

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**



**“ESTUDIO GEOELÉCTRICO Y PLANTEAMIENTO DE EXPLOTACIÓN DE  
AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL FUNDO LA VICTORIA – UNC, 2019”.**

**TESIS**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERO HIDRÁULICO**

Presentado por:

**Bach. JORGE WILSON ROMERO CUEVA**

Asesorado por:

**Dr. Ing. GASPAR VIRILO MÉNDEZ CRUZ**

**CAJAMARCA – PERÚ**

**- 2019 -**

## **AGRADECIMIENTO**

Jessica Tatiana gracias por tu paciencia y comprensión, hoy hemos alcanzado un triunfo más porque los dos somos uno y mis logros son los tuyos; DIOS me ha bendecido al darme una hija hermosa, con quien comparto alegrías y tristezas, pero siempre unidos gracias a Cristo, y nos tenemos el uno a los otros y eso fortalece nuestro compromiso para seguir caminando en este mundo hasta que Cristo nos llame a su presencia.

Quiero agradecer también a todos mis maestros ya que ellos me enseñaron a valorar los estudios y a superarme cada día, agradezco infinitamente a mis padres porque ellos estuvieron guiándome en mi vida como estudiante.

Estoy seguro que mis metas planteadas darán fruto en el futuro y por ende me debo esforzar cada día más para ser mejor en los estudios de posgrado en la Universidad y en todo lugar sin olvidar el respeto que engrandece a toda persona.

## DEDICATORIA

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño a mis padres, por su sacrificio y esfuerzo, por apoyarme y creer en mi capacidad, por estar en los momentos difíciles siempre brindándome su comprensión, cariño y amor.

A mi adorada hija **JESSICA TATIANA** por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depara un futuro mejor.

A mis hermanos quienes con sus palabras de aliento no me dejaban decaer para que siguiera adelante y siempre sea perseverante y cumpla con mis metas propuestas.

A mis compañeros y amigos, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante estos cinco años estuvieron a mi lado apoyándome y lograran que este sueño se haga realidad.

Gracias a todos.

## TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
I. INTRODUCCION	1
II. MARCO TEÓRICO	3
2.1. INVESTIGACIONES ANTERIORES	3
2.2. GEOELÉCTRICA	7
2.3. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA	43
2.4. EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	55
2.5. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL SUELO	64
2.6. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	67
III. MATERIALES Y MÉTODOS	69
3.1. ÁREA DE ESTUDIO	69
3.2. UBICACIÓN TEMPORAL	71
3.3. MATERIALES	71
3.4. EQUIPO DE RESISTIVIDAD ELECTRICA DE SUELOS	72
3.5. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS Y CARACTERISTICAS FISICAS	72
3.6. METODOLOGÍA	74
IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	87
4.1. REQUERIMIENTO DE AGUA EN EL FUNDO LA VICTORIA - UNC	87
4.2. INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA	87
4.3. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	88
4.4. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SEVs	88
4.5. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES DE EXPLORACIÓN	97
4.6. CARACTERIZACIÓN DEL ACUIFERO	104
4.7. DIRECCIÓN DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	104
4.8. DETERMINAR LUGARES DONDE PERFORAR POZOS	104
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
5.1. CONCLUSIONES	105
5.2. RECOMENDACIONES	107
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
VII. ANEXOS	110

## ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1: Valores típicos de  $V_p$  y  $V_s$ .
- Tabla 2: Resistividad de algunos materiales en ohmios-metro.
- Tabla 3: Coeficiente de pérdidas totales (Ct).
- Tabla 4: Balance hídrico para el valle de Cajamarca.
- Tabla 5: Consumo potencial de agua según su peso, estado físico y temperatura.
- Tabla 6: Resistividades encontradas en el SEVP – QÑ 01.
- Tabla 7: Resistividades encontradas en el SEVP – QÑ 02.
- Tabla 8: Resistividades encontradas en el SEVP – CB 01.
- Tabla 9: Resistividades encontradas en el SEVP – FV 01.
- Tabla 10: Resistividades encontradas en el SEV – 01.
- Tabla 11: Resistividades encontradas en el SEV – 02.
- Tabla 12: Resistividades encontradas en el SEV – 03.
- Tabla 13: Resistividades encontradas en el SEV – 04.
- Tabla 14: Resistividades encontradas en el SEV – 05.
- Tabla 15: Resistividades encontradas en el SEV – 06.
- Tabla 16: Resistividades encontradas en el SEV – 07.
- Tabla 17: Resistividades encontradas en el SEV – 08.
- Tabla 18: Resistividades encontradas en el SEV – 09.
- Tabla 19: Resistividades encontradas en el SEV – 10.
- Tabla 20: Resistividades encontradas en el SEV – 11.
- Tabla 21: Resistividades encontradas en el SEV – 12.
- Tabla 22: Resistividades encontradas en el SEV – 13.
- Tabla 23: Resistividades encontradas en el SEV – 14.
- Tabla 24: Resistividades encontradas en el SEV – 15.
- Tabla 25: Resistividades encontradas en el SEV – 16.
- Tabla 26: Resistividades encontradas en el SEV – 17.
- Tabla 27: Resistividades encontradas en el SEV – 18.
- Tabla 28: Resistividades encontradas en el SEV – 19.
- Tabla 29: Resistividades encontradas en el SEV – 20.

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Esquema de ejecución de ensayos MASW.
- Figura 2: Flujo de corriente en un suelo homogéneo e isótropo.
- Figura 3: Líneas de corriente y equipotenciales en las proximidades del electrodo “A”.
- Figura 4: Flujo de corriente en medio natural.
- Figura 5: Cuadripolo de resistividades.
- Figura 6: Volumen del terreno que influye en la medición de la ( $\rho_a$ ).
- Figura 7: Flujo de corriente en un suelo de dos estratos.
- Figura 8: Ejecución de un sondeo eléctrico vertical.
- Figura 9: Perfil electro resistivo (PER).
- Figura 10: Dispositivos de medición.
- Figura 11: Empalmes en la curva de un SEV.
- Figura 12: Clasificación de las curvas de tres capas.
- Figura 13: Interpretación de un SEV.
- Figura 14: Proceso de interpretación de un SEV.
- Figura 15: Electrodo de potencial impolarizable.
- Figura 16: Ciclo hidrológico del agua.
- Figura 17: Perfil hidrogeológico del subsuelo.
- Figura 18: Acuífero libre.
- Figura 19: Acuífero semilibre.
- Figura 20: Acuífero semiconfinado.
- Figura 21: Acuífero confinado.
- Figura 22: Perfil hidrogeológico en estratos acuíferos con pozos.
- Figura 23: Arena saturada con agua, mostrando la diferencia de presión.
- Figura 24: Red de flujo.
- Figura 25: Plano de ubicación de la zona de estudio.
- Figura 25: Plano de ubicación de la zona de estudio.
- Figura 26: Secuencia de actividades para realizar la investigación.
- Figura 27: SEV paramétrico QÑ 01 vs ensayo STO-02, 2008.
- Figura 28: SEV paramétrico QÑ 02 vs ensayo STO-05, 2008.
- Figura 29: SEV paramétrico pozo Cerrillo bajo vs estratigrafía pozo Cerrillo Bajo.
- Figura 30: SEV paramétrico pozo Fundo La Victoria vs NE pozo Fundo La Victoria.

