de las escasas cosechas por esta degradación del suelo, puede alcanzar porcentajes considerables. El origen de los constituyentes salinos son los minerales primarios que se encuentran en los suelos y en rocas expuestas de la corteza terrestre. A medida que estos minerales primarios se someten a intemperismo, sus constituyentes se liberan gradualmente y, en la mayoría de los casos, son transportados a otros lugares. El mecanismo de transporte primario de las sales puede ser a través del flujo de las aguas subterráneas, así como también de las aguas superficiales y el lugar donde se depositan finalmente las sales, depende en gran medida de

las condiciones topográficas, climáticas y del balance hídrico de los acuíferos. (Cardozo, 2004).

➤ **PROCESOS DE SALINIZACIÓN**

Los dos procesos primarios que causan la salinización natural son: la evapoconcentración de las aguas superficiales y la evaporación y transpiración de la humedad de los suelos.



Fotografía 13. Salinización en los Bofedales.

Los procesos de evapoconcentración de las aguas superficiales, se presentan en aquellos casos en los que la cantidad anual de evaporación directa excede al aporte anual de las precipitaciones y el flujo hacia las aguas subterráneas. Como resultado de estas condiciones, los constituyentes solubles son dejados atrás y con el transcurso del tiempo su concentración aumenta gradualmente dejando grandes depósitos de sal en superficie.

Un impacto secundario de la evapoconcentración es la reducción de la capacidad de drenaje cuando se desarrolla una costra de sal. La costra de sal se comporta como una capa impermeable que restringe el drenaje vertical del agua a través del suelo, la misma que permite que un buen porcentaje del agua se acumule en la superficie y que acelere la salinización.

Otro proceso que contribuye a la salinización natural es la que se presenta en las regiones áridas y semiáridas del mundo y se debe a la migración del agua subterránea hacia las partes superiores por la evaporación del suelo desnudo, o por la evapotranspiración causada. Este proceso puede ocurrir tanto por descargas de aguas subterráneas hacia la atmósfera como por la acumulación de sales solubles en una porción superior del suelo. El grado de salinización a través de la evaporación y evapotranspiración de los suelos depende de una diversidad de factores geológicos y climáticos de la región.

Los efectos secundarios de evaporación del suelo desnudo y la evapotranspiración de plantas de plantas puede incluir la reducción de la permeabilidad de los suelos, si se forma una costra de sal en la superficie o si los valores de sodicidad del suelo son altos.

#### **3.2.4.2.10. ACCIÓN DE LOS RÍOS**

Actualmente los ríos de curso permanente son muy escasos, en el pasado la acción fluvial fue importante produciendo erosión y acumulación aportando al desarrollo de la cuenca. Los ríos presentes en el área de estudio generan depósitos aluviales actuales, los depósitos de terraza son superficies que se formaron cuando la corriente de los ríos produjo erosión vertical a través de un depósito aluvial anteriormente depositado, esto ocurrió como respuesta a un descenso del nivel de base o como consecuencia de un levantamiento regional.

Un producto de la erosión producida por los ríos son las terrazas los cuales son permanentes a lo largo de los valles de los ríos que acarreaban materiales y por consiguiente muestran periodos de rejuvenecimiento que los han ido afectando. Debido a que en el área se producen amplios periodos de sequias, la acción erosiva de las aguas que corren por las quebradas en la época de lluvia son los principales agentes de transporte de materiales y de modelado del paisaje.

#### **3.2.4.2.11. ACCIÓN EÓLICA**

La acción de los vientos que durante la noche son muy fuertes, parecen tener solo efectos de erosión. Ciertas partes donde afloran rocas de la formación Pérez, por sus características litológicas, la acción de los vientos, está produciendo el desarrollo de "figuras grotescas" como resultado de su acción erosiva. Así mismo, en algunos lugares altos donde se tienen sedimentos de Charaña, muchos clastos de gravas están perfectamente pulidos y con brillo.

Los procesos que fueron mencionados son los principales responsables de producir las características en los bofedales estudiados ya que son los que generan variaciones composicionales, en la textura y estructura de los diferentes tipos de materiales que los conforman.

#### **3.2.4.3. DISEÑO DE DRENAJE**

El diseño de drenaje dendrítico está presente en el área de estudio, el cual está caracterizado por una serie de ramificaciones irregulares de los ríos tributarios en varias direcciones y con ángulos diferentes, que tienen un marcado escurrimiento en dirección Este. La densidad de los ríos es variable en los distintos sectores de la cuenca teniendo desde baja a alta densidad de drenaje.

La cuenca se encuentra desarrollada en rocas de resistencia uniforme en su mayor parte debido a que el área de estudio se encuentra principalmente conformado por depósitos

sedimentarios de origen lacustre y además de rocas ígneas masivas, y denotan una clara falta de control de tipo estructural.

Se debe mencionar que la mayoría de los ríos presentes en el área de estudio tienen la característica de ser intermitentes, es decir que solo tienen agua en épocas de lluvias y el resto del año se encuentran secos, esto a excepción de los ríos donde se realiza el estudio de los bofedales que son los ríos Caño y Putani, además del río Caquena, los cuales se unen hacia el este al río Mauri. (Figura 3).

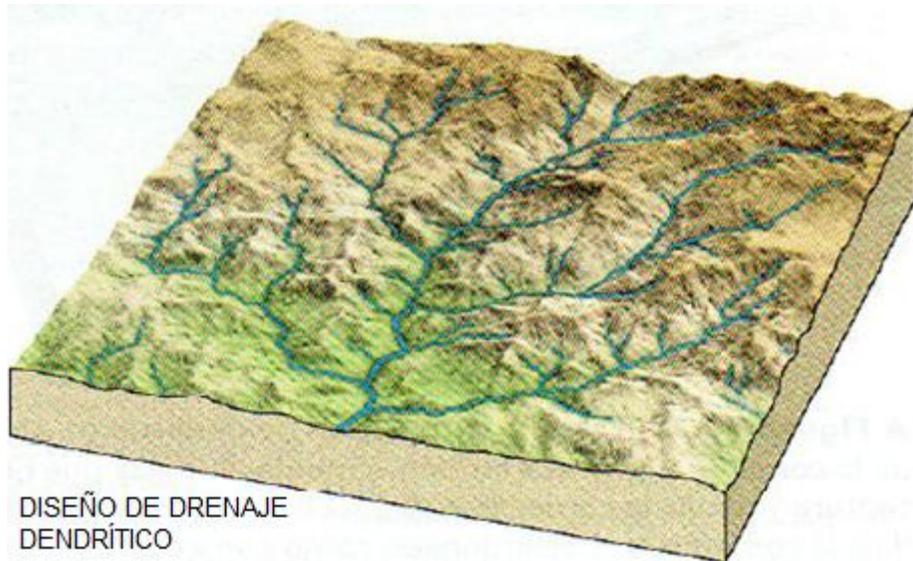
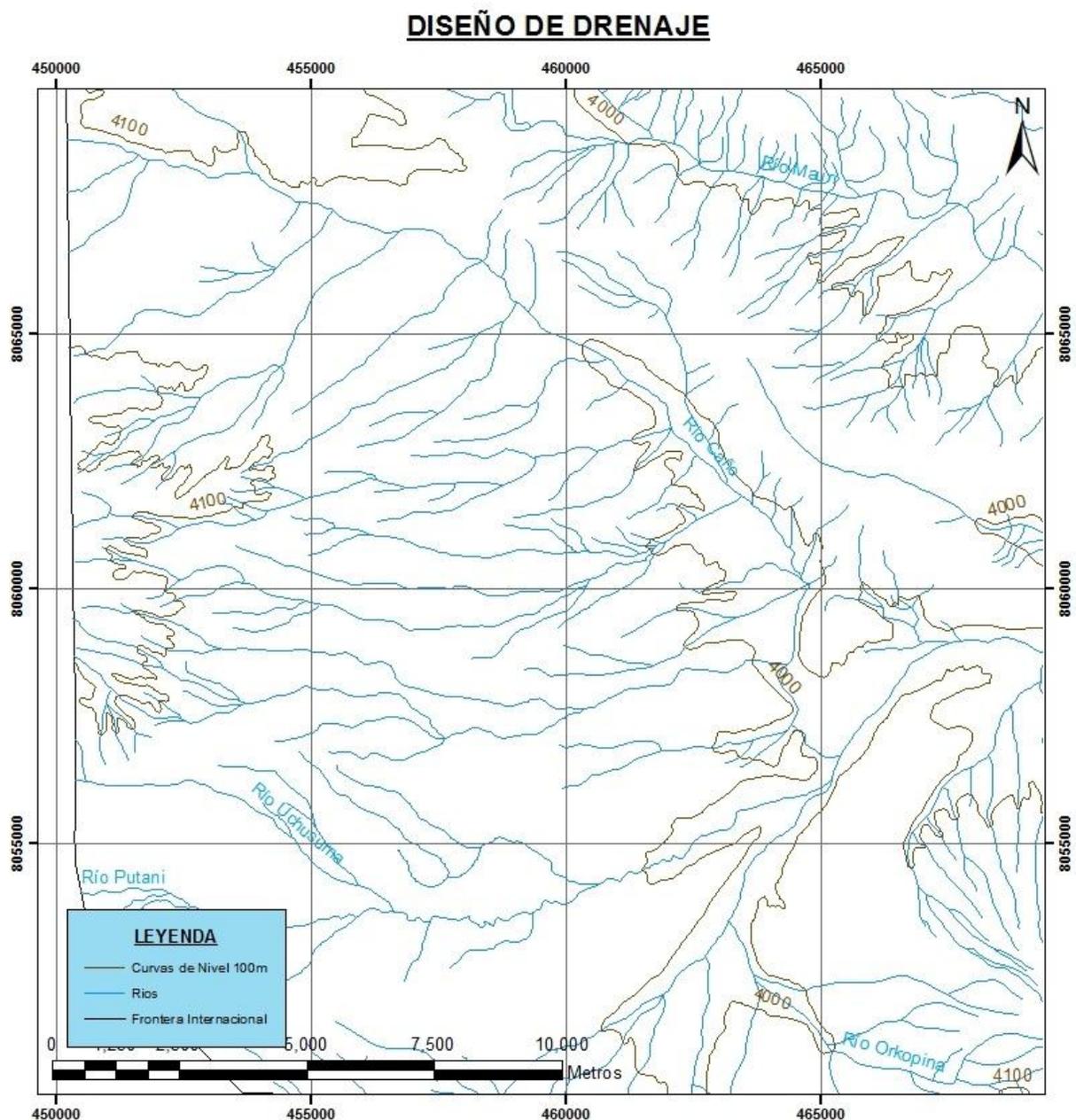


Figura 3. Esquema del Diseño de Drenaje Dendrítico



Mapa 7. Diseño de Drenaje Área de estudio.

Hidrográficamente, la zona pertenece a la Cuenca del Río Mauri, el cual se constituye en el principal tributario al Río Desaguadero, que a su vez pertenece a la Cuenca endorreica central o lacustre del Altiplano. Los principales ríos en el área de estudio son el Río Caquena tributario del Río Mauri, el Río Uchusuma que nace en territorio Peruano, Río Putani que tiene sus orígenes en el vecino país de Chile y el Río Caño que nace en Perú.

#### **3.2.4.4. DESARROLLO DE GEOFORMAS CONSTRUCCIONALES**

Las geoformas construccionales presentes en el área de estudio son las llanuras aluviales y los abanicos aluviales que son muy escasos y de extensión muy reducida (ver Mapa Anexo 2 – Mapa Geomorfológico Charaña).

Las llanuras aluviales fueron producidas por los principales ríos tales como Caño, Putani, Caquena y Uchusuma. Su formación es debido a las variaciones de turbulencia, en este caso la zona se caracteriza por ser árida a semiárida con periodos torrenciales temporales, permitiendo el transporte de gran cantidad de material que luego se deposita caóticamente cuando ocurre una disminución en la velocidad de las aguas y en la capacidad de transporte de los ríos. (Torrez, 1999).

#### **3.2.4.5. DESARROLLO DE GEOFORMAS DESTRUCCIONALES**

Las geoformas destruccionales presentes son las terrazas y los valles. Los depósitos aluviales están conformados por gravas, arenas, limos y arcillas, pueden clasificarse como terrazas aluviales y de erosión.

Las terrazas aluviales reconocidas son las más recientes y vienen a conformar los niveles más bajos de terrazas (ver Mapa Anexo 2 – Mapa Geomorfológico Charaña).

Las terrazas de erosión son los niveles más altos que se observan en los márgenes de los ríos en la mayoría de los casos no han desarrollado rasgos característicos en las superficies.

#### **3.2.4.6. EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA**

"La unidad geomórfica es la unidad básica de mapeo y se caracteriza por hallarse constituida por un grupo homogéneo de formas del terreno cuya expresión morfológica es consecuencia de la acción de uno o más procesos geomórficos locales dominantes, comunes e interrelacionados, desarrollados bajo determinada condición climática y en algunos casos con el control ejercido por algún tipo de estructura geológica o litológica; sin que la estructura sea siempre un factor de control principal y que además son recurrentes en geoformas individuales que integran el paisaje" (Vargas, 1988).

En la cuenca de Charaña se produjo una interrupción del aporte de material detrítico proveniente de la cordillera occidental debido a un aislamiento por una intensa erosión en el borde oeste, que ocasionó que la cuenca no tuviera influencias de la Cordillera (Blanco, 1980),

por lo que las características geomorfológicas comienzan a desarrollarse posterior al depósito de la Formación Charaña.

Por tanto, este aislamiento es el responsable de que procesos de zonas adyacentes tales como glaciación no se manifiesten en el desarrollo de la cuenca, lo que dio lugar a que se produjeran varias etapas de erosión. Esto se entiende debido a que al no haber modificaciones sustanciales en el relieve debido a la ausencia de aportes de materiales, sobreviene una etapa de erosión. (Torrez, 1999).

Tres fases de pedimentación se relacionan con variaciones en el nivel de base local, esto explica la generación de distintos niveles de terrazas, lo que implica ciclos de erosión con profundización y diferenciación de valles lo que permite que se generen las características geomorfológicas actuales. (Blanco, 1980).

## **CAPÍTULO 4**

### **4. HIDROGEOLOGÍA DE BOFEDALES**

#### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En la zona de estudio, la población de Charaña y estancias aledañas hacen uso de agua subterránea mediante el uso de pozos someros excavados de manera manual, el cual es aprovechado más que todo para uso doméstico, utilizando bombas manuales, bombas solares y/o de manera manual a través de balde y soga.

En el presente estudio se prioriza el estudio hidrogeológico en los bofedales de la zona, donde los recursos hídricos subterráneos utilizados dependen de las características sedimentológicas de los acuíferos, de sus condiciones hidrodinámicas y de las condiciones de recarga y descarga.

La calidad de agua subterránea está definida por el volumen de agua de lluvia y de la naturaleza de las rocas por las que atraviesa el agua, de esto también depende la cantidad de sales debido que a mayor precipitación menor es la concentración de sales disueltas, y según su calidad ver qué tipo de uso se le puede dar a estas aguas subterráneas.

Las subcuenca de los ríos Caño y Putani, presenta características hidrogeológicas favorables en los depósitos cuaternarios que son principalmente de origen lacustre y fluvial. La dirección principal de los ríos es Oeste-Este, teniendo como zona de descarga hacia el Río Mauri.

En términos generales un acuífero se define como “Aquella formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua y a partir de la cual se puede extraer agua en cantidad suficiente y económica para cierto fin”. (Cortez, 2013).

A su vez se entiende como una unidad geológica saturada, capaz de suministrar agua a pozos y manantiales, los que a su vez sirven como fuentes prácticas de abastecimiento del líquido elemento. Otro término que también se usa, en lugar de acuífero, son los de formación almacenadora y depósito de agua subterránea (Benitez, 1972).

Para poder hacer posible la exploración de agua subterráneas, es importante en primera instancia realizar el mapeo geológico para conocer la geología del área de estudio (ver Mapa Anexo 1 – Mapa Geológico Charaña), donde se realiza un reconocimiento en superficie de los afloramientos de las diferentes formaciones rocosas, así como de sedimentos cuaternarios, los cuales son de gran importancia debido a que en el área de estudio se tienen sedimentos cuaternarios los cuales controlan la generación de aguas subterráneas.

La cuenca estudiada se encuentra conformada principalmente por sedimentos cuaternarios correspondientes a ambientes lacustres y fluviales, de los cuales los cuales presentan buenas características para la acumulación de agua subterránea, los cuales se encuentran limitados

por formaciones geológicas Cenozoicas hacia el norte, tales como la Formación Pérez, la cual se encuentra conformada por tobas porosas y permeables e ignimbritas las cuales se encuentran muy fracturadas lo que permite la acumulación y el paso hacia las aguas subterráneas, formaciones que se encuentran en áreas más restringidas son las formaciones Abaroa y Cerke, de las cuales la Formación Abaroa se lo clasifica como acuífero fisurado y permite una acumulación regular de agua subterránea, en cambio la Formación Cerke conformada por lavas andesíticas y toba tiene baja probabilidad de acumular agua subterránea. (Ver Mapa Anexo 3 – Mapa Hidrogeológico Charaña).

#### 4.1.1. IMPORTANCIA DE LOS BOFEDALES

En el área de estudio los bofedales son de gran importancia debido que son necesarios para la cría de ganado camélido, además de su alta capacidad de producción de forrajes, así también este ecosistema juega un papel importante en lo que se refiere a la conservación y funcionamiento del medio ambiente en general como fue planteado por Orság en el 2007 y es presentado a continuación:

- *La conservación del recurso suelo. La cobertura vegetal densa y permanente de los bofedales, evita que la acción de los agentes erosivos (agua y viento) actúen sobre los suelos, disminuyendo de esta manera la erosión hídrica y eólica. Esto permite mantener la fertilidad de sus suelos y por ende su capacidad productiva. En general los suelos de los bofedales tienen una Capacidad de Uso de la clase V (Tierras no Arables) con limitaciones de humedad y drenaje, clima y suelo.*
- *La conservación del agua en las microcuencas, subcuencas y cuencas. En razón de que los suelos de los bofedales contienen importantes niveles de materia orgánica (>20%), permite que los suelos retengan elevadas cantidades de agua (tres veces más que la arcilla), evitando que este líquido se pierdan fácilmente por escurrimiento durante la época lluviosa. Esta retención de agua en los suelos de los bofedales permite que en la época seca del año (5 a 7 meses), los ríos, vertientes y aguas subterráneas sean alimentados, evitando que los pobladores de las partes bajas de las cuencas sufran por la escasez de este recurso.*
- *La formación de un microclima. La evaporación constante que se da en estas tierras, favorece que el aire tenga mayor contenido de humedad (la humedad relativa del aire en el Occidente del país es bastante baja), evitando de esta manera la desecación y desertificación del medio.*

- *La conformación de un hábitat diferente y específico. Gracias al microclima, humedad elevada y vegetación abundante, presenta una biodiversidad rica y particular (flora y fauna), en comparación al resto de las áreas secas. Esta situación permite el sostenimiento de la vida humana en estos parajes y que de no existir, sería probable que muchos de los ciclos de vida que se dan en ellos, serían reemplazados por extensiones de tierra, improductiva y despoblada.*
- *La fijación del carbono atmosférico. Los suelos de los bofedales retienen gran cantidad de carbono en su materia orgánica, evitando de esta manera que pasen a la atmósfera y ayuden al calentamiento del planeta. La degradación de los bofedales por falta de agua, provoca un cambio de uso del suelo y por consiguiente una pérdida del carbono de la materia orgánica por mineralización, situación que incide en el calentamiento del planeta.*
- *Favorecen para que el ciclo hidrológico del agua en las cuencas durante el año sea más uniforme.*

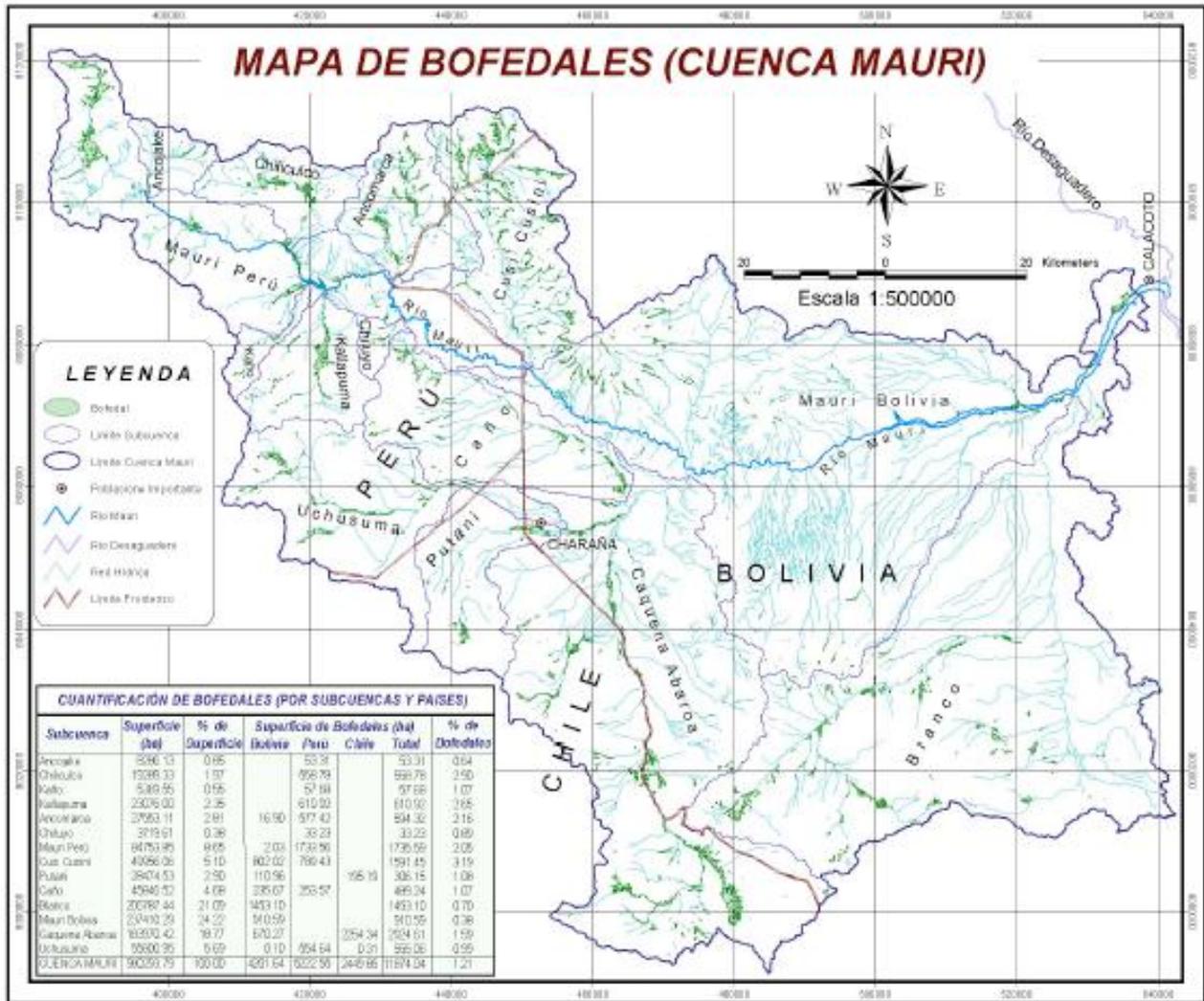
#### **4.1.2. FORMACIÓN DE BOFEDALES**

En la naturaleza se forman bofedales debido a las características ecológicas de las zonas del macizo andino, ubicadas sobre los 4,000 msnm., donde, en sus partes bajas (valles) se extienden amplias zonas planas o de depresión. Las mismas que por las características de sus suelos (arcillosos) almacenan suficiente humedad, proveniente de las precipitaciones, del derretimiento del hielo y de las filtraciones de las aguas almacenadas en los acuíferos, formando así suelos hidromórficos con gran potencial forrajero. (Plan Director Binacional, 1993).

También el poblador andino forma bofedales de manera artificial. Al respecto desde tiempos inmemoriales se practica la formación de bofedales artificiales, puesto que durante la estación seca del año (5 a 7 meses) es el único lugar donde se mantiene una alta producción de forrajes y donde es posible seguir pasteando los animales. Para formar un bofedal artificial, se requiere entre 5 a 10 años de inundación y el control del pastoreo y la carga animal. Según Salazar et al (2003), los estudios realizados con C-14 permiten determinar que los bofedales naturales de la parte altoandina tienen una edad aproximada entre 100 y 1000 años.

De acuerdo al inventario de los bofedales por el Plan Director Binacional, se ha podido constatar la presencia de tomas y canales de riego en las diferentes subcuencas del Mauri, situación que permite alimentar adecuadamente a este ecosistema. Los bofedales ubicados

en la toda la cuenca, dependen de gran manera del agua que se generan en las partes altas de la cuenca que escurren hacia las depresiones.



Mapa 8. Distribución de Bofedales en la Cuenca del Río Mauri - Molina, 2007.

## 4.2. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Hidrogeológicamente se considera que para que el agua siga el ciclo hidrogeológico en el área de estudio se debe considerar la recarga y descarga. (Cortez, 2013).

Las zonas de recarga necesitan muy poca agua para iniciar la infiltración o la recarga en los acuíferos. Las zonas favorables para esto son aquellas constituidas por depósitos aluviales como abanicos y llanuras aluviales. Las zonas de laderas están conformadas por material detrítico, los cuales están constituidos por derrubios, las cuales constituyen importantes zonas de recarga subterránea.

La principal zona de recarga se encuentra en la cabecera de la cuenca en territorio peruano y la constituye la precipitación pluvial, el deshielo de los nevados de la Cordillera Occidental y en menor cantidad las nevadas. El sentido principal de flujo es de noroeste a sureste. (Plan Director Binacional).

Las zonas de descarga son principalmente hacia el Río Mauri que posteriormente llega hasta el Río Desaguadero.

#### 4.3. DELIMITACIÓN DE LOS BOFEDALES EN LAS SUB-CUENCAS.

Los bofedales fueron clasificados en dos categorías siendo estas Bofedales Permanentes, los cuales contienen agua en su superficie durante todo el año considerando épocas secas y épocas húmedas y los Bofedales Temporales, los cuales tienen agua en su superficie durante las épocas húmedas del año y se encuentran secos en las épocas secas.

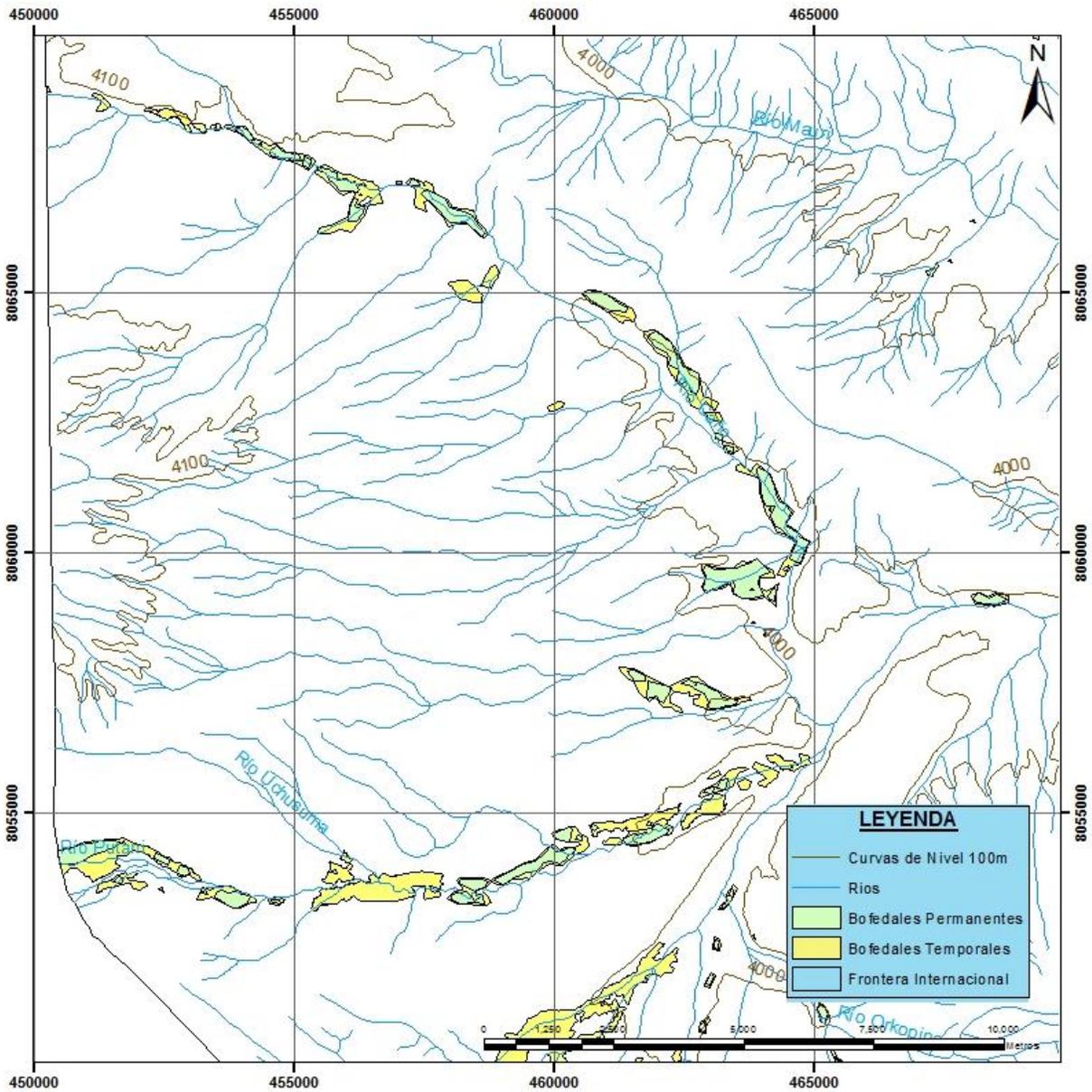
Esta clasificación fue realizada por personal de la ONG "Agua Sustentable", realizando un análisis multitemporal con el uso de imágenes satelitales correspondientes a diferentes años y tomas de fechas consideradas como épocas húmedas y épocas secas.

En base al procesamiento digital de imágenes de satélite, visitas de campo y evaluación de otros trabajos y estudios, etc., se ha determinado que los bofedales en la cuenca del río Mauri, ocupan una superficie total de aproximadamente 11.874 Ha, de las cuales en la parte peruana existen cerca de 5.222Ha, en Bolivia 4.202 Ha y en Chile 2.449 Ha. Si bien, la superficie que ocupa este ecosistema es pequeña (1.21%) en relación a todo el área de la cuenca, sin embargo este ecosistema permite la cría de ganado camélido, ovino y vacuno de manera intensiva. (Orság, 2007)

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Superficie	Área de bofedales (ha)				% de los bofedales
			Bolivia	Perú	Chile	Total	
Ancojake	8286,13	0,85		53,31		53,31	0,64
Chiliculco	19289,33	1,97		558,78		558,78	2,90
Kaño	5369,55	0,55		57,68		57,68	1,07
Kallapuma	23076	2,35		610,92		610,92	2,65
Ancomarca	27553,11	2,81	16,90	577,42		594,32	2,16
Chiluyo	3719,61	0,38		33,23		33,23	0,89
Mauri Perú	84753,85	8,65	2,03	1733,56		1735,59	2,05
Cusi Cusini	49956,06	5,10	802,02	789,43		1591,45	3,19
Putani	28474,53	2,90	110,96		195,19	306,15	1,08
Caño	45846,52	4,68	235,67	253,57		489,24	1,07
Blanco	206787,44	21,09	1453,10			1453,10	0,70
Mauri Bolivia	237410,29	24,22	910,59			910,59	0,38
Caquena Abaroa	183970,42	18,77	670,27		2254,34	2924,61	1,59
Uchusuma	55800,95	5,69	0,10	554,64	0,31	555,06	0,99
<b>T o t a l:</b>	<b>980293,79</b>	<b>100,00</b>	<b>4201,64</b>	<b>5222,55</b>	<b>2449,85</b>	<b>11874,04</b>	<b>1,21</b>

Tabla 1. Distribución de los Bofedales en la Cuenca del Río Mauri – Orság, 2007

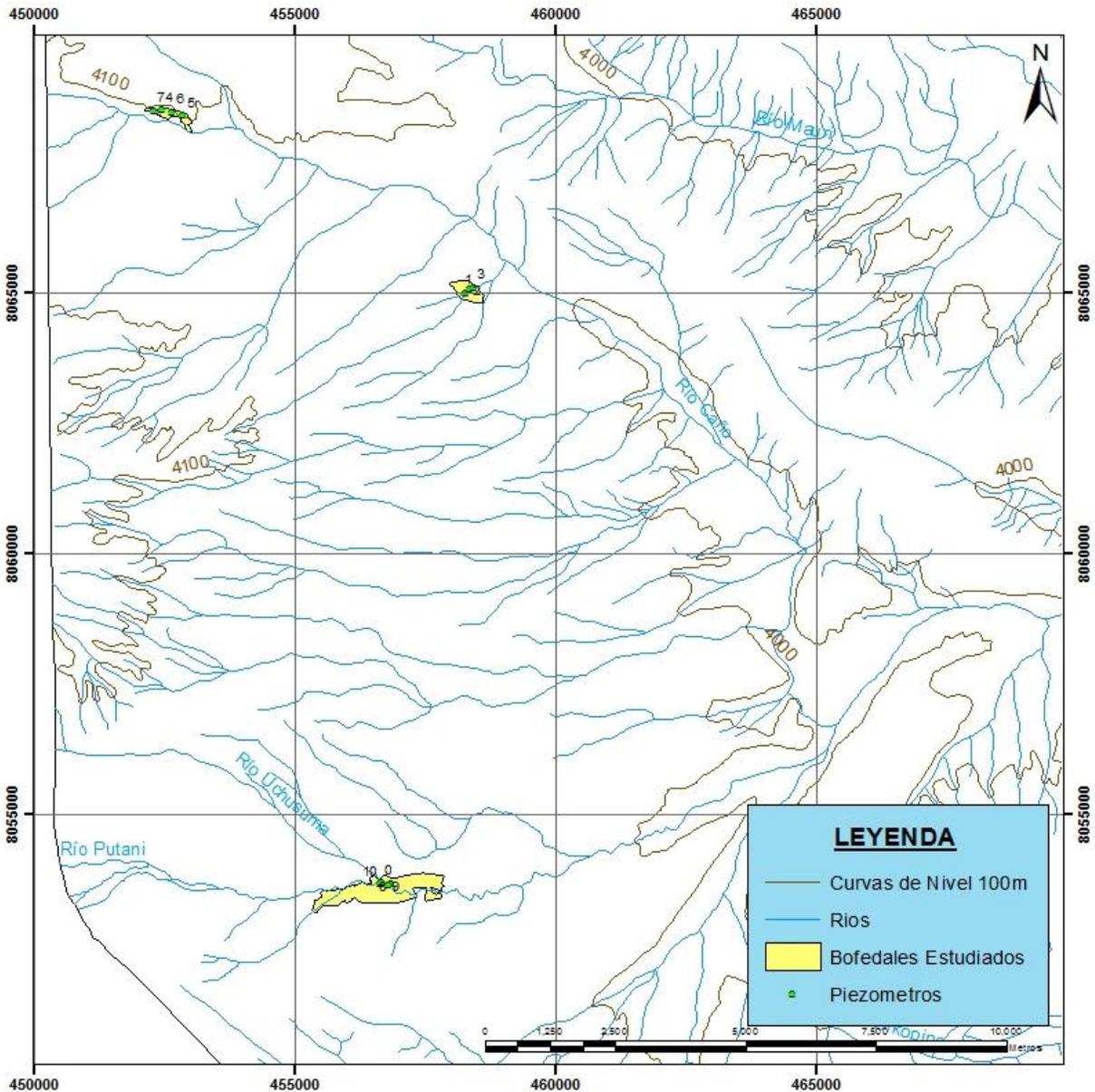
### CLASIFICACIÓN DE BOFEDALES



Mapa 9. Clasificación de Bofedales – Elaboración Propia con información de “Agua Sustentable”

Los bofedales en los cuales se vienen realizando los estudios son tres de los cuales dos se encuentran en la zona norte cercanos al Río Caño y otro en el sector sur en el Río Putani.

### CLASIFICACIÓN DE BOFEDALES



Mapa 10. Bofedales Estudiados.

#### **4.4. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA**

##### **4.4.1. INTRODUCCIÓN**

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. . (“MAYA” Construcción y Servicios, 2014).

La zona de estudio, se encuentran formados por depósitos fluviales, compuestas por materiales de tamaño heterogéneo, compuestos por arenas, gravas, limos y arcillas, formando bofedales. En dichos sectores se necesita conocer la geometría de las mismas para lo cual, se programaron una serie de sondeos eléctricos verticales, para conocer la conformación litológica en profundidad de estos sitios.

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 200 metros, lo cual ha permitido una investigación del subsuelo de cerca a los 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 realizó en planillas electrónicas, los cuales han sido introducidos en un ordenador para su posterior análisis. (“MAYA” Construcción y Servicios, 2014).

##### **4.4.2. OBJETIVO DE LOS SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES**

El objetivo fundamental del estudio geofísico, es el de determinar la litología existente en profundidad de cada uno de los bofedales y así identificar el espesor de los mismos, en las zonas de estudio, y determinar la morfología de los mismos en dichos sectores, utilizando sondeos eléctricos verticales.

Los puntos sondeados fueron registrados mediante un GPS marca Garmin, los cuales se presentan a continuación:

<b>Nº S.E.V.</b>	<b>ESTE</b>	<b>NORTE</b>	<b>ELEVACION (m.s.n.m.)</b>	<b>Obs.</b>
1	456566	8053703	4029	SEV-01 SUR
2	456666	8053676	4030	SEV-02 SUR
3	456760	8053671	4032	SEV-03 SUR
4	456926	8053652	4031	SEV-04 SUR
5	452282	8068517	4056	SEV-01 NORTE
6	452452	8068505	4055	SEV-02 NORTE
7	452592	8068499	4056	SEV-03 NORTE
8	452737	8068469	4056	SEV-04 NORTE
9	452841	8068362	4054	SEV-05 NORTE
10	458151	8065052	4030	SEV-01 CENTRO
11	458251	8065015	4029	SEV-02 CENTRO
12	458308	8065092	4032	SEV-03 CENTRO
13	458452	8065133	4031	SEV-04 CENTRO
14	458575	8065175	4031	SEV-05 CENTRO

Tabla 2. Ubicación de los sondeos.

#### 4.2.2.1. UBICACIÓN DE LOS SONDEOS

El Área de estudio se encuentra ubicado, en el Departamento de La Paz, a una distancia a partir de la población de Viacha, de 230 kilómetros aproximadamente, cercana a la población fronteriza de Charaña, existen varias vías de acceso a las zonas de estudio, a partir de la población antes mencionada.



Mapa 11. Ubicación de Sondeos.

En la Mapa 11 podemos apreciar la ubicación de los sondeos sobre una imagen satelital y se pueden apreciar los tres bofedales donde se realizó el estudio siendo los siguientes:

- Norte: Bofedal Jalaru.
- Centro: Bofedal Curajpucho.
- Sur: Bofedal Putani

Los Bofedales Jalaru y Curajpucho se encuentran aledaños al Río Caño, mientras que el otro bofedal en el Río Putani.

#### 4.4.3. 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 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.

La profundidad de investigación puede regularse variando las distancias entre los electrodos de corriente A, B, como se indica en la Figura 4.

Este método nos ayuda a determinar las características litológicas y estructurales del subsuelo, 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.

##### 4.4.3.1. 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 4).

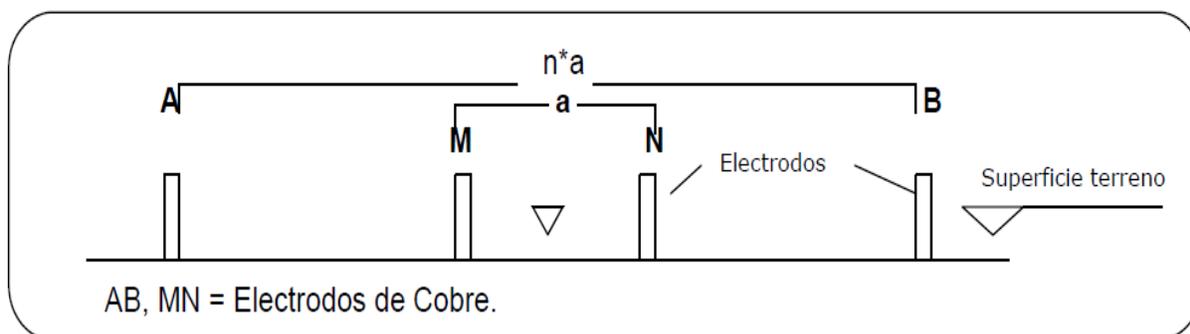


Figura 4. Diseño Electródico Schlumberger.

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.

#### 4.4.3.2. 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. (Fotografía 14).



Fotografía 14. Equipo e instrumento geofísico utilizado en la campaña.

#### 4.4.4. 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.

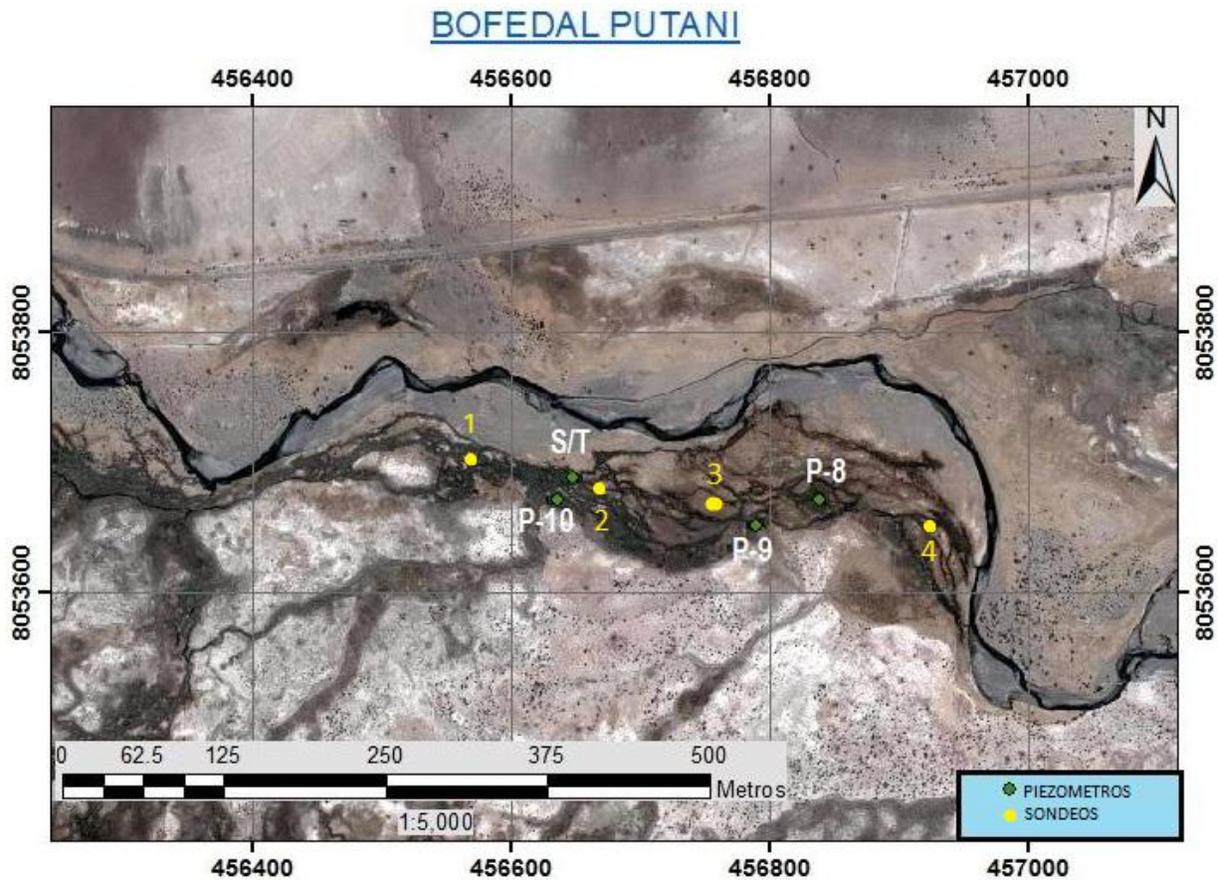
Simultáneamente y una vez introducidos los datos de campo en la computadora, se efectúa una interpretación mediante procesado y el análisis de las curvas utilizando el programa 1X1D de Interpex Limited., el mismo que permiten el ajuste de las curvas de campo con las curvas teóricas, mediante un proceso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

Los resultados del procesado 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.

#### 4.4.5. RESULTADO DE LOS SONDEOS GEO-ELÉCTRICOS (SEV's)

##### 4.4.5.1. BOFEDAL PUTANI.

A continuación se muestra la ubicación de los sondeos, sobre la imagen satelital, las coordenadas se describen en la tabla 2.



Mapa 12. Ubicación de sondeos dentro del Bofedal Putani.

4.4.5.1.1. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-01 SUR

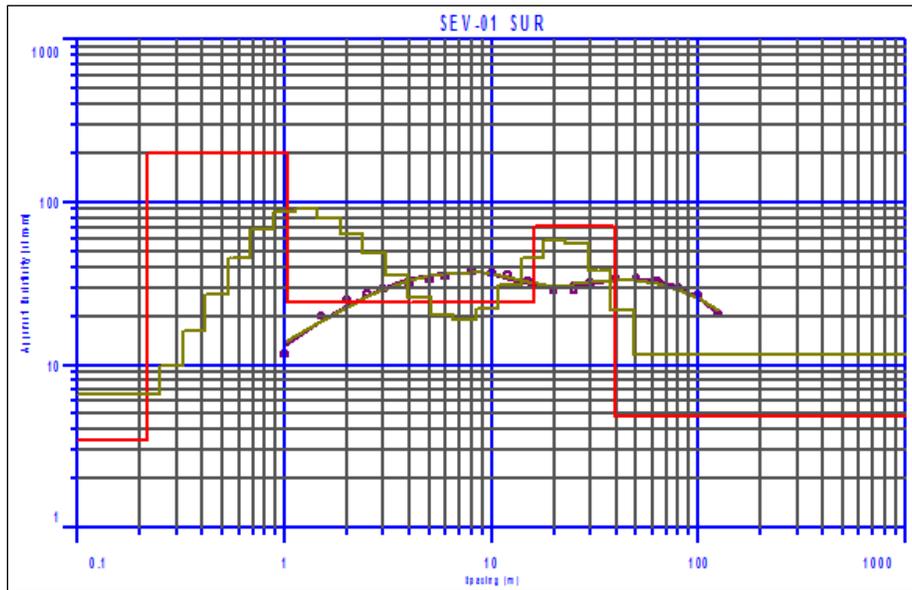


Figura 5. Curva generada con datos de campo - SEV 01 SUR

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 4.8485

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	3.4443	<input type="checkbox"/>	0.21728	0.21728	-0.21728	<input type="checkbox"/>
2	200.83	<input type="checkbox"/>	0.80949	1.0268	-1.0268	<input type="checkbox"/>
3	24.166	<input type="checkbox"/>	14.981	16.008	-16.008	<input type="checkbox"/>
4	70.540	<input type="checkbox"/>	23.729	39.737	-39.737	<input type="checkbox"/>
5	4.8592	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

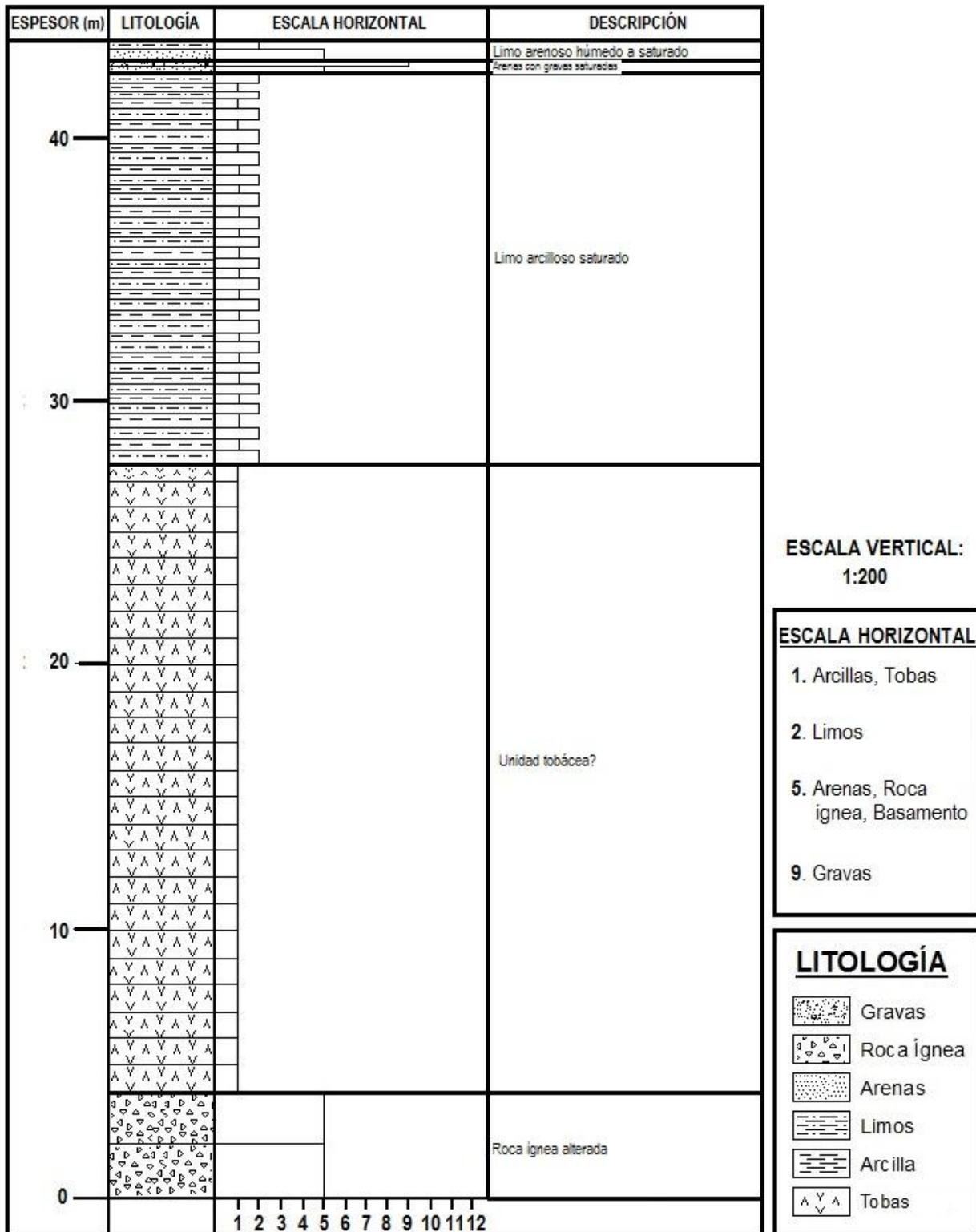
Figura 6. Resultados obtenidos mediante software - SEV 01 SUR

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
3,44	0,21		Limo arenoso húmedo a saturado
200,83	0,80	1,02	Arenas con gravas saturadas
24,16	14,98	16,00	Limo arcilloso saturado
70,54	23,72	39,73	Posible unidad tobácea?
4,85			Roca ígnea alterada?