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Equipo multiparámetros para medir resistividad eléctrica del agua.

Fotografía 2: Equipo para medir resistividad eléctrica de suelos.

Fotografía 3: Multitester digital empleados para la toma de lecturas.

Fotografía 4: Equipo para medir resistividad de suelos (resistivímetro).

Fotografía 5: Ejecución SEV paramétrico N° 01, en Qapac Ñan.

Fotografía 6: Toma de datos del nivel estático en el pozo del Fundo La Victoria.

## RESUMEN

Esta investigación tuvo por objetivo determinar la resistividad eléctrica de los estratos geológicos y el planteamiento de explotación de aguas subterráneas en el Fundo La Victoria, propiedad de la Universidad Nacional de Cajamarca; el cual está ubicado en el distrito de Llacanora provincia de Cajamarca en el departamento de Cajamarca; aplicando para ello la prospección geofísica (Sondeos Eléctricos Verticales). Se ejecutaron veinte (20) SEVs de prospección hasta una profundidad de investigación de 200 m, aplicando el dispositivo Schlumberger en un área de 52.8981 hectáreas, la fecha en que se ejecutaron es desde el 20 de abril del 2019 al 30 de junio del 2019. De los resultados se ha obtenido que la resistividad del suelo varía en el rango  $(5.21 - 126.33)\Omega - m$ , tratándose de suelos arcillosos, limosos, arenosos, gravosos y la combinación de ellos, el nivel freático se encuentra a una profundidad que varía desde los 1.05 m hasta los 5.28 m; después de realizar la interpretación de las resistividades obtenidas se llegó a la conclusión que estamos frente a un acuífero libre del cual podemos extraer agua en cantidad suficiente para abastecer al Fundo La Victoria; también encontramos un acuitardo, es decir un horizonte formado por arcillas saturadas. Para la explotación del agua subterránea se ubicaron 2 puntos donde sería más favorable la perforación de pozos tubulares para la extracción de agua subterránea.

**Palabras claves:** Prospección geofísica, Resistividad eléctrica, acuífero, sondeo eléctrico vertical, dispositivo Schlumberger, aluvial.

## ABSTRACT

This research aimed to determine the electrical resistivity of the geological strata and the approach to the exploitation of groundwater in the Fundo La Victoria, owned by the National University of Cajamarca; which is located in the district of Llacanora province of Cajamarca in the department of Cajamarca; applying geophysical prospecting (Vertical Electrical Probes). Twenty (20) survey SEVs were executed up to a research depth of 200 m, applying the Schlumberger device in an area of 52.8981 hectares, the date on which they were executed is from April 20, 2019 to June 30, 2019. From the results it has been obtained that the resistivity of the soil varies in the range (5.21-126.33)  $\Omega$ -m, being clayey, silty, sandy, burdensome soils and the combination of them, the water table is at a depth that varies from 1.05 m to 5.28 m; After performing the interpretation of the resistivities obtained, it was concluded that we are facing a free aquifer from which we can extract enough water to supply Fundo La Victoria; we also find an aquitard, that is to say a horizon formed by saturated clays. For the exploitation of groundwater, 2 points were located where the drilling of tubular wells for the extraction of groundwater would be more favorable.

**Keywords:** Geophysical prospecting, Electrical resistivity, aquifer, vertical electrical sounding, Schlumberger device, alluvial.

## I. INTRODUCCION

El presente trabajo de investigación está orientado al estudio del agua subterránea en cuanto a cantidad se refiere, esto debido a la importancia que el recurso hídrico subterráneo juega dentro de la sociedad, puesto que el volumen de agua subterránea representa el 30.1% del total de agua dulce que se tiene en la tierra, (Shiklomanov, IA. 1997).

El agua subterránea es producto del agua meteórica que se precipita hacia la superficie en forma de lluvia o nieve, y logra infiltrarse en el suelo llenando las fisuras y grietas de las rocas consolidadas, y los poros de los suelos no consolidados. El origen del agua subterránea no se estableció claro sino hasta finales del siglo XVII, cuando el francés Pierre Perrault, producto de sus investigaciones hidrológicas realizadas en la cuenca del río Sena fue el primero en demostrar que el agua subterránea no proviene de los océanos, sino de las lluvias o el deshielo.

En efecto, se denomina agua subterránea a todas las aguas que los encontramos ocupando los poros y las grietas de los estratos bajo la superficie de la tierra, para lo cual un método muy utilizado es la prospección eléctrica cuya utilización es económica, eficaz y rápida. La prospección eléctrica de suelos permite localizar y distinguir las zonas más favorables para la instalación de capturas, pozos y sondeos, (Castany, G. 1975).

Ante el **problema** de desabastecimiento de agua para uso poblacional y agua para uso agropecuario en el Fundo La Victoria, es que se tomó la iniciativa de realizar esta investigación geoelectrónica aplicada a las aguas subterráneas y su planteamiento de explotación como alternativa de solución; como es sabido el Fundo La Victoria es propiedad de la Universidad Nacional de Cajamarca, el cual requiere de 0.29 l/s de agua para uso poblacional, 601201.68 m<sup>3</sup>/año de agua para riego y de 3370.00 l/día de agua para uso pecuario; para solucionar el desabastecimiento de agua.

Esta investigación geoelectrónica se **justifica** por el bajo costo y la metodología que se empleó (Sondeo Eléctricos Vertical) puesto que son muy utilizados en estudios hidrogeológicos con fines de aprovechamiento del agua subterránea; puesto que su aplicación es rápida en comparación con la perforación de pozos; además de ser económica nos permite conocer los materiales que componen el subsuelo.

Dado que la **metodología** aquí aplicada es la prospección geofísica, específicamente el Sondeo Eléctrico Vertical, el cual es aplicado a diferentes tipos de terrenos, con el cual se ha determinado la resistividad eléctrica de los estratos geológicos en el Fundo La Victoria, propiedad de la Universidad Nacional de Cajamarca; por ello se espera que el alcance de esta investigación sirva para complementar los estudios geotécnicos con fines de cimentación que se realizaron en esta zona. Además, que sirva de guía para futuros estudios hidrogeológicos a realizarse en mencionada zona del Valle de Cajamarca.

El **objetivo** general que se ha perseguido con esta investigación es:

Determinar la resistividad eléctrica de los estratos geológicos en el Fundo La Victoria – UNC 2019, e identificar los puntos más favorables donde perforar pozos para la explotación del agua subterránea; aplicando para ello el método indirecto de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs).

Para lograr el objetivo general antes mencionado, se tuvo que cumplir con cada uno de los objetivos específicos que a continuación se mencionan.

- Determinar el requerimiento de agua en el Fundo La Victoria – UNC.
- Inventariar las fuentes de agua subterránea cercanos al Fundo La Victoria - UNC.
- Realizar el levantamiento topográfico en el Fundo La Victoria - UNC.
- Validar la metodología empleada (Sondajes Eléctricos Verticales).
- Realizar los (SEVs) de exploración e interpretación de resultados.
- Caracterizar el acuífero del Fundo La Victoria – UNC.
- Determinar la dirección de flujo de aguas subterráneas.
- Determinar los lugares donde realizar la perforación de pozos.

## **II. MARCO TEÓRICO**

Los estudios geoelectrónicos nos permiten determinar la constitución de los sedimentos, rocas y la ubicación de las aguas subterráneas, utilizando para ello la variación de la resistividad eléctrica en la profundidad del terreno. En esta investigación se ha realizado el estudio geoelectrónico para la prospección del agua subterránea, y la ubicación de pozos para la explotación del recurso hídrico subterráneo y así satisfacer las necesidades hídricas tanto para consumo humanos, así como para consumo agropecuario en el Fundo La Victoria de propiedad de la Universidad Nacional de Cajamarca.

El Fundo La Victoria forma parte del valle de Cajamarca, en el cual se han realizado investigaciones geofísicas como es el caso del coliseo del Gran Qhapac Ñan, las cuales se detallan a continuación.

### **2.1. INVESTIGACIONES ANTERIORES**

Tenemos al estudio denominado “Estudio de Mecánica de suelos con fines de cimentación del nuevo coliseo de Cajamarca”, el cual tuvo por objetivo realizar el estudio de suelos con fines de cimentación del nuevo coliseo de Cajamarca el cual fue realizado por la empresa Jorge E. Alva Hurtado Ingenieros E.I.R.L. consultor en ingeniería y geotecnia. Dentro de las investigaciones que se realizó tenemos:

#### **a. Calicatas y Sondajes con Posteadora**

Se ejecutaron en total 11 calicatas o excavaciones a cielo abierto. A partir del fondo de 05 de las calicatas se continuó con la exploración mediante posteadora manual hasta las profundidades de como máximo 5.60 m, por las características del material y el nivel freático elevado no se profundizó más. Asimismo, se realizaron 02 sondajes con posteadora manual a partir del nivel superficial del terreno.

Se tomaron muestras alteradas de cada uno de los tipos de suelos encontrados, las que en cantidad suficiente y debidamente protegidas fueron remitidas al laboratorio para realizar los ensayos de clasificación y el análisis químico. Se extrajeron, también, muestras inalteradas que fueron remitidas al laboratorio para realizar ensayos de compresión simple.

Paralelamente al muestreo se efectuó el registro de las excavaciones y sondajes, anotándose las principales características de los estratos encontrados, tales como: clasificación, compacidad, color, humedad, plasticidad, espesor, nivel freático, etc.

#### **b. Ensayo de Penetración Estándar y Cono Dinámico**

Con la finalidad de conocer la resistencia cortante in situ del suelo de fundación se efectuaron 05 ensayos de penetración estándar (SPT) según la norma ASTM D 1586. Los sondajes fueron ejecutados por el Laboratorio Geotécnico de la Empresa Hidroenergía Consultores en Ingeniería SRL. Los sondajes SPT se realizaron hasta una profundidad máxima de 12.00 m y se continuaron con el cono dinámico o “Cono Peck”.

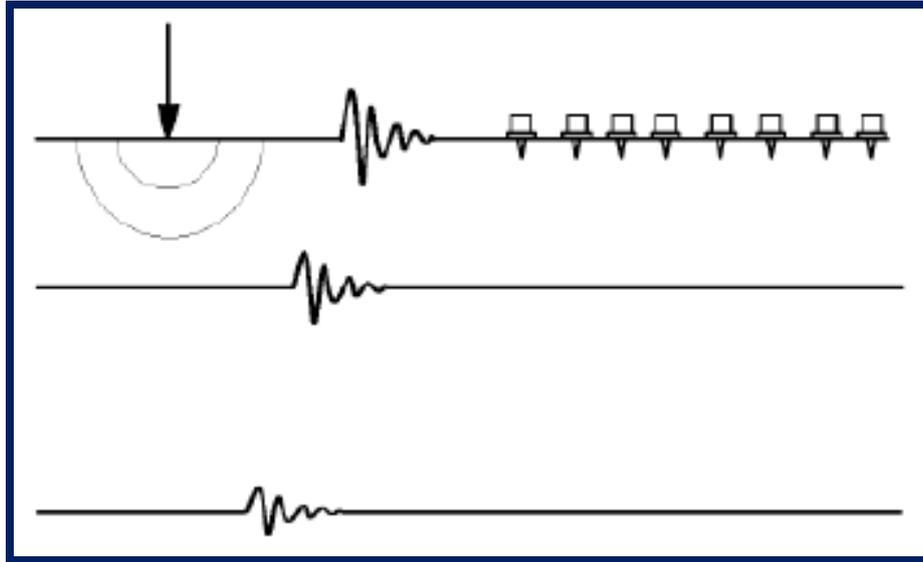
De cada uno de los sondeos realizados mediante el ensayo de penetración estándar se extrajeron muestras alteradas representativas, para ser enviadas al laboratorio y poder identificar el tipo de suelo, además de establecer sus características físicas.

#### **c. Investigaciones geofísicas anteriores**

Se han realizado investigaciones geofísicas para determinar los perfiles del suelo en función a sus características de propagación de ondas y de electricidad; las profundidades de investigación son variables, según el objetivo específico requerido. Esto con el objetivo de lograr un mayor conocimiento de las propiedades de las diferentes capas que servirán para completar la información de la superficie y el subsuelo, y así complementar el estudio geotécnico para la cimentación del coliseo de Cajamarca.

- **Exploración Geofísica Mediante el Método de Análisis Multicanal de Onda de Superficie (MASW).**

El ensayo MASW o Análisis Multicanal de Ondas de Superficie es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman. Este método consiste en generar ondas vibratorias en la superficie del terreno (figura 1) y registrar a distancias variables el arribo de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh), con las cuales a través de un proceso inverso e iterativo se determinan los cambios de velocidades de ondas de corte en el subsuelo, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) para el punto central de dicha línea.



**Figura 1:** Esquema de ejecución de ensayos MASW

**Fuente:** Estudio de mecánica de suelos del nuevo coliseo de Cajamarca, 2008.

La interpretación de los registros consiste en identificar las ondas superficiales provenientes de diferentes profundidades y obtener una curva de dispersión, que representa la variación de la velocidad de fase de las ondas superficiales con la frecuencia. Como dichas velocidades se aproximan en un 90 a 95% del valor de  $V_s$ , se utiliza esta información como modelo inicial y luego mediante un cálculo inverso iterativo, mediante el método de mínimos cuadrados, se obtiene el perfil  $V_s$  desde la curva de dispersión estimada para cada punto.

Una de las ventajas de este método, así como de otros que aprovechan el uso de ondas superficiales, es que es posible encontrar estratos de bajas velocidades que están por debajo de estratos de velocidades más altas.