Tabla 3. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 01 SUR

De acuerdo al sondeo realizado en este sector, se observó la presencia de 5 capas y/o niveles (Figuras 5 y 6). Un primer nivel que está conformado por limo arenoso húmedo a saturado, con una resistividad de 3,44 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,21 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con gravas saturadas, con una resistividad de 200,83 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 1,02 metros; para pasar a otro nivel de limo arcilloso saturado, con una resistividad de 24,16 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 16,00 metros; seguidamente se tiene otro nivel de posibles unidades tobáceas?, con una resistividad de 70,54 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 39,73 metros; por último se tiene la presencia de otro nivel considerado como roca ígnea alterada?, con una resistividad de 4,85 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 2).

Estudio Hidrogeológico de los Bofedales de la Sub Cuenca de los Ríos Caño Y Putani (Cuenca Río Mauri)



Columna Estratigráfica 2. SEV - 01 SUR

4.4.5.1.2. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-02 SUR

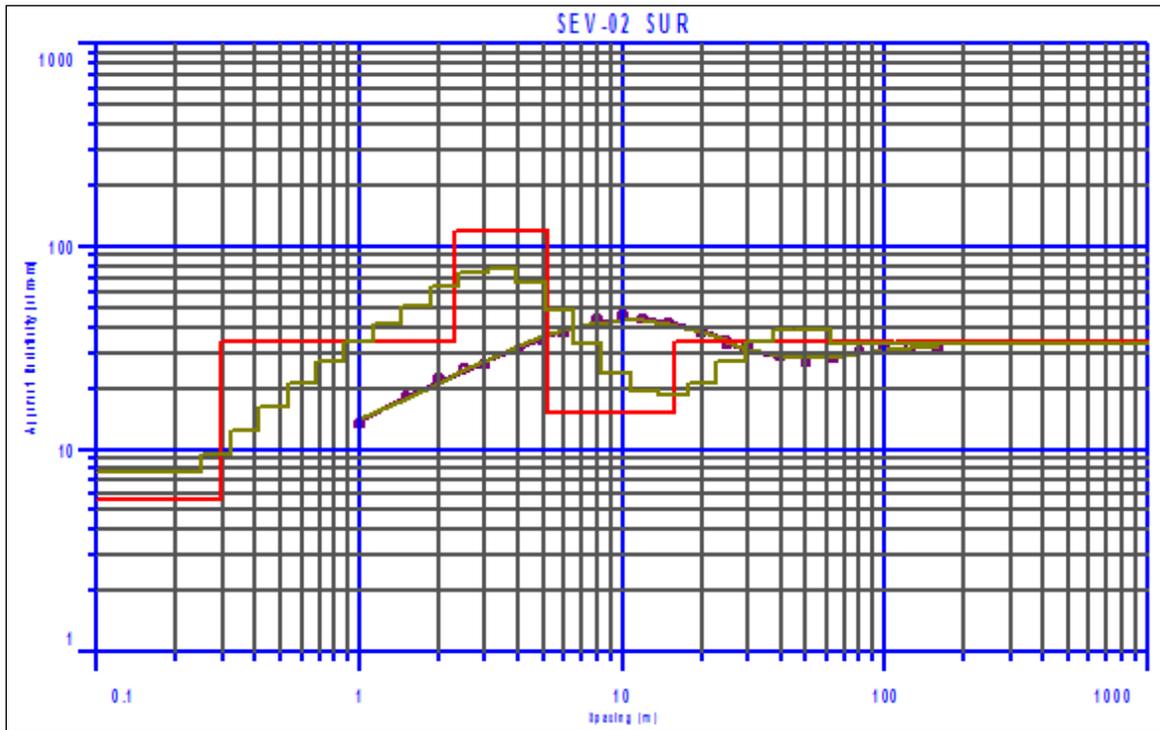


Figura 7. Curva generada con datos de campo - SEV 02 SUR

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 3.1651

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	5.6878	<input type="checkbox"/>	0.29637	0.29637	-0.29637	<input type="checkbox"/>
2	33.996	<input type="checkbox"/>	2.0126	2.3090	-2.3090	<input type="checkbox"/>
3	118.44	<input type="checkbox"/>	2.9232	5.2322	-5.2322	<input type="checkbox"/>
4	15.280	<input type="checkbox"/>	10.473	15.705	-15.705	<input type="checkbox"/>
5	34.293	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

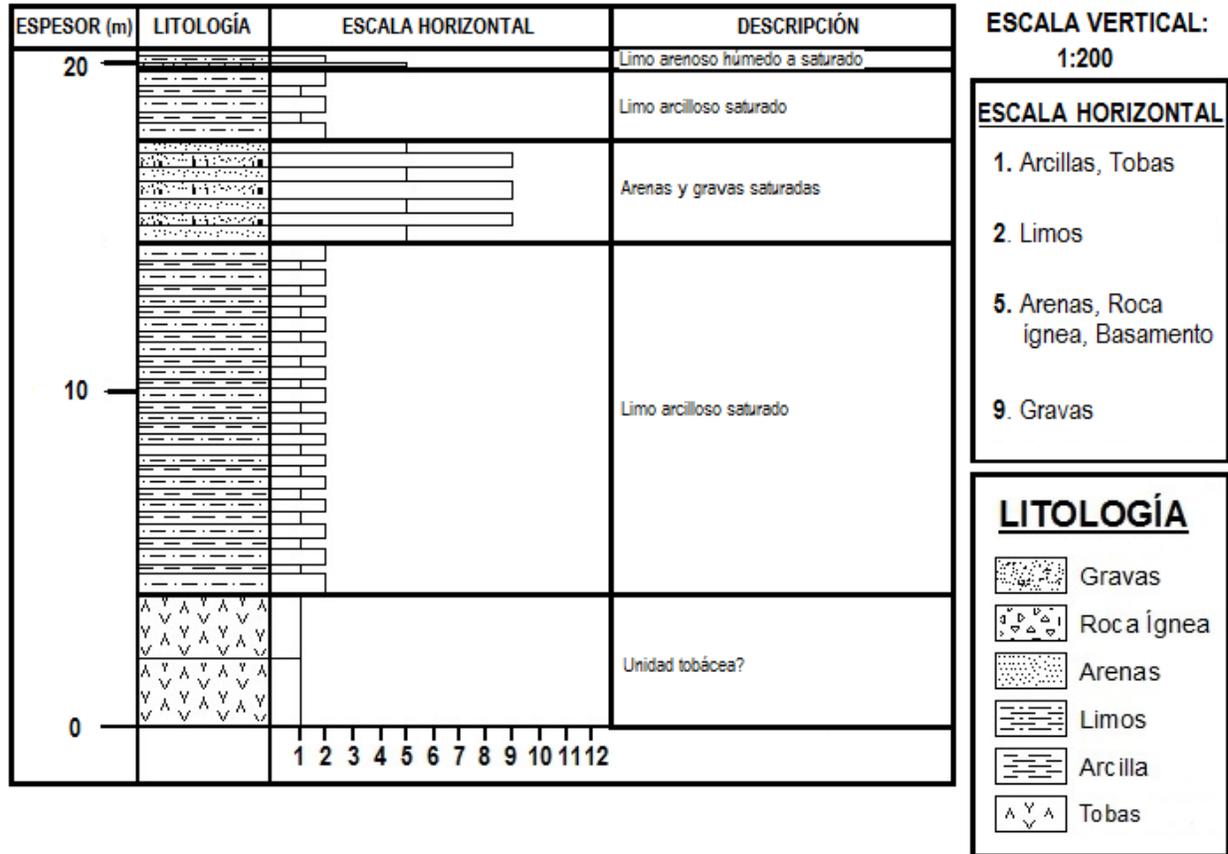
Figura 8. Resultados obtenidos mediante software - SEV 02 SUR

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
5,68	0,29		Limo arenoso húmedo a saturado
33,99	2,01	2,30	Limo arcilloso saturado
118,44	2,92	5,23	Arenas con gravas saturadas
15,28	10,47	15,70	Limo arcilloso saturado
34,29			Posible unidad tobácea?

Tabla 4. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 02 SUR

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 5 capas y/o niveles (Figuras 7 y 8). Un primer nivel que está conformado por limo arenoso húmedo a saturado, con una resistividad de 5.68 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,29 metros; el siguiente nivel que se tiene son limo arcilloso saturado, con una resistividad de 33,99 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 2,30 metros; seguidamente se tiene la presencia de arenas con gravas saturadas, con una resistividad de 118,44 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 5,23 metros; para luego pasar a otro nivel de limo arcilloso saturado, con una resistividad de 15,28 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 15,70 metros; por último se tiene la presencia de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 34,29 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 3).

Estudio Hidrogeológico de los Bofedales de la Sub Cuenca de los Ríos Caño Y Putani (Cuenca Río Mauri)



Columna Estratigráfica 3. SEV - 02 SUR

4.4.5.1.3. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-03 SUR

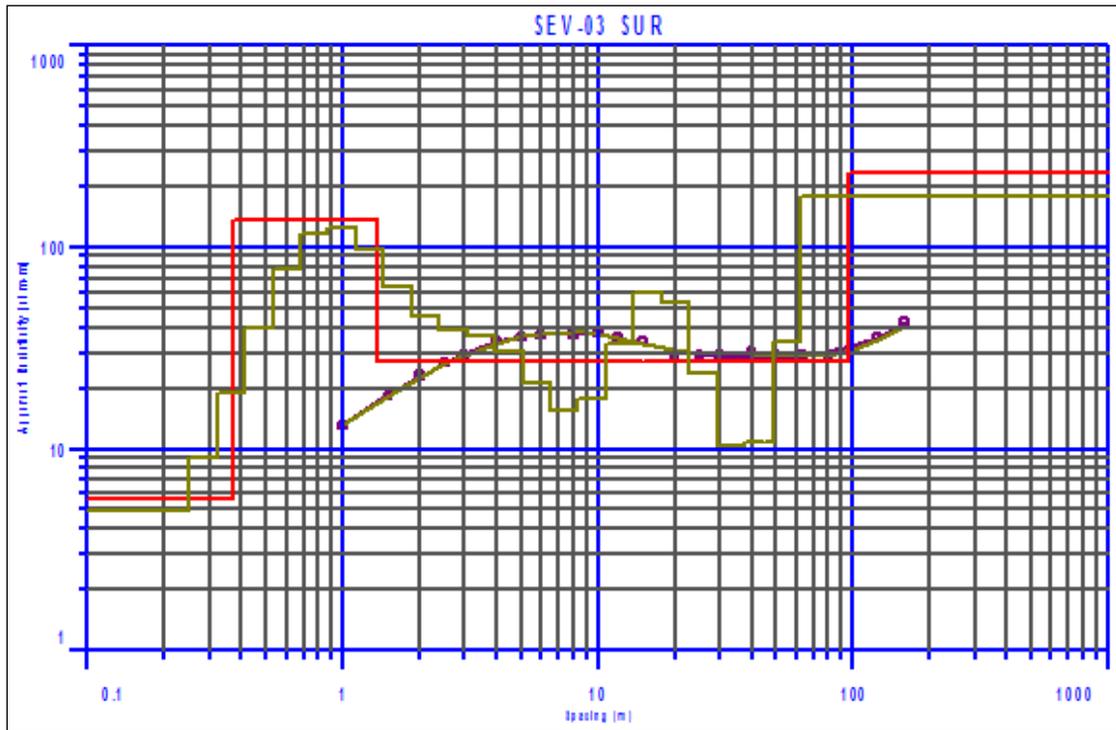


Figura 9. Curva generada con datos de campo - SEV 03 SUR

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 2.6293

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	5.5900	<input type="checkbox"/>	0.37130	0.37130	-0.37130	<input type="checkbox"/>
2	136.97	<input type="checkbox"/>	1.0027	1.3740	-1.3740	<input type="checkbox"/>
3	27.326	<input type="checkbox"/>	94.643	96.017	-96.017	<input type="checkbox"/>
4	233.35	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

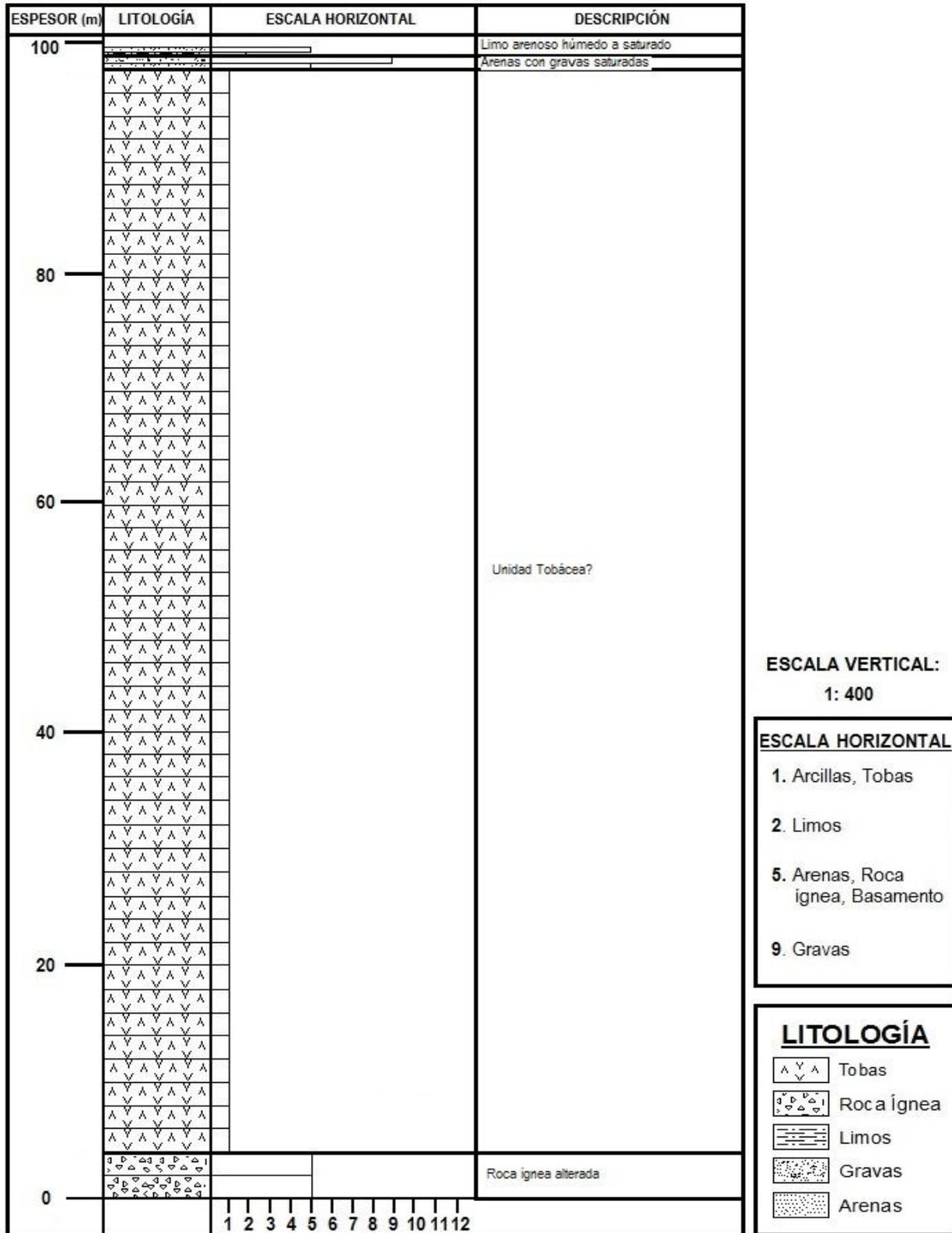
Figura 10. Resultados obtenidos mediante software - SEV 03 SUR

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
5,59	0,37		Limo arenoso húmedo a saturado
136,97	1,00	1,37	Arenas con gravas saturadas
27,32	94,64	96,01	Posible unidad tobácea?
233,35			Roca ígnea alterada

Tabla 5. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 03 SUR

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 4 capas y/o niveles (Figuras 9 y 10). Un primer nivel que está conformado por limo arenoso húmedo a saturado, con una resistividad de 5,59 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,37 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con gravas saturadas, con una resistividad de 136,97 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 1,37 metros; para luego pasar a posible unidad tobácea?, con una resistividad de 27,32 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 96,01 metros; por último se tiene la presencia de roca ígnea alterada, con una resistividad de 233,35 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 4).

Estudio Hidrogeológico de los Bofedales de la Sub Cuenca de los Ríos Caño Y Putani (Cuenca Río Mauri)



Columna Estratigráfica 4. SEV - 03 SUR

4.4.5.1.4. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-04 SUR

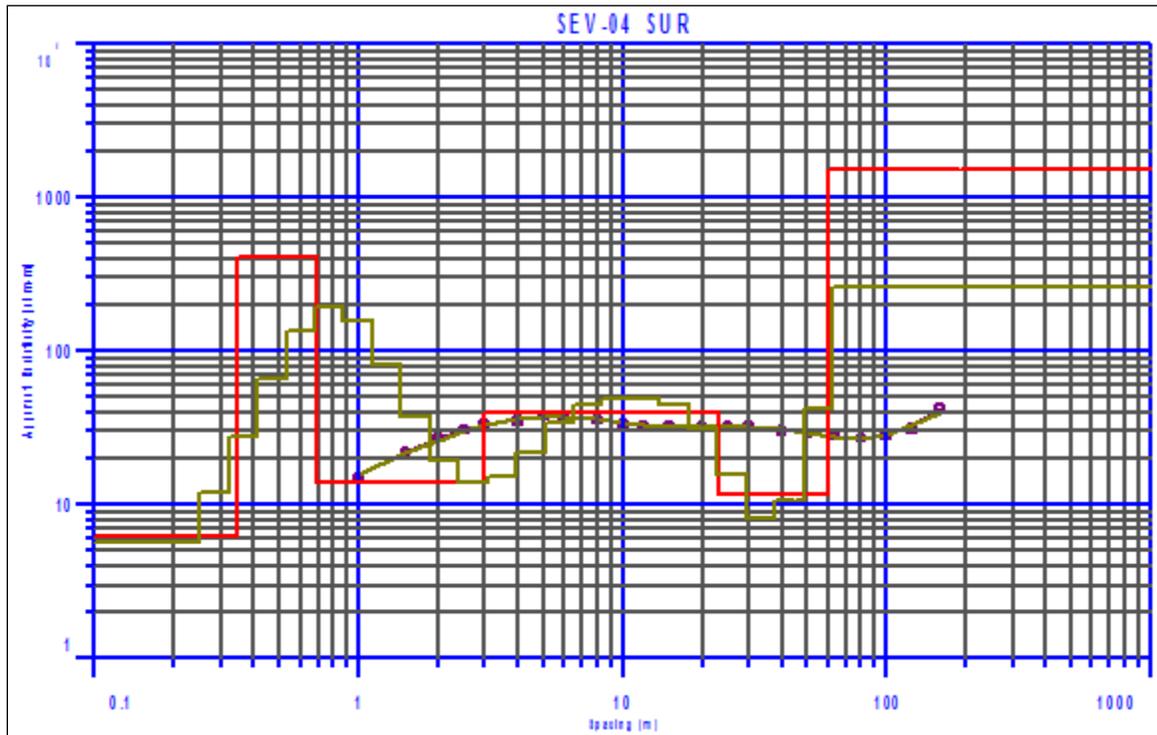


Figura 11. Curva generada con datos de campo - SEV 04SUR

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 2.3263

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	6.2819	<input type="checkbox"/>	0.34745	0.34745	-0.34745	<input type="checkbox"/>
2	412.62	<input type="checkbox"/>	0.34750	0.69494	-0.69494	<input type="checkbox"/>
3	13.826	<input type="checkbox"/>	2.2687	2.9637	-2.9637	<input type="checkbox"/>
4	40.289	<input type="checkbox"/>	20.336	23.300	-23.300	<input type="checkbox"/>
5	11.749	<input type="checkbox"/>	36.583	59.883	-59.883	<input type="checkbox"/>
6	1542.9	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

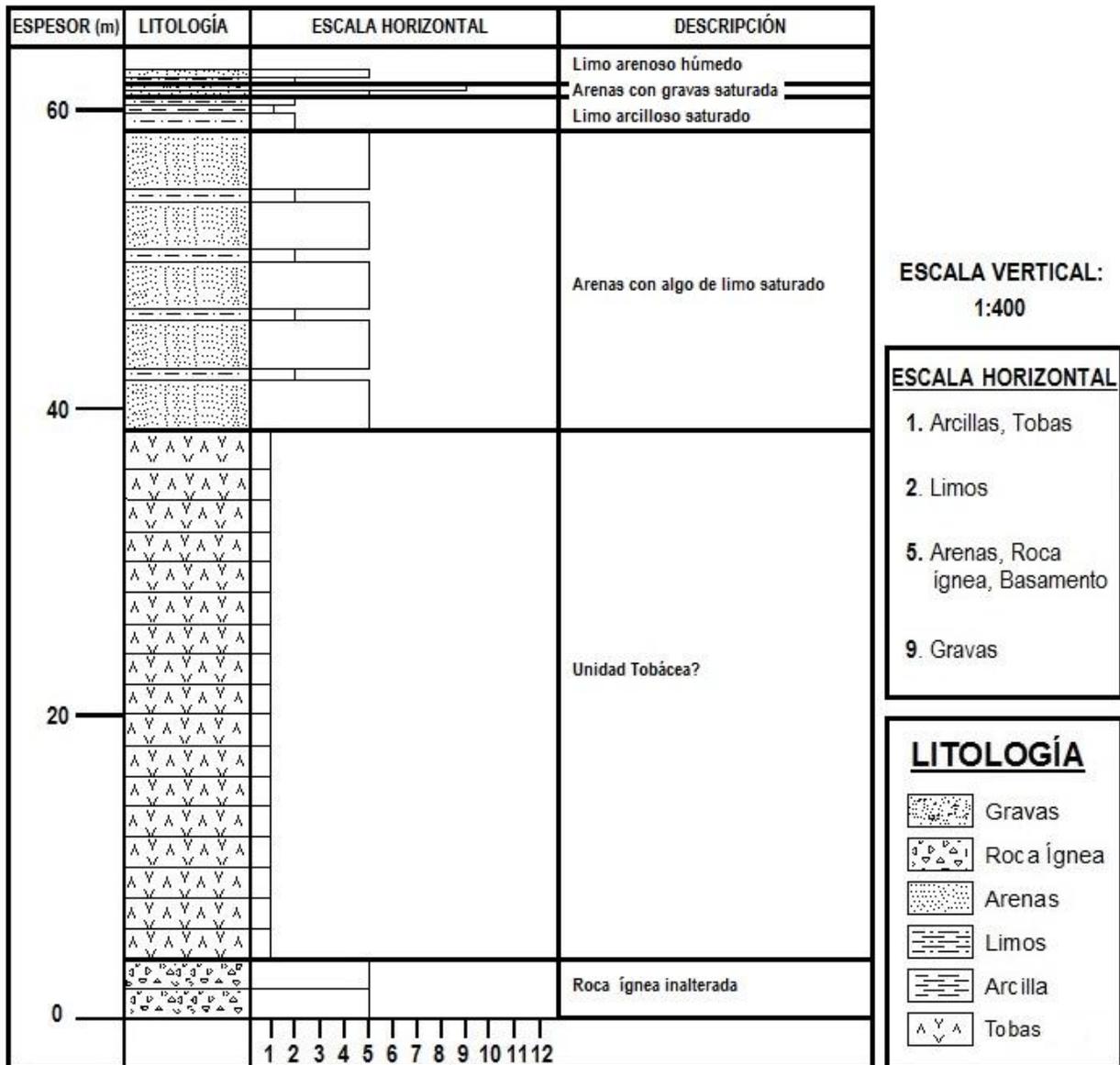
Figura 12. Resultados obtenidos mediante software - SEV 04 SUR

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
6,28	0,34		Limo arenoso húmedo a saturado
412,62	0,34	0,69	Arenas con gravas saturadas
13,82	2,26	2,96	Limo arcilloso saturado
40,28	20,33	23,30	Arenas con algo de limo saturado
11,74	36,58	59,88	Posible unidad tobácea?
1542,9			Roca ígnea inalterada

Tabla 6. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 04 SUR

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 6 capas y/o niveles (Figuras 11 y 12). Un primer nivel que está conformado por limo arenoso húmedo a saturado, con una resistividad de 6,28 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,34 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con gravas saturadas, con una resistividad de 412,62 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 0,69 metros; seguidamente se tiene la presencia de limo arcilloso saturado, con una resistividad de 13,82 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 2,96 metros; para pasar luego a otro nivel de arenas con algo de limo saturado, con una resistividad de 40,28 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 23,30 metros; posteriormente se tiene la presencia de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 11,74 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 59,88 metros; por último se tiene la presencia de roca ígnea inalterada, con una resistividad de 1542,9 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 5).

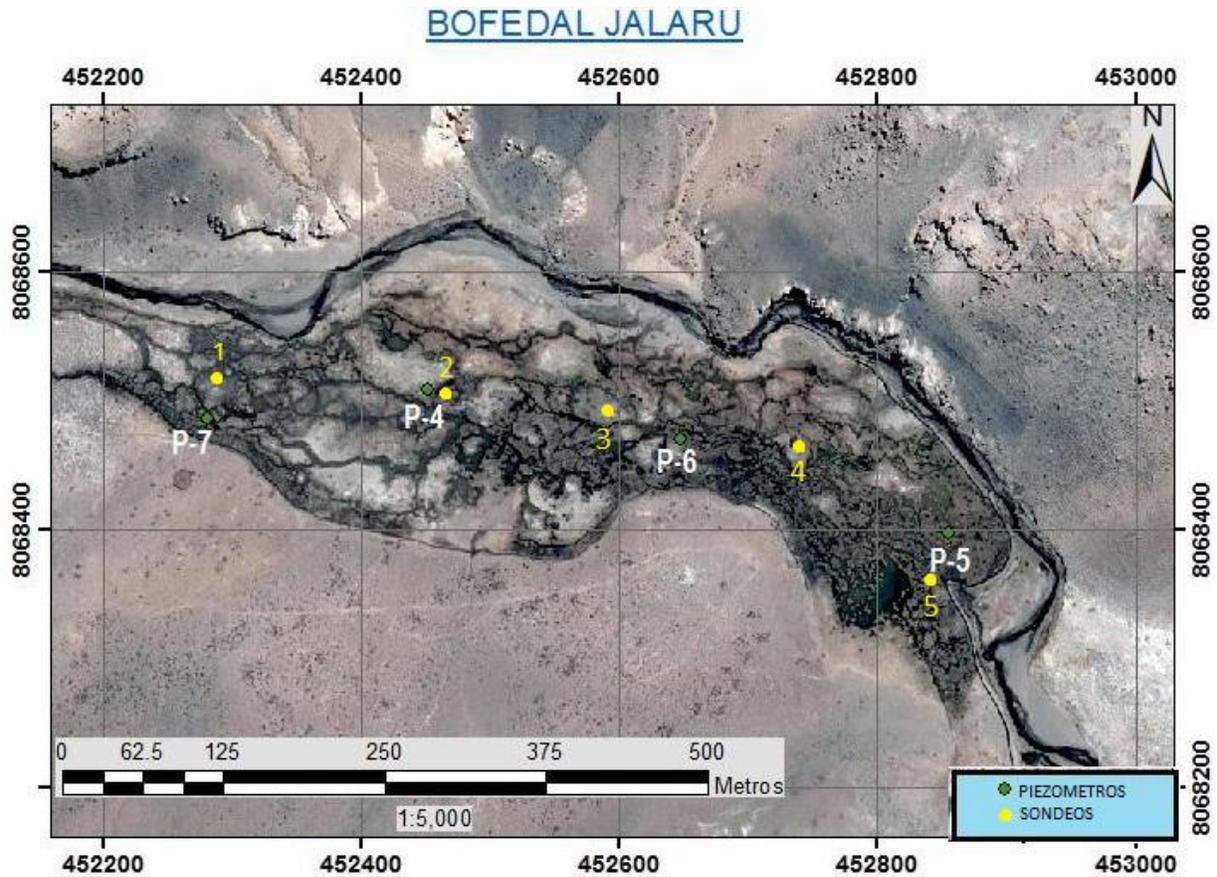
Estudio Hidrogeológico de los Bofedales de la Sub Cuenca de los Ríos Caño Y Putani (Cuenca Río Mauri)



Columna Estratigráfica 5. SEV - 04 SUR

#### 4.4.5.2. BOFEDAL JALARU

A continuación se muestra la ubicación de los sondeos, sobre la imagen satelital, las coordenadas se describen en la tabla 2.



Mapa 13. Ubicación de sondeos dentro del Bofedal Jalaru.

4.4.5.2.1. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-01 NORTE

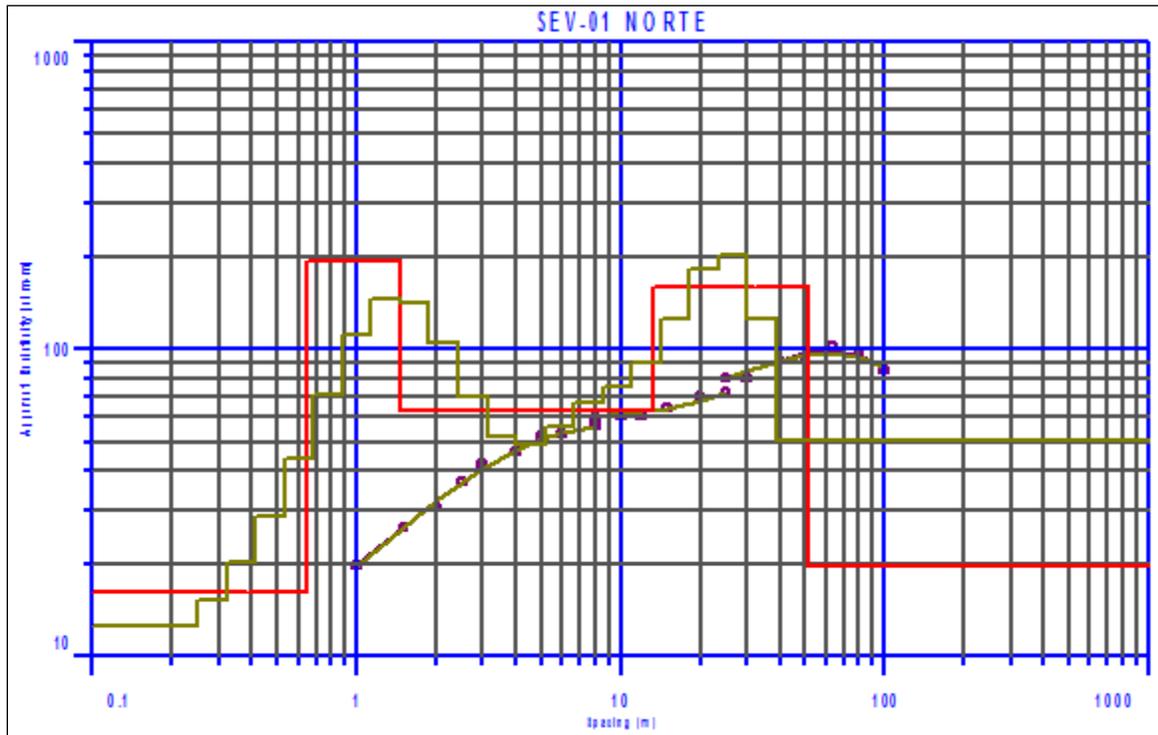


Figura 13. Curva generada con datos de campo - SEV 01 NORTE

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 2.4596

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

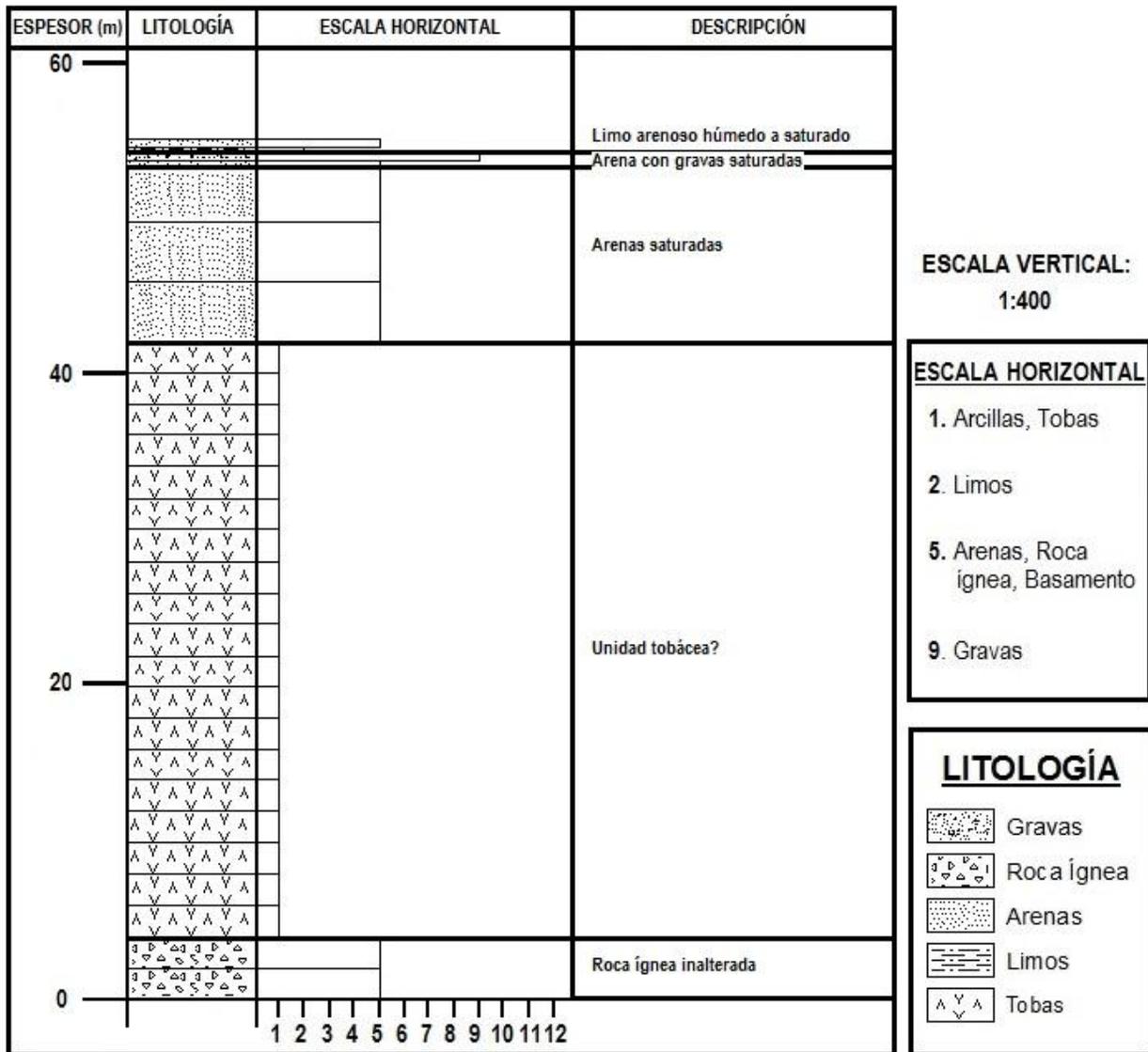
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	16.257	<input type="checkbox"/>	0.64805	0.64805	-0.64805	<input type="checkbox"/>
2	192.49	<input type="checkbox"/>	0.81272	1.4608	-1.4608	<input type="checkbox"/>
3	63.246	<input type="checkbox"/>	11.764	13.225	-13.225	<input type="checkbox"/>
4	160.14	<input type="checkbox"/>	37.962	51.187	-51.187	<input type="checkbox"/>
5	19.716	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

Figura 14. Resultados obtenidos mediante software - SEV 01 NORTE

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
16,25	0,64		Limo arenoso húmedo a saturado
192,49	0,81	1,46	Arenas con gravas saturadas
63,24	11,76	13,22	Arenas saturadas
160,14	37,96	51,18	Posible unidad tobácea?
19,71			Roca ígnea inalterada

Tabla 7. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 01 NORTE

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 5 capas y/o niveles (Figuras 13 y 14). Un primer nivel que está conformado por limo arenoso húmedo a saturado, con una resistividad de 16,25 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,64 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con gravas saturadas, con una resistividad de 192,49 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 1,46 metros; seguidamente se tiene la presencia de arenas saturadas, con una resistividad de 63,24 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 13,22 metros; para pasar luego a otro nivel de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 160,14 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 51,18 metros; por último se tiene la presencia de roca ígnea inalterada, con una resistividad de 19,71 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 6).



Columna Estratigráfica 6. SEV - 01 NORTE

4.4.5.2.2. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-02 NORTE

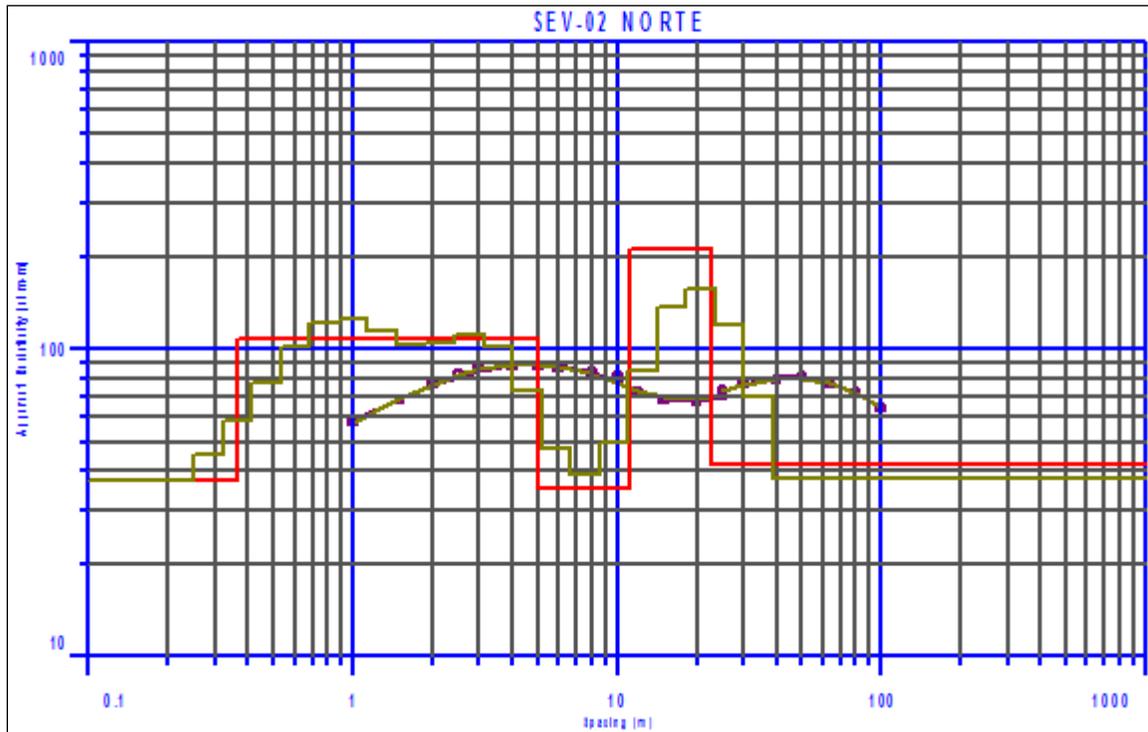


Figura 15. Curva generada con datos de campo - SEV 02 NORTE

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 1.3155

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

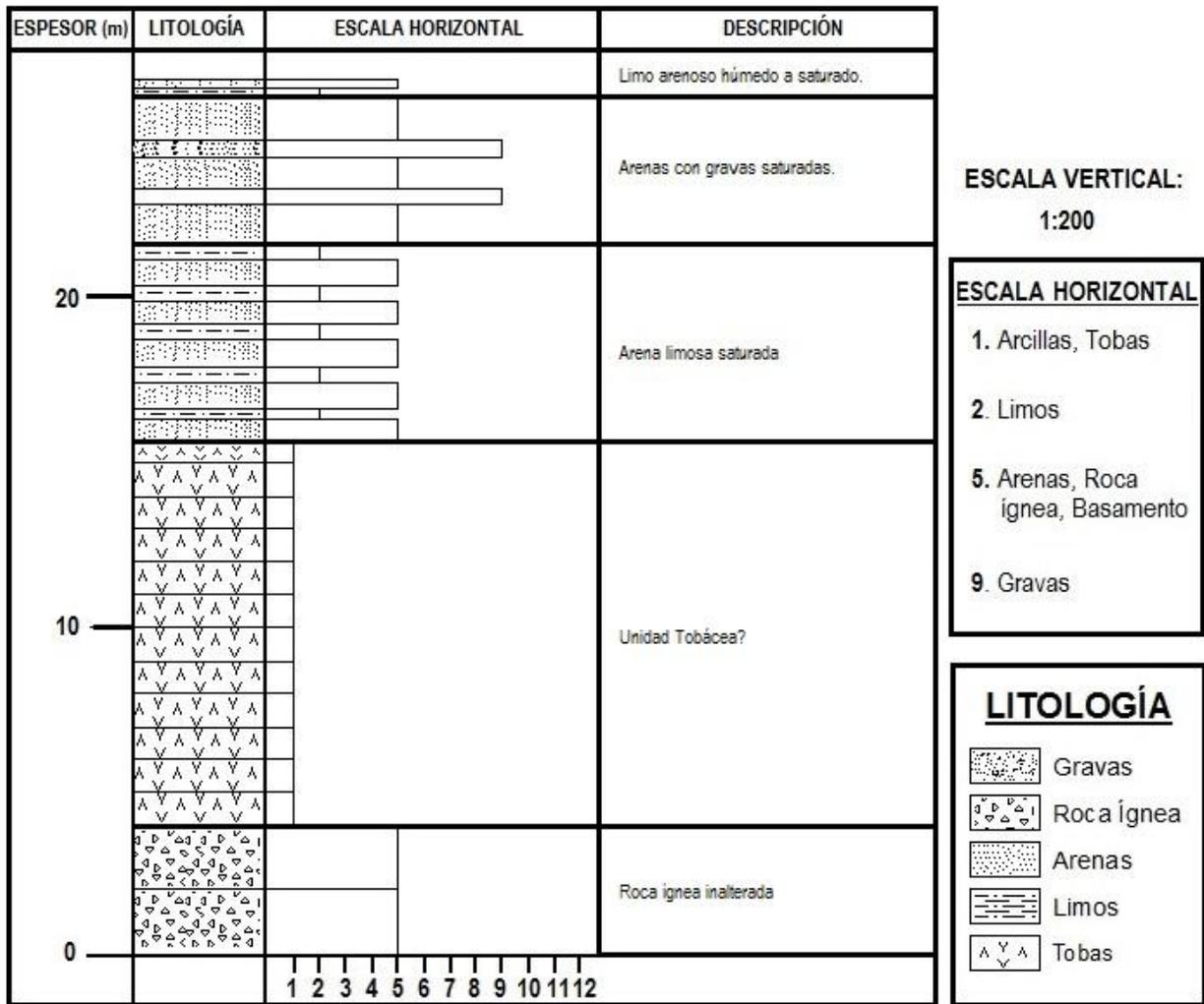
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	37.578	<input type="checkbox"/>	0.36742	0.36742	-0.36742	<input type="checkbox"/>
2	107.81	<input type="checkbox"/>	4.6522	5.0196	-5.0196	<input type="checkbox"/>
3	35.088	<input type="checkbox"/>	6.1444	11.164	-11.164	<input type="checkbox"/>
4	211.49	<input type="checkbox"/>	11.697	22.861	-22.861	<input type="checkbox"/>
5	42.084	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

Figura 16. Resultados obtenidos mediante software - SEV 02 NORTE

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
37,57	0,36		Limo arenoso húmedo a saturado
107,81	4,65	5,01	Arenas con gravas saturadas
35,08	6,14	11,16	Arenas limosas saturadas
211,49	11,69	22,86	Posible unidad tobácea?
42,08			Roca ígnea inalterada

Tabla 8. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 02 NORTE

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 5 capas y/o niveles (Figuras 15 y 16). Un primer nivel que está conformado por limo arenoso húmedo a saturado, con una resistividad de 37,57 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,36 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con gravas saturadas, con una resistividad de 107,81 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 5,01 metros; para luego pasar a otro nivel de arenas limosas saturadas, con una resistividad de 35,08 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 11,16 metros; posteriormente se tiene la presencia de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 211,49 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 22,86 metros; por último se tiene la presencia de roca ígnea inalterada, con una resistividad de 42,08 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 7).



Columna Estratigráfica 7. SEV - 02 NORTE

4.4.5.2.3. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-03 NORTE

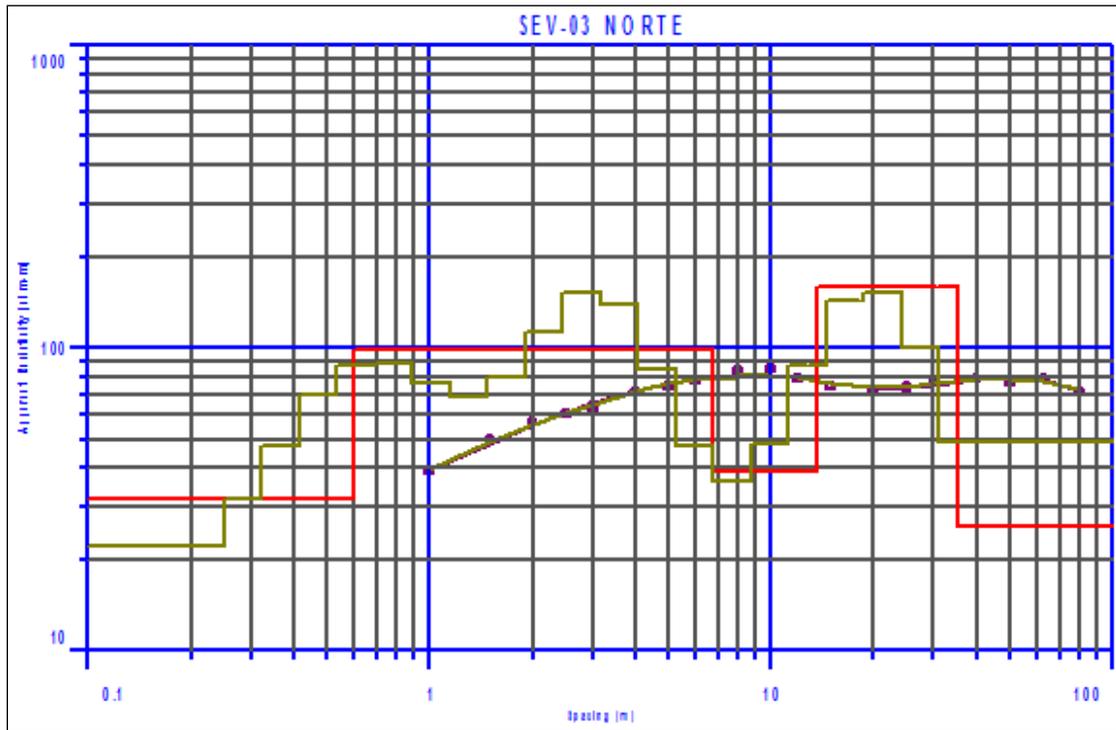


Figura 17. Curva generada con datos de campo - SEV 03 NORTE

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 2.1319

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

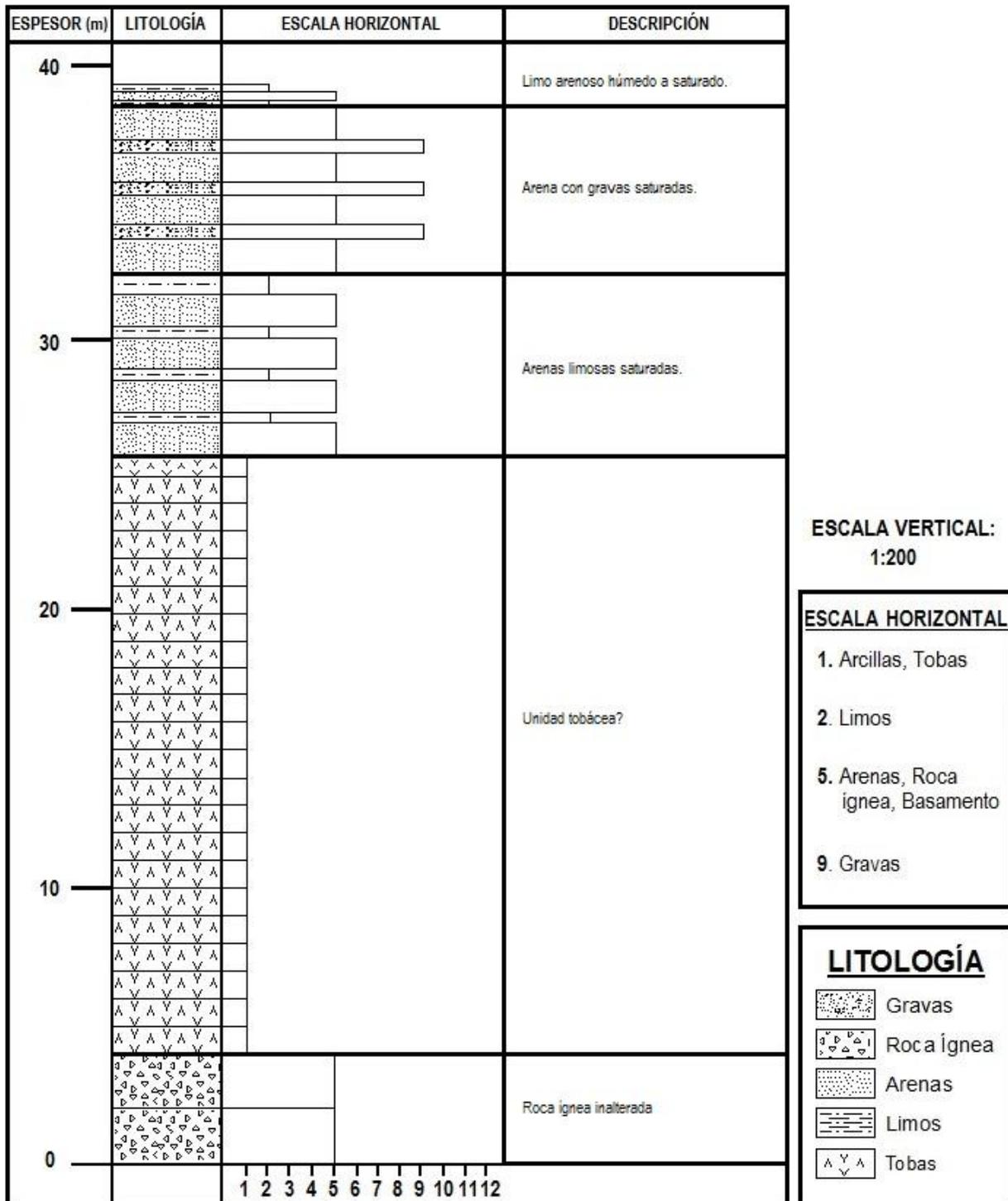
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	31.707	<input type="checkbox"/>	0.60264	0.60264	-0.60264	<input type="checkbox"/>
2	99.285	<input type="checkbox"/>	6.1116	6.7143	-6.7143	<input type="checkbox"/>
3	39.296	<input type="checkbox"/>	6.8539	13.568	-13.568	<input type="checkbox"/>
4	158.15	<input type="checkbox"/>	21.827	35.395	-35.395	<input type="checkbox"/>
5	25.549	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

Figura 18. Resultados obtenidos mediante software - SEV 03 NORTE

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
31,70	0,60		Limo arenoso húmedo a saturado
99,28	6,11	6,71	Arenas con gravas saturadas
39,29	6,85	13,56	Arenas limosas saturadas
158,15	21,82	35,39	Posible unidad tobácea?
25,54			Roca ígnea inalterada

Tabla 9. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 03 NORTE

De acuerdo al sondeo realizado en este sector, se observó la presencia de 5 capas y/o niveles (Figuras 17 y 18). Un primer nivel que está conformado por limo arenoso húmedo a saturado, con una resistividad de 31,70 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,60 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con gravas saturadas, con una resistividad de 99,28 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 6,71 metros; posteriormente se tiene un nivel de arenas limosas saturadas, con una resistividad de 39,29 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 13,56 metros; seguidamente se tiene otro nivel de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 158,15 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 35,39 metros; por último se tiene la presencia de roca ígnea inalterada, con una resistividad de 25,54 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 8).



Columna Estratigráfica 8. SEV - 03 NORTE

4.4.5.2.4. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-04 NORTE

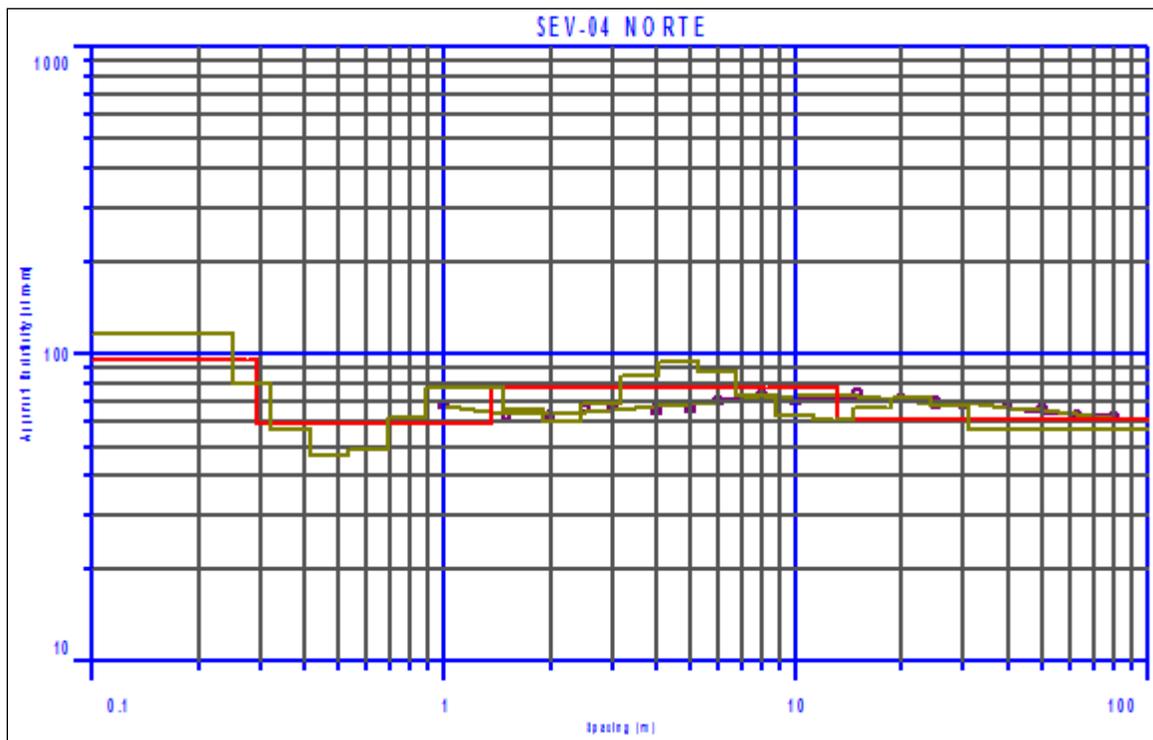


Figura 19. Curva generada con datos de campo - SEV 04 NORTE

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 2.1777

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

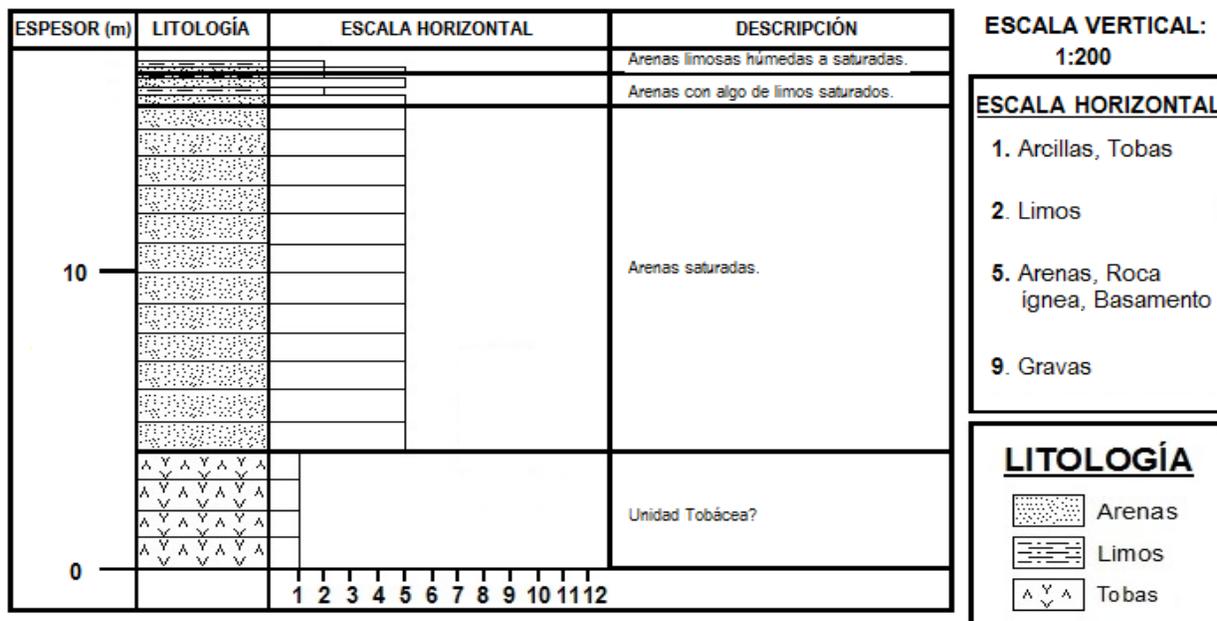
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	95.262	<input type="checkbox"/>	0.29276	0.29276	-0.29276	<input type="checkbox"/>
2	59.171	<input type="checkbox"/>	1.0760	1.3687	-1.3687	<input type="checkbox"/>
3	77.211	<input type="checkbox"/>	11.739	13.108	-13.108	<input type="checkbox"/>
4	61.162	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

Figura 20. Resultados obtenidos mediante software - SEV 04 NORTE

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
95,26	0,29		Arenas limosas húmedas a saturadas
59,17	1,07	1,36	Arenas con algo de limos saturado
77,21	11,73	13,10	Arenas saturadas
61,16			Posible unidad tobácea?

Tabla 10. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 04 NORTE

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 4 capas y/o niveles (Figuras 19 y 20). Un primer nivel que está conformado por arenas limosas húmedas a saturadas, con una resistividad de 95,26 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,29 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con algo de limos saturado, con una resistividad de 59,17 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 1,36 metros; para pasar luego a otro nivel de arenas saturadas, con una resistividad de 77,21 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 13,10 metros; por último se tiene la presencia de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 61,16 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 9).



Columna Estratigráfica 9. SEV - 04 NORTE

4.4.5.2.5. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-05 NORTE

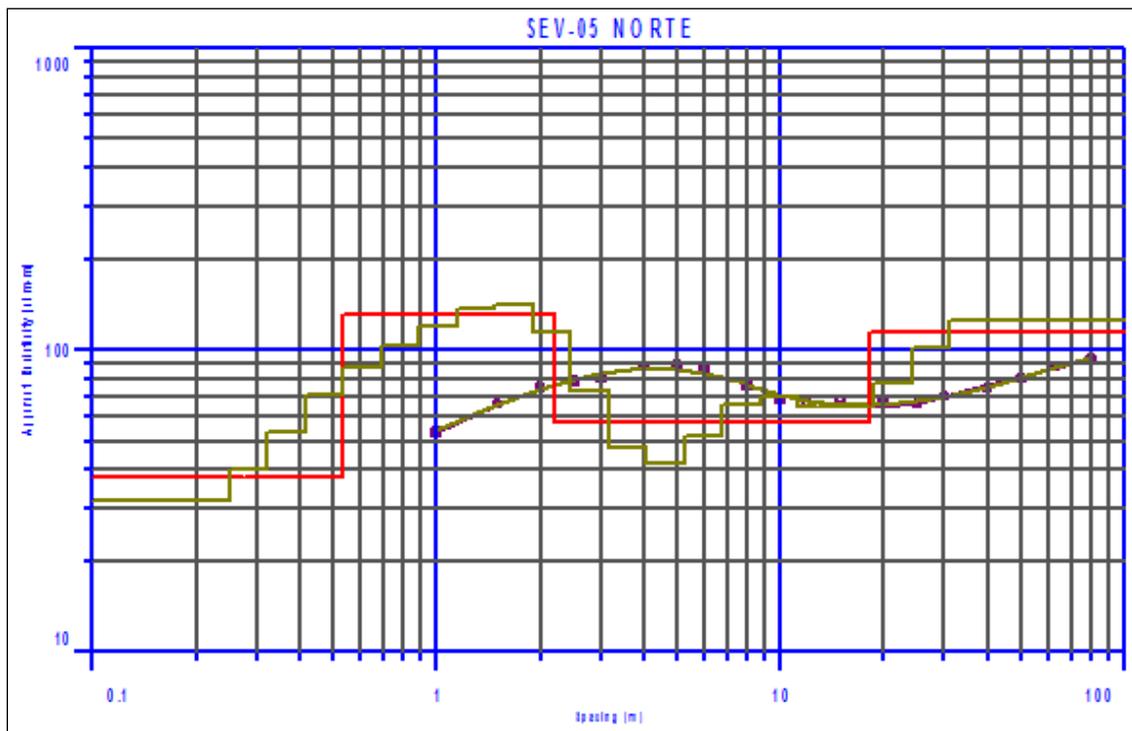


Figura 21. Curva generada con datos de campo - SEV 05 NORTE

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 2.3459

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	37.860	<input type="checkbox"/>	0.53450	0.53450	-0.53450	<input type="checkbox"/>
2	132.09	<input type="checkbox"/>	1.6605	2.1950	-2.1950	<input type="checkbox"/>
3	57.561	<input type="checkbox"/>	15.986	18.181	-18.181	<input type="checkbox"/>
4	114.71	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

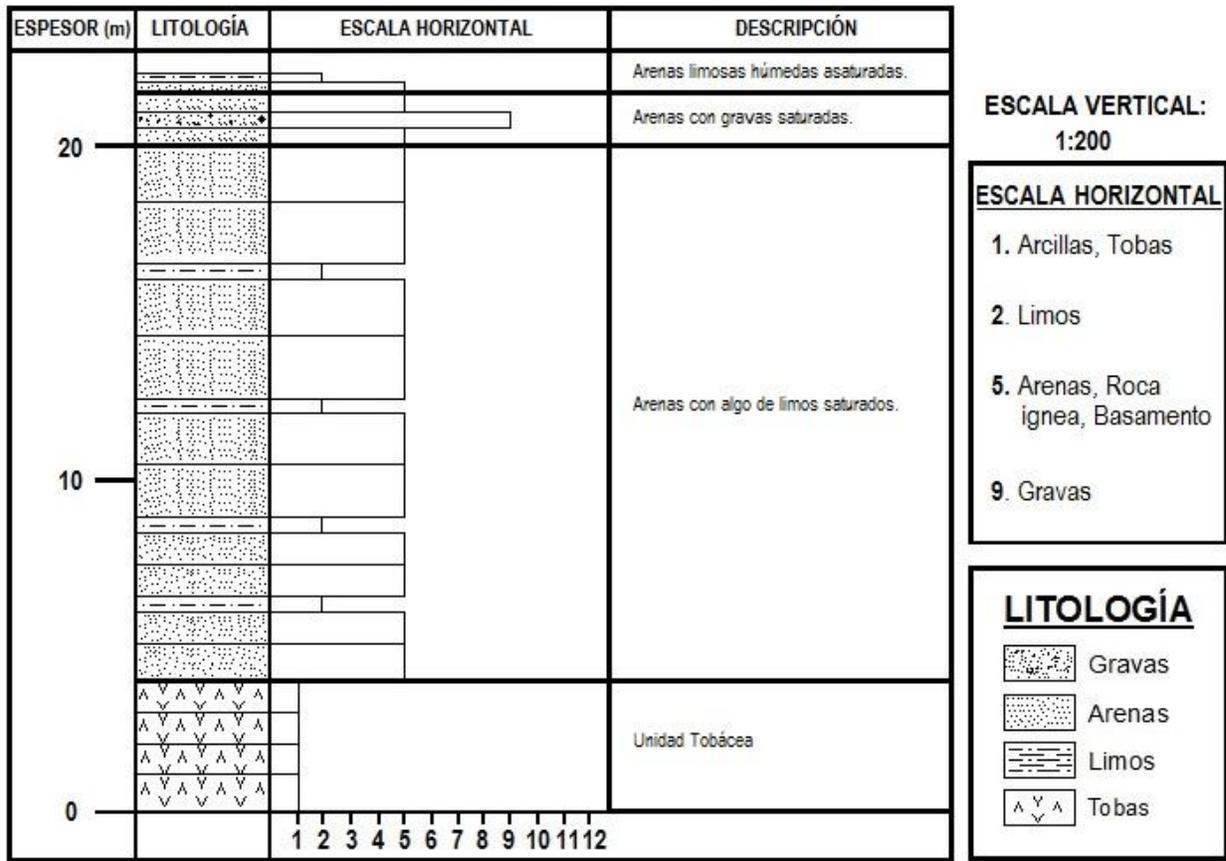
Figura 22. Resultados obtenidos mediante software - SEV 05 NORTE

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
37,86	0,53		Arenas limosas húmedas a saturadas
132,09	1,66	2,19	Arenas con gravas saturadas
57,56	15,98	18,18	Arenas con algo de limos saturado
114,71			Posible unidad tobacea?

Tabla 11. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 05 NORTE

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 4 capas y/o niveles (Figuras 21 y 22). Un primer nivel que está conformado por arenas limosas húmedas a saturadas, con una resistividad de 37,86 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,53 metros; el siguiente nivel que se tiene son arenas con gravas saturadas, con una resistividad de 132,09 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 2,19 metros; para luego pasar a otro nivel de arenas con algo de limos saturado, con una resistividad de 57,56 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 18,18 metros; por último se tiene la presencia de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 114,71 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 10).

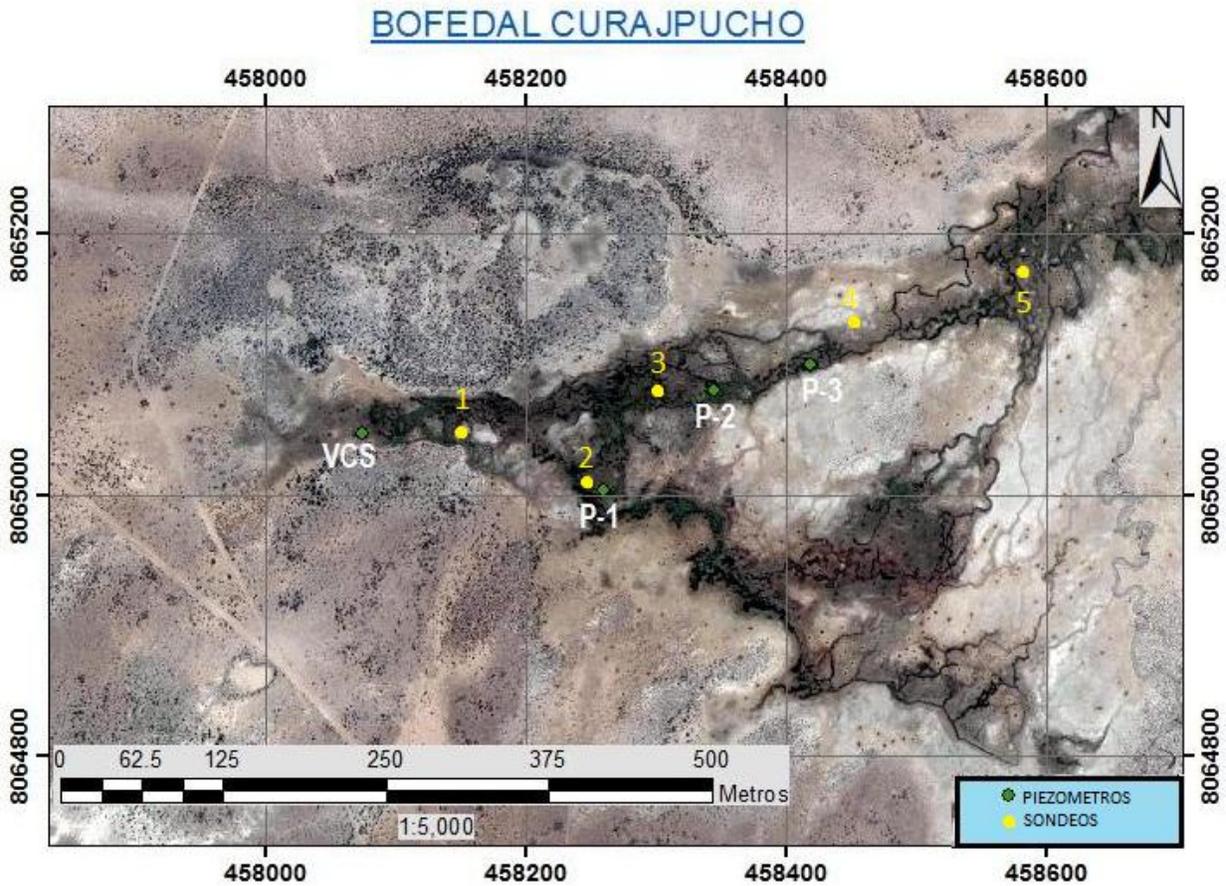
Estudio Hidrogeológico de los Bofedales de la Sub Cuenca de los Ríos Caño Y Putani (Cuenca Río Mauri)



Columna Estratigráfica 10. SEV - 05 NORTE

#### 4.4.5.3. BOFEDAL CURAJPUCHO.

A continuación se muestra la ubicación de los sondeos, sobre la imagen satelital, las coordenadas se describen en la tabla 2.



Mapa 14. Ubicación de sondeos dentro del Bofedal Curajpucho.

4.4.5.3.1. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-01 CENTRO

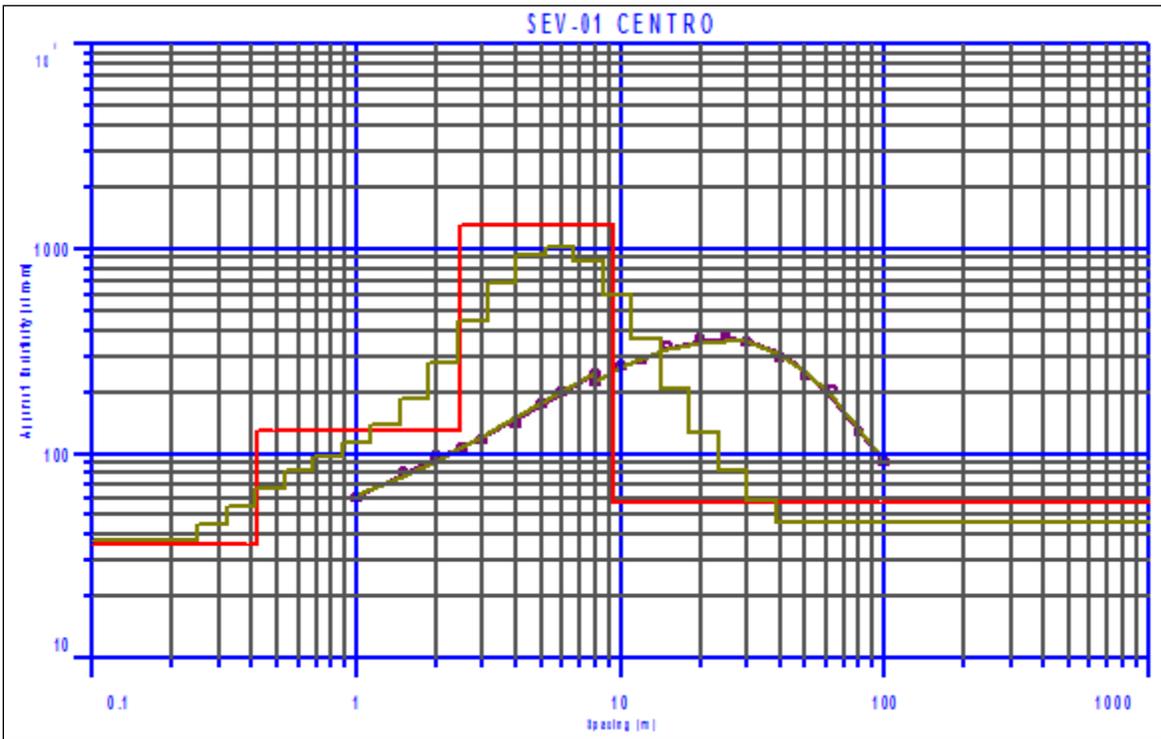


Figura 23. Curva generada con datos de campo - SEV 01 CENTRO

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 3.2142

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	36.028	<input type="checkbox"/>	0.41890	0.41890	-0.41890	<input type="checkbox"/>
2	129.65	<input type="checkbox"/>	2.0618	2.4807	-2.4807	<input type="checkbox"/>
3	1290.8	<input type="checkbox"/>	6.9226	9.4033	-9.4033	<input type="checkbox"/>
4	57.280	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

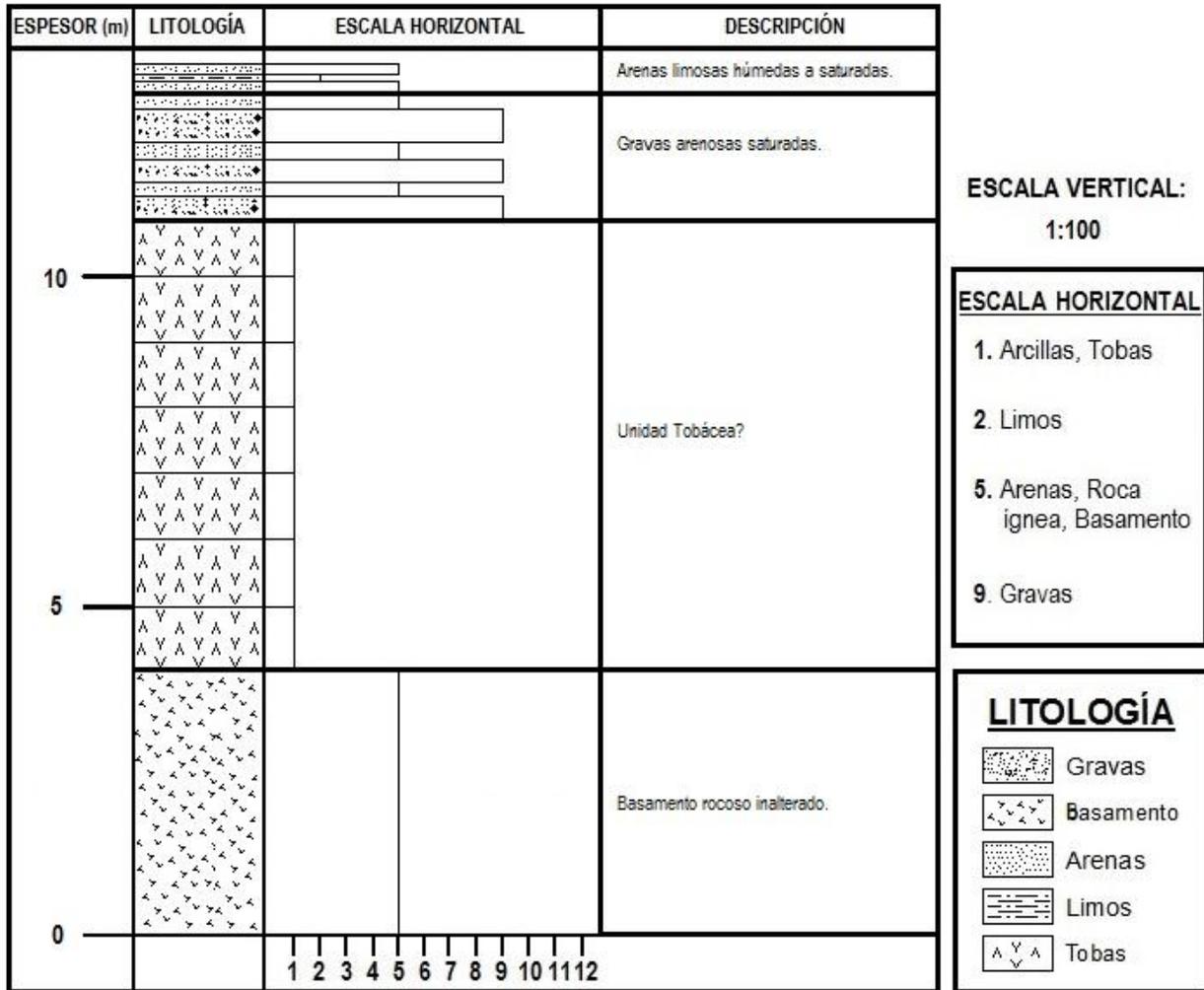
Figura 24. Resultados obtenidos mediante software - SEV 01 CENTRO

<b>Resistividad (Ohm-m)</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Descripción geológica</b>
36,02	0,41		Arenas limosas húmedas a saturadas
129,65	2,06	2,48	Gravas y arenas saturadas
1290,8	6,92	9,40	Posible unidad tobácea?
57,28			Basamento rocoso inalterado

Tabla 12. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 01 CENTRO

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 4 capas y/o niveles (Figuras 23 y 24). Un primer nivel que está conformado por arenas limosas húmedas a saturadas, con una resistividad de 36,02 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,41 metros; el siguiente nivel que se tiene son gravas y arenas saturadas, con una resistividad de 129,65 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 2,48 metros; seguidamente se tiene la presencia de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 1290,8 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 9,40 metros; por último se tiene la presencia de basamento rocoso inalterado, con una resistividad de 57,28 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 11).

Estudio Hidrogeológico de los Bofedales de la Sub Cuenca de los Ríos Caño Y Putani (Cuenca Río Mauri)



Columna Estratigráfica 11. SEV - 01 CENTRO

4.4.5.3.2. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-02 CENTRO

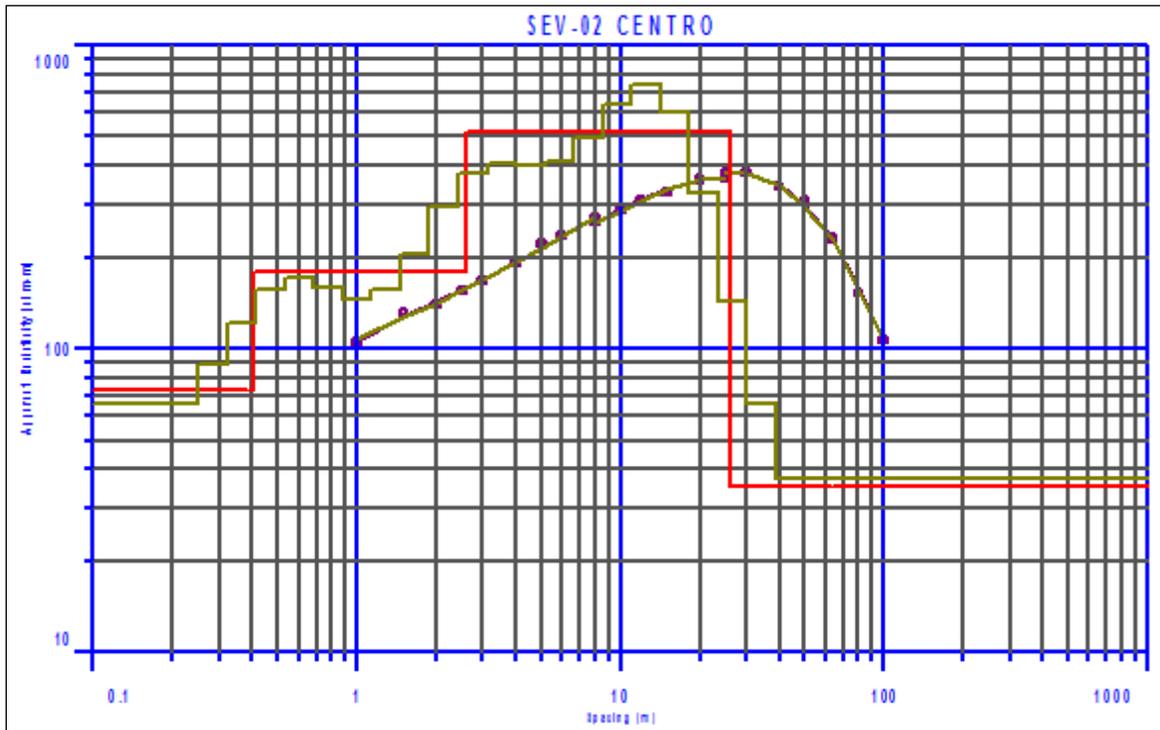


Figura 25. Curva generada con datos de campo - SEV 02 CENTRO

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 2.0716

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

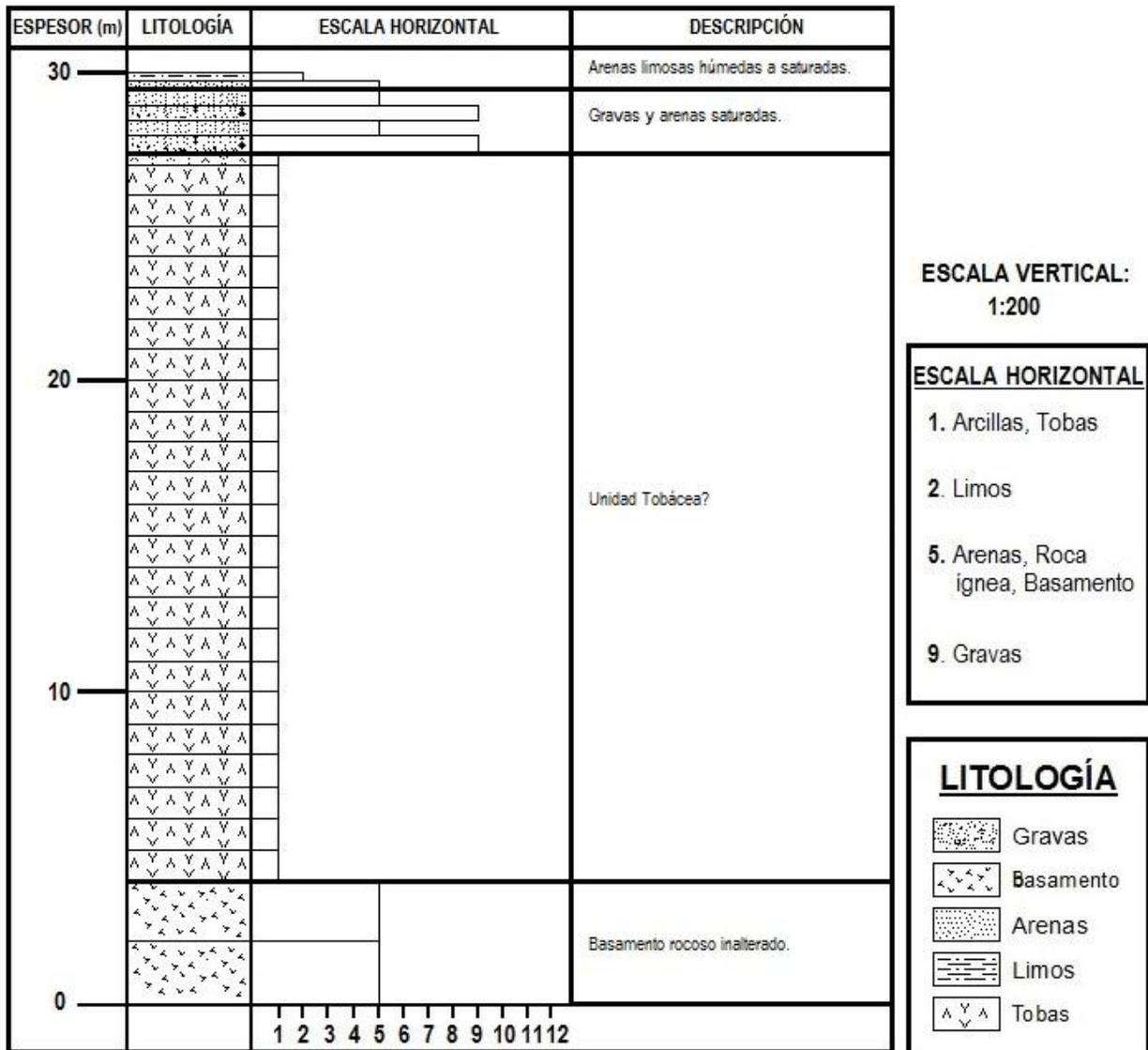
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	73.096	<input type="checkbox"/>	0.40332	0.40332	-0.40332	<input type="checkbox"/>
2	178.55	<input type="checkbox"/>	2.1888	2.5922	-2.5922	<input type="checkbox"/>
3	516.18	<input type="checkbox"/>	23.440	26.032	-26.032	<input type="checkbox"/>
4	35.197	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

Figura 26. Resultados obtenidos mediante software - SEV 02 CENTRO

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
73,09	0,40		Arenas limosas húmedas a saturadas
178,55	2,18	2,59	Gravas y arenas saturadas
516,18	23,44	26,03	Posible unidad tobacea?
35,19			Basamento rocoso inalterado

Tabla 13. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 02 CENTRO

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 4 capas y/o niveles (Figuras 25 y 26). Un primer nivel que está conformado por arenas limosas húmedas a saturadas, con una resistividad de 73,09 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,40 metros; el siguiente nivel que se tiene son gravas y arenas saturadas, con una resistividad de 178,55 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 2,59 metros; para luego pasar a otro nivel de posible unidad tobacea?, con una resistividad de 516,18 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 26,03 metros; por último se tiene la presencia de basamento rocoso inalterado, con una resistividad de 35,19 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 12).



Columna Estratigráfica 12. SEV - 02 CENTRO

4.4.5.3.3. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-03 CENTRO

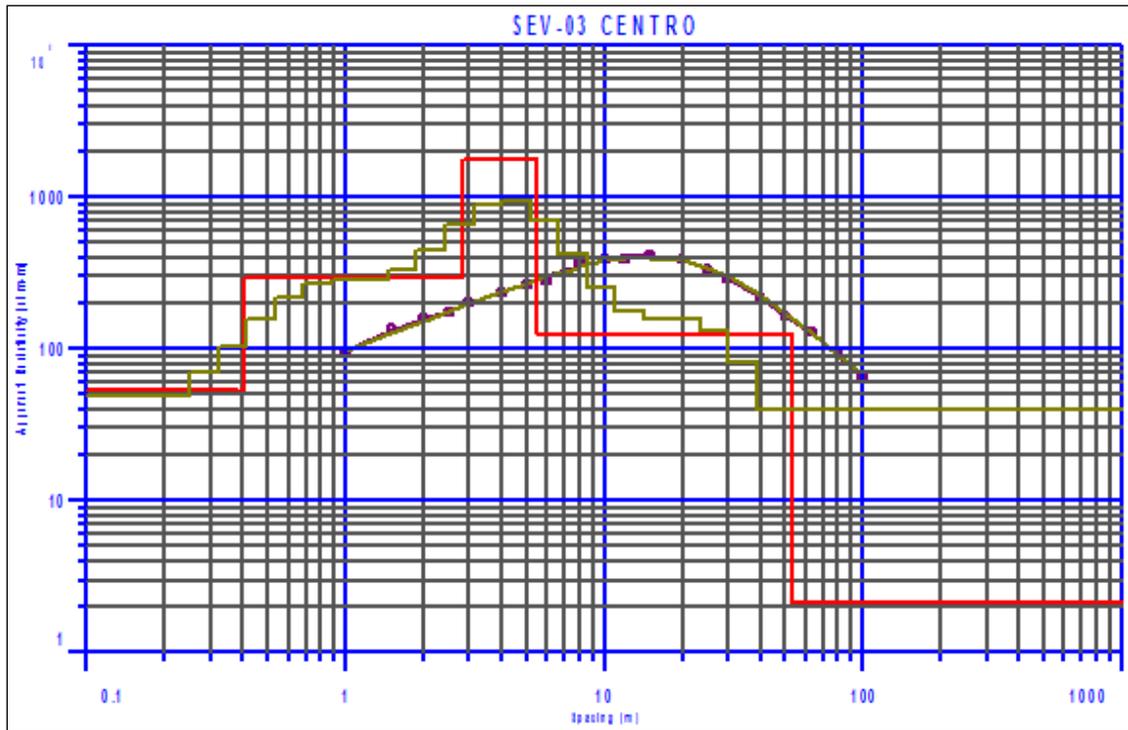


Figura 27. Curva generada con datos de campo - SEV 03 CENTRO

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 2.8307

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

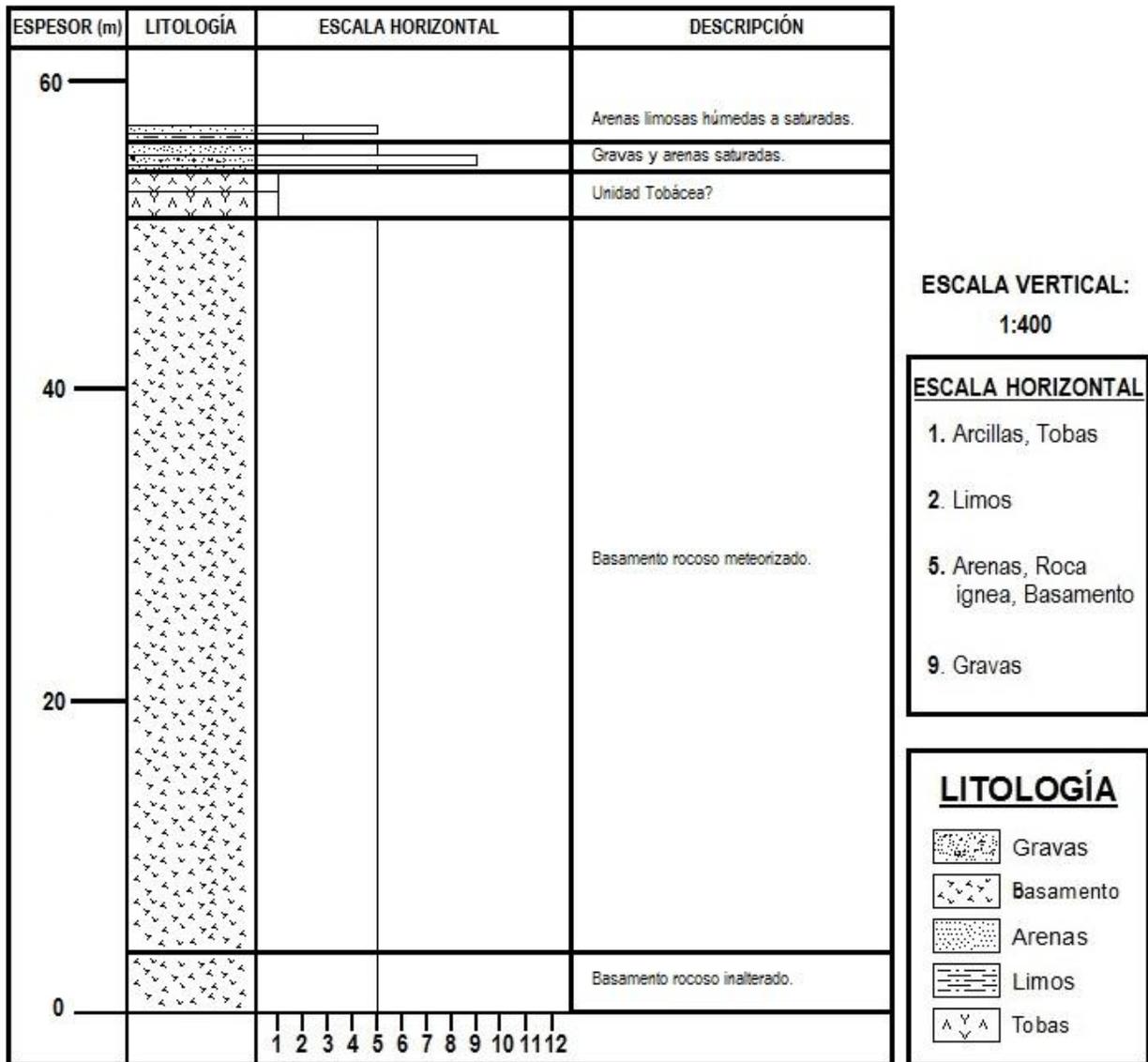
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	54.385	<input type="checkbox"/>	0.40682	0.40682	-0.40682	<input type="checkbox"/>
2	295.93	<input type="checkbox"/>	2.4144	2.8213	-2.8213	<input type="checkbox"/>
3	1750.7	<input type="checkbox"/>	2.6413	5.4625	-5.4625	<input type="checkbox"/>
4	124.71	<input type="checkbox"/>	47.430	52.892	-52.892	<input type="checkbox"/>
5	2.1061	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

Figura 28. Resultados obtenidos mediante software - SEV 03 CENTRO

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
54,38	0,40		Arenas limosas húmedas a saturadas
295,93	2,41	2,82	Gravas y arenas saturadas
1750,7	2,64	5,46	Posible unidad tobácea?
124,71	47,43	52,89	Basamento rocoso meteorizado?
2,10			Basamento rocoso inalterado

Tabla 14. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 03 CENTRO

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 5 capas y/o niveles (Figuras 27 y 28). Un primer nivel que está conformado por arenas limosas húmedas a saturadas, con una resistividad de 54,38 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,40 metros; el siguiente nivel que se tiene son gravas y arenas saturadas, con una resistividad de 295,93 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 2,82 metros; seguidamente se tiene la presencia de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 1750,7 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 5,46 metros; para luego pasar a basamento rocoso meteorizado, con una resistividad de 124,71 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 52,89 metros; por último se tiene la presencia de basamento rocoso inalterado, con una resistividad de 2,10 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 13).