**Trabajo de Campo.** El trabajo de campo para este ensayo ha sido realizado teniendo en cuenta el objetivo de la exploración. Se llevaron a cabo investigaciones de prospección geofísica, empleando el método de Análisis Multicanal de Ondas de Superficie con el objeto de determinar el perfil estratigráfico de la zona en estudio en función a sus características de propagación de ondas.

Para realizar cada uno de los ensayos se define primeramente el eje de la línea sísmica, luego se instalan los geófonos y los cables de conexión al equipo de adquisición de datos. Se realizaron 21 líneas sísmicas de 53 m para la ejecución de ensayo MASW, acumulando un total de 1113 metros. Para realizar los ensayos, el espaciamiento entre geófonos fue de 3 m.

**Resultados del Ensayo MASW.** Se presenta un resumen de los ensayos MASW, luego de la evaluación de los registros obtenidos en campo de las velocidades de propagación de ondas S y el número de estratos identificados en cada línea sísmica. En el Anexo N° 01 se muestran el registro de los sondajes STP – 02 y STP – 05.

**Evaluación de Ensayos MASW.** La interpretación de los ensayos de refracción sísmica se realizó tomando en cuenta experiencias anteriores y considerando el Cuadro que a continuación se muestra el cual es de velocidades.

La interpretación de ensayos MASW, correspondientes a las líneas realizadas, genera un modelo unidimensional de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 15 metros en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de tres estratos. El primer estrato presenta valores de velocidad de propagación de ondas Vs entre 180 a 260 m/s, hasta una profundidad de 3.0 m, estratigráficamente este material correspondería a un suelo de cobertura conformado por material blando. El segundo estrato presenta valores de velocidad entre 200 a 370 m/s que correspondería a un material arcilloso blando a medianamente compacto, hasta la profundidad de 10.0 m. El tercer estrato presenta velocidades Vs de 270 a 540 m/s que indicarían la existencia de un material arcilloso medianamente compacto.

**Tabla 1:** Valores típicos de  $V_p$  y  $V_s$ .

Descripción	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)
Suelos superficial	250	90
Limo	1150	210
Arcilla	1330.00	350.00
Arena	1760	450
Arena fina	1780	460
Arena media	1810	600
Arena gruesa	1700	300
Grava	1910	510
Grava gruesa	2250	650
Esquisto de barro, Depósito o Acarreo Fluvial	1750	550

**Fuente:** Estudio de mecánica de suelos del nuevo coliseo de Cajamarca, 2008.

## 2.2. GEOELÉCTRICA

Rama de la geofísica que se encarga de estudiar el comportamiento de rocas y sedimentos en relación a la conductividad de la corriente eléctrica. Es decir, estudian la respuesta del terreno cuando se propaga a través de ellas corrientes eléctricas continuas. El parámetro físico que se controla es la resistividad y la interpretación final se hace en función de las características geológicas de la zona.

### a. Resistividad eléctrica

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene este, para conducir electricidad, es conocida como la resistencia específica del terreno; esto es, si en un terreno introducimos una corriente eléctrica, esta se propaga de forma tal que podemos asignar al terreno una resistencia, una capacidad y una inductancia (excluimos los intervalos inicial y final de la apertura y cierre del circuito), tendremos la resistencia como único parámetro.

Su origen se remonta hasta antes de la primera guerra mundial, cuando por primera vez Conrad Schlumberger en 1913 introduce una fuente artificial (inyección de corriente al suelo) para estudiar la cuenca silúrica de Calvados (Francia), de este modo demostró las ventajas de la corriente directa, la cual puede penetrar a grandes profundidades, (Master Curves For Electrical Sounding, *compañía general de Geofísica (C.G.G)*).

En prospección geoelectrica los parámetros que se miden son; diferencia de potencial y la intensidad de corriente, pero el parámetro físico básico que se obtiene es la resistividad del suelo, es decir, la resistencia específica de las capas horizontales de suelos estratificados. La unidad de medida de la resistencia específica en el S.I. es el Ohmio-metro ( $\Omega - m^2/m$  o  $\Omega - m$ ), que corresponde a la intensidad de 1 amperio que permite pasar por un material conductor de sección  $1 m^2$  y longitud de 1 m cuando se le aplica en sus caras opuestas una diferencia de potencial de 1 Voltio, además recalcar también que en ocasiones, en lugar de la resistividad se emplea la conductividad ( $\sigma$ ), que es su inverso.

Cuando se introduce electricidad en el suelo se debe tener en cuenta que esta no sólo se desplaza por la superficie del terreno, sino que también se introduce en el terreno, la profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores de corriente (AB). Mientras mayor sea la distancia entre los electrodos (AB), la corriente circulara a mayor profundidad, pero su densidad disminuye.

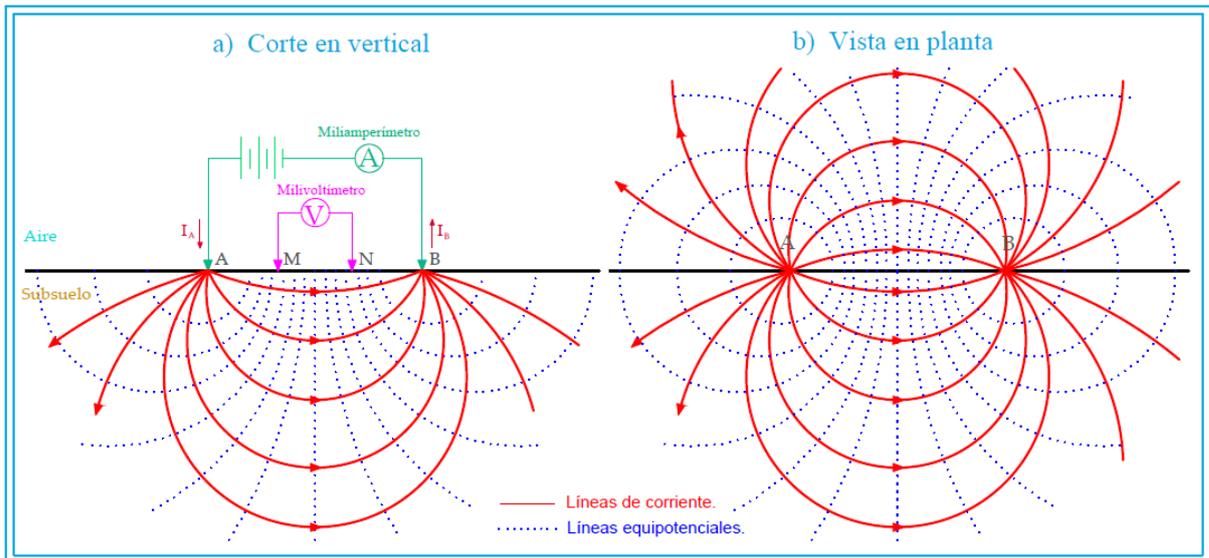
Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad ( $AB/2$ ) y el 70.6% por encima de una profundidad  $AB$  (Orellana, 1982). Sin embargo, no es posible determinar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual sin anularse nunca, por lo que podríamos suponer que es proporcional a  $(AB)$ . Sin embargo, esto no es cierto en general puesto que lo dicho solo es válido para un subsuelo homogéneo.

En prospección geoelectrica utilizando corriente continua, la profundidad de investigación ha sido considerada sinónimo de la profundidad de penetración de la corriente. Sin embargo, el efecto de una capa en los potenciales o campos observados en superficie no depende únicamente de la densidad de corriente que la atraviesa, (Roy y Apparao, 1971), define la profundidad de investigación característica como la profundidad a la que una capa delgada de medida de la resistividad eléctrica del subsuelo (paralelo a la superficie) contribuye con participación máxima a la señal total medida en la superficie del terreno.

Los autores indican que la profundidad de investigación está determinada por la distancia de los electrodos inyectores y detectores, y no solo por la penetración o distribución de corriente. Además para una misma corriente de inyección, la resistividad ( $\rho$ ) medida será independiente de la posición de los electrodos de inyección y detección cuando estos se intercambian.

Esta propiedad se conoce con el nombre de *Principio de reciprocidad*, que se cumple también para los medios heterogéneos. No obstante, en la realidad en la práctica no se tiene que tener en cuenta que cuando se coloca los electrodos (M) y (N) tan separados (como normalmente los A y B) la medición resulta más fácilmente afectada por las corrientes telúricas, corrientes parasitas industriales, es decir ruidos cuyo efecto aumenta proporcionalmente con la distancia entre (M) y (N).

La figura 2 que se muestra a continuación, representa el campo eléctrico para un suelo homogéneo e isótropo.



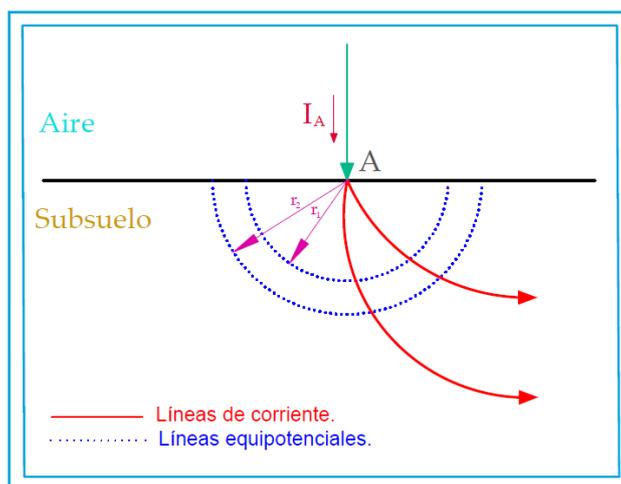
**Figura 2:** Flujo de corriente en un suelo homogéneo e isótropo.

**Fuente:** Adaptado del libro: Prospección Geoeléctrica (Estrada, L. 2012).

De la figura anterior, si tomamos el sentido técnico de la circulación de la corriente eléctrica, la cual lo establecen los electrones, esto es desde donde hay exceso de carga negativa hasta donde hay carga positiva, es decir de polo negativo a polo positivo, el electrodo (A) representaría un manantial puntual, y el electrodo (B) un sumidero también puntual. La corriente eléctrica “I” (medida en miliamperímetros), es comparable con el caudal del flujo subterráneo que ingresa al terreno por (A) y es igual a la que sale de el por (B), esto en condiciones de régimen estacionario (sin pérdida ni ganancia entre A y B), cerrándose el circuito en la fuente de poder (baterías), la misma que ha originado este flujo de electrones en los cables y principalmente de iones en el terreno gracias a la diferencia de voltaje entre sus bornes de salida y que, en nuestra analogía, la podemos comparar con una diferencia de niveles piezométricos, siendo (A) de mayor valor piezométrico, por lo que el flujo es de (A) hacia (B). Esta comparación solo es posible cuando se usa corriente directa, de lo cual:

$$I_A = I_B \quad (1)$$

Si los electrodos (A) y (B) están separados una distancia considerable y el subsuelo es homogéneo e isótropo, las líneas de corriente son radiales y divergentes y las superficies equipotenciales son semiesféricas en las proximidades del electrodo (A), así como lo podemos mostrar a continuación en la figura 3. En este caso la resistividad del subsuelo será.

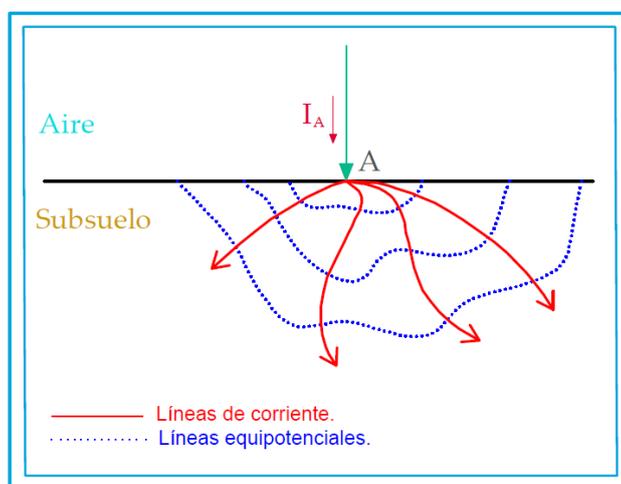


**Figura 3:** Líneas de corriente y equipotenciales en proximidades del electrodo “A”.

**Fuente:** Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea (Auge, M. 2008).

$$\rho = 2\pi \frac{(r_2 - r_1) \Delta V}{r_2 \cdot r_1 I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

Donde ( $K$ ) se denomina constante geométrica, porque depende directamente de la geometría del dispositivo empleado para inyectar y medir la corriente y tiene las dimensiones de una distancia. Como se sabe, el componente geológico natural no es isótropo ni homogéneo, por lo que las superficies equipotenciales y las líneas de corriente no son regulares y rectas como podemos notar en la figura 4, Además la resistividad obtenida en la ecuación 2, corresponderá a una integración de los valores medios, en los que inciden la anisotropía y la heterogeneidad del terreno y la posición relativa de los electrodos; a esta resistividad se la denomina resistividad aparente ( $\rho_a$ ), que en la práctica es lo que en realidad se mide.



**Figura 4:** Flujo de corriente en medio natural.

**Fuente:** Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea (Auge, M. 2008).

En el caso de la corriente alterna también tiene lo mismo, pero el sentido de la corriente o flujo se invierte constantemente de acuerdo a la frecuencia, es así que, por ejemplo, en la red eléctrica doméstica, el sentido de la corriente cambia de sentido 60 veces por segundo y, consecuentemente, los focos se apagan y encienden también a razón de 60 veces por segundo mientras están funcionando. Por otro lado, el tratamiento matemático para el uso de la corriente alterna en la prospección eléctrica de suelos es más complejo, además presenta el inconveniente de tener un poder de penetración en el terreno inverso a la frecuencia, que es el fenómeno conocido como “efecto skin”, por no hablar también de los problemas de acoplamiento e inducción entre cables, por lo que, en adelante, se trata exclusivamente del uso de la corriente continua o directa en la prospección eléctrica de suelos. Esto se especifica en la tesis (Abastecimiento de agua para usos complementarios de la Universidad Nacional de Cajamarca con la aplicación de método de la resistividad eléctrica de suelos en el estudio hidrogeológico; Carlos A. Cerdán Moreno, 1997).