Columna Estratigráfica 13. SEV - 03 CENTRO

4.4.5.3.4. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-04 CENTRO

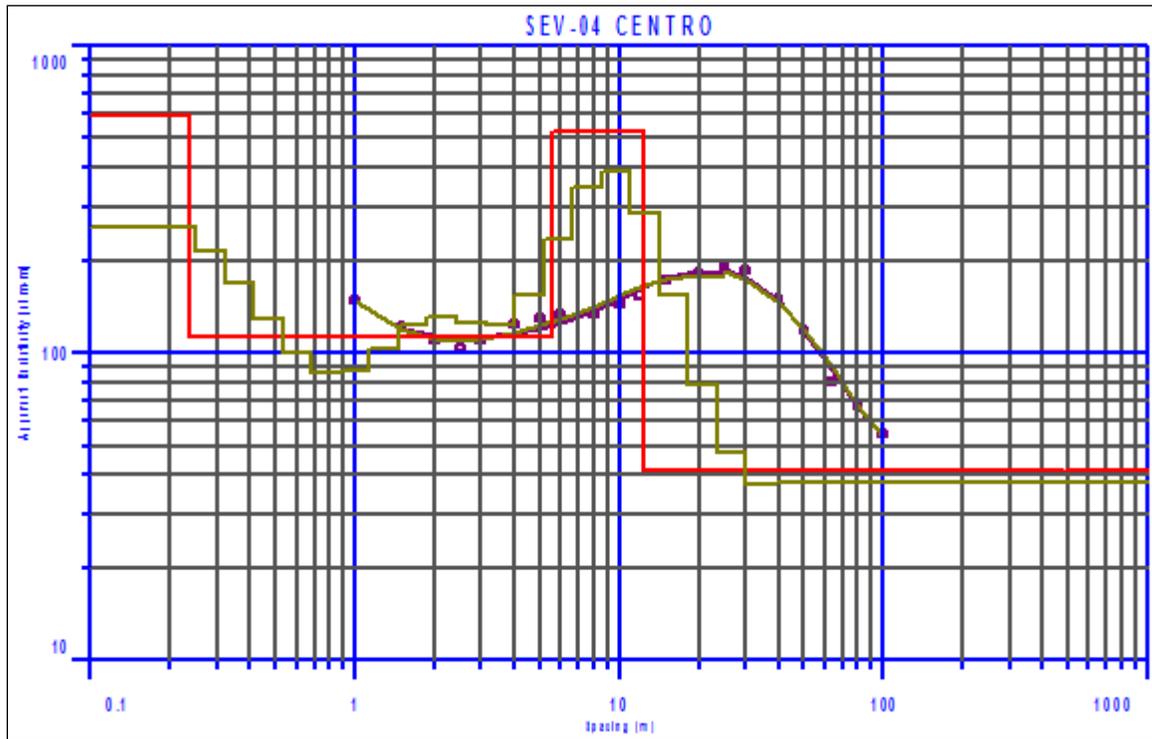


Figura 29. Curva generada con datos de campo - SEV 04 CENTRO

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 5.0362

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

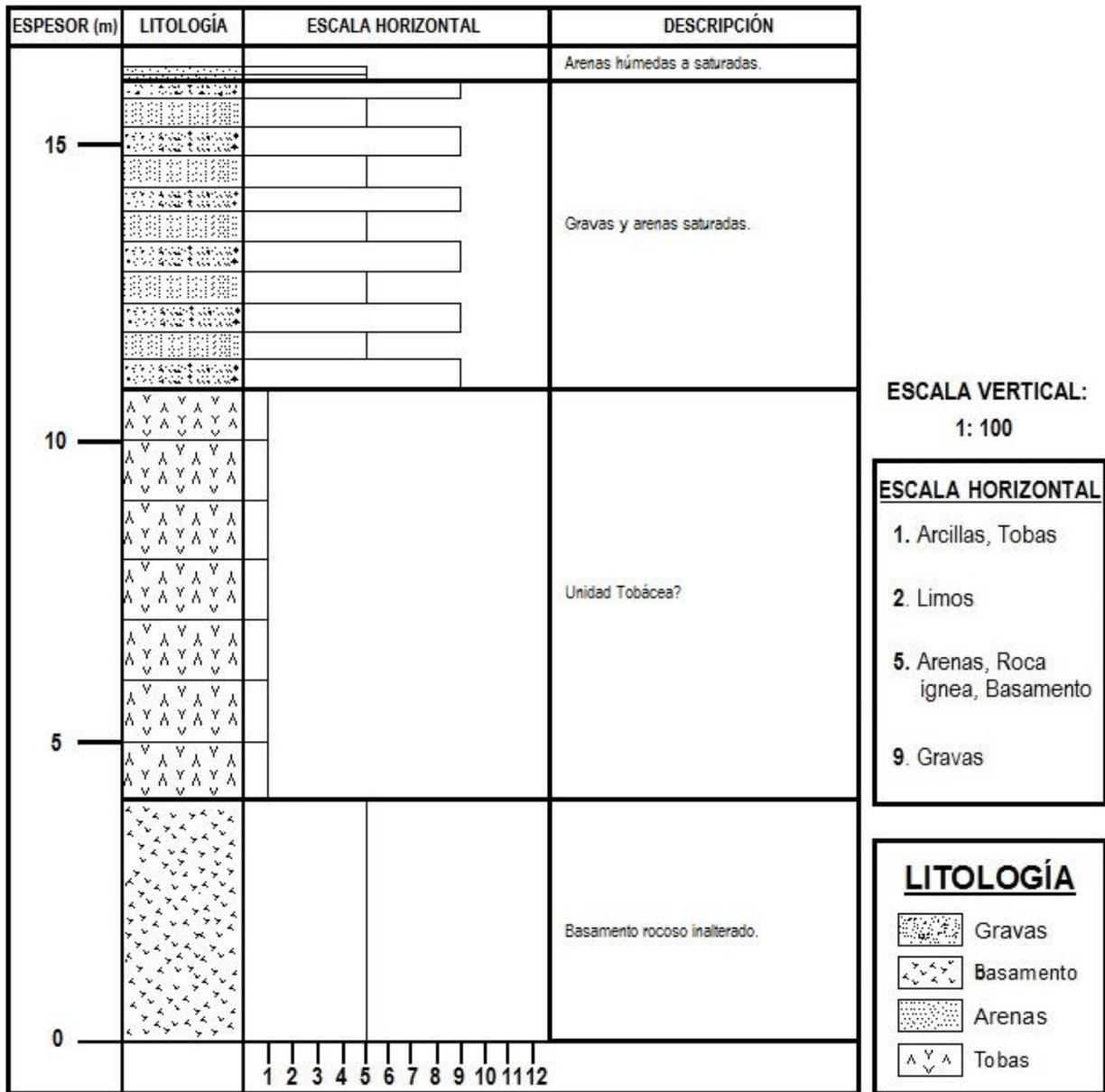
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	589.05	<input type="checkbox"/>	0.23483	0.23483	-0.23483	<input type="checkbox"/>
2	112.81	<input type="checkbox"/>	5.3139	5.5487	-5.5487	<input type="checkbox"/>
3	528.94	<input type="checkbox"/>	6.8652	12.414	-12.414	<input type="checkbox"/>
4	41.316	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

Figura 30. Resultados obtenidos mediante software - SEV 04 CENTRO

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
589,05	0,23		Arenas húmedas a saturadas
112,81	5,31	5,54	Gravas y arenas saturadas
528,94	6,86	12,41	Posible unidad tobácea?
41,31			Basamento rocoso inalterado

Tabla 15. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 04 CENTRO

En el sondeo realizado, se apreció la presencia de 4 capas y/o niveles (Figuras 29 y 30). Un primer nivel que está conformado por arenas húmedas a saturadas, con una resistividad de 589,05 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,23 metros; el siguiente nivel que se tiene son gravas y arenas saturadas, con una resistividad de 112,81 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 5,54 metros; para luego pasar a otro nivel de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 528,94 Ohm-m., y que llega a una profundidad de 12,41 metros; por último se tiene la presencia de basamento rocoso inalterado, con una resistividad de 41,31 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 14).



Columna Estratigráfica 14. SEV - 04 CENTRO

4.4.5.3.5. SONDEO GEOELÉCTRICO: SEV-05 CENTRO

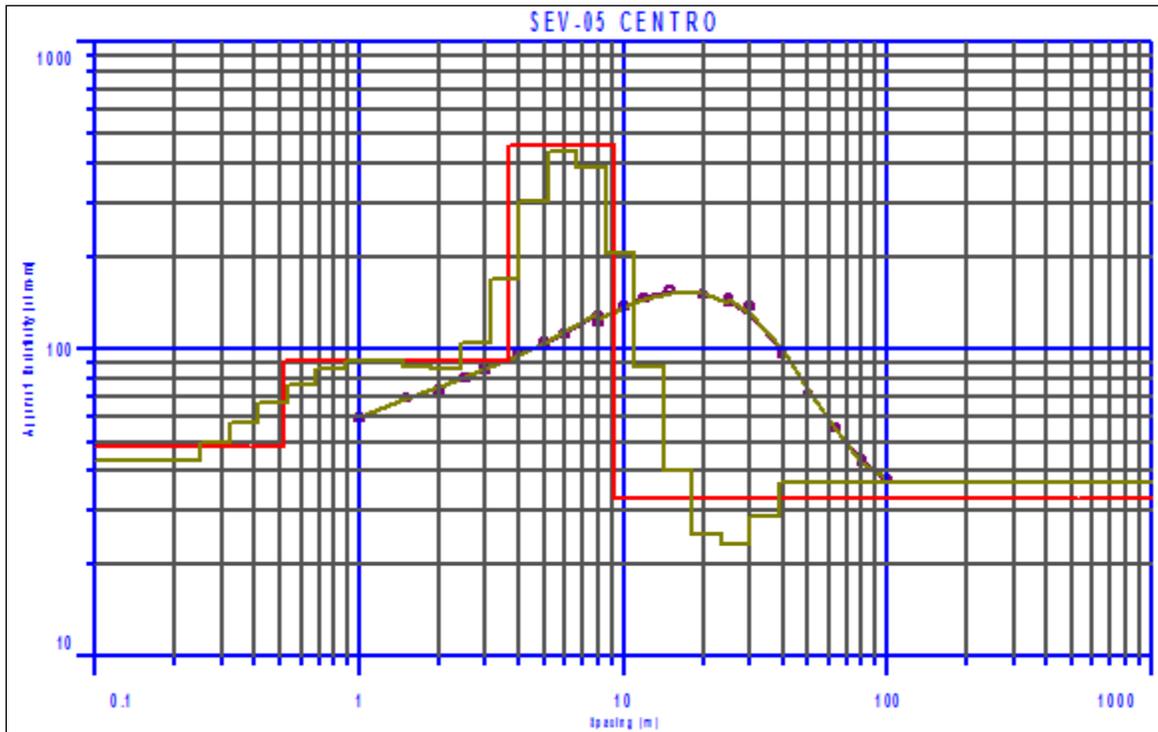


Figura 31. Curva generada con datos de campo - SEV 05 CENTRO

Resistivity Model

Surface Elevation: 0.0000      Fitting Error: 1.9402

Use Depth Instead of Thickness      Units: (meters)

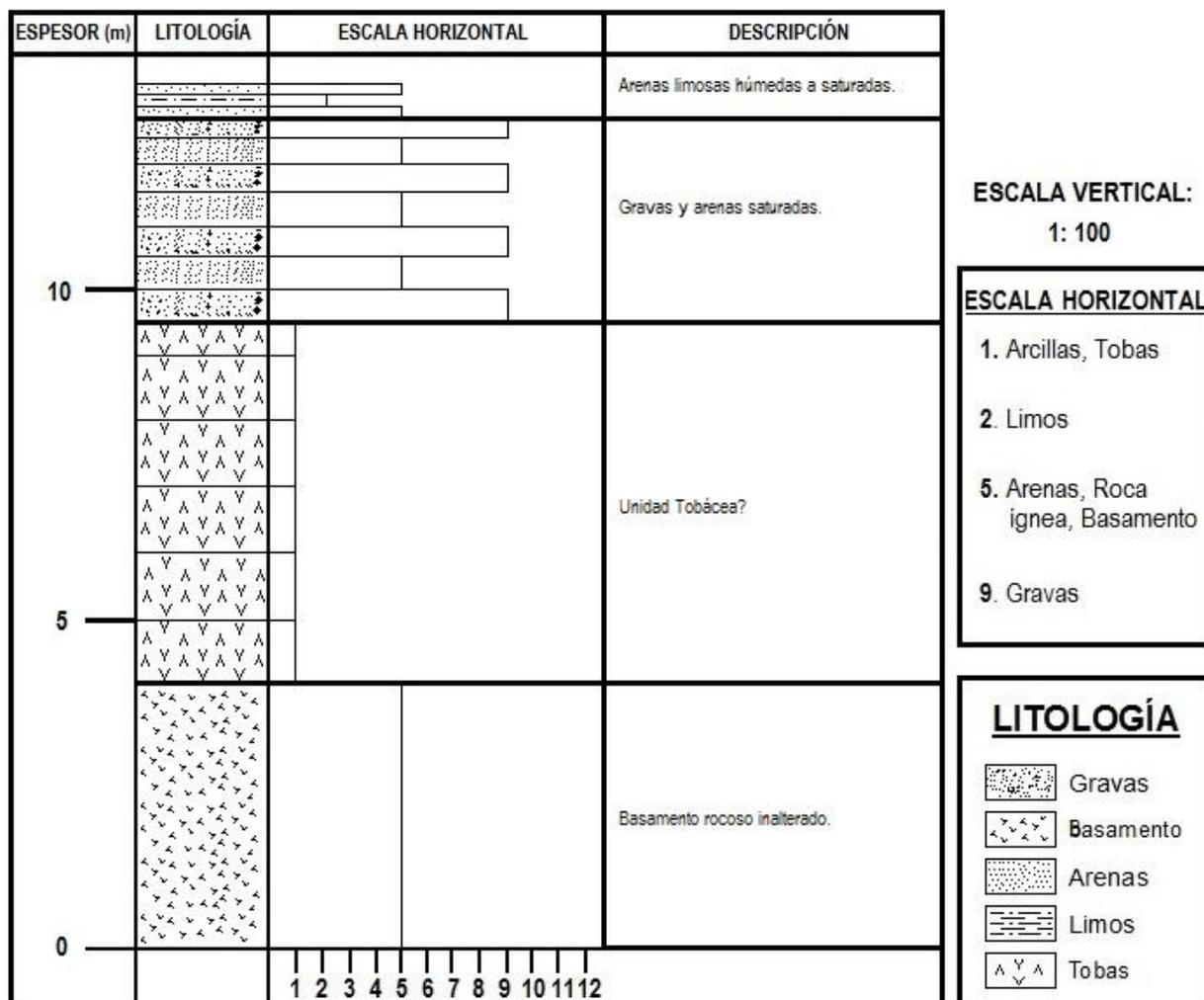
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	48.121	<input type="checkbox"/>	0.51625	0.51625	-0.51625	<input type="checkbox"/>
2	91.362	<input type="checkbox"/>	3.1732	3.6894	-3.6894	<input type="checkbox"/>
3	458.11	<input type="checkbox"/>	5.4643	9.1538	-9.1538	<input type="checkbox"/>
4	32.630	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>

Figura 32. Resultados obtenidos mediante software - SEV 05 CENTRO

Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Descripción geológica
48,12	0,51		Arenas limosas húmedas a saturadas
91,36	3,17	3,68	Gravas y arenas saturadas
458,11	5,46	9,15	Posible unidad tobácea?
32,63			Basamento rocoso inalterado

Tabla 16. Descripciones obtenidas en el sondeo - SEV 05 CENTRO

De acuerdo al sondeo realizado en este sector, se observó la presencia de 4 capas y/o niveles (Figuras 31 y 32). Un primer nivel que está conformado por arenas limosas húmedas a saturadas, con una resistividad de 48,12 Ohm-m y alcanza una profundidad de 0,51 metros; el siguiente nivel que se tiene son gravas y arenas saturadas, con una resistividad de 91,36 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 3,68 metros; posteriormente se tiene un nivel de posible unidad tobácea?, con una resistividad de 458,11 Ohm-m., y que alcanza una profundidad de 9,15 metros; por último se tiene la presencia de otro nivel considerado como basamento rocoso inalterado, con una resistividad de 32,63 Ohm-m. (Columna Estratigráfica 15).



Columna Estratigráfica 15. SEV - 05 CENTRO

#### 4.4.6. CONCLUSIONES DE LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

De acuerdo a los sondeos realizados en los tres bofedales, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- La toma de datos no fue complicada, las únicas complicaciones que se tuvieron fue la presencia del río en dos de los sectores que complico la extensión de los cables, también en uno de los sectores complico el cambio de pendiente, que limito en cierta forma la profundización de los datos por falta de espacio. Aunque de todas formas se pudo detectar el basamento rocoso en algunos casos y en otros se pudo detectar las unidades tobáceas.

- El ambiente geológico, en los tres sitios es similar, en la parte norte y sur se encuentran asociados a un río, en el sector norte posee un sistema de riego que mantiene vivo al bofedal, en el caso del bofedal central, este está siendo alimentado a través de las unidades tobáceas, que serían la fuente de agua para este sector.
- En los tres sectores se tiene la presencia de arenas con gravas, limos y arcillas que se encontrarían por encima de las unidades tobáceas, las cuales, serían las portadoras de agua
- En el sector central, se pudo observar que las unidades tobáceas, son la fuente de alimentación de este bofedal, en los otros dos sectores si bien el río principal alimenta de agua a estos sitios, asumimos que los niveles tobáceas se encontrarían saturadas y que en algún momento cede agua a los bofedales.

Por las observaciones realizadas, y los datos obtenidos, podríamos llegar a la siguiente consideración, si muchos de los bofedales se encuentran asociados a las fuentes de agua superficial (ríos), existen otros sectores los cuales, estarían asociados a unidades tobáceas como es el caso del sector central, por lo que podríamos asumir que las unidades tobáceas serían las que se encontrarían asociados a las aguas subterráneas.

#### **4.5. ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO**

Para hacer posible la elaboración del mapa piezométrico en primera instancia fue necesario realizar la instalación de piezómetros en los bofedales que se estudiaron, para conocer las variaciones en la altura piezométrica.

##### **4.5.1. INSTALACIÓN DE PIEZÓMETROS**

En el mes de Octubre de 2013 se realizó el primer viaje al área de estudio con la finalidad de instalar piezómetros en los bofedales para que mediante estos se posibilite la medición del nivel freático en los meses siguientes, por lo que se realizó un trabajo conjunto entre personal de la ONG "Agua Sustentable", personal del Herbario Nacional y el autor del presente documento ya que son los que llevan a cabo este estudio.

Esta instalación se la realizó con las siguientes finalidades:

- Permitir una medición fidedigna de las variaciones del nivel piezométrico de los acuíferos y así determinar la magnitud y dirección de los gradientes hidráulicos.

- Conocer la calidad del agua subterránea de los bofedales y así detectar anomalías y poder identificar sus causas.
- Detectar posibles anomalías en las alturas piezométricas.

La metodología para la instalación de los piezómetros viene a dado a continuación:



Fotografía 15. Perforación para instalación de piezómetros.

Para esto se utilizaron tubos de tres metros de longitud, los cuales tienen aperturas longitudinales en la parte inferior para posibilitar el paso del agua subterránea al interior del tubo, además de que el tubo se encontraba revestido de una malla (Fotografía 16) para evitar el ingreso de sedimentos u otros materiales al interior del tubo.

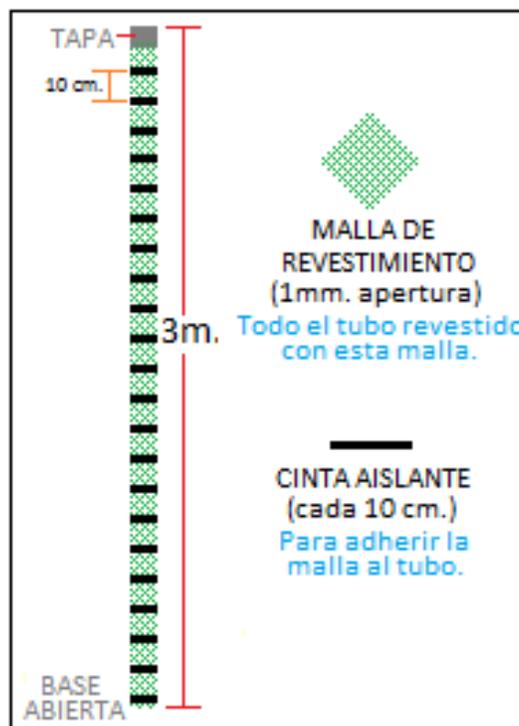


Figura 33. Esquema del Piezómetro.



Fotografía 16. Tubo piezómetro revestido con malla.

Se realizó la perforación manual con la ayuda de barrenos de diferentes tipos para posibilitarla extracción de suelos y sedimentos a profundidad (Fotografía 15).



Fotografía 17. Muestra extraída en la perforación.

Se realizó el loggeo o descripción de los materiales extraídos (Fotografía 17) en cada una de las perforaciones los cuales se encuentran resumidos en la siguiente tabla:

COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)	x	y	Altura (metros)	Profundidad Perforada (metros)	Descripción Perforación
PIEZOMETRO 1	458259	8065004	4039	2.85	En la parte más profunda se encuentra limo-arenoso (0.9 m.), a continuación arcilla (0.20 m.), seguido de limo-arenoso (0.6 m.), a continuación se tiene arcillas húmedas (1 m.), y finalmente en la parte superior se encuentra conformada por suelo, vegetación y restos vegetales (0.15 m.).
PIEZOMETRO 2	458344	8065081	4037	1.82	En la base se encuentra arena (0.5 m.), seguido de arcilla húmeda (0.60 m.), a continuación limo húmedo (0.55 m.) y finalmente se tiene suelo, vegetación (0.17m.).
PIEZOMETRO 3	458418	8065100	4043	2	En la base se encuentra arena-limosa (0.3 m.), seguido de arcilla (0.845 m.), a continuación limo (0.70 m.) y finalmente suelos y restos vegetales (0.155 m.).
PIEZOMETRO 4	452451	8068509	4073	2.9	En la base se tiene limo-arenoso (0.9 m.), seguido de arcilla (1.8 m.) y finalmente se tiene suelo y vegetación (0.2 m.).
PIEZOMETRO 5	452854	8068398	4066	2.8	En la base se aprecia limo-arenoso (1m.), seguido de arcilla (1.7 m.) y en la parte superior se encuentra suelo y restos de vegetación (0.1m.).
PIEZOMETRO 6	452647	8068471	4053	2.9	La parte profunda compuesta por limo-arenoso (0.65 m.), seguido de limo (0.75 m.), a continuación arcilla (1.28 m.) y finalmente suelo y vegetación (0.22 m.).
PIEZOMETRO 7	452281	8068487	4068	2.5	En la base se observa limo-arenoso (1.05 m.), seguido de arcilla (1.30 m) y finalmente suelo y vegetación (0.15 m.).
PIEZOMETRO 8	456837	8053671	4043	1.6	En la parte más profunda se observa limo-arenoso (0.65 m.), a continuación limo (0.315 m.), seguido de arcilla (0.45 m.), finalmente suelo y vegetación (0.185 m.).
PIEZOMETRO 9	456789	8053652	4039	1.6	En la base se tiene limo-arenoso (0.7 m.), seguido de arcilla (0.63 m.), finalmente suelo y vegetación (0.21m.).
PIEZOMETRO 10	456635	8053671	3970	1.5	En la parte más profunda se observa limo-arenoso (0.5 m.), seguido de limo (0.3 m.), a continuación de arcilla (0.3 m.), finalmente suelo y vegetación (0.2 m.).
PIEZOMETRO s/t	456647	8053688	4044	1.5	En la base se tiene limo-arenoso (0.4 m.), seguido de arcilla (0.9 m.), finalmente suelo y vegetación (0.2 m.).

Tabla 17. Descripción de material extraído de la perforación.

Posteriormente se realizó la introducción de los tubos dentro del espacio perforado.



Fotografía 18. Introducción de tubos piezómetros en el espacio perforado.

Finalmente se procedió a poner la tapa correspondiente teniendo ya el piezómetro instalado.



Fotografía 19. Piezómetro instalado con su respectiva tapa y numeración.

Como se puede observar en la fotografía el agua se introduce en el tubo lo que posibilita medir el nivel freático en cada uno de los tubos.

Anteriormente ya se había realizado la instalación de un piezómetro al cual se lo denominó como Piezómetro VCS, el cual es más ancho con relación a los piezómetros instalados.



Fotografía 20. Piezómetro VCS - Anteriormente instalado.

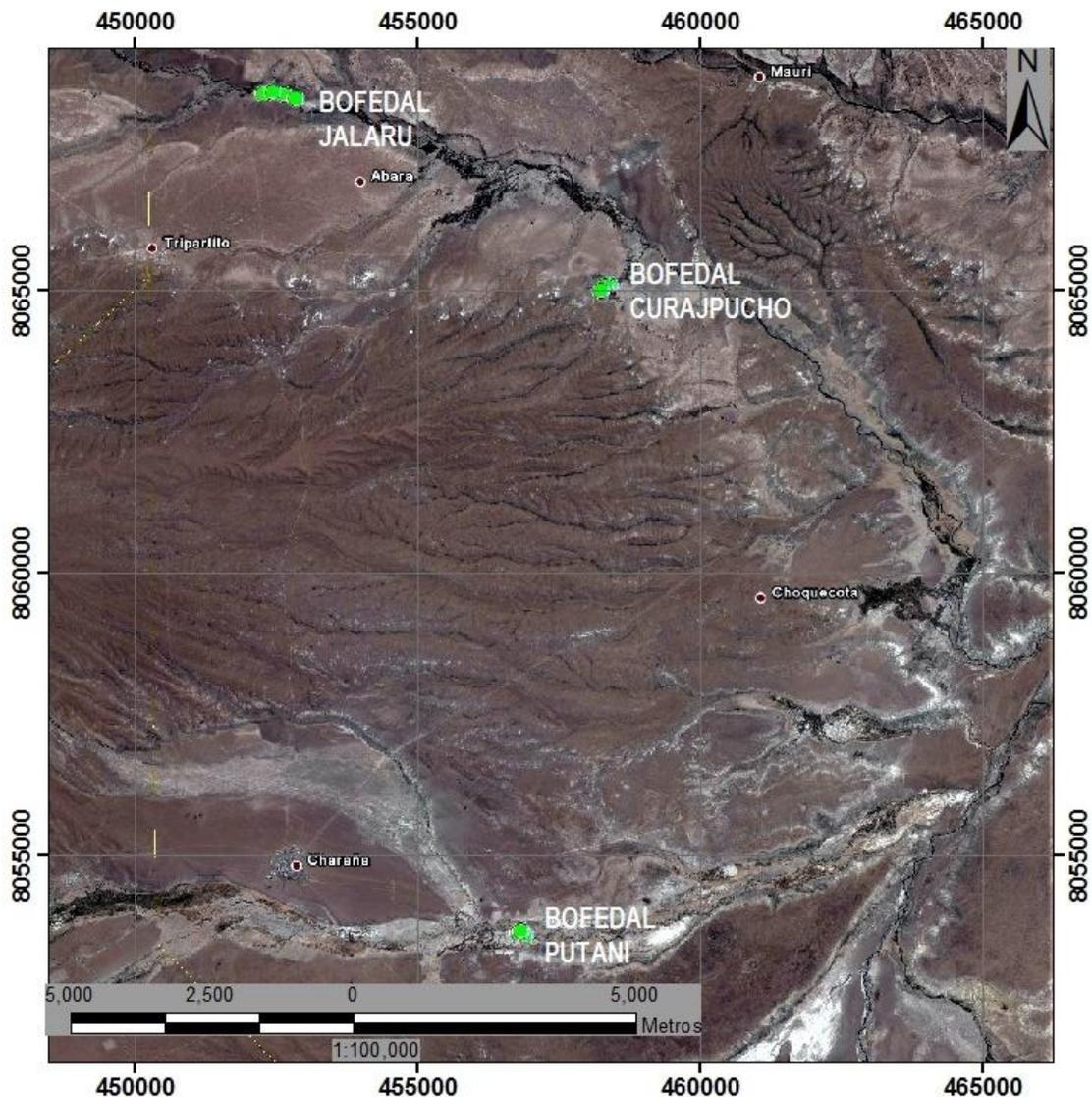
Posterior al mes de octubre, el siguiente monitoreo el mes de Febrero se observó que se produjo sedimentación en el fondo de los piezómetros lo que se le puede atribuir a que la base de los tubos es abierta, por lo que se tuvo la necesidad de realizar la limpieza de los mismos con barrenos más delgados que los utilizados en la perforación, realizando esto en el mes de Marzo.



Fotografía 21. Limpieza de Piezómetros - Mes de Marzo de 2014.

#### 4.5.2. UBICACIÓN DE PIEZÓMETROS

Los piezómetros instalados fueron 12 en total los cuales se encuentran distribuidos en los tres bofedales estudiados, teniendo 4 piezómetros en cada uno de los bofedales los que permitieron realizar el monitoreo de la altura piezométrica del agua subterránea.



Mapa 15. Ubicación de los bofedales estudiados.

#### 4.5.1.1. BOFEDAL CURAJPUCHO

Los piezómetros en este bofedal se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

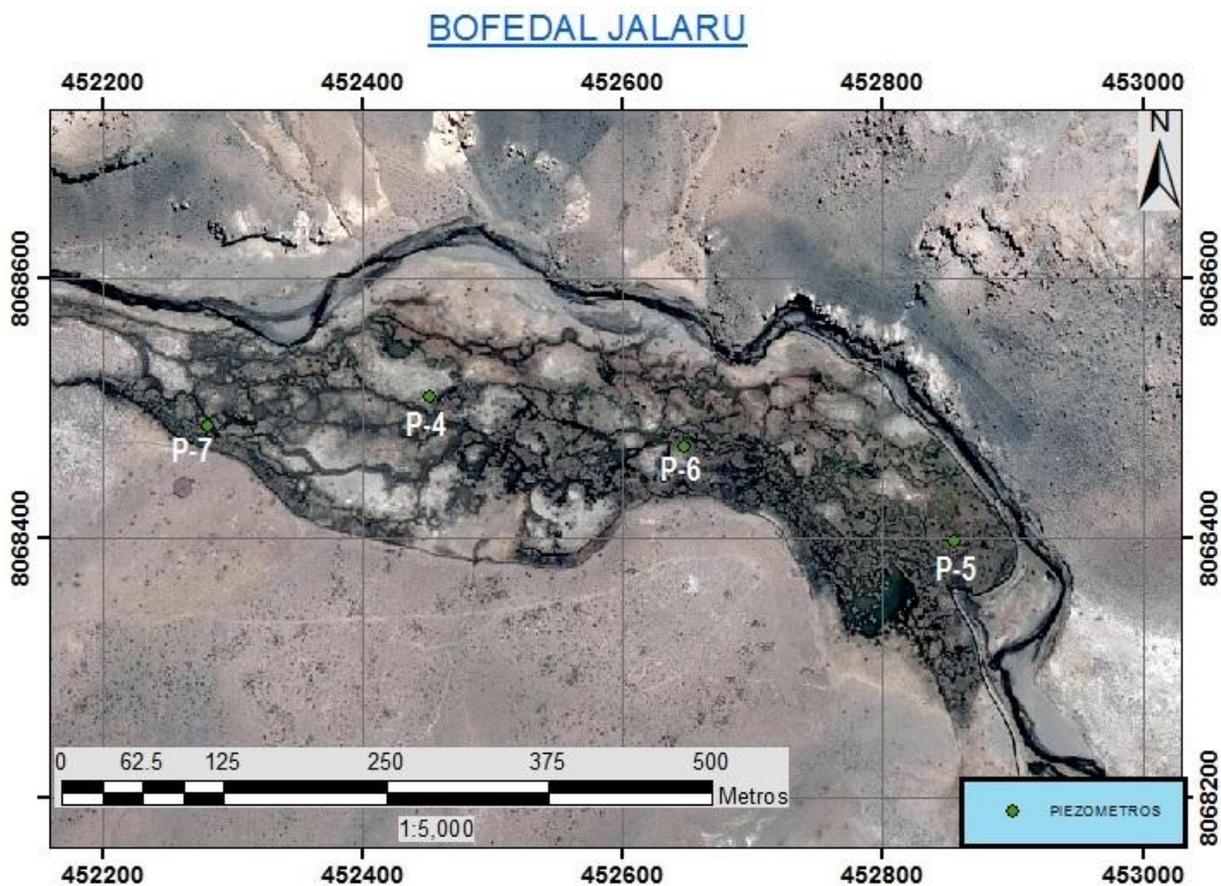


Mapa 16. Ubicación de piezómetros en el bofedal Curajpucho.

En el bofedal Curajpucho fueron instalados 3 piezómetros en Octubre de 2013, pero anteriormente a este mes ya se había instalado el piezómetro VCS, teniendo en total 4 piezómetros en los cuales se realizó el monitoreo, con los cuales se realizaron todas las interpretaciones posteriormente.

#### 4.5.1.2. BOFEDAL JALARU

Los piezómetros se encuentran distribuidos en el bofedal Jalaru como se muestra en el siguiente mapa:

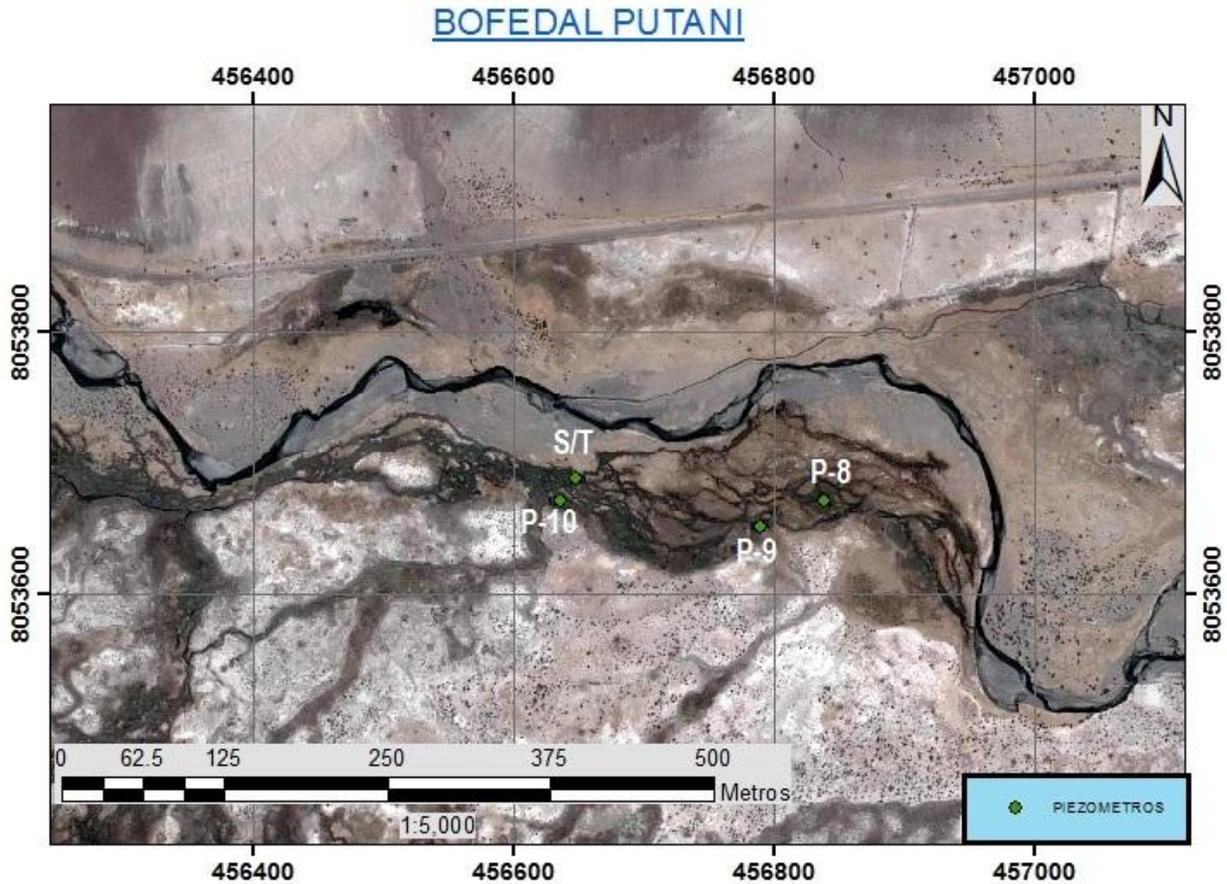


Mapa 17. Ubicación de piezómetros en el bofedal Jalaru.

En el bofedal Jalaru ubicado al nor-oeste del área de estudio cuenta con cuatro piezómetros instalados con los cuales se realizaron los trabajos interpretativos en etapas posteriores al monitoreo, además este bofedal está en contacto con el río caño.

### 4.5.1.3. BOFEDAL PUTANI

En el siguiente mapa se muestra la distribución de los piezómetros en el bofedal Putani:



Mapa 18. Ubicación de piezómetros en el bofedal Putani.

El bofedal Putani ubicado al sur del área de estudio cuenta con cuatro piezómetros instalados los que fueron utilizados para el monitoreo, siendo además que este bofedal está en contacto con el río Putani.

### 4.5.3. MONITOREO DE NIVEL FREÁTICO

En cada una de los viajes al área de estudio que fue posible gracias al auspicio de la ONG "Agua Sustentable", se realizó el monitoreo del nivel freático en cada uno de los piezómetros instalados, lo cual trata de realizar la medición de la profundidad a la cual se encuentra el agua en el piezómetro y se procedió a realizar las siguientes mediciones:

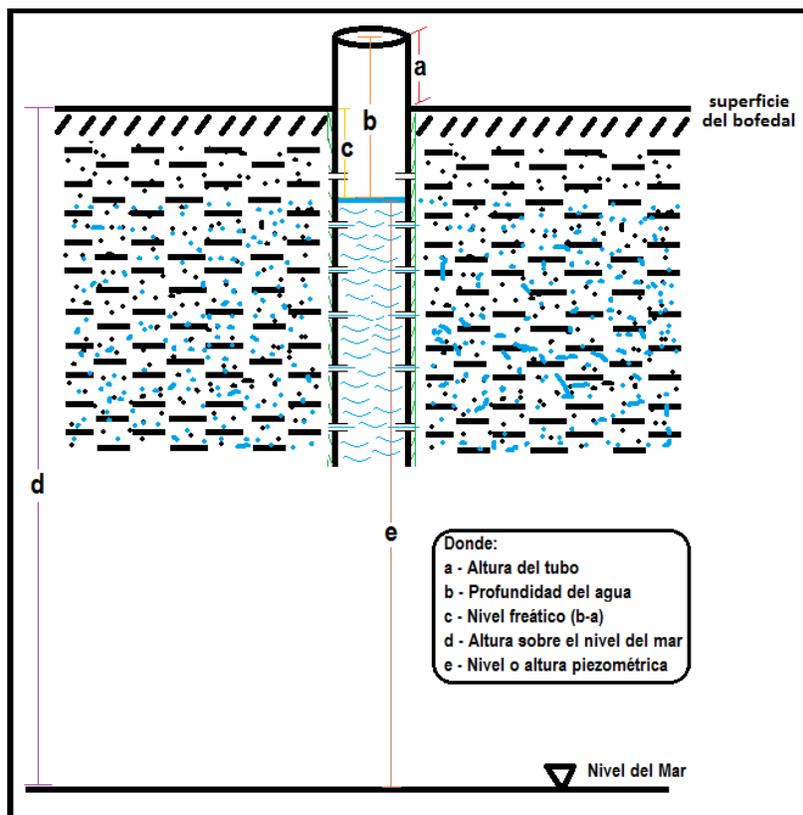


Figura 34. Esquematzación de mediciones en el monitoreo piezométrico.

El procedimiento para realizar la medición de la altura piezométrica es la siguiente:

1. Se mide la altura de tubo, es decir la parte del piezómetro que sobresale en superficie (a – Figura 34).
2. Se mide la profundidad a la que se encuentra el agua en el piezómetro, desde la parte superior del tubo hasta el nivel de agua (b – Figura 34).
3. Se obtiene el dato del nivel freático (c – Figura 34), haciendo la diferencia entre (b-a).
4. Se tiene el dato de la altura de la superficie del bofedal con respecto al nivel del mar obtenido mediante el GPS (d – Figura 34).
5. Finalmente se calcula la diferencia entre la altura sobre el nivel del mar y el nivel freático y se obtiene el nivel o altura piezométrica con la cual se realizan todos los trabajos de interpretación.

A continuación se presentan los resultados del nivel o altura piezométrica en cada uno de los piezómetros en cada uno de los meses en los que se realizó el monitoreo:

#### 4.5.3.1. BOFEDAL CURAJPUCHO

##### 4.5.3.1.1. PIEZÓMETRO 1

PIEZOMETRO 1		
COORDENADAS (WGS-84)		ALTURA
458259	8065004	4039
OCTUBRE/2013	4038.73	
DICIEMBRE/2013	4038.735	
FEBRERO/2014	4038.76	
MARZO/2014	4038.805	
JUNIO/2014	4038.82	
JULIO/2014	4038.757	
SEPTIEMBRE/2014	4038.57	

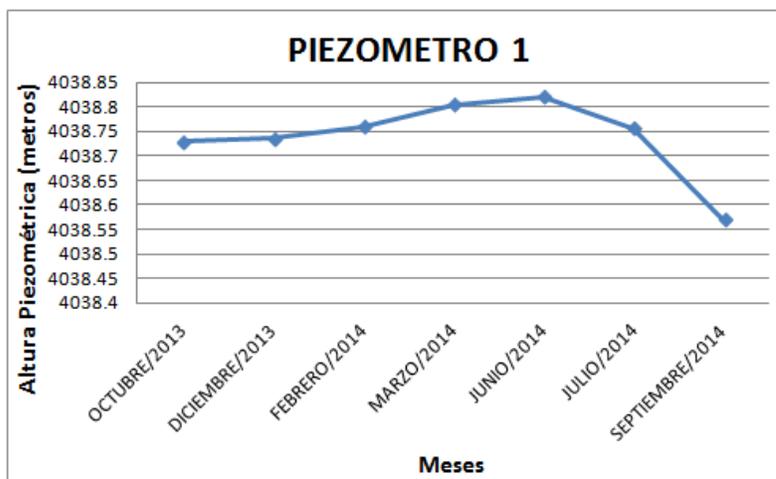


Figura 35. Monitoreo piezómetro 1.

#### INTERPRETACIÓN:

En el gráfico del piezómetro 1 se puede apreciar que durante los meses de octubre de 2013 hasta febrero de 2014 el nivel piezométrico se mantuvo casi constante donde se conoce que hubieron bajas precipitaciones en la zona. Posteriormente entre los meses de marzo a junio se observa un aumento en la altura piezométrica que se vio favorecida por las lluvias y la nieve durante el invierno, lo que permitió un ascenso en la altura piezométrica y por tanto mayor acumulación de agua en los bofedales. Ya hacia el final del estudio entre los meses de julio a septiembre existe una baja considerable de la altura piezométrica en 25 centímetros aproximadamente lo cual nos indica que hubo menor acumulación de agua subterránea dentro el bofedal.

#### 4.5.3.1.2. PIEZÓMETRO 2

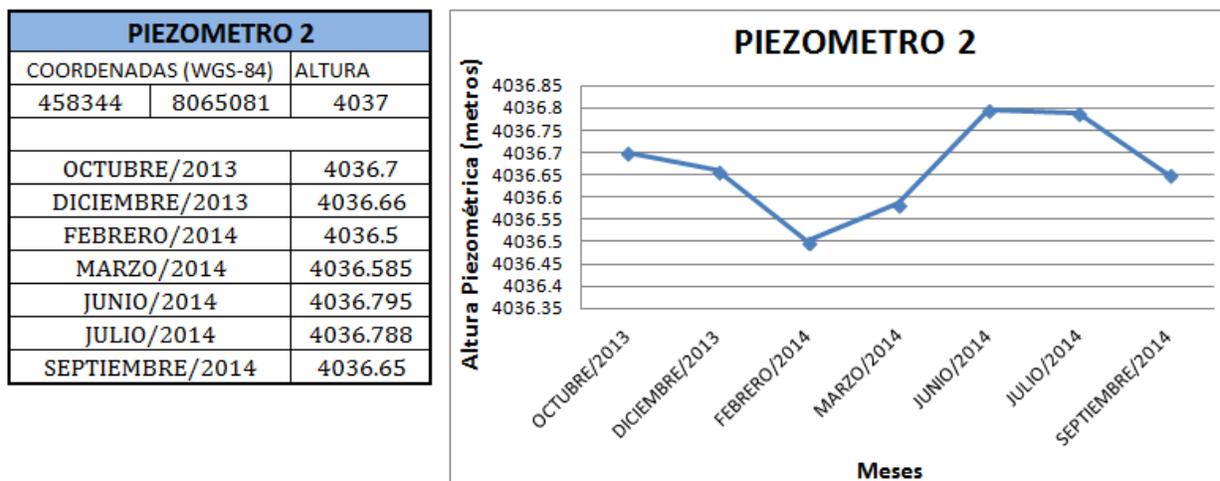


Figura 36. Monitoreo piezómetro 2.

#### INTERPRETACIÓN:

En el gráfico se observa que la altura piezométrica entre los meses de octubre de 2013 hacia los meses de diciembre y febrero de 2014 fue descendiendo de forma considerable lo cual se relaciona con las bajas precipitaciones en la zona de estudio llegando a disminuir hasta en 20 centímetros de altura lo que se relaciona con las bajas precipitaciones y por tanto una recarga baja con relación a la descarga, en los siguientes meses se produce un aumento considerable en la altura piezométrica llegando a aumentar hasta en 30 centímetros de altura hacia el mes de junio donde se tiene el dato más alto de altura piezométrica de todos los meses monitoreados, lo que se le puede atribuir a la nieve que es muy característica en esta zona durante el invierno, lo cual tiene poca diferencia con relación al siguiente mes de julio donde se produce una disminución de la altura pero de menor magnitud siendo estos los meses en los que se conoce las precipitaciones fueron mayores y por tanto hubo una mayor recarga en los acuíferos, lo cual se ve contrariado hacia los meses siguientes debido a que se produce una disminución de 15 centímetros aproximadamente para el mes de septiembre siendo que en estos meses la tasa de recarga fueron menores a las de descarga.

### 4.5.2.1.3. PIEZÓMETRO 3

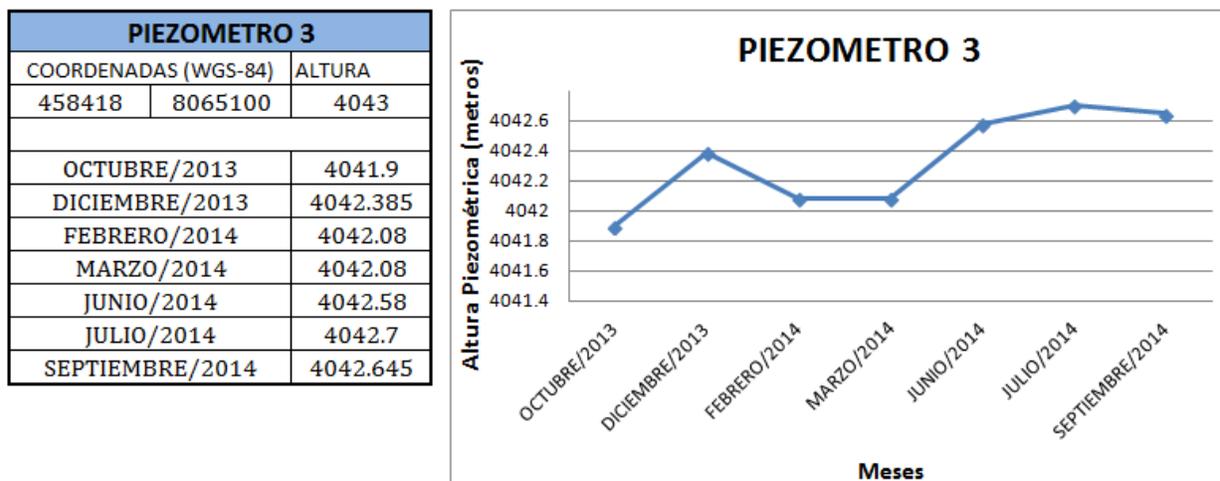


Figura 37. Monitoreo piezómetro 3.