La resistividad ( $\rho$ ) del terreno varía dependiendo de su composición y de algunas condiciones físicas. Sus valores se encuentran desde unos pocos hasta millones de ohmios-metro, los suelos orgánicos suelen tener valores bajos; y las rocas valores muy altos, y está influenciada por:

- Tipo de suelo
- Composición química de las sales disueltas en el agua contenida
- Contenido de humedad
- Compactación
- Tamaño y distribución del grano
- Temperatura
- Procesos geológicos
- Litología

Solo son conductores los materiales metálicos y algunas de sus sales. El terreno, por lo tanto, sería en general aislante o de resistencia muy elevada. Pero en todos los materiales del terreno existen poros saturados o no de agua, aunque siempre con una cierta humedad.

El agua, por la presencia de sales disueltas, en proporción que depende de la temperatura, actúa como un conductor, cuya resistividad o resistencia específica oscila en la práctica entre

0.03 ohmios-metro (agua de mar) y 3000 ohmios-metro (agua extraordinariamente pura, obtenida por destilación con precauciones especiales).

La resistividad de las rocas dependerá, por lo tanto, del volumen de sus poros, de su distribución y de la resistividad del líquido que los rellena. Esto es que, si los poros estuviesen acumulados en tubos capilares y paralelos, la resistencia entre las dos caras de un cubo de arista unidad sería:

$$\rho_t = \frac{\rho_w}{\phi} \quad (3)$$

Donde:

- $\rho_t$  = Resistividad del terreno.
- $\rho_w$  = Resistividad del agua.
- $\phi$  = Porosidad en tanto por uno.

En la naturaleza, la porosidad no corresponde a huecos distribuidos en la forma indicada; por ello, es necesario introducir el llamado factor de formación, que experimentalmente se ha encontrado puede expresarse por:

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (4)$$

Donde:

- $F$  = Factor de formación.
- $a$  = Coeficiente que varía entre 0.81 para las arenas y 1 para las rocas compactas.
- $m$  = Factor de cementación, variable entre 1.5 y 3.0.
- $\phi$  = Porosidad en tanto por uno.

En la práctica se suele tomar:

$$F = \frac{1}{\phi^2} \quad (5)$$

Y la resistividad de un terreno saturado será:

$$\rho_t = \frac{\rho_w}{\phi^2} \quad (6)$$

Si el agua no satura el terreno, es fácil concluir que solo habrá de considerarse una parte de los poros y, por tanto:

$$\rho_t = \frac{\rho_w}{(\phi S)^2} \quad (7)$$

Siendo "S" la saturación, se comprende que no es posible clasificar los terrenos por la resistividad, ya que esta característica eléctrica está ligada a la porosidad, al contenido de agua y su resistividad. Sin embargo, si existe una cierta relación indicativa y lo que es más interesante, conocido el terreno y su situación respecto al nivel freático, podemos deducir su porosidad de forma aproximada y cualitativa y del mismo modo la calidad del agua que rellena los poros. A efectos hidrogeológicos, una porosidad baja se manifiesta por resistividad elevada. Si la roca se encuentra sobre el nivel freático, o no contiene agua, la resistividad será elevada. Si la resistividad es muy baja, el agua almacenada tendrá un elevado contenido de sales.

**Tabla 2:** Resistividades de algunos materiales en ohmios-metro.

Suelos/Roca	Resistividad en Ohmios-metro
Aguas subterráneas en granito y roca hipogénica	20 - 100
Aguas subterráneas en caliza y acarreos	20 - 50
Aguas salobres	01-oct
Aguas potables superficiales	20 - 300
Agua de mar	Menor de 0.2
Agua destilada	Mayor de 500
Arcillas y margas	10 - 100
Calizas y areniscas	50 - 3000
Pizarras	50 - 300
Rocas hipogénicas y metamórficas	10 - 10000
Gravas	10 - 10000
Arenas	130 - 1000
Limos	30 - 500

**Fuente:** Hidrología Subterránea (Custodio, E. y Llamas, MR. 2001).

Las dispersiones que se observan en la tabla 2, son incluso inferiores a las que pueden encontrarse en la realidad. Por ejemplo, una arcilla desecada naturalmente puede presentar valores muy superiores a los 100 ohmios-metro, que indicarán claramente su estado, unas gravas con resistividad de 10-20 ohmios-metro se encuentra con seguridad bajo el nivel freático y el agua es salobre. Un granito con resistividad de 100 ohmios-metro indica que

esta alterado si se encuentra sobre el nivel freático, y con una gran fracturación si se encuentra debajo y el agua no es muy salobre o marina. La práctica permite deducir bastante aceptablemente el estado de la roca y la calidad del agua, siempre que por hipótesis geológicas se conozca la naturaleza de la roca del subsuelo. También es fácil concluir que no puede deducirse la naturaleza de la roca realizando mediciones en los afloramientos próximos y comparando las resistividades con las obtenidas en el sondeo eléctrico, ya que en el afloramiento existe una alteración y humedad diferente de las que se encuentra en profundidad, (Custodio, E. y Llamas, MR., 2001).

- **Fórmulas**

Si clavamos un electrodo en la superficie plana de un terreno homogéneo e isótropo, con resistividad ( $\rho$ ), y por el introducimos una corriente de intensidad ( $I$ ), el potencial creado en un punto cualquiera del semiespacio, a distancia ( $r$ ) del manantial, está definido por:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} + C \quad (8)$$

Donde ( $C$ ) es una constante debida a la resistencia del contacto entre el electrodo y el terreno. Esta fórmula es válida para todo el semiespacio si el electrodo tiene la forma esférica y solo válida a partir de una cierta distancia ( $r_0$ ), si no tiene esa forma.

Si en lugar de suministrar una intensidad ( $I$ ) (manantial) tomamos del terreno una intensidad ( $-I$ ) (sumidero) la fórmula es igualmente válida. Si sobre el terreno cerramos un circuito mediante dos electrodos tendremos el doble efecto de un manantial y un sumidero.