#### INTERPRETACIÓN:

En el monitoreo realizado en el piezómetro 3 en el bofedal Curajpucho, se puede observar que en el primer mes donde se realizó la medición de la altura piezométrica presenta un dato bajo lo cual se podría relacionar con que el piezómetro fue recientemente instalado y por tanto se creería que el agua no habría alcanzado su altura real hasta el momento de la medición y posteriormente hacia los meses siguientes se puede ver que al igual que en los piezómetros descritos anteriormente existe una disminución en la altura piezométrica en los meses de febrero y marzo donde las precipitaciones como se dijo fueron bajas y por tanto no hubo acumulación de agua subterránea importante en los bofedales, siendo que esto cambia hacia los meses siguientes como se observa en los meses de junio y julio donde la altura piezométrica es más alta con relación al resto de los meses monitoreados, conociendo que fueron meses con precipitaciones mayores y por tanto mayor recarga en el acuífero, siendo que esto se ve otra vez afectado hacia septiembre ya que se produce una disminución en la altura piezométrica.

#### 4.5.2.1.4. PIEZÓMETRO VCS

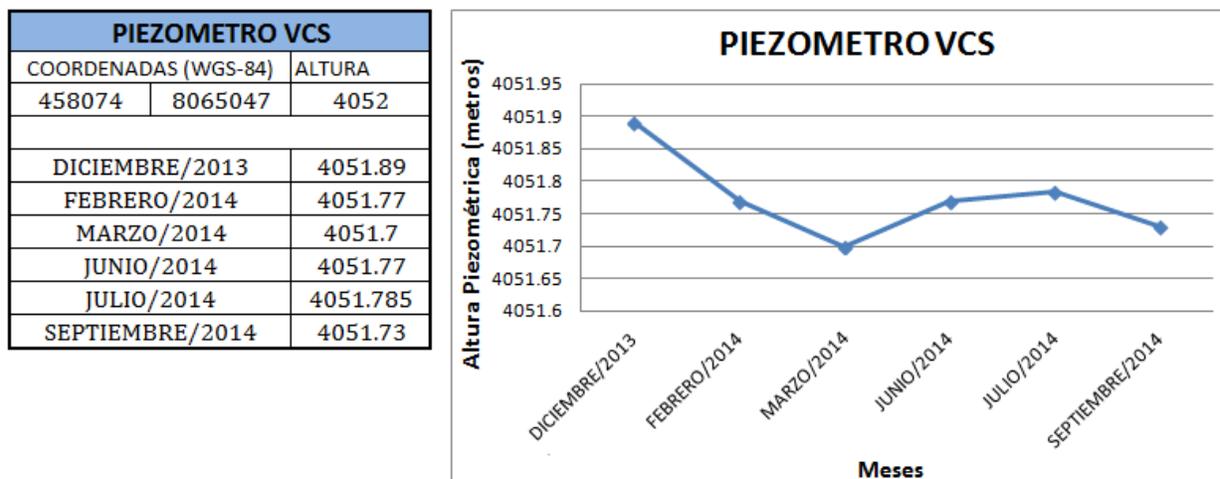


Figura 38. Monitoreo piezómetro VCS.

#### INTERPRETACIÓN:

El piezómetro VCS fue instalado antes que el resto de los piezómetros, pero se inició con su monitoreo a partir del mes de diciembre de 2013 donde se puede apreciar que el dato de altura piezométrica es el más alto con relación al resto de los meses en que se realizaron las mediciones y esto se podría atribuir a que el extremo oeste que es donde se encuentra este piezómetro es la zona de recarga del acuífero. Tal como se apreció en los anteriores piezómetros se ve una disminución en los meses siguientes, siendo que en el mes de marzo la altura piezométrica alcanza su altura más baja lo que se relaciona con las bajas precipitaciones en la zona y por tanto una tasa de recarga del acuífero menor, posteriormente aumentan las precipitaciones y se ve un aumento substancial en la altura piezométrica hacia el mes de julio y seguido de una disminución de altura por un aumento en la tasa de descarga hacia el mes de septiembre.

4.5.2.1.5. GRÁFICO COMPARATIVO BOFEDAL CURAJPUCHO

Sobreponiendo los datos de los cuatro piezómetros que conforman este bofedal se obtuvo el siguiente gráfico:

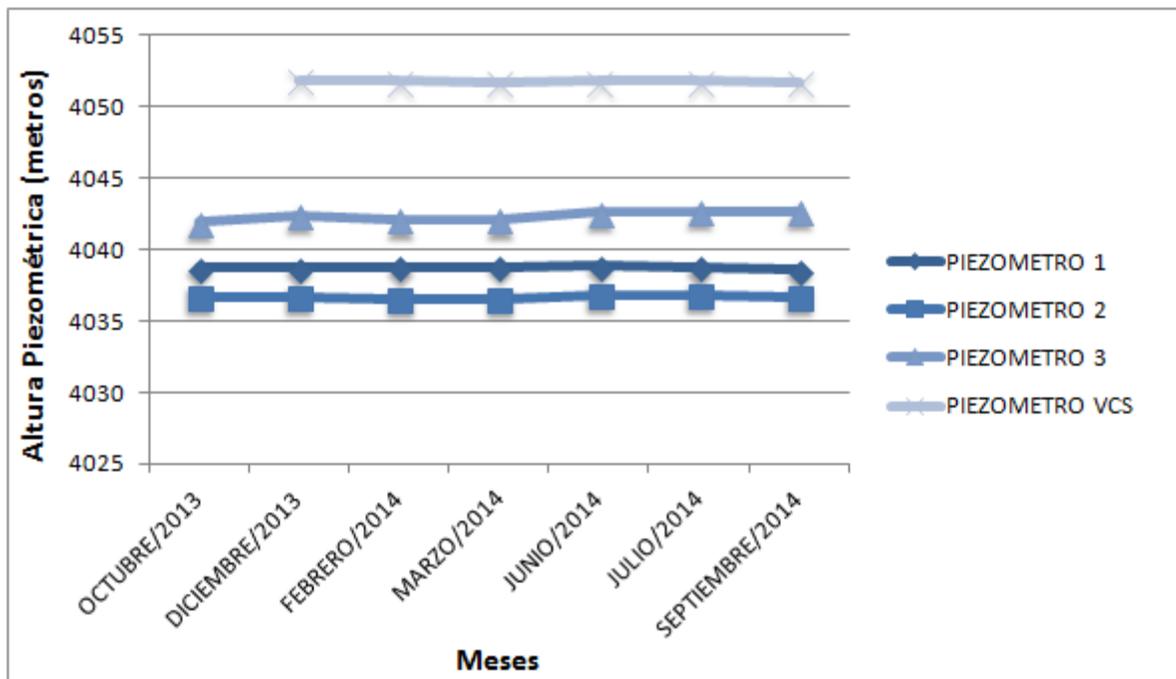


Figura 39. Gráfico comparativo de alturas piezométricas - Bofedal Curajpucho.

**INTERPRETACIÓN:**

En la gráfica se aprecia que el piezómetro con mayor altura piezométrica es el VCS el cual se encuentra en el extremo oeste del bofedal, seguido en altura por el piezómetro 3, el cual se encuentra en el extremo este del bofedal, lo que nos da a entender que el flujo del agua subterránea es hacia el centro del acuífero hacia donde se encuentran los piezómetros 1 y 2. Además se puede apreciar que las alturas de los cuatro piezómetros tienen comportamientos similares, teniendo datos más bajos en las épocas de menor precipitación siendo estos los meses entre diciembre a marzo y un aumento en la altura hacia los meses de junio y julio donde se produce una recarga en las aguas subterráneas del bofedal.

### 4.5.3.2. BOFEDAL JALARU

#### 4.5.3.2.1. PIEZÓMETRO 4

PIEZOMETRO 4		
COORDENADAS (WGS-84)		ALTURA
452451	8068509	4073
OCTUBRE/2013		4072.63
DICIEMBRE/2013		4072.77
FEBRERO/2014		4072.71
MARZO/2014		4072.75
JUNIO/2014		4072.77
JULIO/2014		4072.723
SEPTIEMBRE/2014		4072.74

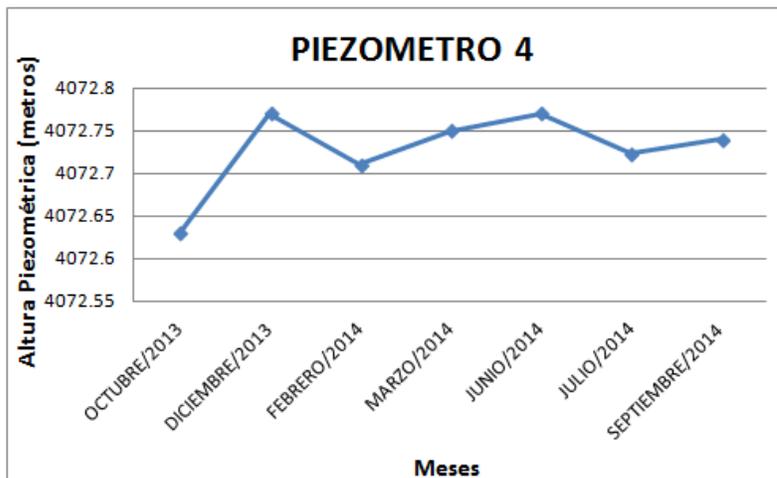


Figura 40. Monitoreo piezómetro 4.

#### INTERPRETACIÓN:

En la gráfica se puede apreciar que la altura piezométrica comienza baja en el primer mes de monitoreo lo cual se puede atribuir a que el piezómetro estaba recién instalado y por tanto el agua no había ingresado hasta su altura real al momento de tomar el dato, posteriormente se ve que hay un ascenso hacia el mes de diciembre y en los meses posteriores una disminución, tal como se vio en los datos del anterior bofedal descrito estos coinciden con los meses en los que las precipitaciones son menores, que son los meses de febrero y marzo, seguido de un aumento en la altura piezométrica hacia los meses de junio y julio por la nieve en la zona, siendo estos los meses de recarga del acuífero que posteriormente se ve que otra vez va en descenso hacia el mes de septiembre.

#### 4.5.3.2.2. PIEZÓMETRO 5

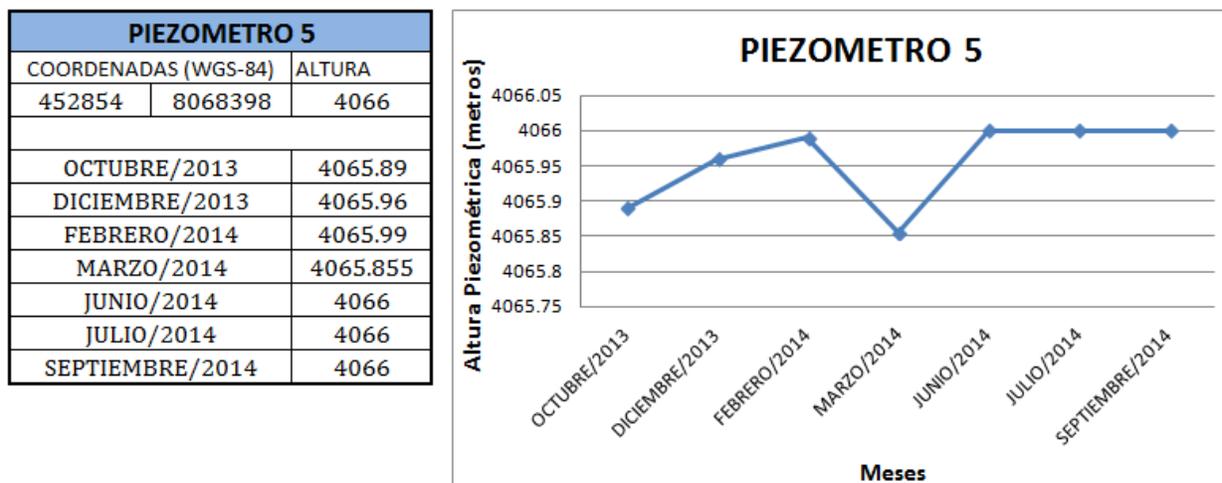


Figura 41. Monitoreo piezómetro 5.

#### INTERPRETACIÓN:

En la gráfica del piezómetro 5 se observa que hay una disminución importante en la altura piezométrica en el mes de marzo llegando a ser aproximadamente 15 centímetros más bajo con relación a los otros meses lo cual viene a ser porque la tasa de descarga es mayor que la de recarga, lo cual se lo relaciona con los bajos índices de precipitación en la zona, lo que posteriormente se vio contrarrestado con el aumento del nivel piezométrico en los meses siguientes hasta septiembre que se produjo gracias al aumento en las precipitaciones y por tanto un aumento en la tasa de recarga de agua al acuífero.

#### 4.5.3.2.3. PIEZÓMETRO 6

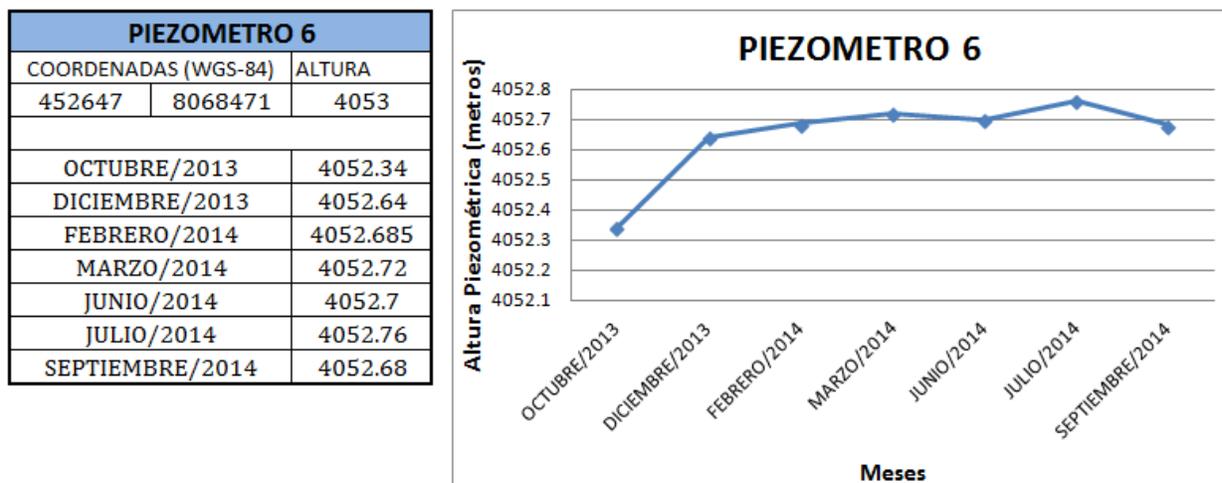


Figura 42. Monitoreo piezómetro 6.

#### INTERPRETACIÓN:

Se puede apreciar que en este piezómetro no se observa el mismo tipo de gráfica comparando con los de los otros piezómetros esto debido a que se observa que la altura piezométrica fue en aumento durante gran parte del año lo que hace entender que es hacia esta zona del bofedal donde se produce la dirección del flujo del agua subterránea y es por eso que existe un aumento o recarga continua en este piezómetro, lo cual es constatado con el mapa piezométrico que se presentarán posteriormente y muestra que las direcciones de flujo del agua subterránea es hacia el sector donde se encuentra este piezómetro.

#### 4.5.2.2.4. PIEZÓMETRO 7

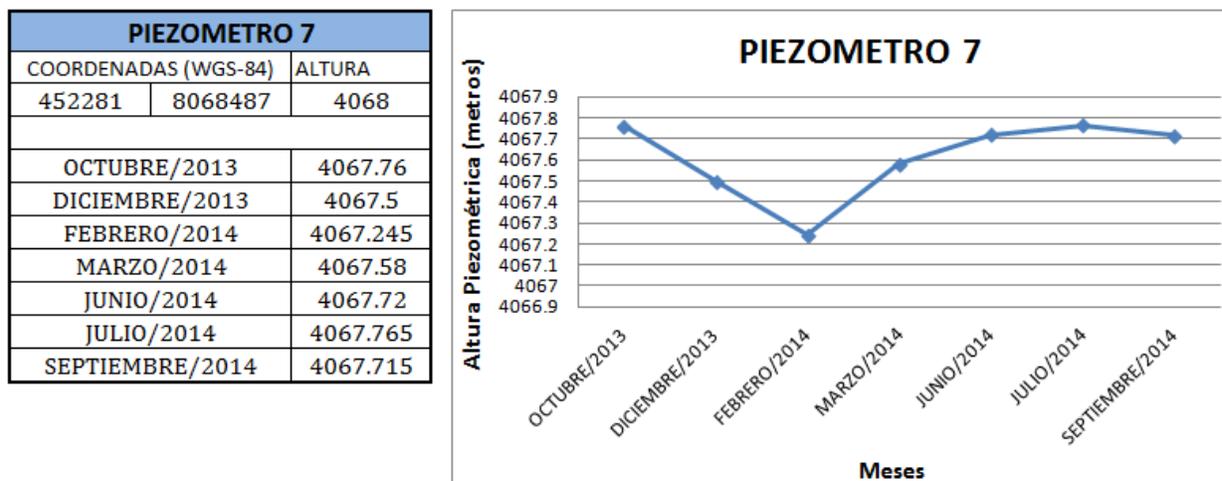


Figura 43. Monitoreo piezómetro 7.

#### INTERPRETACIÓN:

En el piezómetro 7 se tiene que los datos más anómalos y bajos se dieron en el mes de febrero donde se pudo apreciar una sequía llegando a formar grietas de desecación en los bofedales producido por las bajas de tasas de precipitación durante esta época del año que se puede apreciar en el gráfico con una brusca caída en la altura piezométrica de aproximadamente 50 centímetros con relación al resto de los meses de monitoreo, lo cual se vio seguido por un aumento en la altura piezométrica hacia los meses siguiente, lo cual se produce por un aumento en la precipitación y por lo tanto un aumento en la recarga del acuífero.

#### 4.5.3.2.1. GRÁFICO COMPARATIVO BOFEDAL JALARU

Sobreponiendo los datos de los cuatro piezómetros que conforman este bofedal se obtuvo el siguiente gráfico:

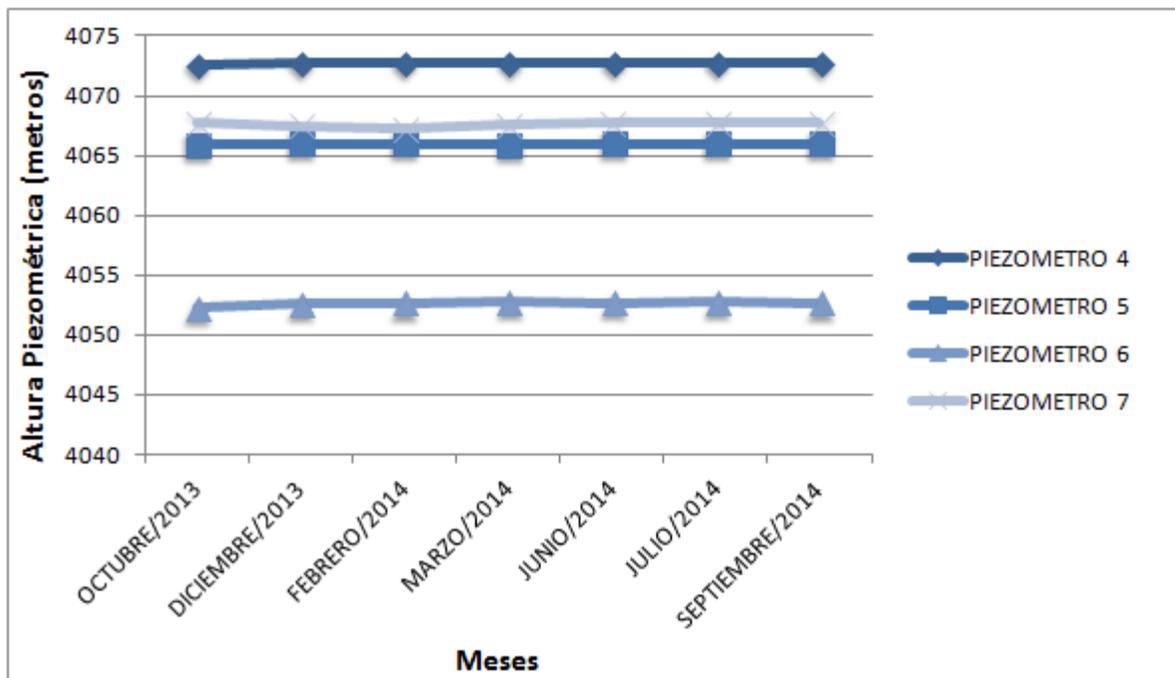


Figura 44. Gráfico comparativo de alturas piezométricas - Bofedal Curajpucho.

#### INTERPRETACIÓN:

En el cuadro comparativo de las alturas piezométricas del bofedal Curajpucho se puede ver que los piezómetros 4, 6 y 7 tienen alturas piezométricas mayores con relación al piezómetro 5 lo que nos indica que las zonas de descarga son en los extremos del bofedal, siendo que las aguas subterráneas siguen su flujo en dirección a la zona donde se encuentra el piezómetro 5 (centro del bofedal – Ver Mapa 17), que además como vimos en su gráfica individual (Figura 42), se aprecia que la altura piezométrica en este piezómetro va en aumento en gran parte del año esto debido a que esta es la zona que recibe agua subterránea proveniente de los extremos del acuífero, lo que también es observado en los mapas piezométricos del bofedal.

### 4.5.3.3. BOFEDAL PUTANI

#### 4.5.3.3.1. PIEZÓMETRO 8

PIEZOMETRO 8		
COORDENADAS (WGS-84)		ALTURA
456837	8053671	4043
OCTUBRE/2013		4042.36
DICIEMBRE/2013		4042.567
FEBRERO/2014		4042.46
MARZO/2014		4042.47
JUNIO/2014		4042.58
JULIO/2014		4042.59
SEPTIEMBRE/2014		4042.73

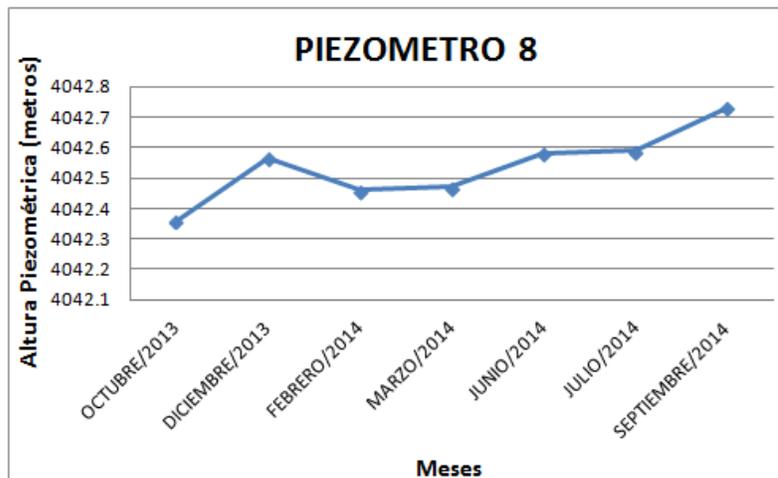


Figura 45. Monitoreo piezómetro 8.

#### INTERPRETACIÓN:

En la gráfica de las alturas piezométricas en el piezómetro 8, se puede observar que comienza con un dato anómalo bajo en el mes de octubre, así como en varios de los piezómetros, esto debido a que se tomó el dato cuando se realizó la instalación de estos y entonces el agua subterránea no habría alcanzado aún su altura dentro el tubo, posteriormente se ve una baja en la altura piezométrica durante los meses más secos del año que fueron entre febrero y marzo, esto debido a la escasa precipitación en la zona, los meses posteriores las aguas subterráneas se vieron favorecidas por el aumento en las precipitaciones y nieve, y se produjo una recarga del acuífero teniendo alturas piezométricas más altas en los meses siguiente hasta el último mes de monitoreo que fue el mes de septiembre.

#### 4.5.3.3.2. PIEZÓMETRO 9

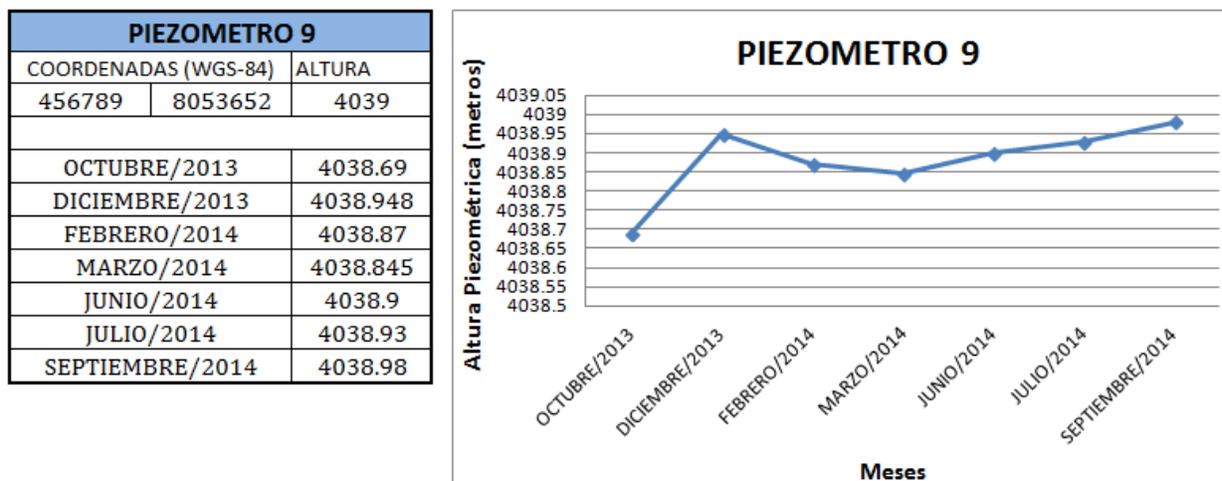


Figura 46. Monitoreo piezómetro 9.

#### INTERPRETACIÓN:

En la gráfica de este piezómetro se puede apreciar un dato anómalo el mes de octubre lo cual ya se justificó anteriormente, seguido a esto una disminución importante en la altura piezométrica hacia los meses de febrero y marzo, lo que se relacionó con la época seca en la zona con escasas precipitaciones, posteriormente en los últimos meses de monitoreo se produjo un aumento en la altura piezométrica favorecido por la recarga que produjo el aumento de precipitaciones en el bofedal.

#### 4.5.3.3.3. PIEZÓMETRO 10

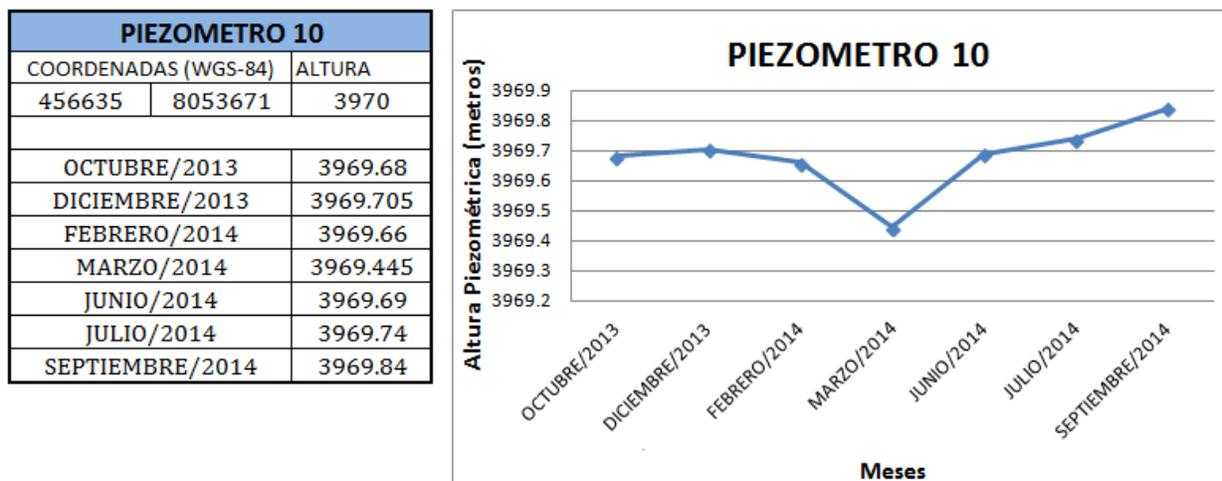


Figura 47. Monitoreo piezómetro 10.

#### INTERPRETACIÓN:

En este piezómetro se puede resaltar la altura más baja dado en el mes de marzo, esto debido a que este mes fue muy seco respecto a precipitaciones y por tanto no hubo recarga en el acuífero, siendo el resto de los meses que la altura piezométrica varió como máximo entre los 10 a 15centímetros.

#### 4.5.3.3.4. PIEZÓMETRO SIN TAPA

PIEZOMETRO SIN TAPA		
COORDENADAS (WGS-84)		ALTURA
456647	8053688	4044
OCTUBRE/2013		4043.7
DICIEMBRE/2013		4043.93
FEBRERO/2014		4043.08
MARZO/2014		4043.61
JUNIO/2014		4043.57
JULIO/2014		4043.6
SEPTIEMBRE/2014		4043.71

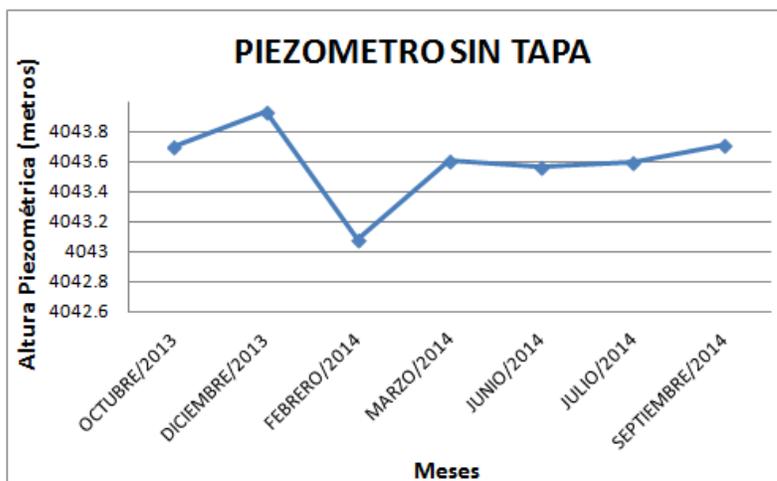


Figura 48. Monitoreo piezómetro SIN TAPA.



Fotografía 22. Piezómetro SIN TAPA.

#### INTERPRETACIÓN:

Este piezómetro fue instalado sin tapa a diferencia del resto por lo que permite que el agua superficial o de las precipitaciones pueda pasar directo al interior del tubo. Este piezómetro nos muestra que la altura más baja registrada en este piezómetro se dio el mes de febrero, esto debido a la época seca en los bofedales lo que afectó directamente la recarga del acuífero.

#### 4.5.3.3.5. GRÁFICO COMPARATIVO BOFEDAL PUTANI

Sobreponiendo los datos de los cuatro piezómetros que conforman este bofedal se obtuvo el siguiente gráfico:

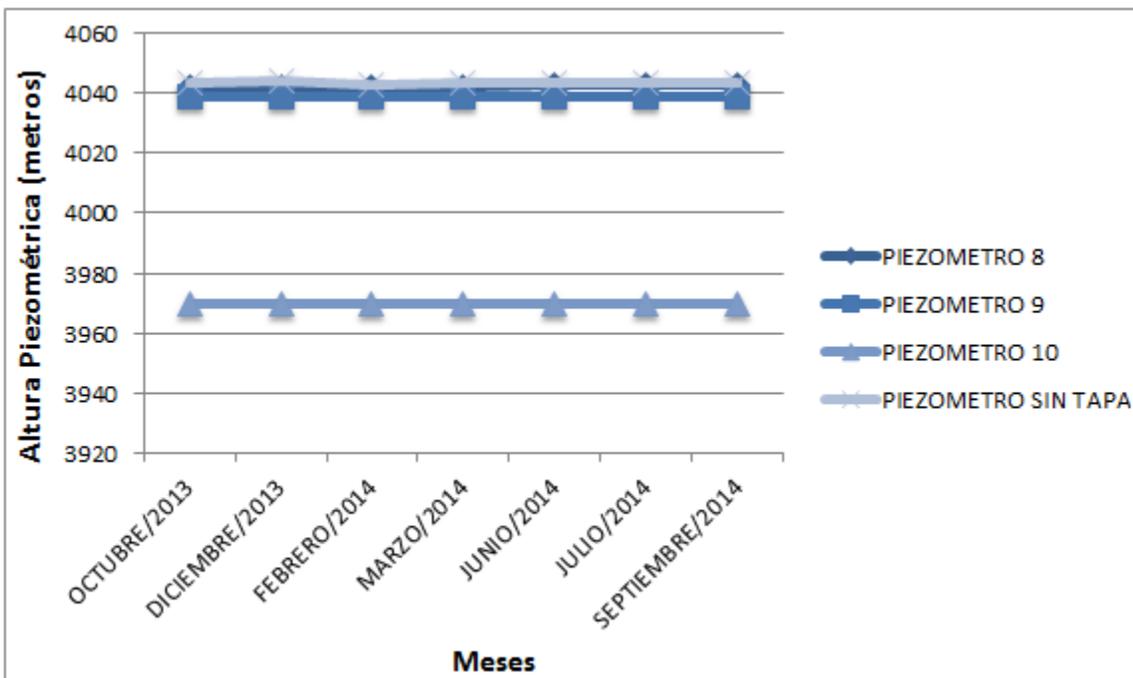


Figura 49. Gráfico comparativo de alturas piezométricas - Bofedal Curajpucho.

#### INTERPRETACIÓN:

Como se observa en el cuadro comparativo de las alturas piezométricas en los distintos piezómetros del bofedal Putani, se puede ver que las alturas en los piezómetros 8, 9 y SIN TAPA son mayores con relación al nivel piezométrico del piezómetro 10. Y como se puede apreciar en el mapa de distribución de piezómetros en este bofedal, el piezómetro 10 se encuentra en el extremo oeste del bofedal, porque se puede afirmar que el flujo del agua subterránea es en dirección este hacia el oeste, lo cual también se podrá ver en los mapas piezométricos del bofedal que serán presentados más adelante.



Fotografías 23 - 24. Medición de altura piezométrica en tubos piezómetros.

#### 4.5.4. MAPAS PIEZOMÉTRICOS

Los mapas piezométricos, son mapas que por medio de líneas curvas (de igual valor numérico) representan la napa freática (nivel freático) de un acuífero libre o el nivel potenciométrico de un acuífero confinado.

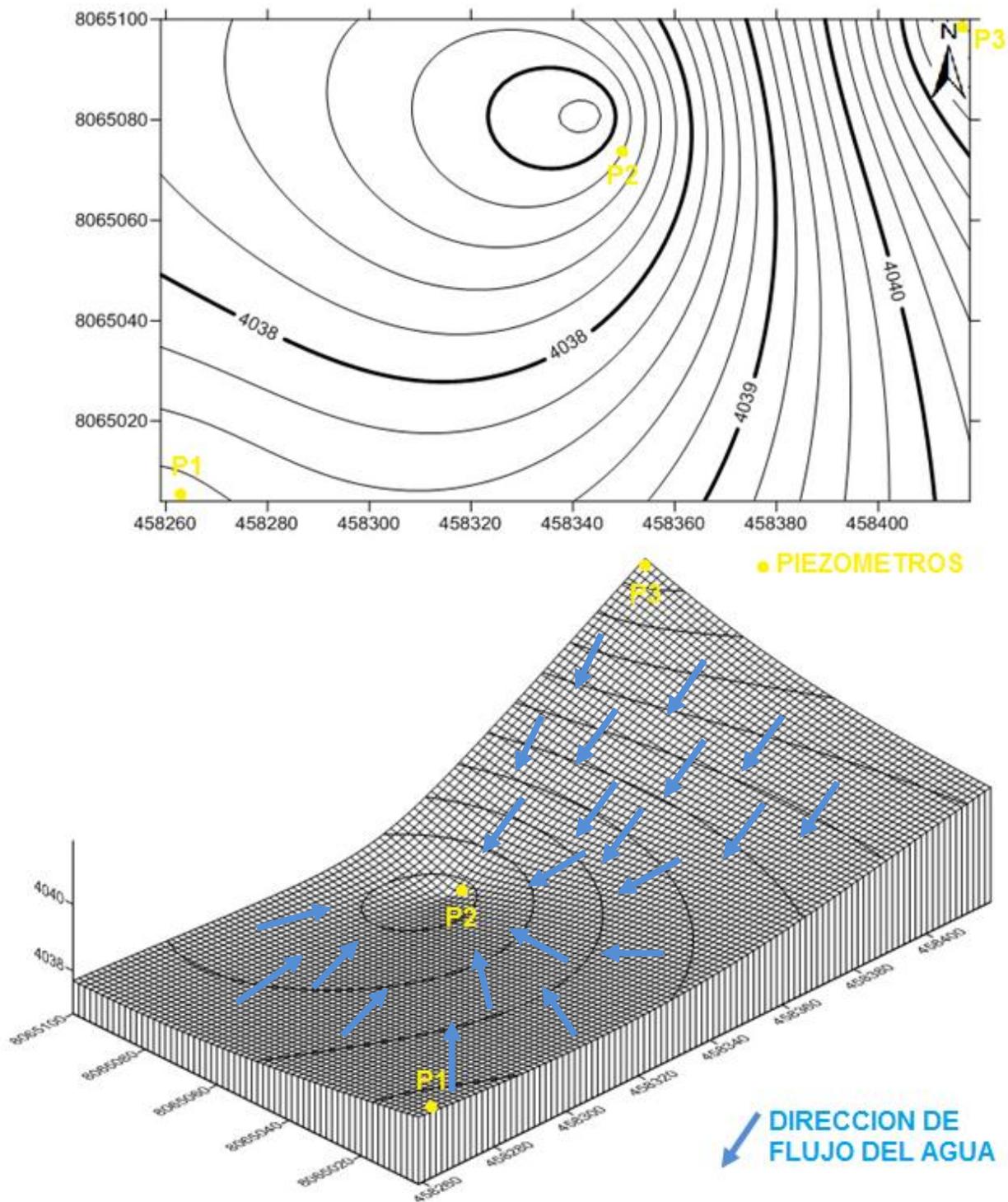
Estos mapas que son representaciones 2D de superficies 3D y que también pueden ser vistas como diagramas de bloque (perspectiva) o en vistas computarizadas 3D, son una de las herramientas más básicas en hidrogeología (Cortez, 2013).

Para elaborar los mapas piezométricos se trabajó en cada uno de los bofedales y se hizo una interpolación lineal con la ayuda del software SURFER, entre las alturas piezométricas en cada bofedal para cada uno de los meses en los que se realizó el monitoreo.

A continuación se presentan los mapas piezométricos elaborados para cada bofedal en cada uno de los meses que se realizó el monitoreo de la altura piezométrica.

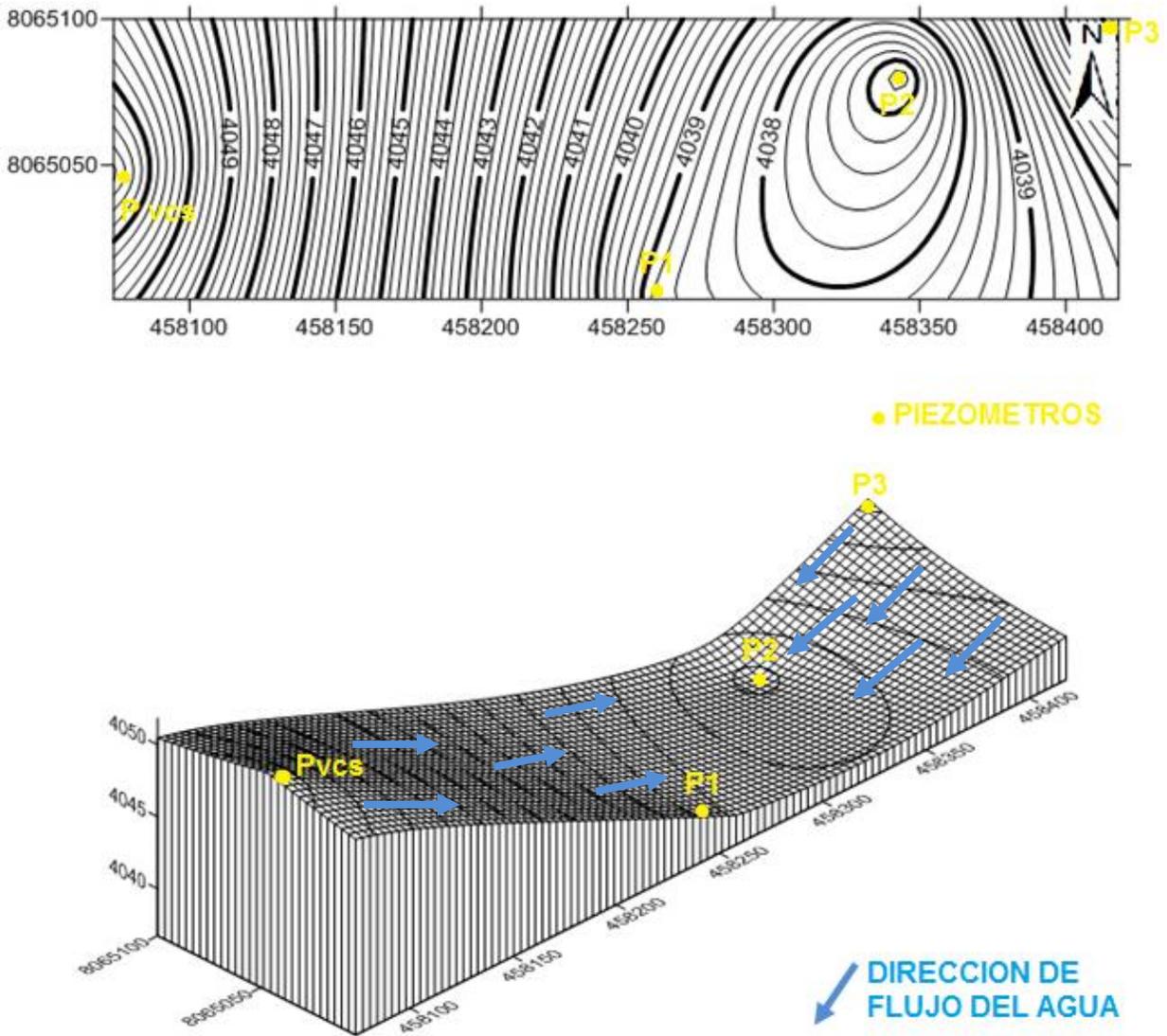
### 4.5.4.1. BOFEDAL CURAJPUCHO

#### 4.5.4.1.1. OCTUBRE DE 2013



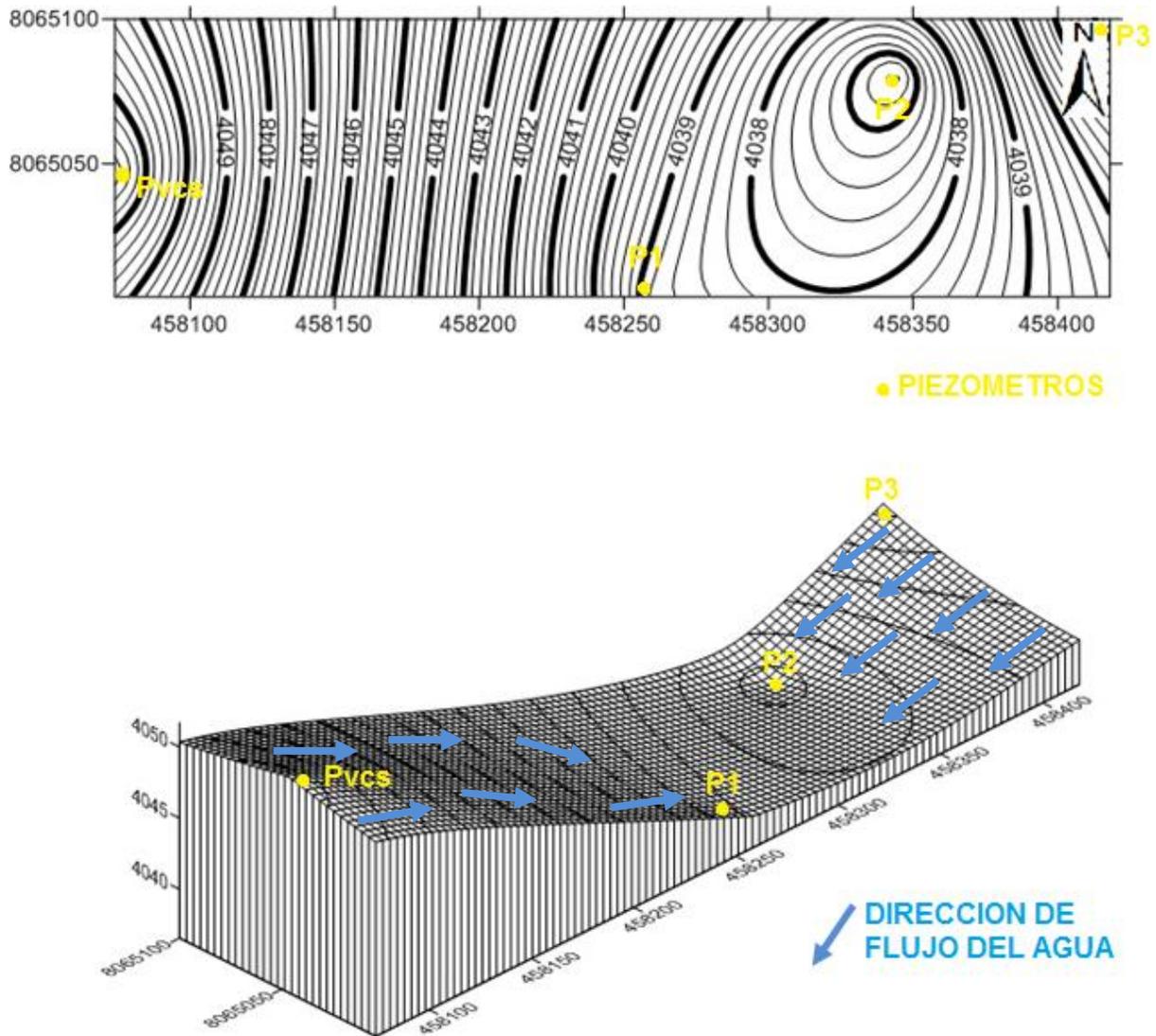
Mapas 19 - 20. Mapas Piezométricos - Bofedal Curajpucho - Octubre 2013