Supongamos una configuración del terreno análogo al de la figura 5, la diferencia de potencial creado entre los puntos (M) y (N) será la siguiente; la diferencia de potencial originado por el manantial (A) será:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{L_1} + C_A + C_M - \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{L_2} - C_A - C_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1} \right) + C_M - C_N \quad (9)$$

Diferencia de potencial originado por el sumidero (B):

$$V'_M - V'_N = \frac{\rho(-I)}{2\pi} \cdot \frac{1}{l_1} - C_B - C_M - \frac{\rho(-I)}{2\pi} \cdot \frac{1}{l_2} + C_B + C_N = -\frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \right) - C_M + C_N \quad (10)$$

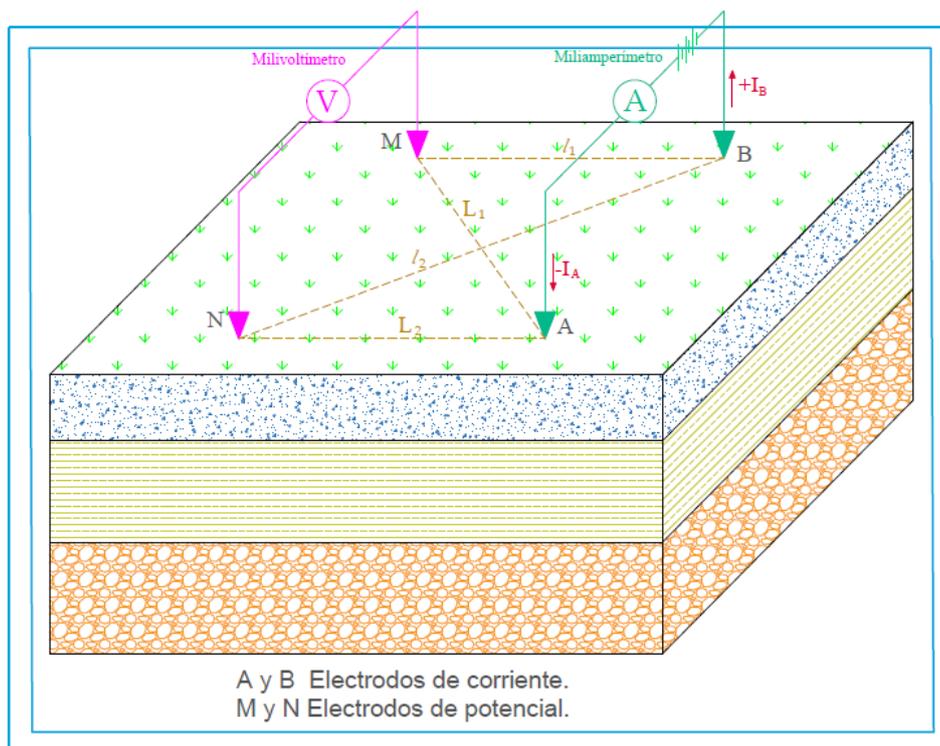
Diferencia de potencial creado por el circuito en (MN):

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1} - \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right) \quad (11)$$

Como podemos notar en la fórmula han desaparecido las resistencias de contactos de los cuatro electrodos (A), (B), (M) y (N). Esta fue la idea base de Schlumberger en 1912 y la fórmula (5) es la básica en la prospección eléctrica resistiva. De ella podemos deducir la resistividad del terreno definida por:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left( \frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} - \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right)^{-1} \quad (12)$$

Cuyos términos se aprecian en la siguiente figura 5.

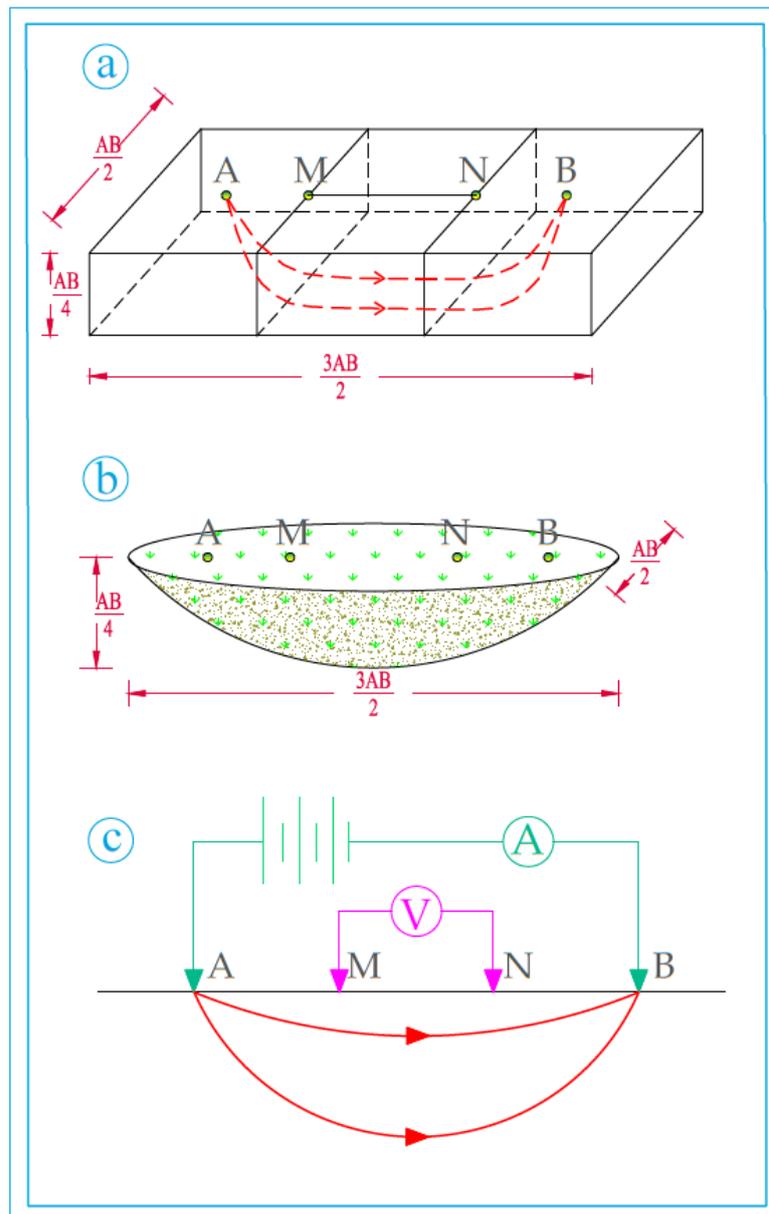


**Figura 5:** Cuadrupolo de Resistividades.

**Fuente:** Adaptado de: Hidrología Subterránea (Custodio, E. y Llamas, MR. 2001).

La resistividad aparente del terreno que se obtiene a partir de la ecuación (12), se aplica a cualquier dispositivo de medición, y corresponde a un volumen de terreno, cuyo centro coincide con el centro de la distribución de los electrodos. Para Jean Pimiento considera en primera aproximación que esta resistividad, corresponde a un volumen de terreno que tiene de largo los tres medios de la distancia (AB), y el ancho la mitad de esta distancia y de

espesor un cuarto de éste, de acuerdo a esto, se tiene que al separar los electrodos (A) y (B) aumenta la profundidad explorada; Garcia Yague, considera este volumen de terreno como un semielipsoide de revolución, con eje mayor y de revolución coincidente con la línea de emisión y dimensiones igual a tres medios de (AB), y el eje menor un medio de (AB); sin embargo el más aceptado es el modelo de Benjamin F. Howell, el cual lo presentamos a continuación.



**Figura 6:** Volumen de terreno que influye en la medición de la ( $\rho_a$ ).

**Fuente:** Adaptado de la tesis: Abastecimiento de agua para usos complementarios de la Universidad Nacional de Cajamarca con la aplicación de método de la resistividad eléctrica de suelos en el estudio hidrogeológico; (Cerdán Moreno, CA. 1997).