4.5.4.1.2. DICIEMBRE DE 2013



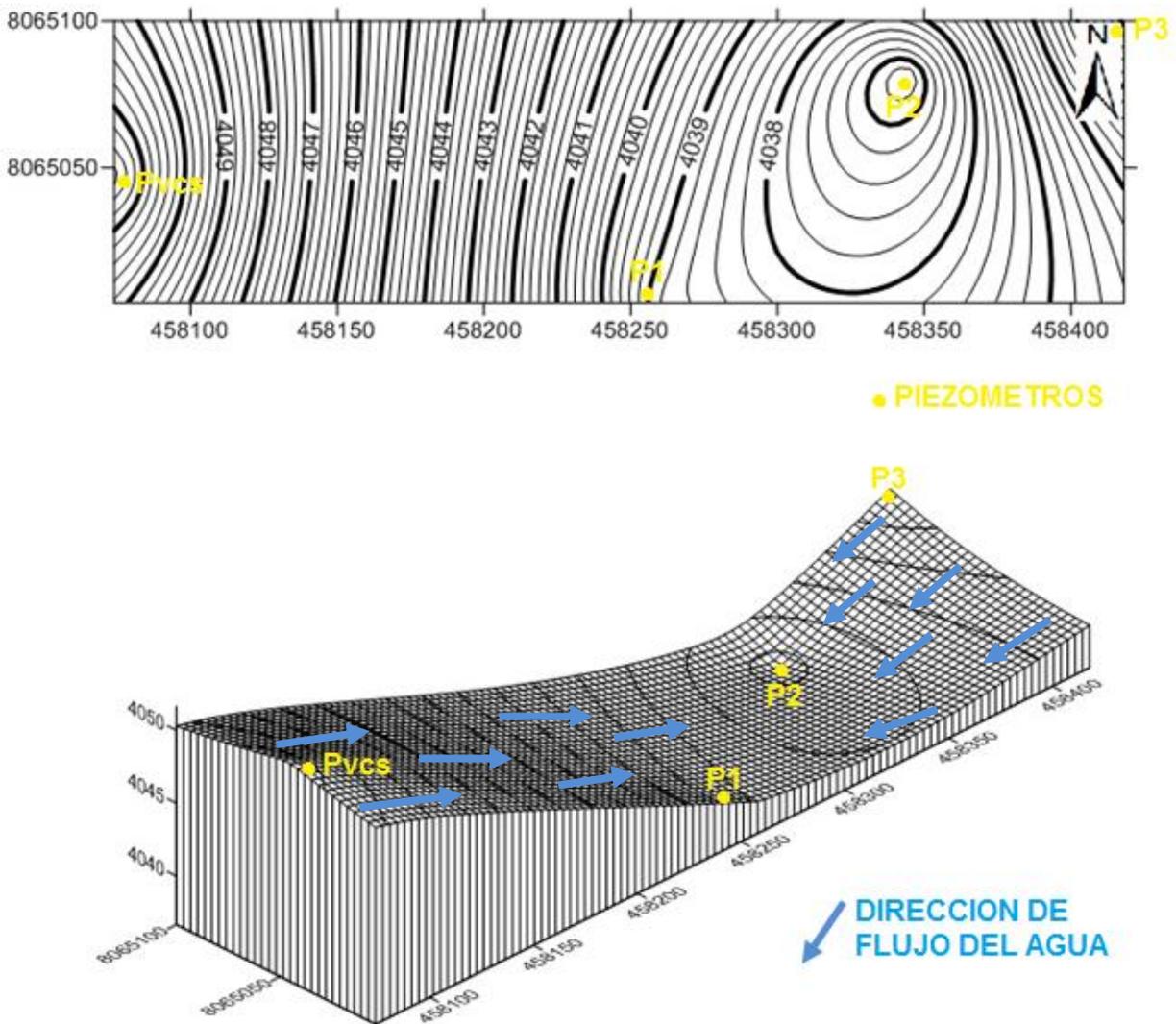
Mapas 21 - 22. Mapas Piezométricos - Bofedal Curajpucho - Diciembre 2013

4.5.4.1.3. FEBRERO DE 2014



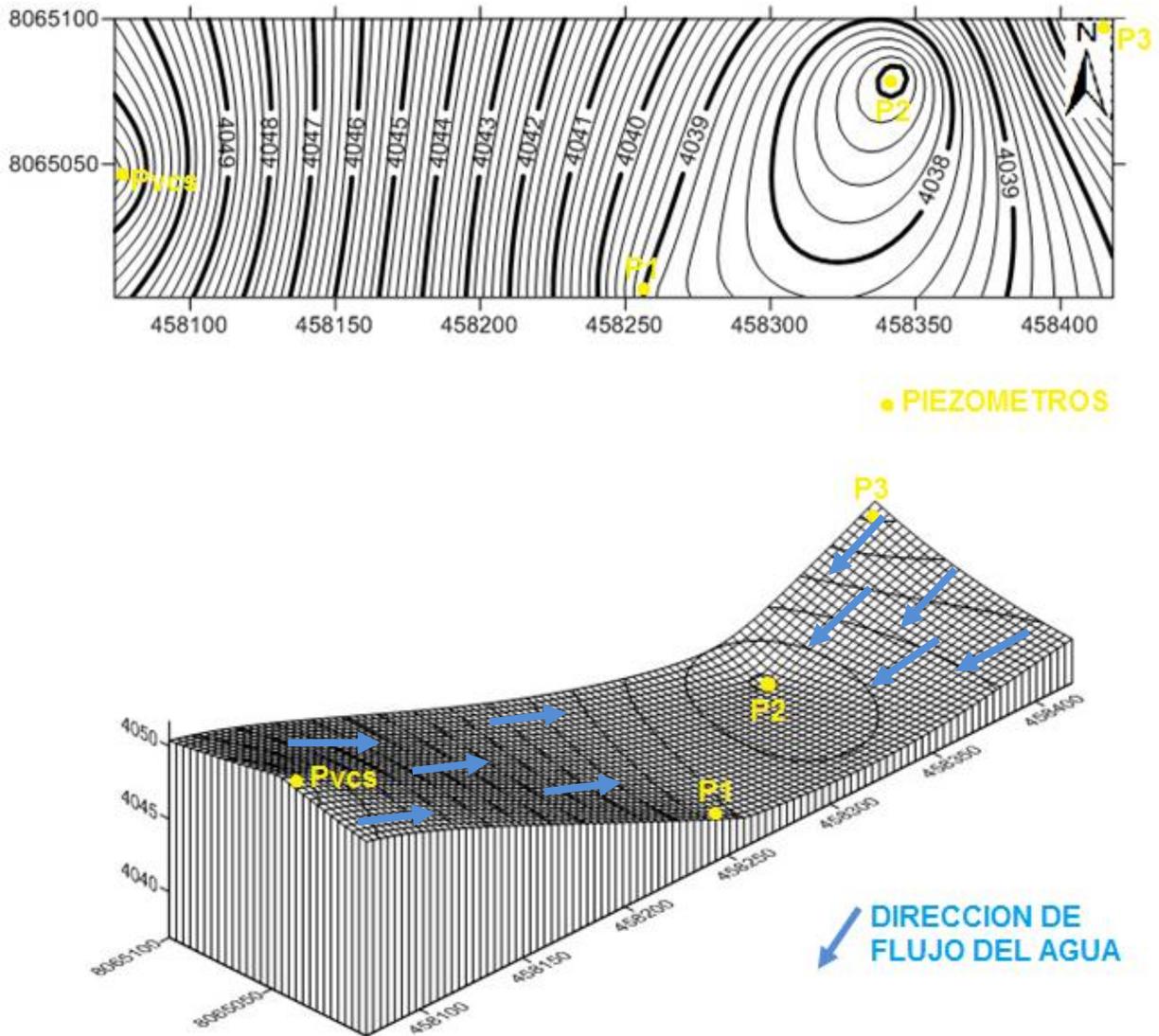
Mapas 23 - 24. Mapas Piezométricos - Bofedal Curajpucho - Febrero 2014

4.5.4.1.4. MARZO DE 2014



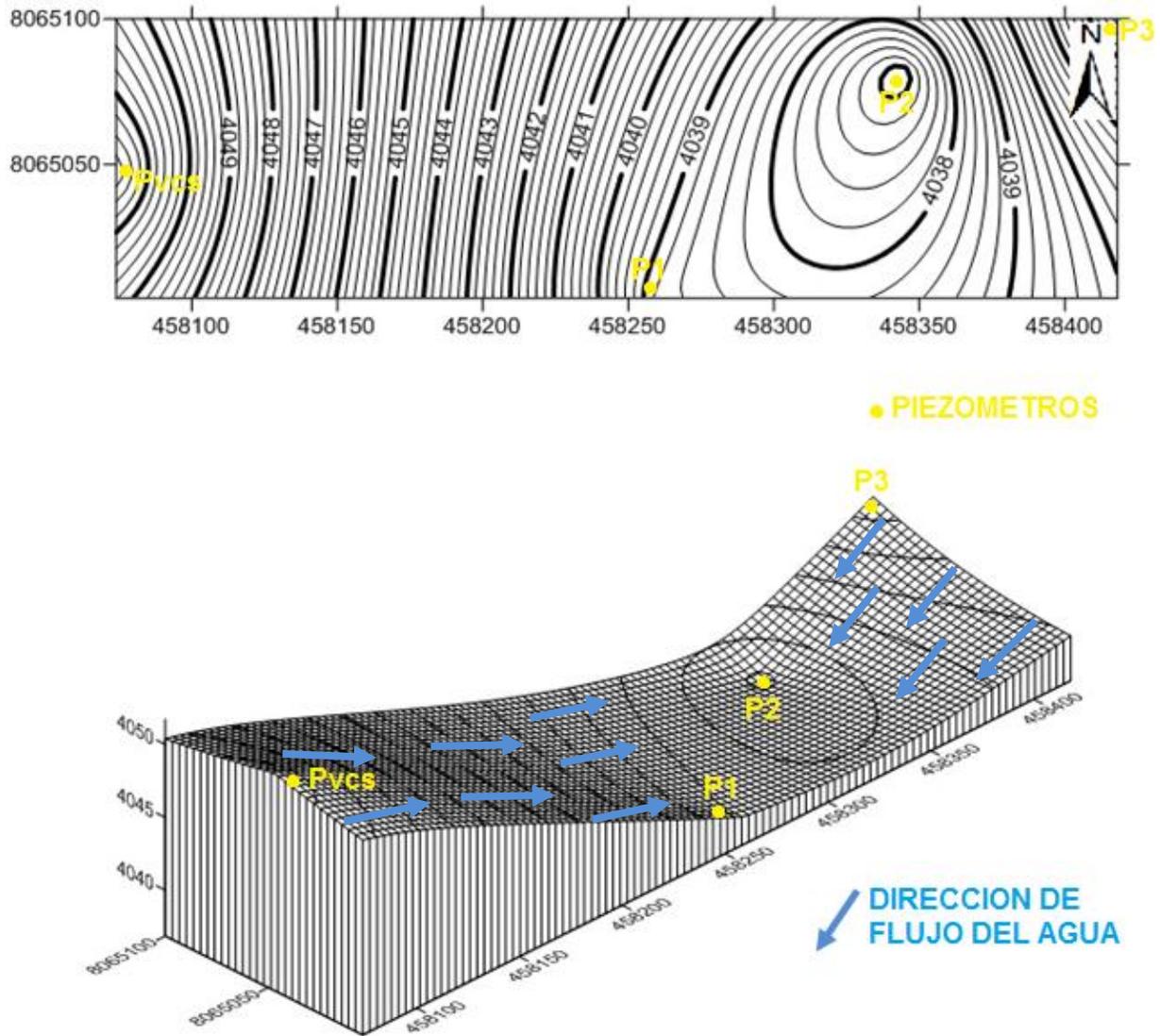
Mapas 25- 26. Mapas Piezométricos - Bofedal Curajpucho - Marzo 2014

4.5.4.1.5. JUNIO DE 2014



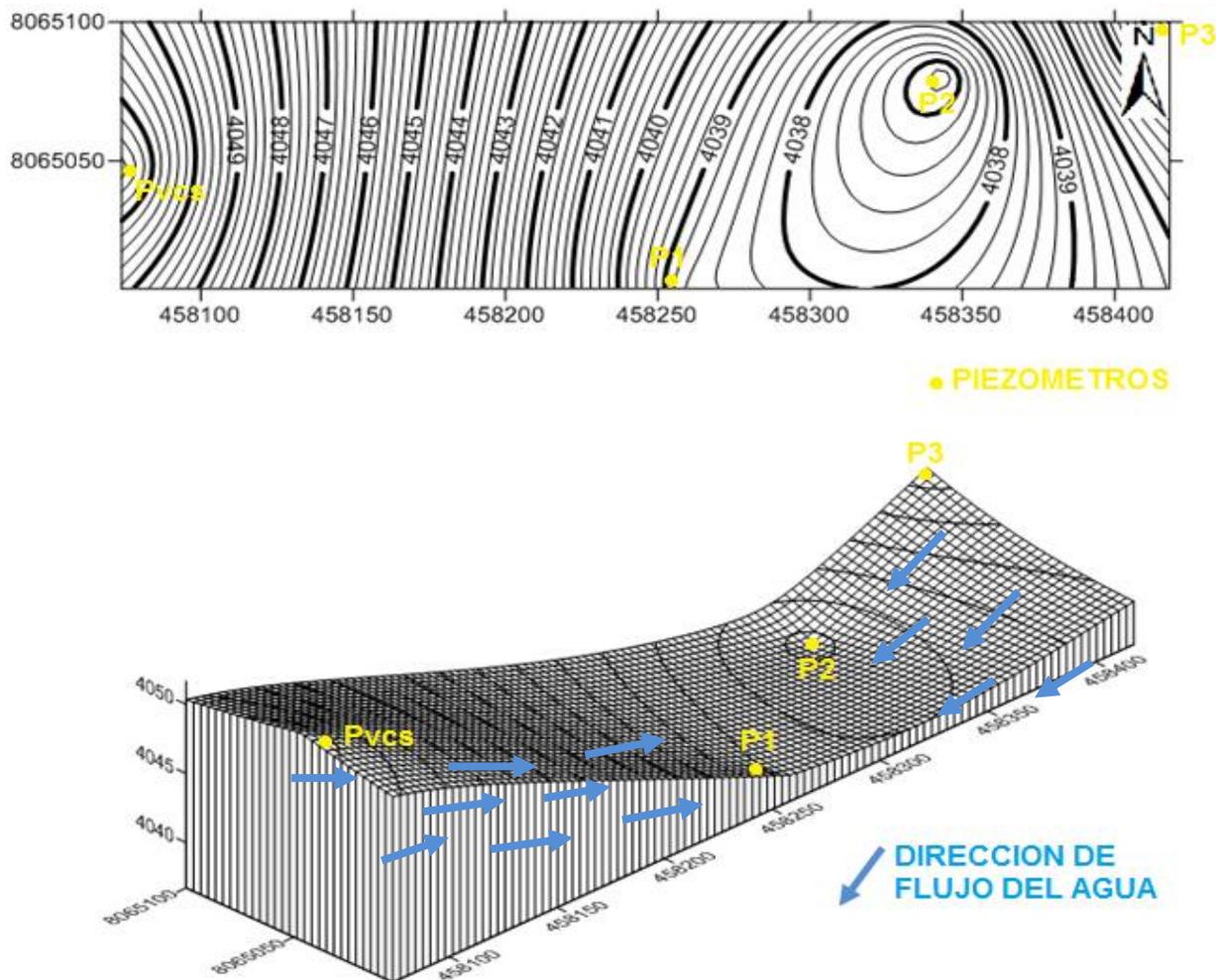
Mapas 27 - 28. Mapas Piezométricos - Bofedal Curajpucho - Junio 2014

4.5.4.1.6. JULIO DE 2014



Mapas 29 -30. Mapas Piezométricos - Bofedal Curajpucho - Julio 2014

#### 4.5.3.1.7. SEPTIEMBRE DE 2014



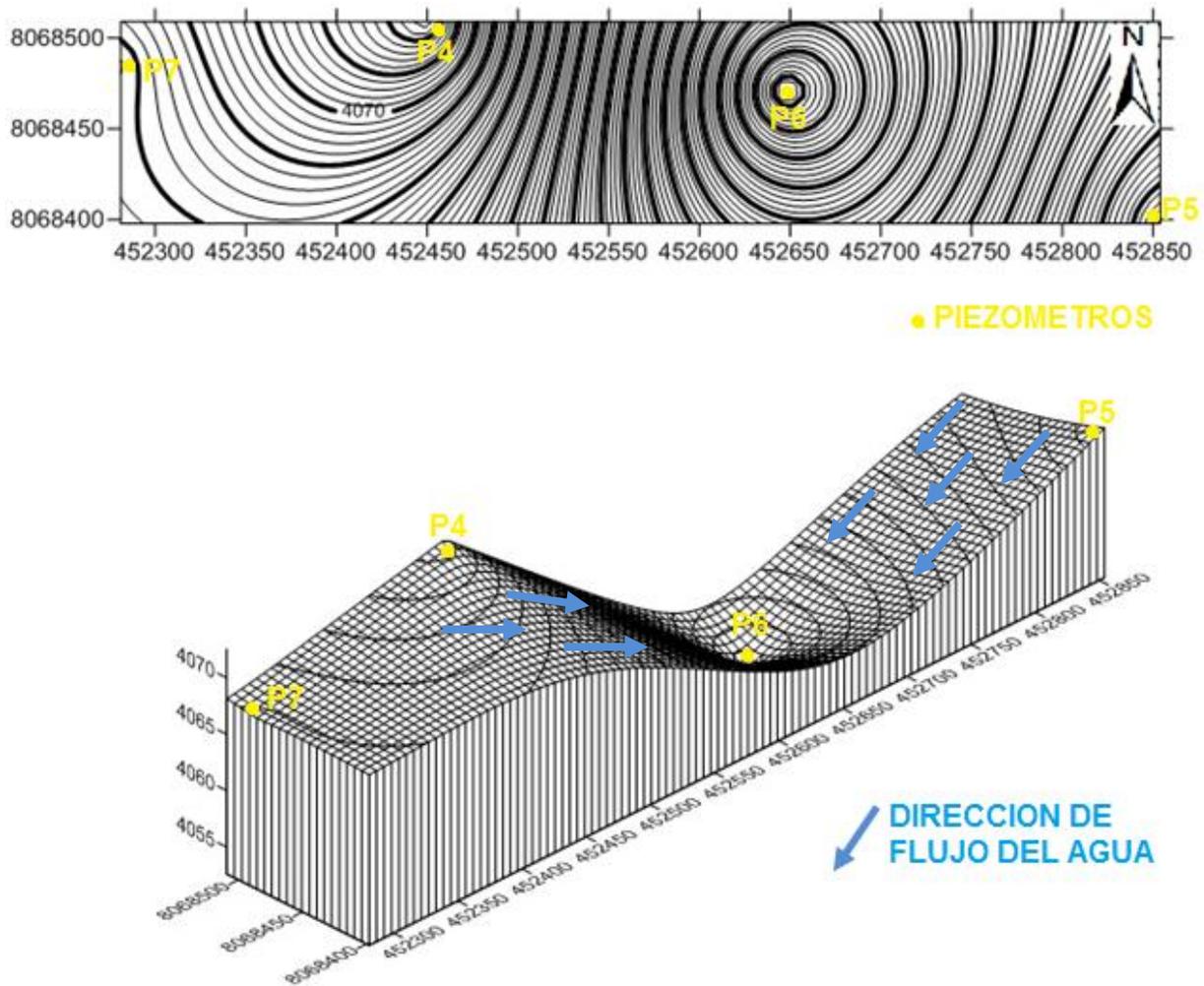
Mapas 31 - 32. Mapas Piezométricos - Bofedal Curajpucho - Septiembre 2014

#### 4.5.4.1.8. INTERPRETACIÓN DE MAPAS PIEZOMÉTRICOS - BOFEDAL CURAJPUCHO

En los mapas piezométricos realizados para cada mes en los que se realizó el monitoreo en el bofedal Curajpucho se puede apreciar que la altura piezométrica medida tiene variaciones máximas de hasta 70 centímetros como en el piezómetro VCS donde se observa una mayor variación en la altura piezométrica, donde la dirección de flujo del agua subterránea es hacia el centro del acuífero. En el centro del bofedal donde se encuentra el piezómetro 2 se observa una menor altura piezométrica, siendo los piezómetros P1, P2 y VCS, que se encuentran hacia los extremos este y oeste con mayor altura piezométrica, teniendo más agua por ser la zona de recarga del acuífero..

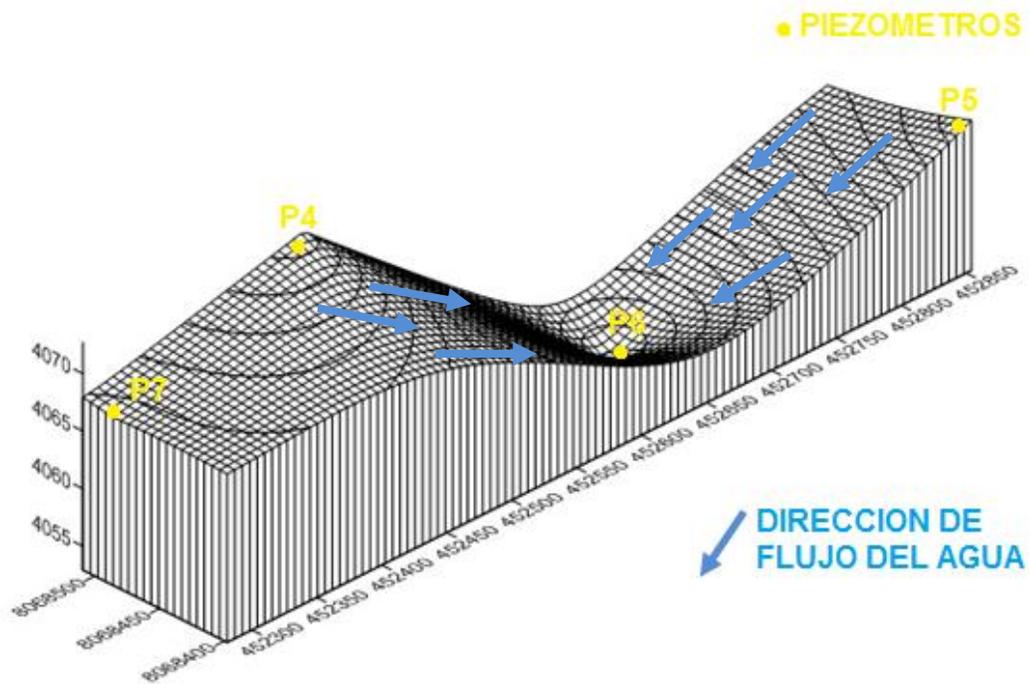
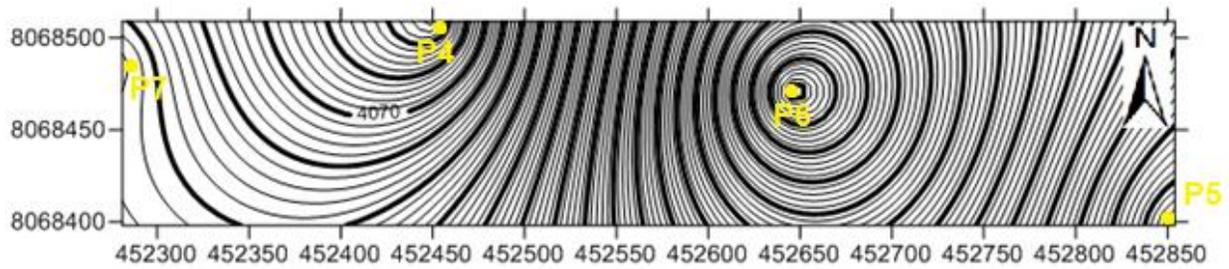
#### 4.5.4.2. BOFEDAL JALARU

##### 4.5.4.2.1. OCTUBRE DE 2013



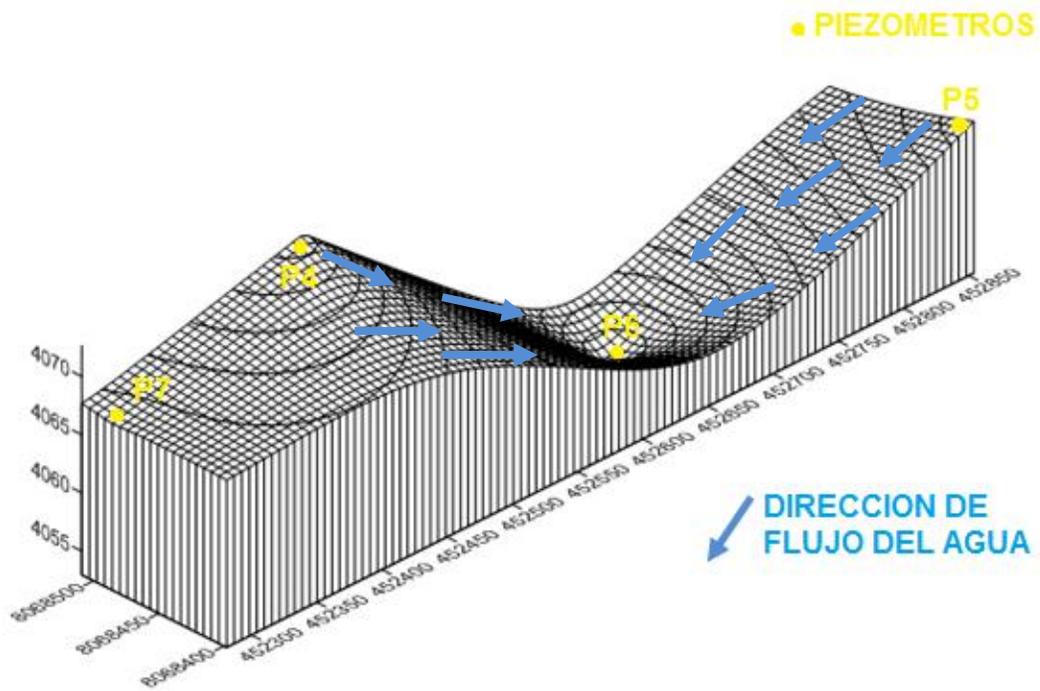
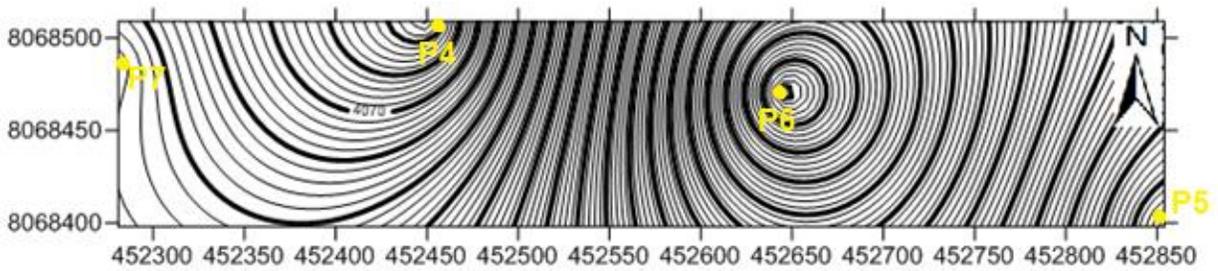
Mapas 33 - 34. Mapas Piezométricos - Bofedal Jalaru - Octubre 2013

4.5.4.2.2. DICIEMBRE DE 2013



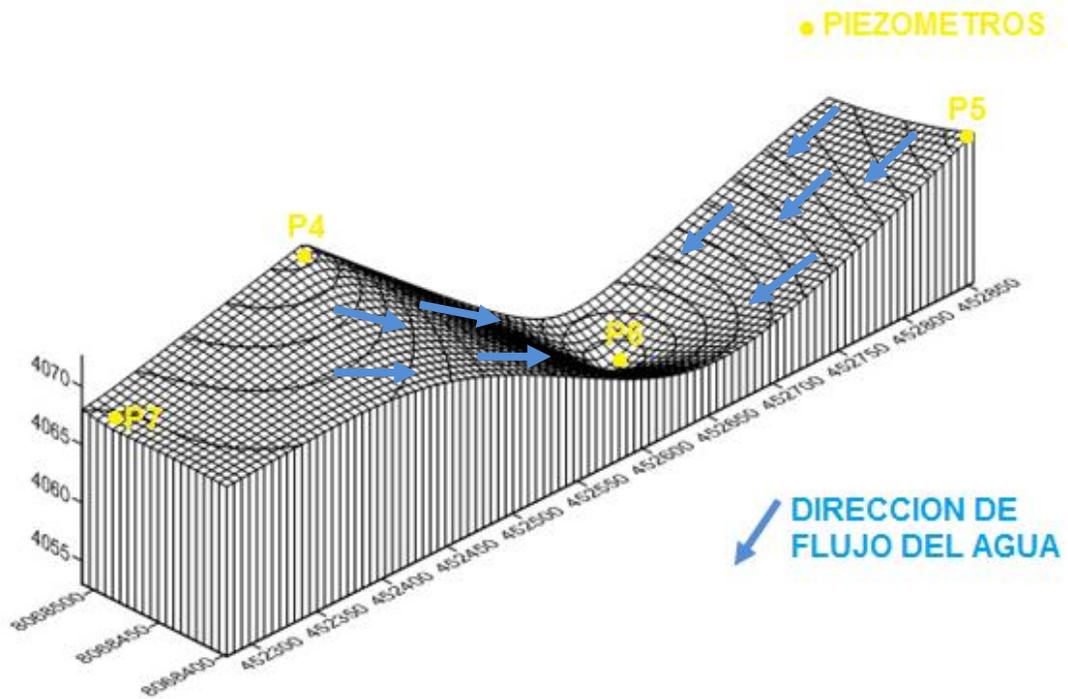
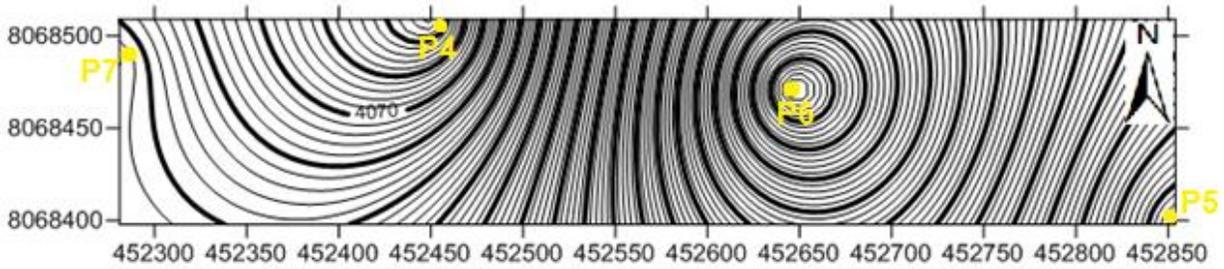
Mapas 35 – 36. Mapas Piezométricos - Bofedal Jalaru - Diciembre 2013

4.5.4.2.3. FEBRERO DE 2014



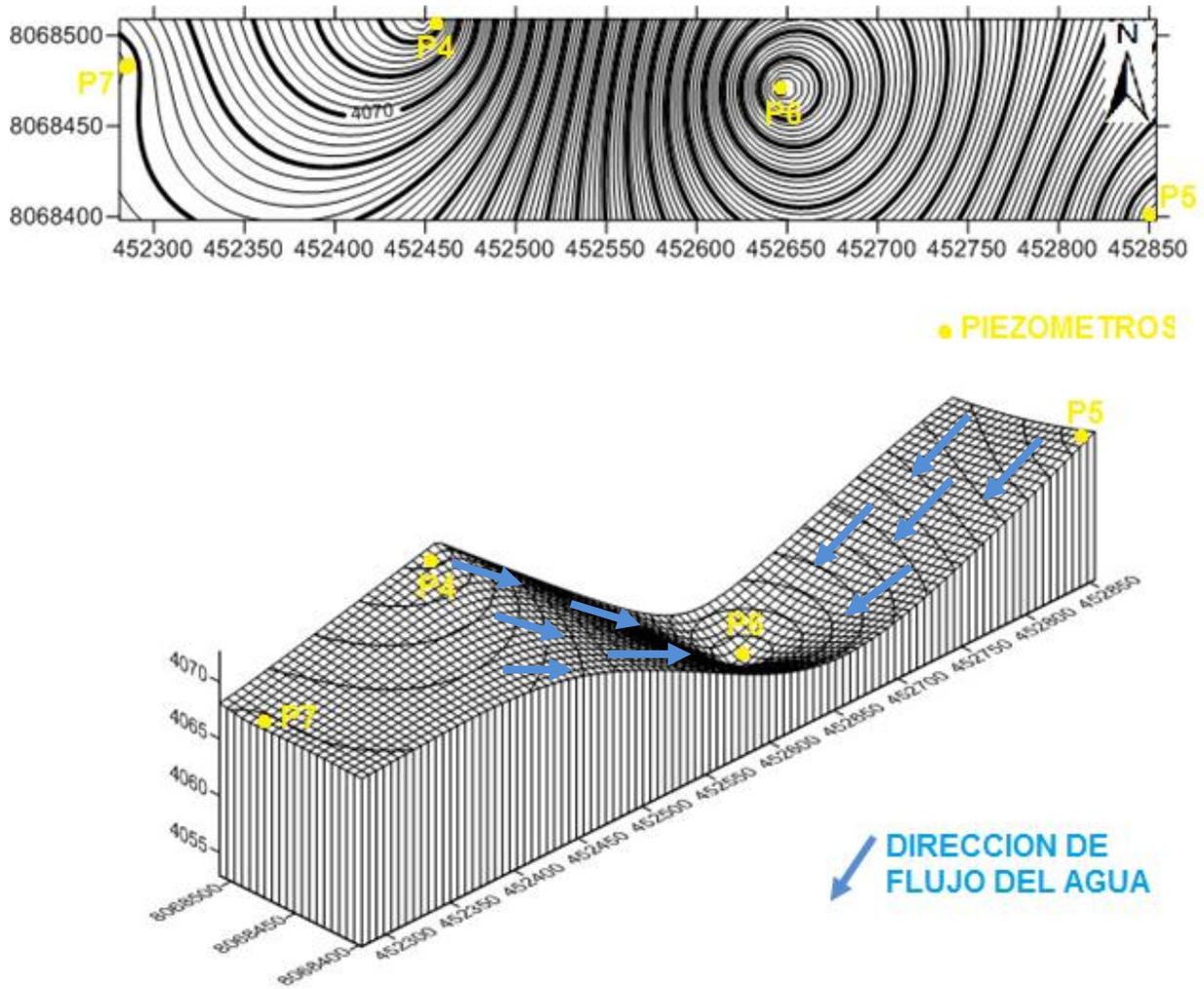
Mapas 37 - 38. Mapas Piezométricos - Bofedal Jalaru - Febrero 2014

4.5.4.2.4. MARZO DE 2014



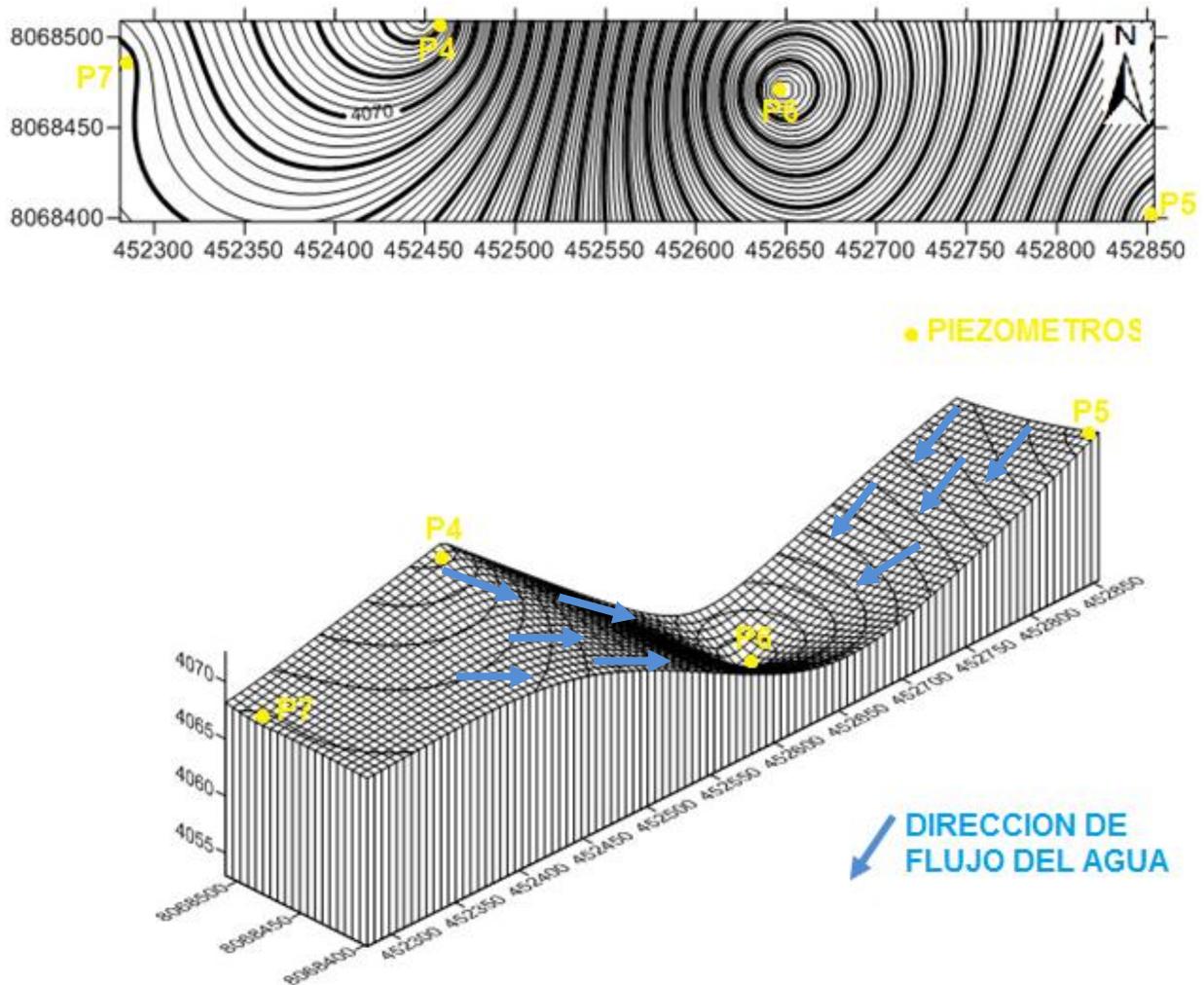
Mapas 39 - 40. Mapas Piezométricos - Bofedal Jalaru - Marzo 2014

4.5.4.2.5. JUNIO DE 2014



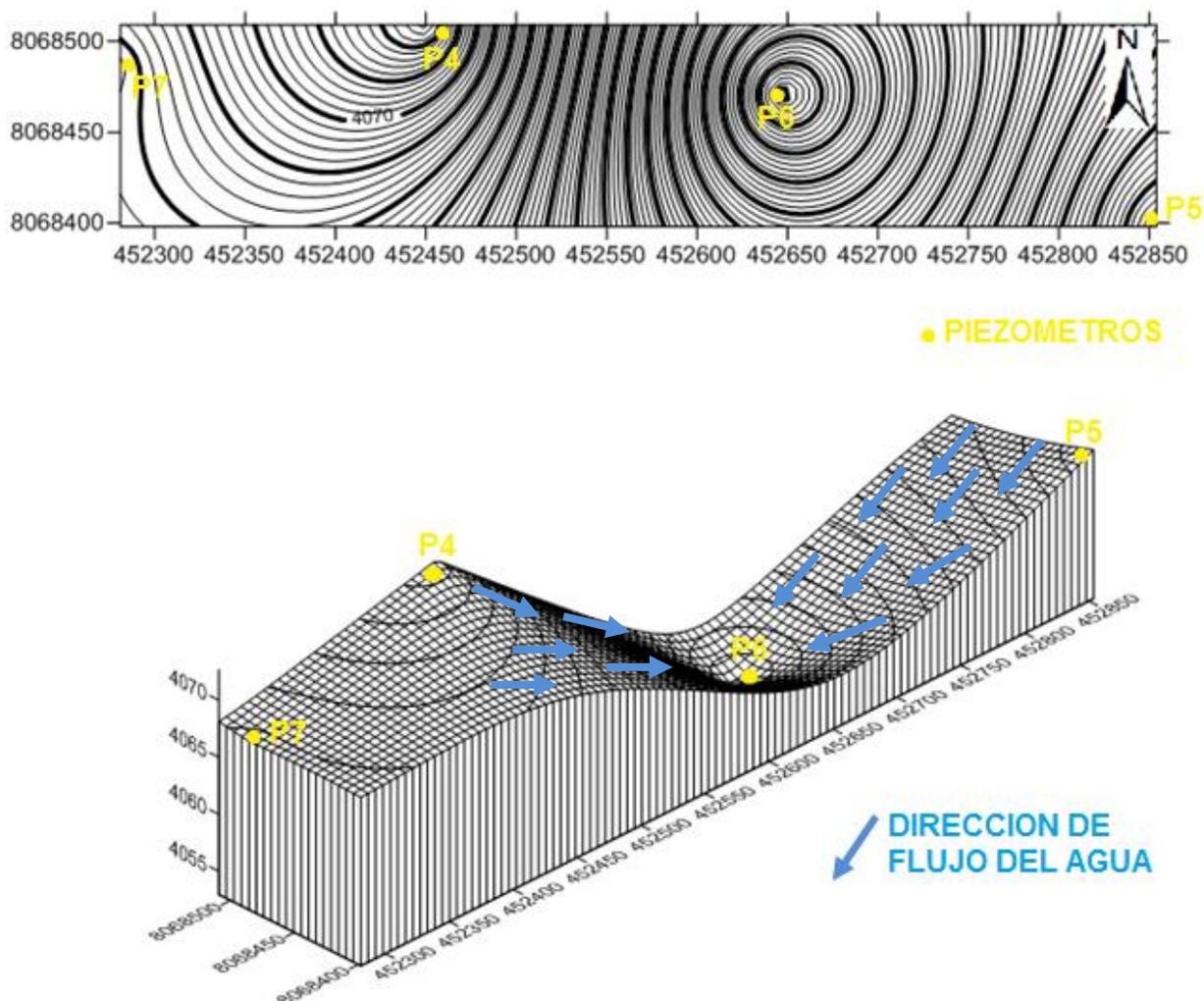
Mapas 41 - 42. Mapas Piezométricos - Bofedal Jalaru - Junio 2014

4.5.4.2.6. JULIO DE 2014



Mapas 43 - 44. Mapas Piezométricos - Bofedal Jalaru - Julio 2014

#### 4.5.4.2.7. SEPTIEMBRE DE 2014



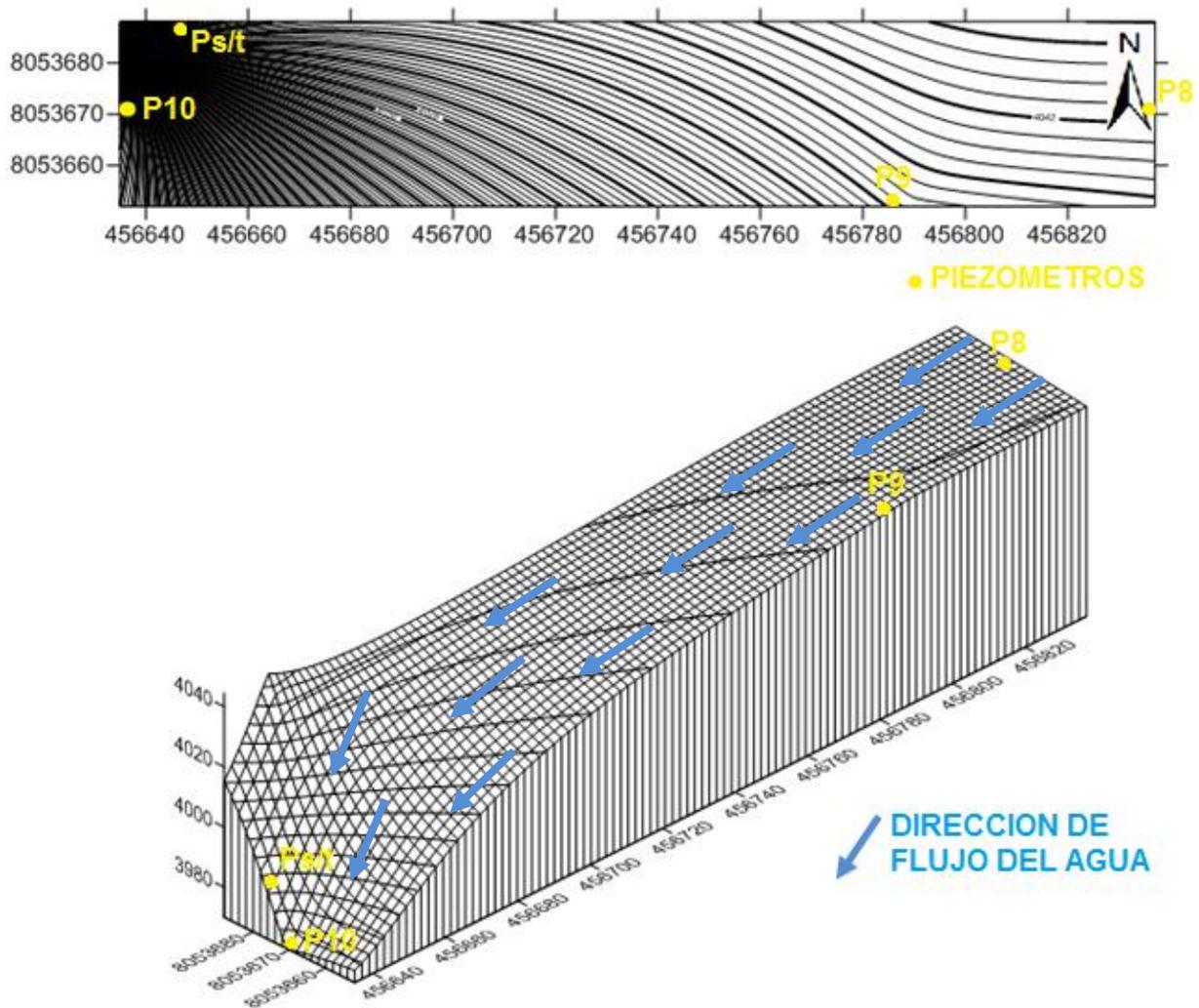
Mapas 45 - 46. Mapas Piezométricos - Bofedal Jalaru - Septiembre 2014

#### 4.5.4.2.8. INTERPRETACIÓN DE MAPAS PIEZOMÉTRICOS - BOFEDAL JALARU

En los mapas piezométricos elaborados para el bofedal Jalaru, se puede apreciar que las variaciones mensuales en la altura piezométrica varía entre 15 hasta 50 centímetros por lo que hay variaciones estacionales en las diferentes épocas del año y en general se puede observar que las zonas donde existe mayor acumulación de agua subterránea en este bofedal es en los bordes este y oeste del mismo y que el agua subterránea sigue su curso hacia el centro del bofedal hacia donde se encuentra el piezómetro 6 el cual tiene una altura piezométrica menor con relación a los otros piezómetros y que se encuentra cercano al centro del bofedal y por tanto el agua subterránea se dirige hacia esta zona.

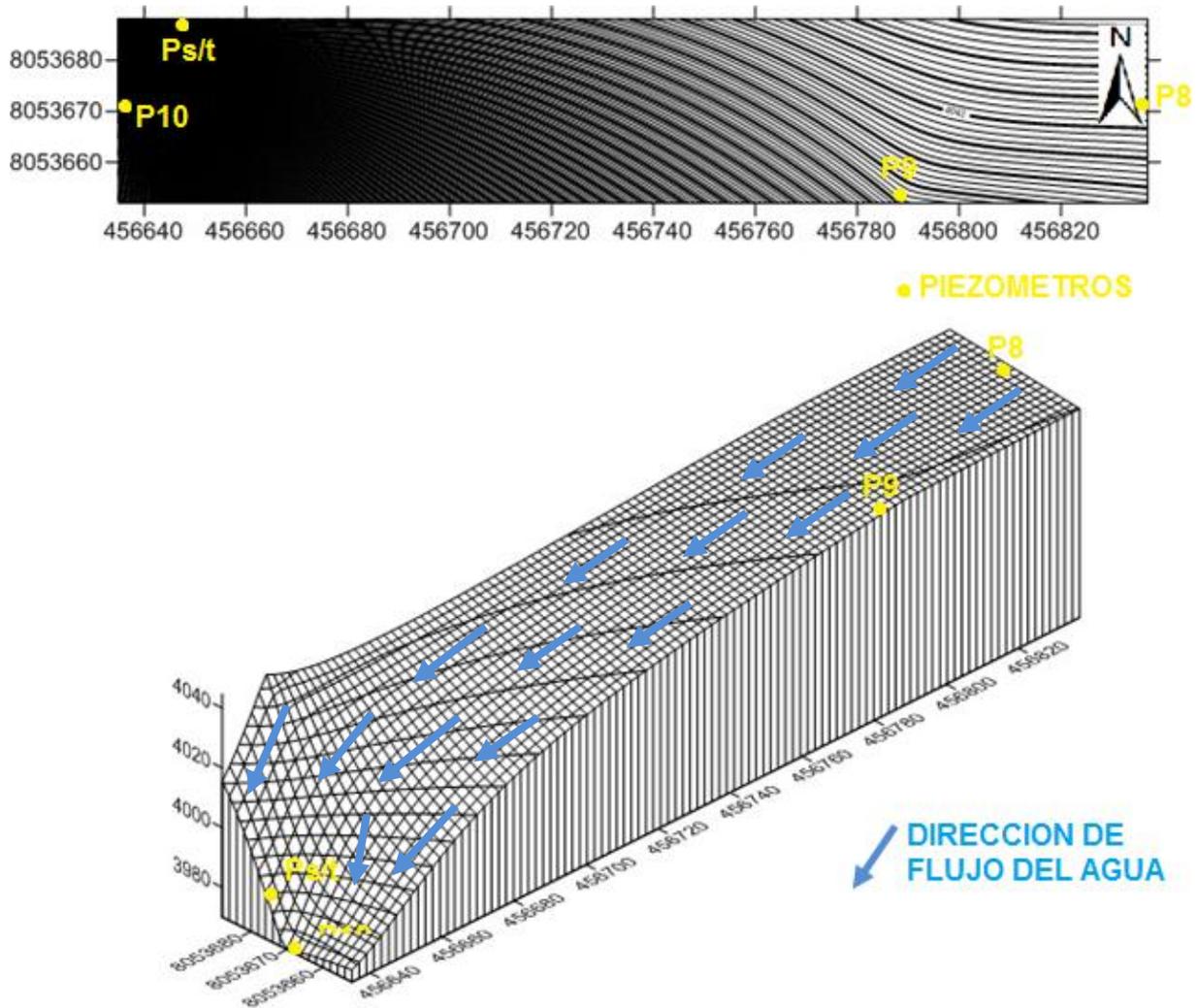
### 4.5.4.3. BOFEDAL PUTANI

#### 4.5.4.3.1. OCTUBRE DE 2013



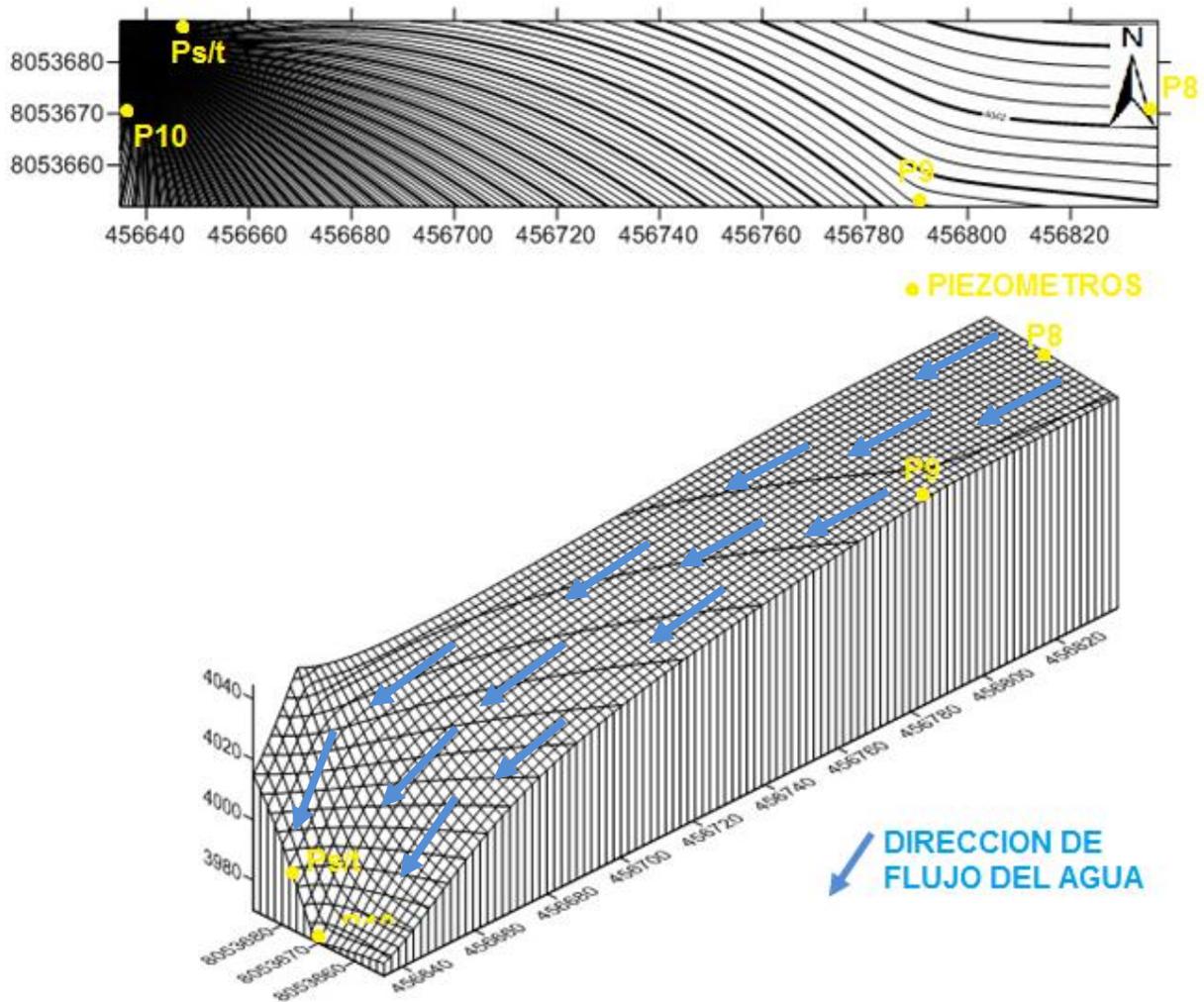
Mapas 47 - 48. Mapas Piezométricos - Bofedal Putani - Octubre 2013

4.5.4.3.2. DICIEMBRE DE 2013



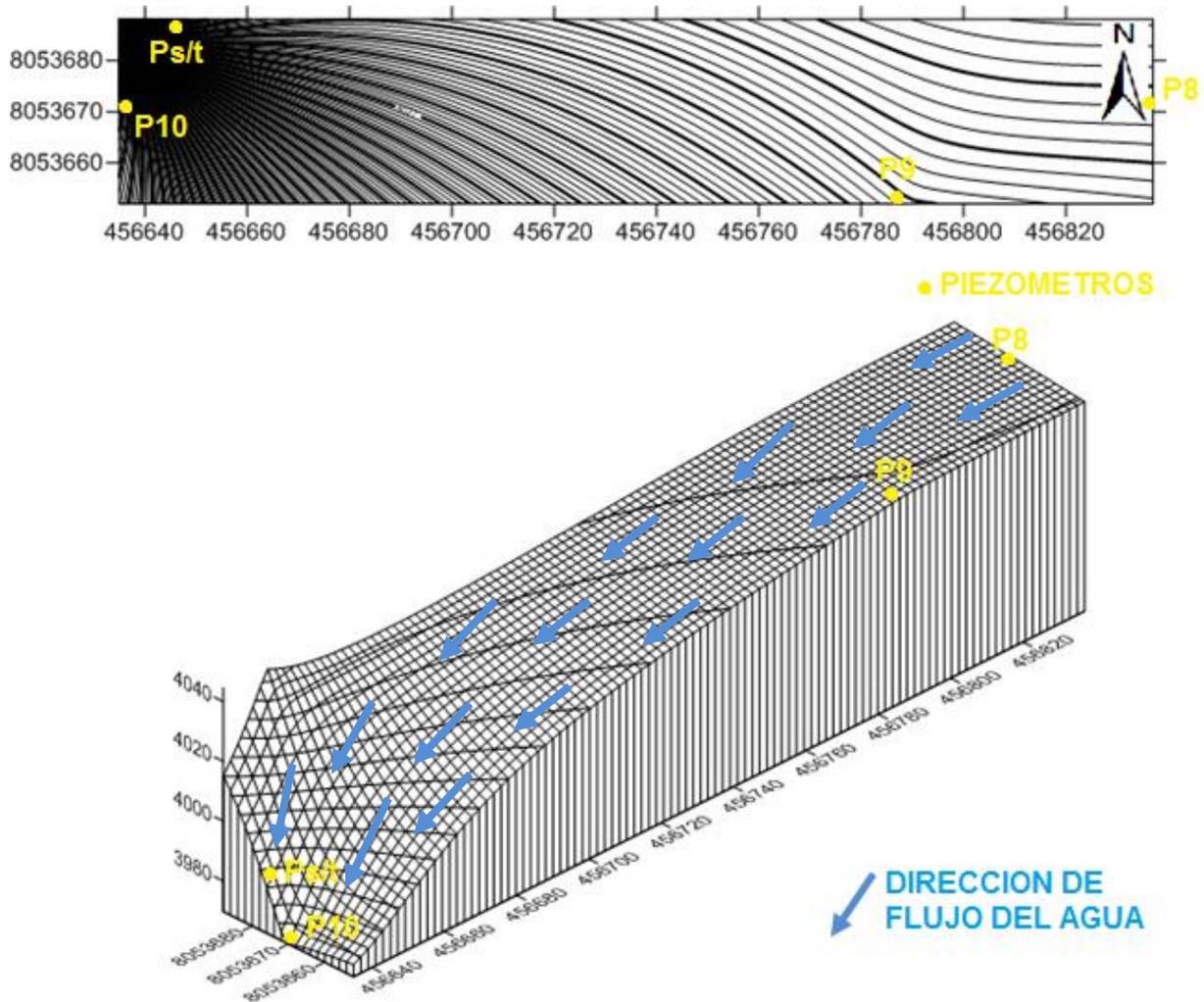
Mapas 49 - 50. Mapas Piezométricos - Bofedal Putani - Diciembre 2013

4.5.4.3.3. FEBRERO DE 2014



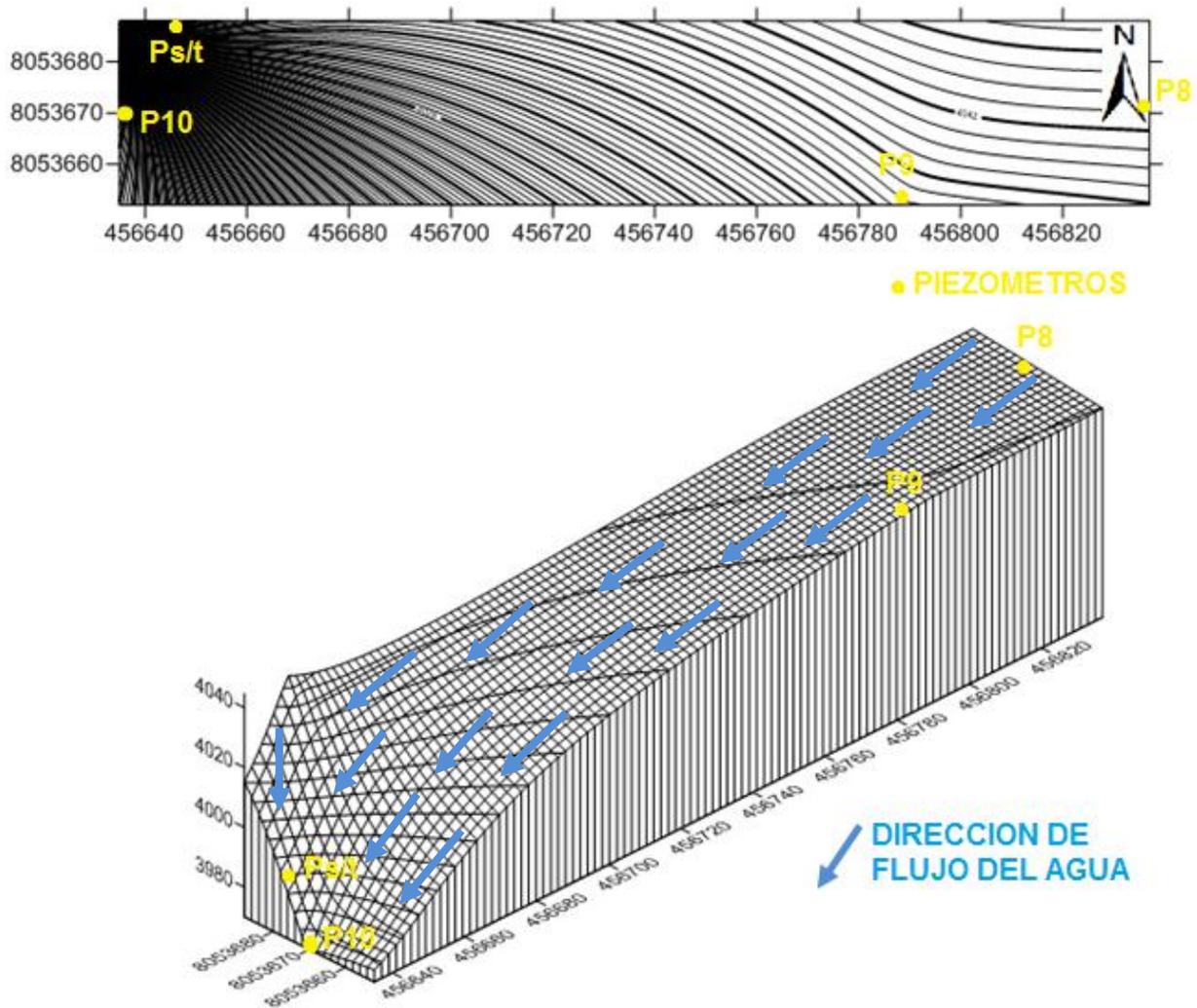
Mapas 51 - 52. Mapas Piezométricos - Bofedal Putani - Febrero 2014

4.5.4.3.4. MARZO DE 2014



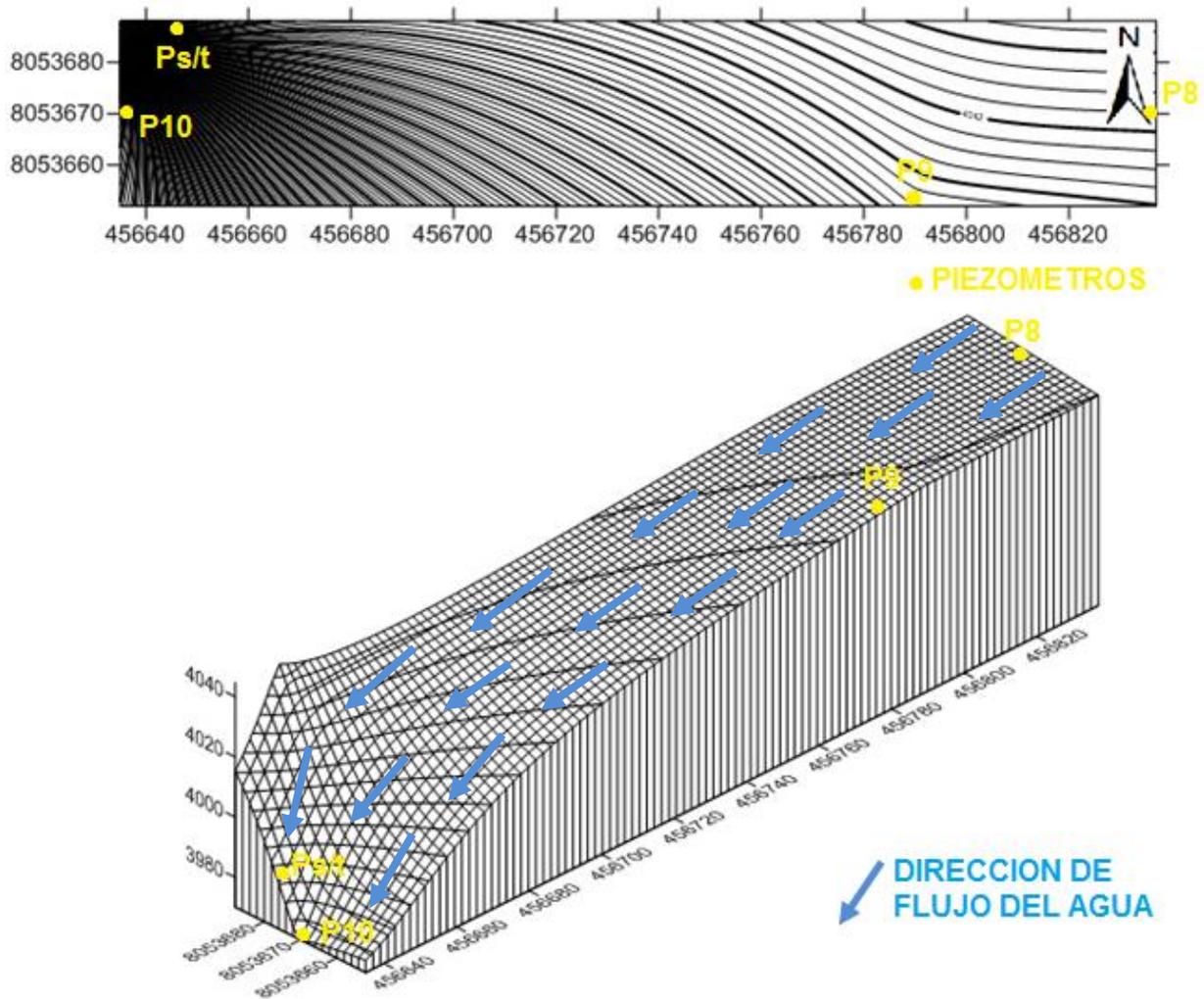
Mapas 53 - 54. Mapas Piezométricos - Bofedal Putani - Marzo 2014

4.5.4.3.5. JUNIO DE 2014



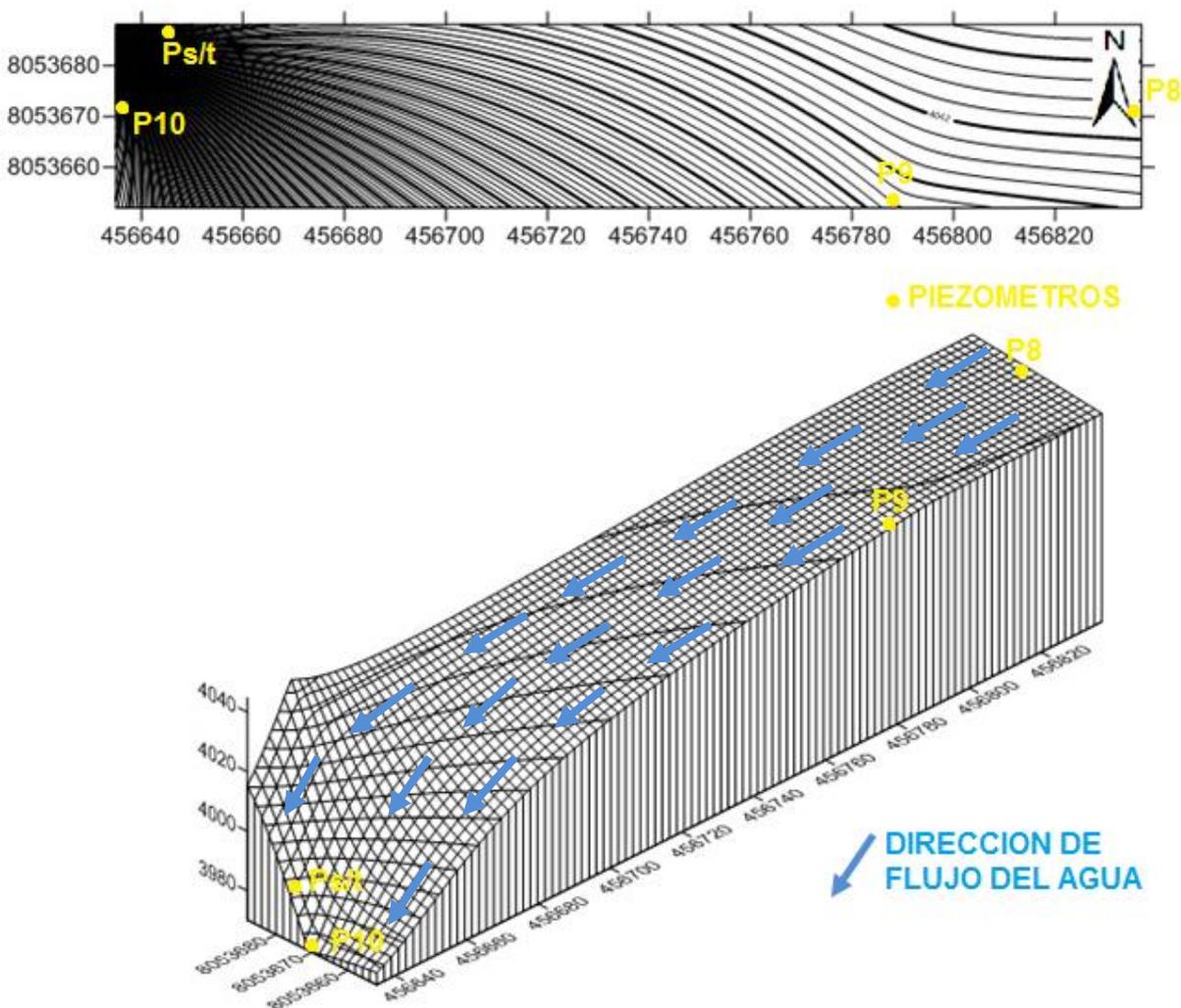
Mapas 55 - 56. Mapas Piezométricos - Bofedal Putani - Junio 2014

4.5.4.3.6. JULIO DE 2014



Mapas 57 - 58. Mapas Piezométricos - Bofedal Putani - Julio 2014

#### 4.5.4.3.7. SEPTIEMBRE DE 2014



Mapas 59 - 60. Mapas Piezométricos - Bofedal Putani - Septiembre 2014

#### 4.5.4.3.8. INTERPRETACIÓN DE MAPAS PIEZOMÉTRICOS - BOFEDAL PUTANI

En los mapas piezométricos del bofedal Putani se observa que las variaciones en las alturas piezométricas, en los meses en los cuales se realizó el monitoreo, llegan a variar entre 30 a 40 centímetros en los diferentes piezómetros instalados en este bofedal y en un régimen general se puede decir que el curso de las aguas subterráneas van en dirección este hacia el oeste, lo cual es constatado debido a que la altura del agua en el piezómetro 10 es menor con relación a los otros piezómetros y este se encuentra en el extremo este del bofedal por lo que el agua contenida en los bofedales tendría esa dirección de flujo.

**NOTA:**

Como se mencionó tanto en las interpretaciones de los gráficos de las alturas piezométricas, así como en las interpretaciones de los mapas piezométricos, en los bofedales estudiados se pudo apreciar que las precipitaciones fueron escasas en los meses de febrero y marzo, lo que produjo que una buena parte de los bofedales se encuentren secos llegando a generar grietas de desecación que son estructuras poligonales irregulares en la superficie compacta que se generan al perder agua o humedad en los periodos de sequía y es por este motivo que en estos meses en todos los piezómetros se observó disminución de la altura piezométrica.



Fotografías 25 -26. Grietas de desecación en los bofedales - Febrero 2014

#### 4.6. HIDROGRAMAS

Un hidrograma es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrogeológica tal como: nivel de agua, caudal, carga de sedimentos, entre otros, para un río, arroyo, canal, o acuífero. Si bien típicamente representa el caudal frente al tiempo; esto es equivalente a decir que es el gráfico de la descarga ( $L^3/T$ ) de un flujo en función del tiempo. Estos pueden ser hidrogramas de tormenta e hidrogramas anuales, los que a su vez se dividen en perenes y en intermitentes. (Cortez, 2013).

Un hidrograma permite observar:

- Variaciones de la descarga a través de una tormenta, o a través del año hidrogeológico.
- El flujo de base o aporte al flujo de las aguas subterráneas.
- Variaciones estacionales si se grafica en periodos de uno o varios años.

En la elaboración de los hidrogramas se consideró la Altura piezométrica (metros) y la Precipitación Pluvial Mensual (mm/mes) Vs. Meses monitoreados.

Se obtuvieron datos de precipitaciones pluviales promedio de los cinco últimos años, que fue posible mediante la estación meteorológica Charaña del SENAMHI, adquiriendo los datos de su página web ([www.senamhi.gob.bo/metereologia/boletinmensualprecipitacion](http://www.senamhi.gob.bo/metereologia/boletinmensualprecipitacion)), además de datos adquiridos mediante el software Hydraccess.

MESES	PRECIPITACION MENSUAL (mm/mes)
SEPTIEMBRE	45.5
OCTUBRE	69.6
NOVIEMBRE	97.4
DICIEMBRE	127.5
ENERO	120.5
FEBRERO	46.9
MARZO	63.4
ABRIL	45.2
MAYO	31.2
JUNIO	27.4
JULIO	23.9
AGOSTO	32.7
<b>PRECIPITACION ANNUAL (mm/año)</b>	<b>731.2</b>

Tabla 18. Precipitación mensual regional promedio (últimos 5 años)

#### 4.6.1. HIDROGRAMA BOFEDAL CURAJPUCHO

En los hidrogramas se trabajó con los datos del nivel de agua de los piezómetros que se encuentran en el área de recarga del bofedal.

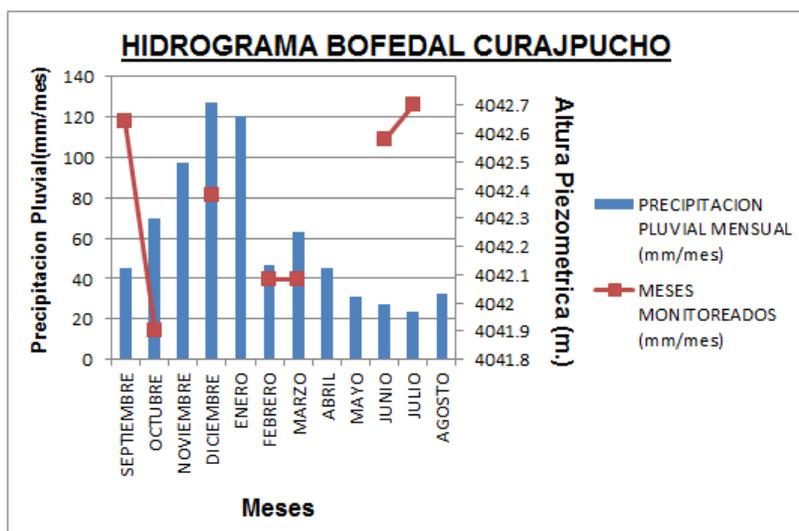


Figura 50. Hidrograma bofedal Curajpucho

### INTERPRETACIÓN:

En el hidrograma del bofedal Curajpucho se graficó la variación del nivel de agua del Piezómetro 3, en los meses monitoreados, porque este se encuentra en el área de recarga del bofedal y la precipitación pluvial promedio durante los mismos meses. En el gráfico se aprecia que entre los meses de octubre a marzo hay un comportamiento similar entre el agua que precipita y el agua de recarga del acuífero, por lo que la recarga se asocia a precipitación pluvial, pero lo que llama la atención es que durante los meses de junio y septiembre, donde las precipitaciones son bajas y el nivel de agua en los piezómetros aumenta, se dice que la recarga en el acuífero es lenta, debido a las características litológicas que condicionan que recién después de la época de lluvias haya recarga en el acuífero, además de precipitación nival en el bofedal lo que aporta agua al acuífero.

#### 4.6.2. HIDROGRAMA BOFEDAL JALARU

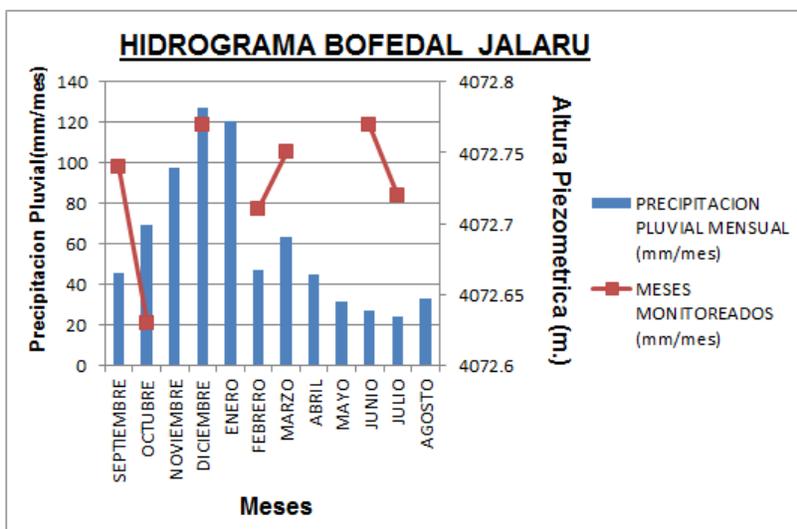


Figura 51. Hidrograma bofedal Jalaru

### INTERPRETACIÓN:

En el hidrograma del bofedal Jalaru se graficó la variación de la precipitación pluvial mensual y del nivel de agua del Piezómetro 4, por estar en el área de recarga del bofedal. Durante los meses entre octubre y marzo, considerado la época de lluvia, se aprecia una relación directa entre la precipitación y la recarga por la precipitación pluvial. En tanto que durante los meses donde las precipitaciones pluviales disminuyen y las nivales aumentan, hay aumento del nivel de agua en el acuífero, lo que da a entender que la recarga en el acuífero es lenta,

condicionada por factores litológicos, que produce que recién en estos meses se recargue de agua el acuífero.

#### 4.6.3. HIDROGRAMA BOFEDAL PUTANI

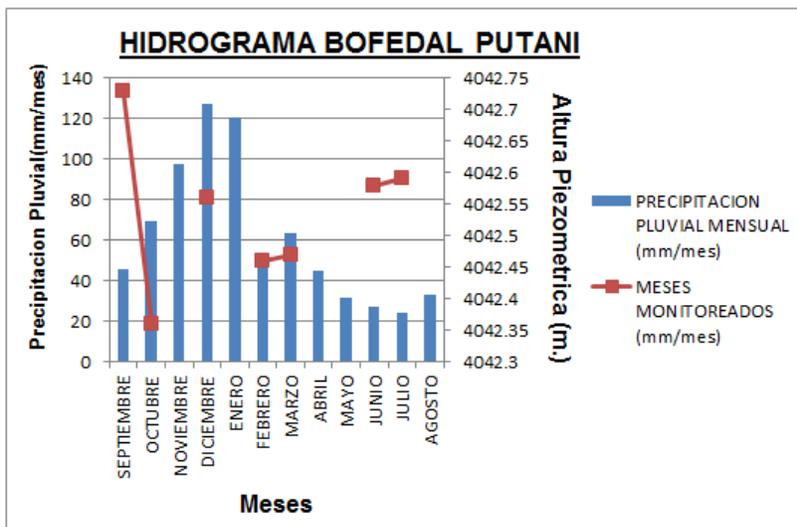


Figura 52. Hidrograma bofedal Putani

#### INTERPRETACIÓN:

En el hidrograma del bofedal Putani se graficó la variación de la precipitación pluvial mensual y del nivel de agua del Piezómetro 8, que se encuentra en el área de recarga del bofedal. En la época de lluvias comprendida entre los meses de octubre y marzo la precipitación y la recarga se produce de forma normal, mientras que en la época seca cuando las precipitaciones pluviales fueron bajas, se produjo un aumento en la altura piezométrica lo que se relaciona con una recarga lenta del acuífero, debido a las características litológicas del bofedal y la precipitación nival que se produce en estas épocas del año.

#### 4.7. RIQUEZA HIDRICA

La riqueza hídrica se define como la cantidad (volumen de agua), que se puede almacenar en un área en un lapso de tiempo determinado. (Cortez, 2013).

La riqueza hídrica se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$R.H. (l / año) = \frac{\text{Área de la subcuenca (m}^2) * \text{Precipitación (l / m}^2 * \text{año)}}{1000}$$

Para el cálculo de la riqueza hídrica de los bofedales se consideró la precipitación anual promedio de los últimos cinco años con los datos presentados en la siguiente tabla:

MESES	PRECIPITACION MENSUAL (mm/año)
ENERO	120.5
FEBRERO	46.9
MARZO	63.4
ABRIL	45.2
MAYO	31.2
JUNIO	27.4
JULIO	23.9
AGOSTO	32.7
SEPTIEMBRE	45.5
OCTUBRE	69.6
NOVIEMBRE	97.4
DICIEMBRE	127.5
PRECIPITACION ANUAL (mm/año)	731.2

Tabla 19. Precipitación anual regional promedio (últimos 5 años)

El área de la subcuenca de los ríos Caño y Putani es = **176 950 024,34 m<sup>2</sup>**. Y la precipitación = **731.2 l / m<sup>2</sup> \* año**.

Por lo tanto la Riqueza Hídrica de la subcuenca de los ríos Caño y Putani es:

**129 385 857, 79 l / año**

Si consideramos que los bofedales estudiados representan el 0.1% de área de la subcuenca podemos decir que la riqueza hídrica en los tres bofedales es:

**129 385, 85 l / año.**

#### 4.8. MEDICIÓN DE CAUDALES

En cada uno de los viajes realizados al área de estudio se procedió a realizar la medición del caudal en los ríos Caño y Putani con un "Molinete", el cual es un aparato constituido de paletas o conchas móviles, las cuales, impulsadas por el agua, dan un número de revoluciones proporcional a la velocidad de la corriente.



Fotografía 27. Molinete.

El molinete utilizado para la medición de los caudales en los ríos se conoce como "Molinete de eje horizontal o de hélice".

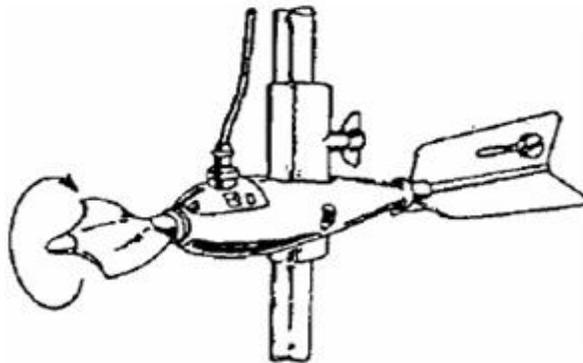


Figura 53. Eje horizontal o hélice de molinete.

Este método consiste básicamente en medir en un área transversal de la corriente, previamente determinada, las velocidades de flujo con las cuales se puede obtener luego el caudal. El lugar elegido para hacer el aforo cumplió los siguientes requisitos:

- La sección transversal debe estar bien definida y que en lo posible no se presente agradación o degradación del lecho.
- Debe tener fácil acceso.
- Debe estar en un sitio recto, para evitar las sobre elevaciones y cambios en la profundidad producidos por curvas.



Fotografía 28. Sección donde se realizó el aforo.

Las secciones elegidas para realizar el aforo, en principio fueron tomadas sobre el río Caño, en la zona de descarga del bofedal Jalaru, mientras que en el río Putani se tomó en la zona de recarga del bofedal Putani, se debe mencionar que en principio al elegir las secciones no se conocía cuáles eran las zonas de recarga y descarga de los bofedales. La sección elegida se divide en tramos iguales tal como muestra la Figura 52. En cada vertical, de las partes en que se divide la sección, se midieron las velocidades con el molinete.

Cada vertical tiene su respectiva área de influencia (sombreada en la gráfica), la cual se determina de la siguiente manera:

Una vez conocido la distancia total del ancho del río, se procedió a dividir estas en 10 partes iguales, por lo que ya se conocía la distancia horizontal ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , etc.) de cada una de las partes o áreas de influencia, posteriormente se procede a medir la distancia vertical o altura del agua con respecto a la base del río ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ , etc.), con lo que se puede conocer el área de cada una de las áreas de influencia mediante la siguiente fórmula:

$$A_1 = d_1 \times h_1$$

Dónde:

$A$  = área de influencia

$d$  = distancia horizontal del área de influencia

$h$  = distancia vertical o altura del área de influencia

El molinete viene calibrado de fábrica y acompañado de una tabla o ecuación, donde se relaciona la velocidad angular de la rueda giratoria con la velocidad de la corriente.

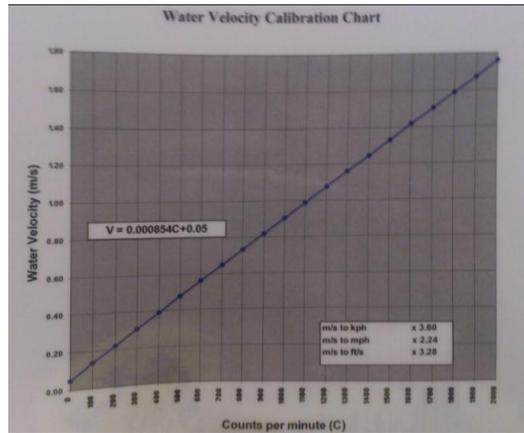


Figura 54. Carta de calibración de velocidad de agua.

Para calcular la velocidad en cada una de las áreas de influencia se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$V = 0.000854 \times C + 0.05$$

Dónde:

V = Velocidad del agua en el área de influencia.

C = Número de conteos por minuto (dado por el molinete).

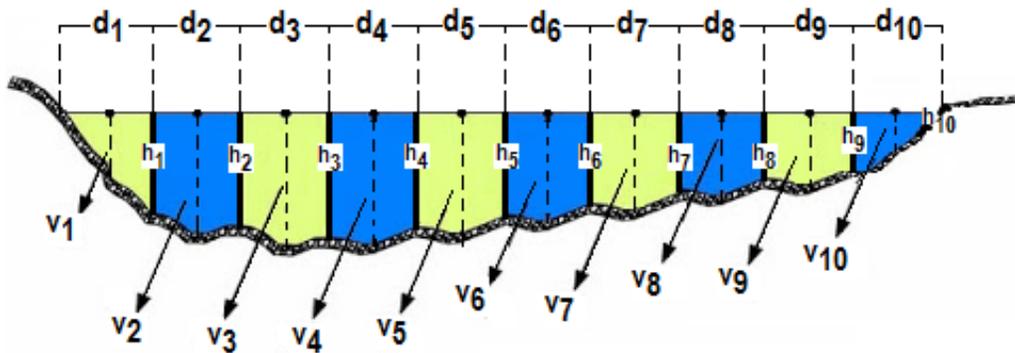


Figura 55. Esquema de un aforo y los datos considerados.

Por lo tanto una vez conocida el área de influencia y la velocidad del agua en cada una de las partes donde se realizó el aforo se procede a realizar el cálculo del caudal mediante la siguiente ecuación:

$$Q_1 = A_1 \times V_1$$

Dónde:

Q = Caudal en el área de influencia.

A = Área de influencia.

V = Velocidad del agua en el área de influencia

Finalmente para conocer el caudal total en el aforo se realiza la sumatoria de los caudales de las 10 áreas de influencia:

$$\Sigma Q_1, Q_2, \dots, Q_{10}$$

Los resultados obtenidos en el río Caño durante los aforos realizados en cada uno de los viajes al área de estudio son los siguientes:

RÍO CAÑO				
MES:		DICIEMBRE		
COORDENADAS	X	Y	ALTURA	
		452669	80688550	4057
DISTANCIA	PROFUNDIDAD	NÚMERO DE REVOLUCIONES	VELOCIDAD	CAUDAL
0.27	0.09	287	0.2951	0.0072
0.27	0.095	489	0.4676	0.0120
0.27	0.115	430	0.4172	0.0130
0.27	0.12	541	0.5120	0.0166
0.27	0.12	564	0.5317	0.0172
0.27	0.15	566	0.5334	0.0216
0.27	0.19	629	0.5872	0.0301
0.27	0.26	665	0.6179	0.0434
0.27	0.18	545	0.5154	0.0250
0.27	0	0	0.0500	0.0000
2.7				0.1861

Tabla 20. Cálculo de caudal río Caño - Diciembre de 2013.

<b>RÍO CAÑO</b>				
<b>MES:</b>		<b>FEBRERO</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
		452983	8068431	4062
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.28	0.035	0	0.0500	0.0005
0.28	0.085	442	0.4275	0.0102
0.28	0.12	863	0.7870	0.0264
0.28	0.165	889	0.8092	0.0374
0.28	0.17	892	0.8118	0.0386
0.28	0.16	687	0.6367	0.0285
0.28	0.16	597	0.5598	0.0251
0.28	0.11	0	0.0500	0.0015
0.28	0.03	0	0.0500	0.0004
0.28	0	0	0.0500	0.0000
2.8				0.1687

Tabla 21. Cálculo de caudal río Caño - Febrero de 2014.

<b>RÍO CAÑO</b>				
<b>MES:</b>		<b>MARZO</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
		452984	8068431	4064
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.27	0.035	0	0.0500	0.0005
0.27	0.12	0	0.0500	0.0016
0.27	0.295	685	0.6350	0.0506
0.27	0.29	726	0.6700	0.0525
0.27	0.28	733	0.6760	0.0511
0.27	0.285	786	0.7212	0.0555
0.27	0.27	687	0.6367	0.0464
0.27	0.145	655	0.6094	0.0239
0.27	0.13	614	0.5744	0.0202
0.27	0.06	0	0.0500	0.0008
2.7				0.3030

Tabla 22. Cálculo de caudal río Caño - Marzo de 2014.

<b>RÍO CAÑO</b>				
<b>MES:</b>		<b>JUNIO</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
		452896	8068433	4054
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.27	0	0	0.0500	0.0000
0.27	0.035	0	0.0500	0.0005
0.27	0.07	332	0.3335	0.0063
0.27	0.14	743	0.6845	0.0259
0.27	0.155	890	0.8101	0.0339
0.27	0.17	981	0.8878	0.0407
0.27	0.195	992	0.8972	0.0472
0.27	0.185	641	0.5974	0.0298
0.27	0.15	622	0.5812	0.0235
0.27	0.07	0	0.0500	0.0009
2.7				0.2089

Tabla 23. Cálculo de caudal río Caño - Junio de 2014.

<b>RÍO CAÑO</b>				
<b>MES:</b>		<b>JULIO</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
		452896	8068433	4054
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.26	0.015	0	0.0500	0.0002
0.26	0.06	331	0.3327	0.0052
0.26	0.125	626	0.5846	0.0190
0.26	0.14	750	0.6905	0.0251
0.26	0.17	766	0.7042	0.0311
0.26	0.18	848	0.7742	0.0362
0.26	0.175	696	0.6444	0.0293
0.26	0.155	688	0.6376	0.0257
0.26	0.145	634	0.5914	0.0223
0.26	0.08	397	0.3890	0.0081
2.6				0.2023

Tabla 24. Cálculo de caudal río Caño - Julio de 2014.

<b>RÍO CAÑO</b>				
<b>MES:</b>		<b>SEPTIEMBRE</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
	452896	8068433	4054	
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.24	0.145	427	0.4147	0.0144
0.24	0.15	683	0.6333	0.0228
0.24	0.15	698	0.6461	0.0233
0.24	0.158	718	0.6632	0.0251
0.24	0.16	652	0.6068	0.0233
0.24	0.15	539	0.5103	0.0184
0.24	0.1	320	0.3233	0.0078
0.24	0.07	0	0.0500	0.0008
0.24	0.035	0	0.0500	0.0004
0.24	0	0	0.0500	0.0000
2.4				0.1363

Tabla 25. Cálculo de caudal río Caño - Septiembre de 2014.

Con los resultados de caudales obtenidos en cada aforo se realiza el siguiente gráfico comparativo:

RÍO CAÑO	
MES	CAUDAL
DICIEMBRE	0.1861
FEBRERO	0.1687
MARZO	0.3030
JUNIO	0.2089
JULIO	0.2023
SEPTIEMBRE	0.1363

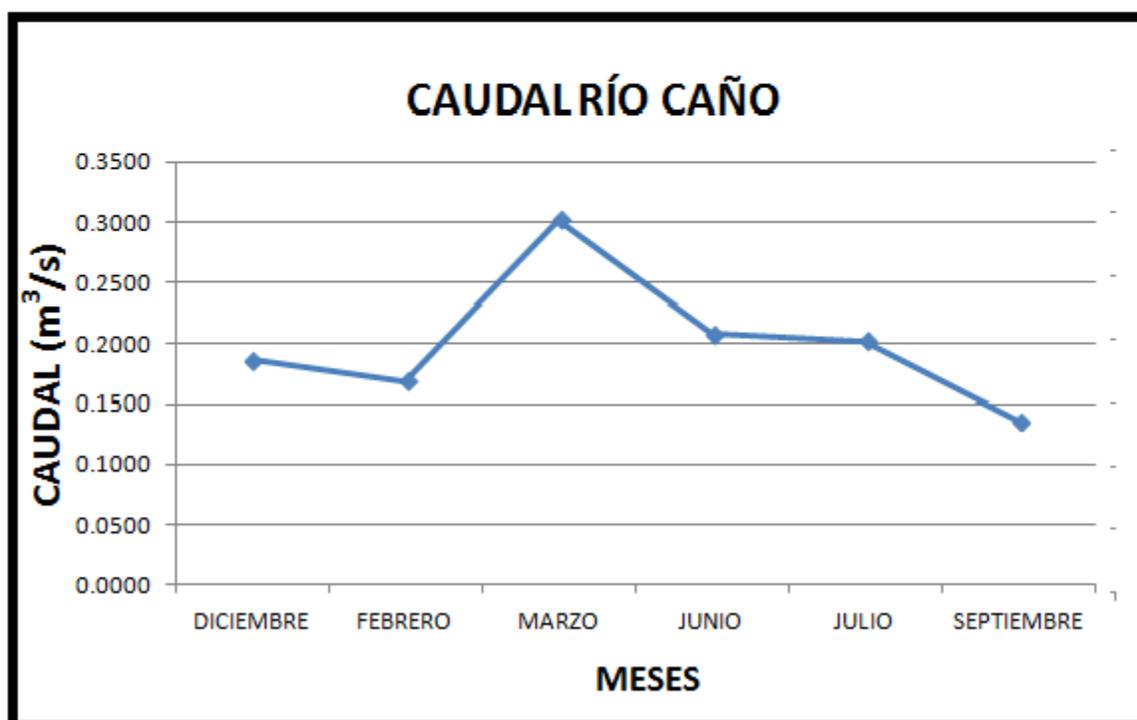


Figura 56. Gráfica comparativa de datos de caudal - Río Caño.

#### INTERPRETACIÓN:

Como se puede observar el caudal en el río Caño varía entre 0.1 a 0.3 m<sup>3</sup>/s teniendo como dato más llamativo el pico alto generado en el mes de marzo, que se le puede atribuir al aumento en las precipitaciones y debido a que el área de estudio se encuentra en la parte baja de la cuenca mayor y la cabecera del río en los países de Perú y Chile, se atribuye a un mayor aporte hacia aguas abajo, por lo que se tendría además una baja infiltración en los bofedales por los datos piezométricos y generando así mayor escorrentía superficial, por lo que habría una relación directa entre el agua del río Caño con las aguas subterráneas de los bofedales Jalaru y en menor proporción por la ubicación con el bofedal Curajpucho.

Los resultados de los aforos realizados en el río Putani son los siguientes:

<b>RÍO PUTANI</b>				
<b>MES:</b>		<b>DICIEMBRE</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
	456884	8053772	4038	
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.28	0.035	0	0.0500	0.0005
0.28	0.06	322	0.3250	0.0055
0.28	0.09	636	0.5931	0.0149
0.28	0.12	803	0.7358	0.0247
0.28	0.14	791	0.7255	0.0284
0.28	0.12	767	0.7050	0.0237
0.28	0.105	624	0.5829	0.0171
0.28	0.085	436	0.4223	0.0101
0.28	0.065	204	0.2242	0.0041
0.28	0.05	0	0.0500	0.0007
2.8				0.1297

Tabla 26. Cálculo de caudal río Putani - Diciembre de 2013

<b>RÍO PUTANI</b>				
<b>MES:</b>		<b>FEBRERO</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
	456759	8053731	4058	
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.25	0.025	0	0.0500	0.0003
0.25	0.06	0	0.0500	0.0008
0.25	0.095	1104	0.9928	0.0236
0.25	0.11	798	0.7315	0.0201
0.25	0.125	1005	0.9083	0.0284
0.25	0.105	819	0.7494	0.0197
0.25	0.08	663	0.6162	0.0123
0.25	0.06	449	0.4334	0.0065
0.25	0	0	0.0500	0.0000
0.25	0	0	0.0500	0.0000
2.5				0.1116

Tabla 27. Cálculo de caudal río Putani - Febrero de 2014.

<b>RÍO PUTANI</b>				
<b>MES:</b>		<b>MARZO</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
		456766	8053729	4046
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.28	0.06	0	0.0500	0.0008
0.28	0.085	638	0.5949	0.0142
0.28	0.095	672	0.6239	0.0166
0.28	0.105	862	0.7861	0.0231
0.28	0.125	913	0.8297	0.0290
0.28	0.11	868	0.7913	0.0244
0.28	0.09	502	0.4787	0.0121
0.28	0.08	398	0.3899	0.0087
0.28	0.065	279	0.2883	0.0052
0.28	0.05	0	0.0500	0.0007
2.8				0.1349

Tabla 28. Cálculo de caudal río Putani - Marzo de 2014.

<b>RÍO PUTANI</b>				
<b>MES:</b>		<b>JUNIO</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
		456766	8053729	4046
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.25	0.06	0	0.0500	0.0008
0.25	0.145	837	0.7648	0.0277
0.25	0.16	984	0.8903	0.0356
0.25	0.165	1167	1.0466	0.0432
0.25	0.16	998	0.9023	0.0361
0.25	0.14	1285	1.1474	0.0402
0.25	0.12	895	0.8143	0.0244
0.25	0.095	322	0.3250	0.0077
0.25	0.055	0	0.0500	0.0007
0.25	0	0	0.0500	0.0000
2.5				0.2163

Tabla 29. Cálculo de caudal río Putani - Junio de 2014.

<b>RÍO PUTANI</b>				
<b>MES:</b>		<b>JULIO</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
		456766	8053729	4046
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.27	0.06	818	0.7485720	0.0121269
0.27	0.11	838	0.7656520	0.0227399
0.27	0.14	779	0.7152660	0.0270371
0.27	0.14	733	0.6759820	0.0255521
0.27	0.15	701	0.6486540	0.0262705
0.27	0.145	1117	1.0039180	0.0393034
0.27	0.145	818	0.7485720	0.0293066
0.27	0.12	1027	0.9270580	0.0300367
0.27	0.09	576	0.5419040	0.0131683
0.27	0.05	0	0.0500000	0.0006750
2.7				0.2262163

Tabla 30. Cálculo de caudal río Putani - Julio de 2014.

<b>RÍO PUTANI</b>				
<b>MES:</b>		<b>SEPTIEMBRE</b>		
<b>COORDENADAS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ALTURA</b>	
		456766	8053729	4046
<b>DISTANCIA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>NÚMERO DE REVOLUCIONES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CAUDAL</b>
0.3	0	0	0.0500000	0.0000000
0.3	0.035	0	0.0500000	0.0005250
0.3	0.04	0	0.0500000	0.0006000
0.3	0.05	125	0.1567500	0.0023513
0.3	0.06	254	0.2669160	0.0048045
0.3	0.07	280	0.2891200	0.0060715
0.3	0.08	298	0.3044920	0.0073078
0.3	0.05	98	0.1336920	0.0020054
0.3	0.025	0	0.0500000	0.0003750
0.3	0.008	0	0.0500000	0.0001200
3				0.0241604

Tabla 31. Cálculo de caudal río Putani - Septiembre de 2014.

Con los resultados de caudales obtenidos en el río Putani en cada aforo se realiza el siguiente gráfico comparativo:

RÍO PUTANI	
MES	CAUDAL
DICIEMBRE	0.1297
FEBRERO	0.1116
MARZO	0.1349
JUNIO	0.2163
JULIO	0.2262
SEPTIEMBRE	0.02416

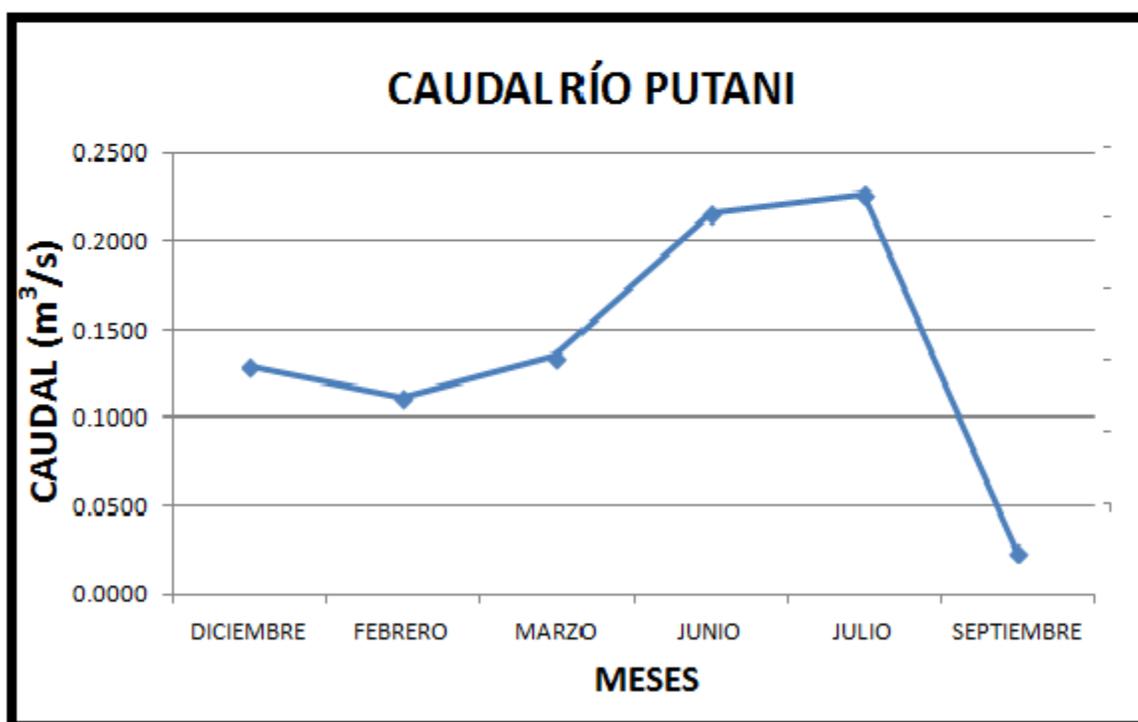


Figura 57. Gráfica comparativa de datos de caudal - Río Putani

#### INTEPRETACIÓN:

En los caudales del río Putani se ve una relación entre el agua superficial con el agua subterránea debido a que sus variaciones mensuales son muy parecidas y están relacionadas con variaciones estacionales, siendo que hay mayor caudal en épocas húmedas y al contrario en épocas secas del año, así también la ubicación del punto de aforo es importante en estas variaciones, siendo que este punto se encuentra en la parte baja del río. Lo que llamó la atención fueron los datos obtenidos en el mes de septiembre debido a que el caudal fue muy bajo y se observó que la profundidad de agua en el río bajó considerablemente con relación a los otros meses, por lo que habría una tasa mayor de infiltración lo que posibilita una mayor

acumulación de agua en los acuíferos y beneficiando así también al agua subterránea en los bofedales, lo que se aprecia en las alturas piezométricas en este bofedal teniendo aumento en el nivel piezométrico.

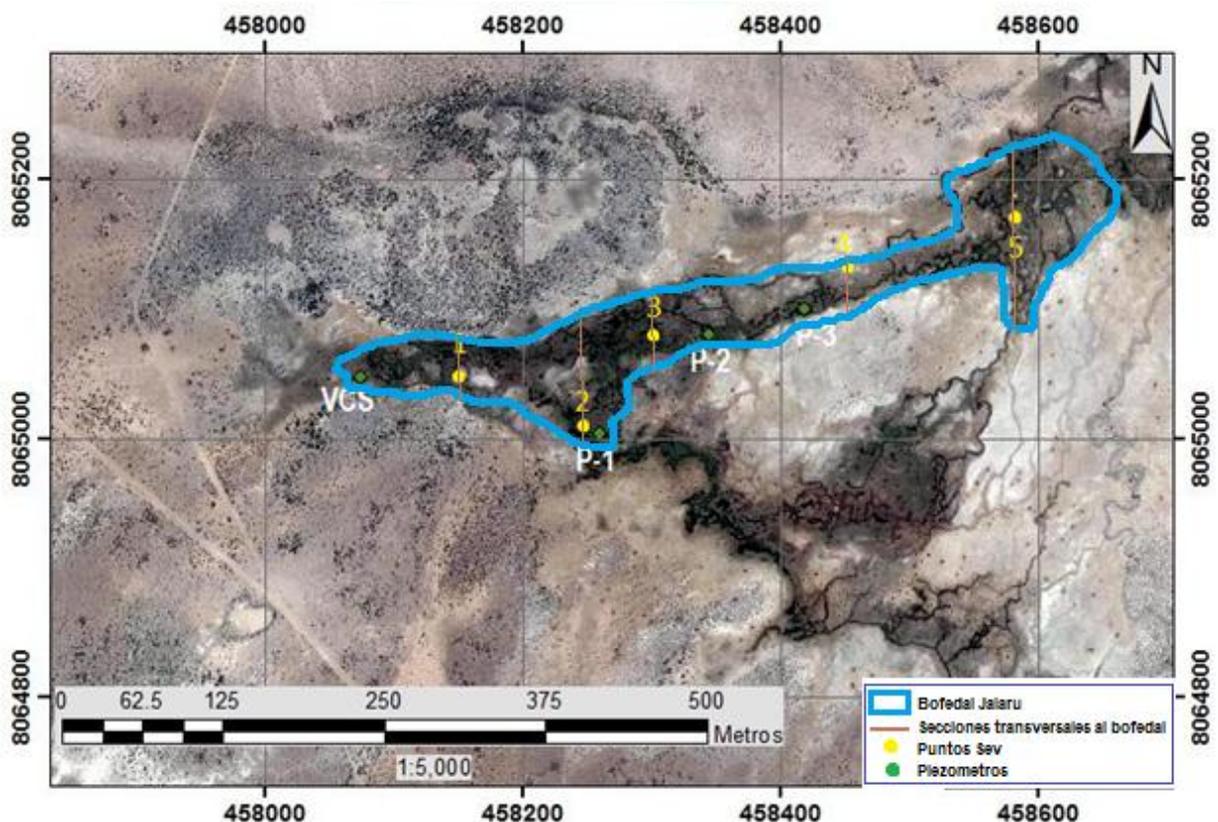
#### 4.9. CÁLCULO DE VOLUMEN DE LOS BOFEDALES.

Para realizar el cálculo del volumen de los bofedales se hizo uso de los datos de las secciones generadas mediante geofísica, es decir de los datos obtenidos mediante el sondeo eléctrico vertical ya presentado.

A su vez fue necesario realizar mediciones en superficie lo cual se pudo obtener mediante el uso de imágenes satelitales, así como utilizando los software Google Earth y el ArcGis.

Los resultados obtenidos son presentados a continuación:

##### 4.9.1. VOLUMEN BOFEDAL CURAJPUCHO



Mapa 61. Bofedal Curajpucho con las secciones SEV.

Para realizar el cálculo del volumen, se dividió el bofedal en 5 partes de acuerdo a los puntos en los que se realizó el estudio geofísico, por lo que se realizaron mediciones en superficie de la longitud y el ancho de cada sección, y teniendo la profundidad o espesor del bofedal de los

datos que resultan del método SEV y al no tener la forma precisa del bofedal en subsuelo lo que se hizo fue realizar un modelo matemático para realizar el cálculo del volumen de cada una de las secciones siendo que se calculó cada una como un troco de pirámide rectangular siendo esta figura tridimensional la más próxima a la forma real del bofedal en subsuelo.

Al ser una aproximación a un modelo matemático los resultados no son precisos sino aproximados y al ser costoso el realizar el estudio geofísico se realizó la distribución de los puntos de manera que se pueda abarcar todo el bofedal, pero al tener dificultades con el presupuesto no se realizaron sondeos en los bordes llegando a asumir espesores en estos.

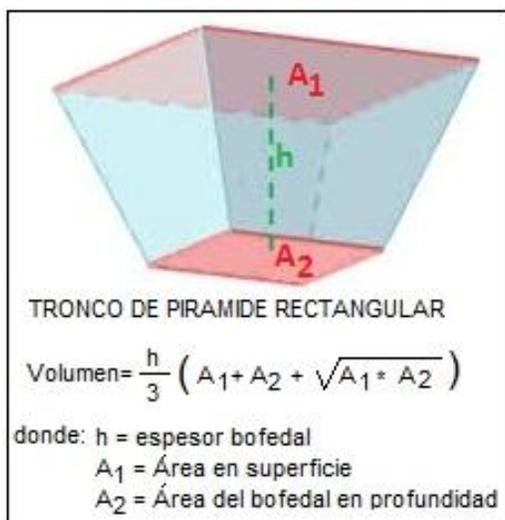


Figura 58. Fórmula del volumen de un tronco de pirámide rectangular

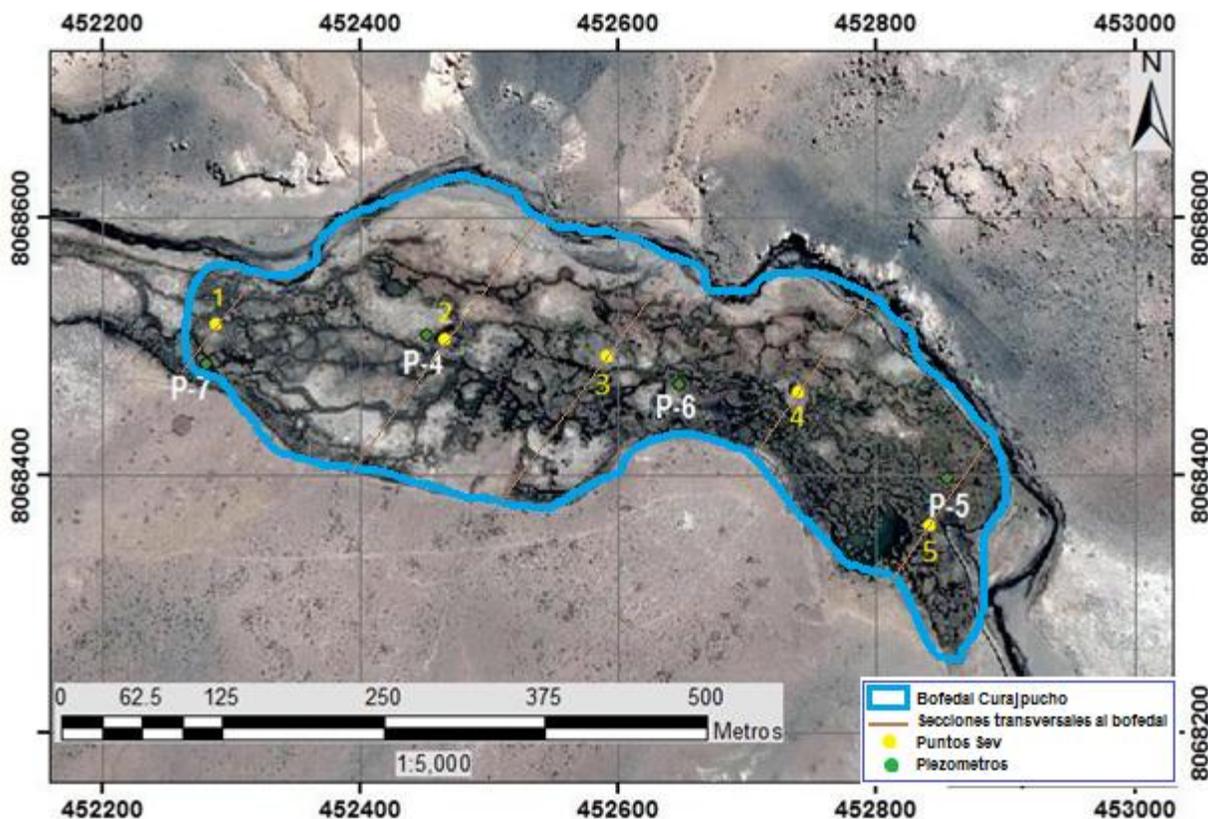
BOFEDAL CURAJPUCHO			
			VOLUMEN DE SECCIONES DEL BOFEDAL
1	Longitud (m)	72.28	
	Ancho (m)	87.91	52084.08
	Espesor Bofedal (m)	9.4	
2	Longitud (m)	144.33	
	Ancho (m)	84.35	276335.43
	Espesor Bofedal (m)	26.03	
3	Longitud (m)	119.47	
	Ancho (m)	112.1	617673.18
	Espesor Bofedal (m)	52.89	
4	Longitud (m)	31.45	
	Ancho (m)	136.52	46463.23
	Espesor Bofedal (m)	12.41	
5	Longitud (m)	119.89	
	Ancho (m)	136.21	130296.80
	Espesor Bofedal (m)	9.15	
VOLUMEN BOFEDAL (m <sup>3</sup> )			1122852.72

Tabla 32. Cálculo de volumen del bofedal Curajpucho.

Por tanto el volumen calculado del bofedal Curajpucho es de 1 122 852.72 m<sup>3</sup>.

#### 4.9.2. VOLUMEN BOFEDAL JALARU

Para realizar el cálculo del volumen del bofedal Jalaru se dividió toda el área del bofedal en 5 partes según los puntos donde se realizó el estudio geofísico, donde se realizaron las mediciones de ancho y longitud de las secciones y el dato de profundidad se obtuvo por el método geofísico SEV.



Mapa 62. Bofedal Jalaru con las secciones SEV.

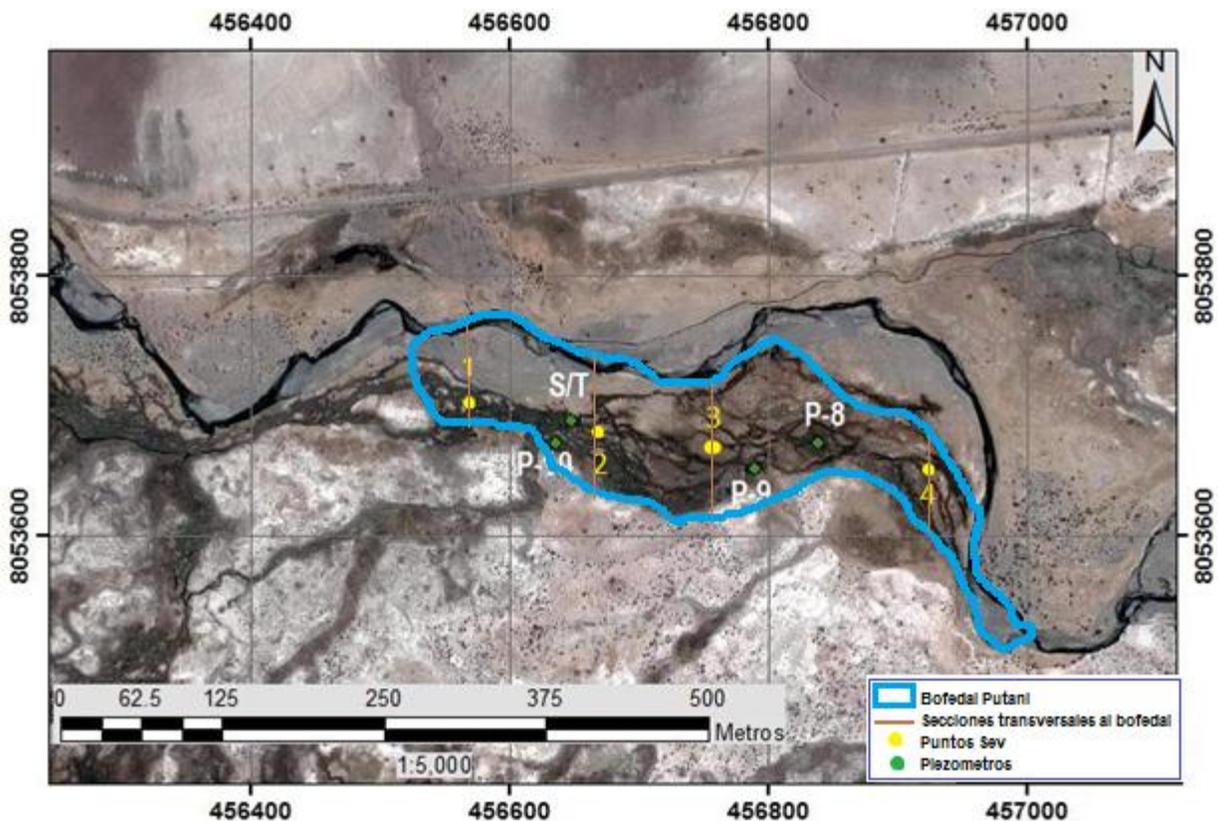
BOFEDAL JALARU			
			VOLUMEN DE SECCIONES DEL BOFEDAL
1	Longitud (m)	113.33	
	Ancho (m)	166.67	842999.65
	Espesor Bofedal (m)	51.18	
2	Longitud (m)	226.67	
	Ancho (m)	146.67	662698.53
	Espesor Bofedal (m)	22.86	
3	Longitud (m)	166.67	
	Ancho (m)	146.67	754364.84
	Espesor Bofedal (m)	35.39	
4	Longitud (m)	186.67	
	Ancho (m)	133.33	284313.52
	Espesor Bofedal (m)	13.10	
5	Longitud (m)	173.33	
	Ancho (m)	120.00	329744.77
	Espesor Bofedal (m)	18.18	
<b>VOLUMEN BOFEDAL (m<sup>3</sup>)</b>			<b>2874121.31</b>

Tabla 33. Cálculo de volumen del bofedal Jalaru.

Por tanto el volumen del bofedal Jalaru calculado es de: 2 874 121.31 m<sup>3</sup>.

### 5.9.3. VOLUMEN BOFEDAL PUTANI

Para realizar el cálculo del volumen del bofedal Putani se dividió al bofedal en cuatro partes según la ubicación de las secciones donde se realizó el estudio geofísico y como en los dos anteriores se midieron la longitud y ancho de las secciones en superficie y por el dato de profundidad obtenido por el método SEV casos.



Mapa 63. Bofedal Putani con las secciones SEV.

BOFEDAL PUTANI			
			VOLUMEN DE SECCIONES DEL BOFEDAL
1	Longitud (m)	119.98	
	Ancho (m)	100.49	417706.25
	Espesor Bofedal (m)	39.73	
2	Longitud (m)	103.78	
	Ancho (m)	88.39	125584.82
	Espesor Bofedal (m)	15.7	
3	Longitud (m)	172.24	
	Ancho (m)	120.15	1732586.65
	Espesor Bofedal (m)	96.01	
4	Longitud (m)	175.96	
	Ancho (m)	152.49	1401063.48
	Espesor Bofedal (m)	59.88	
<b>VOLUMEN BOFEDAL (m<sup>3</sup>)</b>			<b>3676941.20</b>

Tabla 34. Cálculo de volumen del bofedal Putani.

Por lo tanto se precedió a obtener como volumen del bofedal Putani: 3 676 941.20 m<sup>3</sup>.

#### 4.10. CÁLCULO DE VOLUMEN DE AGUA CONTENIDO EN LOS BOFEDALES.

Es importante conocer que los suelos de los bofedales contienen importantes niveles de materia orgánica (>20%), lo que permite que se retengan cantidades importantes de agua, evitando que el agua se pierda por escurrimiento durante las épocas lluviosas, esta retención del agua permite que en épocas secas (5 a 7 meses), los ríos, vertientes y aguas subterráneas sean alimentados.

Una vez conocido el volumen de cada uno de los bofedales necesitamos conocer el volumen de agua contenidos en esto, para lo cual se utilizaron tablas de porosidad de acuerdo a la litología, porque no fue posible realizar cálculos de porosidad con muestras obtenidas del bofedal. (Tabla 36)

ROCA/SEDIMENTO	POROSIDAD (%)
Andesita	10 a 15
Anfibolita	
Arenisca	5 a 25 (16)
Arena	10 a 20
Basalto	0.1 a 2
Caliza	5 a 20 (11)
Carbón	10
Cuarcita	0.1 a 0.5
Creta	30
Diabasa	0.1
Diorita	
Dolomía	0.5 a 10
Esquisto	3
Gabro	0.1 a 0.2
Gneis	0.5 a 1.5
Granito	0.5 a 1.5 (0.9)
Grauvaca	3
Mármol	0.3 a 2 (0.6)
Lutita	2 a 15
Limo	3 a 8
Arcilla	1 a 5
Pizarra	0.1 a 1
Riolita	4 a 6
Sal	5
Toba	14 a 40
Yeso	5

Tabla 35. En paréntesis algunos valores medios de porosidad eficaz.

Datos seleccionados a partir de Goodman (1989), Rahn (1986), Walthan (1999), Farmer (1968) - Extraído Libro Ingeniería Geológica de Luis Gonzáles de Vallejo.

A continuación se presentan los resultados del cálculo de volumen de agua para cada uno de los bofedales estudiados:

BOFEDAL CURAJPUCHO				
			VOLUMEN DE SECCIONES DEL BOFEDAL	VOLUMEN DE AGUA EN SECCIONES
1	Longitud (m)	72.28		
	Ancho (m)	87.91	52084.08	7812.61
	Espesor Bofedal (m)	9.4		
2	Longitud (m)	144.33		
	Ancho (m)	84.35	276335.43	41450.31
	Espesor Bofedal (m)	26.03		
3	Longitud (m)	119.47		
	Ancho (m)	112.1	617673.18	92650.98
	Espesor Bofedal (m)	52.89		
4	Longitud (m)	31.45		
	Ancho (m)	136.52	46463.23	6969.48
	Espesor Bofedal (m)	12.41		
5	Longitud (m)	119.89		
	Ancho (m)	136.21	130296.80	19544.52
	Espesor Bofedal (m)	9.15		
VOLUMEN BOFEDAL (m <sup>3</sup> )			1122852.72	
VOLUMEN DE AGUA EN EL BOFEDAL (m <sup>3</sup> )				168427.91

Tabla 36. Cálculo de volumen de agua del bofedal Curajpucho.

BOFEDAL JALARU				
			VOLUMEN DE SECCIONES DEL BOFEDAL	VOLUMEN DE AGUA EN SECCIONES
1	Longitud (m)	113.33		
	Ancho (m)	166.67	842999.65	126449.95
	Espesor Bofedal (m)	51.18		
2	Longitud (m)	226.67		
	Ancho (m)	146.67	662698.53	99404.78
	Espesor Bofedal (m)	22.86		
3	Longitud (m)	166.67		
	Ancho (m)	146.67	754364.84	113154.73
	Espesor Bofedal (m)	35.39		
4	Longitud (m)	186.67		
	Ancho (m)	133.33	284313.52	42647.03
	Espesor Bofedal (m)	13.10		
5	Longitud (m)	173.33		
	Ancho (m)	120.00	329744.77	49461.72
	Espesor Bofedal (m)	18.18		
VOLUMEN BOFEDAL (m <sup>3</sup> )			2874121.31	
VOLUMEN DE AGUA EN EL BOFEDAL (m <sup>3</sup> )				431118.20

Tabla 37. Cálculo de volumen de agua del bofedal Jalaru.

BOFEDAL PUTANI				
			VOLUMEN DE SECCIONES DEL BOFEDAL	VOLUMEN DE AGUA EN SECCIONES
1	Longitud (m)	119.98		
	Ancho (m)	100.49	417706.25	62655.94
	Espesor Bofedal (m)	39.73		
2	Longitud (m)	103.78		
	Ancho (m)	88.39	125584.82	18837.72
	Espesor Bofedal (m)	15.7		
3	Longitud (m)	172.24		
	Ancho (m)	120.15	1732586.65	259888.00
	Espesor Bofedal (m)	96.01		
4	Longitud (m)	175.96		
	Ancho (m)	152.49	1401063.48	210159.52
	Espesor Bofedal (m)	59.88		
VOLUMEN BOFEDAL (m <sup>3</sup> )			3676941.20	
VOLUMEN DE AGUA EN EL BOFEDAL (m <sup>3</sup> )				551541.18

Tabla 38. Cálculo de volumen de agua del bofedal Putani.

Los volúmenes aproximados de agua contenidos en los bofedales obtenidos en los cálculos son los siguientes:

- Bofedal Curajpucho: 168 427.91 m<sup>3</sup>.
- Bofedal Jalaru: 431 118.20 m<sup>3</sup>.
- Bofedal Putani: 551 541.18 m<sup>3</sup>.

#### 4.11. CÁLCULO DE FLUCTUACION DE AGUA EN LOS BOFEDALES.

El término fluctuación se refiere a la variación del volumen de agua en diferentes épocas del año, por lo que se calcula en la zona de recarga del bofedal, haciendo la diferencia del volumen máximo de agua registrado, y el mínimo de volumen, y esta diferencia multiplicada por la porosidad que varía según la litología que compone el bofedal.

NOMBRE BOFEDAL	VOLUMEN MAXIMO			VOLUMEN MINIMO			DIFERENCIA DE VOLUMENES	FLUCTUACION (m <sup>3</sup> )
	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)		
CURAJPUCHO	31.45	53283.01	12.41	31.45	49848.16	11.61	3434.84	515.23
	136.52			136.52				
	136.52			136.52				
JALARU	226.67	759996.45	22.86	226.67	755342.05	22.72	4654.40	698.16
	146.67			146.67				
	146.67			146.67				
PUTANI	172.24	1986892.00	96.01	172.24	1979234.99	95.64	7657.02	1148.55
	120.15			120.15				
	120.15			120.15				

Tabla 39. Cálculo de volumen de fluctuación del agua en los bofedales.

#### 4.12. MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS.

Cuando la composición y características del agua se consideran bajo el punto de vista de una utilización o aplicación determinada nace el concepto de "calidad". Mientras la composición en un instante y lugar determinados es única, la calidad puede ser múltiple y no queda perfectamente definida hasta que el uso concreto a que se destine el agua no quede especificado. Se habla entonces de calidad para el consumo, la agricultura, cierto tipo de industria. etc. Muy a menudo, sin embargo, se equiparan los términos "calidad natural" y "composición". (Orság, 2007)

Durante los viajes al área de estudio también se realizó el monitoreo de la calidad de agua en cada uno de los piezómetros, para conocer las propiedades del agua subterránea, por lo que se hizo uso de ciertos equipos para posibilitar la medición de la conductividad eléctrica, temperatura y pH del agua.

#### 4.12.1. PH

Para realizar la medición del pH se utilizó el pH-metro.



Fotografía 29. pH-metro.

Para lo cual se toma agua subterránea proveniente del piezómetro (10ml.), en un tubo como se muestra en la Fotografía 28.



Fotografía 30. Tubo del pH-metro con 10 ml de agua.

Posteriormente se introduce al tubo una pastilla de Phenol Rojo y se agita el tubo para que esta se disuelva en el agua y esta tomará una coloración entre rosado y rojizo, posteriormente este tubo se pone en el pH-metro y se compara con los colores del aparato para conocer el valor del pH.



Fotografía 31. pH-metro mostrando la medición del pH.

#### 4.12.2. TEMPERATURA Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

A su vez en cada uno de los piezómetros se realizó la medición de propiedades como la temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea de los bofedales con un equipo de calidad de aguas.



Fotografías 32 - 33. Equipo de calidad de agua.

Las actividades antrópicas que se realizan sobre la superficie de los bofedales así como los cambios en los usos del suelo o la modificación de los cauces naturales pueden causar un gran impacto sobre las aguas subterráneas, afectando su calidad y cantidad. En zonas pobladas y con un uso intensivo de los recursos naturales, es importante la evaluación de las características hidrogeológicas, para prevenir la degradación de la calidad de los recursos subterráneos.

No fue posible efectuar el monitoreo de calidad de aguas en todas los viajes al área de estudio debido a que el equipo perteneciente a las ONG “Agua Sustentable” no estaba disponible todos los meses, los resultados obtenidos en cada uno de los meses que se realizó el

monitoreo de las propiedades del agua subterránea en los bofedales se los presenta en las siguientes tablas:

19 DE DICIEMBRE DE 2013					
BOFEDAL CURAJPUCHO					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 1	458259	8065004	257 us	9.9	7.5
PIEZOMETRO 2	458344	8065081	250 us	9.1	7.5
PIEZOMETRO 3	458418	8065100	250 us	8	7.5
PIEZOMETRO VCS	458074	8065047	375 uS	7.2	7.7
BOFEDAL JALARU					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 4	452451	8068509	15.58 us	10.5	7.8
PIEZOMETRO 5	452854	8068398	102.7 us	9.7	7.7
PIEZOMETRO 6	452647	8068471	118.3 us	9.4	7.7
PIEZOMETRO 7	452281	8068487	8.25 us	9.4	7.8
BOFEDAL PUTANI					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 8	456837	8053671	19.55 us	9.8	8.1
PIEZOMETRO 9	456789	8053652	3.05mS	9.6	8.1
PIEZOMETRO 10	456635	8053671	2.70 ms	9.6	8.1
PIEZOMETRO s/t	456647	8053688	15.47us	9.8	8.1

Tabla 40. Monitoreo mes de diciembre de 2013.

6 Y 7 DE FEBRERO DE 2014					
BOFEDAL CURAJPUCHO					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 1	458259	8065004	562 us	11	7.8
PIEZOMETRO 2	458344	8065081	920 uS	10.3	7.8
PIEZOMETRO 3	458418	8065100	444 uS	9.5	7.8
PIEZOMETRO VCS	458074	8065047	358 uS	10.2	7.8
BOFEDAL JALARU					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 4	452451	8068509	346 uS	10.5	7.7
PIEZOMETRO 5	452854	8068398	426 uS	10	7.7
PIEZOMETRO 6	452647	8068471	225 uS	10.1	7.7
PIEZOMETRO 7	452281	8068487	3.51 mS	10.3	7.7
BOFEDAL PUTANI					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 8	456837	8053671	2.95mS	9.8	7.9
PIEZOMETRO 9	456789	8053652	2.93mS	10.3	7.9
PIEZOMETRO 10	456635	8053671	4.42mS	10	7.9
PIEZOMETRO s/t	456647	8053688	4.25mS	9.7	7.9

Tabla 41. Monitoreo mes de febrero de 2014.

5 Y 6 DE JUNIO DE 2014					
BOFEDAL CURAJPUCHO					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 1	458259	8065004	446 us	6.8	7.6
PIEZOMETRO 2	458344	8065081	526uS	5.8	7.6
PIEZOMETRO 3	458418	8065100	442uS	5.5	7.6
PIEZOMETRO VCS	458074	8065047	368uS	8.6	7.6
BOFEDAL JALARU					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 4	452451	8068509	326uS	7.2	7.7
PIEZOMETRO 5	452854	8068398	418uS	9.3	7.7
PIEZOMETRO 6	452647	8068471	242uS	7.3	7.7
PIEZOMETRO 7	452281	8068487	1087uS	4.5	7.7
BOFEDAL PUTANI					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 8	456837	8053671	3.03mS	6.8	7.9
PIEZOMETRO 9	456789	8053652	2.99mS	5.1	7.9
PIEZOMETRO 10	456635	8053671	6.17mS	5.6	7.9
PIEZOMETRO s/t	456647	8053688	5.63mS	4.8	7.9

Tabla 42. Monitoreo mes de junio de 2014.

28 DE JULIO DE 2014					
BOFEDAL CURAJPUCHO					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 1	458259	8065004	335 us	6.2	7.7
PIEZOMETRO 2	458344	8065081	442uS	5.5	7.7
PIEZOMETRO 3	458418	8065100	565uS	5.8	7.7
PIEZOMETRO VCS	458074	8065047	375 uS	7.2	7.7
BOFEDAL JALARU					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 4	452451	8068509	418uS	6.8	7.8
PIEZOMETRO 5	452854	8068398	320uS	8.7	7.7
PIEZOMETRO 6	452647	8068471	264uS	7.2	7.7
PIEZOMETRO 7	452281	8068487	862uS	5.2	7.8
BOFEDAL PUTANI					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 8	456837	8053671	2.98mS	5.5	8
PIEZOMETRO 9	456789	8053652	3.03mS	4.8	8
PIEZOMETRO 10	456635	8053671	5.28mS	4.8	8
PIEZOMETRO s/t	456647	8053688	4.98mS	5.5	8

Tabla 43. Monitoreo mes de julio de 2014.

12 DE SEPTIEMBRE DE 2014					
BOFEDAL CURAJPUCHO					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 1	458259	8065004	354 us	6.6	7.7
PIEZOMETRO 2	458344	8065081	480uS	5.8	7.7
PIEZOMETRO 3	458418	8065100	552uS	5.7	7.7
PIEZOMETRO VCS	458074	8065047	395 uS	6.6	7.7
BOFEDAL JALARU					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 4	452451	8068509	380uS	6.7	7.7
PIEZOMETRO 5	452854	8068398	315uS	7.8	7.7
PIEZOMETRO 6	452647	8068471	312uS	7.3	7.7
PIEZOMETRO 7	452281	8068487	654uS	5.6	7.7
BOFEDAL PUTANI					
NÚMERO PIEZOMETROS	COORDENADAS PIEZOMETROS (WGS-84)		Conductividad	Temperatura (°C)	pH
	x	y			
PIEZOMETRO 8	456837	8053671	2.5mS	5.4	8
PIEZOMETRO 9	456789	8053652	3.1mS	4.9	8
PIEZOMETRO 10	456635	8053671	4.14mS	5.3	8
PIEZOMETRO s/t	456647	8053688	3.79mS	6.2	8

Tabla 44. Monitoreo mes de septiembre de 2014.

## INTERPRETACIÓN:

### CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

En los bofedales Curajpucho y Jalaru presentan valores de conductividad eléctrica admisibles para el consumo animal y riego por lo que se le podría considerar como agua de buena calidad, con la excepción de que en épocas secas tiene un alto contenido de arsénico, según datos obtenidos por análisis de laboratorio realizado por el Herbario Nacional, lo que llega a afectar considerablemente su calidad.

Las aguas subterráneas del bofedal Putani por su elevada conductividad eléctrica y presencia de sales lo que significa menor calidad como agua para su utilización tales como para riego, esta agua exigen prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica para un uso adecuado.

### PH

Los valores de pH aceptables para que se considere como agua de buena calidad para uso agrícola y riego según la FAO está entre 6.5 y 8.4, y según los datos adquiridos en los tres bofedales se encuentran dentro de este rango, por lo que no se las consideraría agua ácidas, ni alcalinas.

## TEMPERATURA DEL AGUA

La temperatura del agua es un buen indicador del ambiente físico-químico en el interior de la zona saturada de los acuíferos. Conforme aumenta la profundidad varía por la gradiente geotérmica. Por los datos obtenidos podemos ver que las aguas subterráneas en los tres bofedales estudiados mantienen una oscilación térmica anual, lo cual se relaciona directamente con las variaciones estacionales y que sus temperaturas son inferiores a las de las aguas superficiales.

### 4.13. MAPA HIDROGEOLÓGICO

Debido a las características geológicas presentes en el país, Bolivia tiene un gran potencial de aguas subterráneas. Esto se puede apreciar a escalas grandes como en el mapa geológico 1:1'000.000 donde el Altiplano y las llanuras del oriente del país tienen litologías favorables para la ocurrencia de agua subterránea. Adicionalmente la presencia de las dos Cordilleras se constituyen en fuente de agua de deshielo como una de las fuentes de recarga de los acuíferos. De igual manera al relacionar la distribución espacial de las precipitaciones pluviales con la geología se infiere una importante fuente de recarga de agua subterránea. (Cortez, 2013)

Para poder entender la forma de clasificación de se presenta el siguiente gráfico con el significado de los colores utilizados en el mapa hidrogeológico:

COLOR	TONALIDAD	SIGNIFICADO
AZUL	OSCURO	Buen acuífero o detrítico con mucha agua.
	CLARO	Buen acuífero o detrítico con poca agua.
VERDE	OSCURO	Acuífero moderado o fisurado con agua.
	CLARO	Acuífero moderado o fisurado con poca agua.
CAFÉ	OSCURO	Acuífero pobre sin agua.
	CLARO	Acuífero pobre con muy poca o nada de agua.

Tabla 45. Significado de colores utilizados en la leyenda hidrogeológica – UNESCO 1983.

En el mapa hidrogeológico fue elaborado en base a los mapas geológico y geomorfológico de la zona de estudio (Mapas Anexos 1 y 2), llegando a dividir el área de estudio en las siguientes unidades hidrogeológicas:

<u>UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS</u>			
	Hs (a)	Depósitos Aluviales	Arenas, Arcillas, Limos, Gravas, Cantos
	Hs (t)	Terrazas	Gravas, Arenas, Arcillas, Limos, Cantos
	Pts (ch)	Formación Charaña	Areniscas y conglomerados finos tuffíticos de color blancuzco
	Pvl (pe)	Formación Pérez	Ignimbritas rosáceas de composición riodacítica
	Pvl (ck)	Formación Cerke	Lavas andesíticas duras de color gris blancuzco
	Mvl (ab)	Formación Abaroa	Lavas oscuras interestratificadas con areniscas y conglomerados

Figura 59. Unidades hidrogeológicas.

#### 4.13.1. Mvl (Formación Abaroa)

Esta formación de edad Mioceno Inferior, litológicamente está conformada por coladas de lavas las cuales siguen las direcciones de flujo y de hundimiento, por lo que se los puede clasificar dentro de los acuíferos fisurados por lo que esta unidad va en color verde, lo que significa que esta unidad no tiene buena porosidad primaria y por tanto baja permeabilidad, pero que se lo clasifica dentro de los fisurados debido a que podría tener porosidad secundaria para posibilitar que se acumule agua en estos, y se lo pone en color verde claro porque las posibilidades de acumulación de agua en esta unidad es baja, que solo se podría dar acumulación por precipitaciones orográficas, es decir chubascos aislados en las partes altas lo que puede permitir que se produzca recarga.

#### 4.13.2. Pvl (Formación Cerke)

Esta unidad de edad Pliocena está conformada por lavas de composición andesítica y tobas en la base, también se conoce que en esta unidad se genera alteración hidrotermal además de mineralización y meteorización lo que podría dar indicios de cierta existencia de porosidad, pero son muy bajas las probabilidades de que esto se pueda dar por lo que se lo pone en color café oscuro, lo que significa que no contiene posibilidades de poder contener agua.

#### 4.13.3. Pvl (Formación Pérez)

Esta unidad de edad Pliocena, está conformada por ignimbritas de composición riodacítica, de color rosáceo la cual se la clasifica dentro de los acuíferos fisurados debido a que esta unidad

se encuentra altamente fracturada, por tanto la porosidad secundaria en esta unidad es bastante alta lo que posibilita que haya buena posibilidad de acumulación de agua y es por esta razón que se la pone en color verde oscuro, por ser un acuífero fisurado con buena posibilidad de acumulación de agua.

#### **4.13.4. Pts (Formación Charaña)**

La unidad Charaña es de edad Pleistocena se encuentra conformada por sedimentos depositados en una llanura fluvial y lacustre, la cual está constituida litológicamente por un manto de toba de grano grueso, areniscas tobáceas de grano medio y conglomerados finos, los cuales tiene posibilidades de contener agua, pero en poca cantidad y es por este motivo que se lo pone en color azul claro, debido a que los sedimentos pueden tener porosidad, pero no una permeabilidad alta.

#### **4.13.5. Hs (Aluvial)**

Estos depósitos son de edad Holocena y se encuentran conformados por sedimentos tales como cantos, gravas, arenas, arcillas y limos, los cuales se depositaron por acción fluvial y conforman los depósitos aluviales actuales, que conforman buenos acuíferos por su buena porosidad y permeabilidad en los sedimentos y con muy buena posibilidad de que se acumule agua subterránea en estos.

#### **4.13.6. Hs (Terraza)**

Las terrazas aluviales son de edad Holoceno y son testigos de antiguas llanuras aluviales, las cuales se encuentran en diferentes valles y quebradas, ejercen poca influencia en la acumulación de materiales debido a los bajos caudales de los ríos en el área de estudio, pero por su composición litológica conforman buenos acuíferos con buena posibilidad de contener agua.

## CAPITULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Por estar próximo a la cadena volcánica de la Cordillera Occidental, en el área hay gran influencia de rocas ígneas volcánicas que produjeron el depósito de lavas e ignimbritas, con posterior depósitos de sedimentos cuaternarios, siendo este carácter litológico el que tiene mayor control sobre la geomorfología, así como también sobre el modelamiento de la morfología actual.
- Las formaciones geológicas presentes en el áreas de estudio son Cenozoicas y Cuaternarias, teniendo del Mioceno a la Formación Abaroa, del Plioceno las Formaciones Cerke y Pérez y del Cuaternario la Formación la formación Charaña y depósitos cuaternarios tales como depósitos aluviales y terrazas, siendo estas últimas los mejores afines a nuestro trabajo, así como también la formación Pérez que siendo un acuífero fisurado con porosidad secundaria, se encuentran intensamente fracturadas lo que le da una buena posibilidad de contener agua subterránea en estos espacios y permitir la acumulación en los bofedales.
- En el área de estudio las estructuras más importantes son las fracturas debido a que estas están presentes en gran cantidad en las rocas tanto ígneas, como en materiales cuaternarios, lo que posibilita la acumulación de agua subterránea.
- Es importante conocer que los suelos de los bofedales contienen importantes niveles de materia orgánica, lo que permite que se retengan cantidades importantes de agua, evitando que el agua se pierda por escurrimiento durante las épocas lluviosas. Esta retención del agua permite que en épocas secas (5 a 7 meses), los ríos, vertientes y aguas subterráneas sean alimentados.
- Por los datos adquiridos en los meses de monitoreo de la altura piezométrica, en la construcción de los mapas piezométricos y los hidrogramas de los bofedales, se puede conocer que la recarga al acuífero es lenta, debido a que durante la época seca, es decir cuando las precipitaciones son bajas, se observó un aumento del nivel de agua, esto se debe a factores de carácter litológico que condicionan la recarga.
- El ambiente geológico, en los tres bofedales es similar, el bofedal Jalaru y Putani se encuentran asociados a un río, en el sector norte del bofedal Jalaru existe un sistema de riego que mantiene vivo al bofedal, en el caso del bofedal Curajpucho, está siendo alimentado a través de las unidades tobáceas, que serían la fuente de agua para este

sector ya que las tobas se encuentran saturadas según los datos geofísicos y por tanto estas cederían agua al bofedal.

- El volumen aproximado de los bofedales son, bofedal Curajpucho  $1\,392\,237.81\text{ m}^3$ , en el bofedal Jalaru es de  $3\,368\,417.33\text{ m}^3$  y en el bofedal Putani es de  $5\,259\,497.16\text{ m}^3$ . Los datos de volumen de agua calculados en los bofedales son, bofedal Curajpucho es de  $208\,835.67\text{ m}^3$ , bofedal Jalaru es de  $595\,262.60\text{ m}^3$  y bofedal Putani es de  $788\,924.57\text{ m}^3$ . Por lo que se puede conocer que los bofedales tienen aproximadamente un 15% de su volumen saturado por agua subterránea, lo que se considera una buena cantidad, la cual puede ser utilizada para diferentes actividades según su calidad de aguas, teniendo en cuenta que la recarga de los bofedales es lenta y hay mayor cantidad de agua subterránea durante la época seca lo que favorece de gran manera a las comunidades que pueden aprovechar de este recurso durante los meses de precipitaciones bajas.
- Los valores de volumen de fluctuación de agua entre época seca y época húmeda son, en el bofedal Curajpucho es de  $515.23\text{ m}^3$ , en el bofedal Jalaru es de  $698.16\text{ m}^3$  y en el bofedal Putani es de  $1148.55\text{ m}^3$ . Considerando estos datos y comparados con el volumen de agua aproximada contenida en los bofedales, se sabe que el volumen de agua que fluctúa entre las épocas secas y húmedas son, en el bofedal Curajpucho 0.25%, bofedal Jalaru es de 0.11% y en el bofedal Putani es de 0.15%.
- La riqueza hídrica de la subcuenca de los ríos Caño y Putani es de  $129\,385\,857,79$  l/año, y considerando que los tres bofedales estudiados representan el 0.1% del área de la subcuenca, entonces la riqueza hídrica de los bofedales es de  $129\,385,85$  l/año.
- La calidad de aguas en los bofedales Curajpucho y Jalaru presentan valores de conductividad eléctrica, pH y temperatura admisibles para consumo animal y riego, con la excepción de que en épocas secas aumenta el valor del Arsénico lo que llega a afectar su calidad. En el caso del bofedal Putani tiene una conductividad alta por lo que necesitaría prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica para uso adecuado.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas de porosidad para verificar los datos de volumen de agua en los bofedales con mayor precisión.
- La perforación y posterior explotación de los acuíferos profundos en los bofedales solucionarían la problemática hídrica en las comunidades aledañas.

- El presente documento apoyara al planteamiento de estrategias de adaptación al cambio climático y reservas hídricas de la región con el aporte de estudios realizados en la misma área de estudio en diferentes ramas científicas y sociales de interés que viene realizando la ONG “Agua Sustentable”.