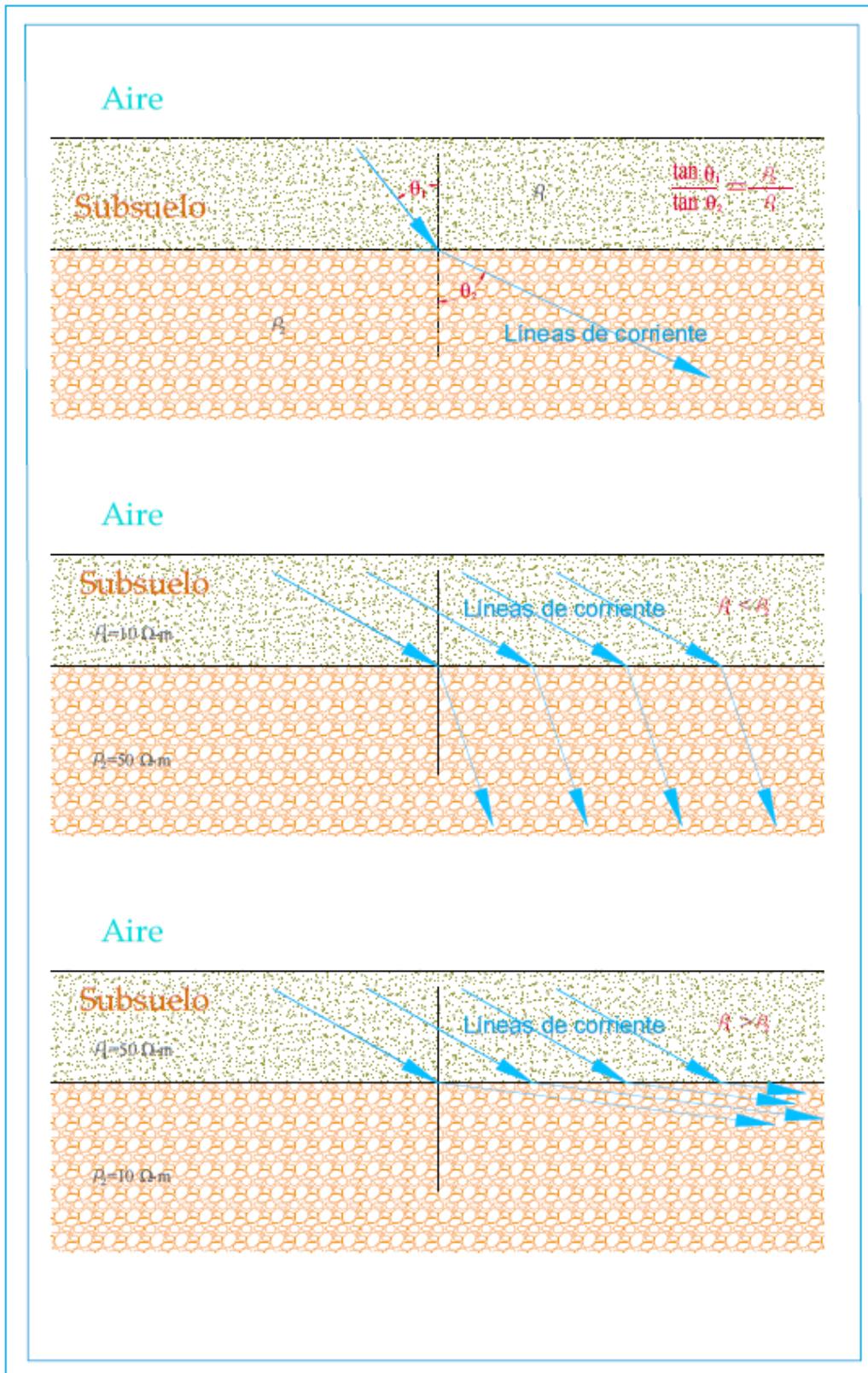
Como podemos ver en la figura 6.c., Benjamin F. Howell presenta el corte en vertical del volumen (el cual no está especificado), cuyo corte está comprendido entre dos líneas equipotenciales “MN”, Benjamin F. Howell no especifica las dimensiones sobre el ancho (perpendicular a la hoja de papel) o la profundidad de este volumen de terreno, lo que no minimiza a este modelo, más por el contrario, pues más adelante podrá verse que mientras no se haga la interpretación de la curva obtenida en campo, no se puede determinar la profundidad hasta la donde se está sondeando, pues esta profundidad depende de otros factores, uno de ellos es debido a que los terrenos estratificados alteran el campo eléctrico creado desde la superficie con los electrodos de inyección “AB”, además Benjamin F. Howell toma en cuenta las líneas equipotenciales que llegan a los electrodos “NM” con las modificaciones que imponga el terreno, como podemos ver el modelo utilizado por Benjamin F. Howell, es el más indeterminable en cuanto a saber a priori la profundidad que alcanza y el ancho en el terreno, medidos desde la línea de emisión de corriente, para lo cual se considera que la resistividad obtenida es la misma. En cuanto a la profundidad de investigación se ha considerado que esta es igual a “AB/2”, es decir para una separación de AB = 200 m, la profundidad de investigación será de 100 m, esto se fundamenta ya que se verifico en campo.

Los suelos estratificados, como se mencionó anteriormente, deforman el campo eléctrico creado por los electrodos (AB). Esta deformación es comparable a la que sufre la luz al pasar de un medio transparente a otro de diferente densidad (refracción de la luz), verificándose un cambio en su dirección en la superficie limitante de dichos medios. Según Griffiths, si  $(\theta_1)$  y  $(\theta_2)$  son los ángulos que forman las líneas de corriente con la normal a la superficie de separación entre estratos, se cumple que:

$$\frac{tg(\theta_1)}{tg(\theta_2)} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (13)$$

En la figura siguiente se muestra la situación de subsuelo con masas rocosas de distinta resistividad. Se indican las líneas de flujo eléctrico y algunas relaciones físicas entre el campo eléctrico (E), la densidad de corriente (J) y los demás parámetros vistos. También se ilustra la relación de *Marion K. Hubbert*, análogo eléctrico de la ley de Snell en óptica y sísmica, que condiciona la profundidad de investigación de estos métodos. Además, puede definirse el coeficiente de refracción o transmisión eléctrica como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (14)$$



**Figura 7:** Flujo de corriente en un suelo de dos estratos.

**Fuente:** Adaptado de: Una Introducción a la Investigación Sismológica (Benjamin F. Howell Jr. 2005).

Los libros e investigaciones consultadas para la elaboración de esta tesis, consideran modelos sencillos, considerando hasta cinco (05) estratos como máximo, separados unos de otros por superficies planas y horizontales, con una diferencia marcada de resistividad e isotropas. Pero es raro encontrar en realidad formaciones próximas a la superficie del suelo que presenten una estratificación tan simple y con propiedades eléctricas simples. Las variaciones de resistividad suelen ser muy complejas en todas las direcciones; pero, aun así, los métodos de resistividad eléctrica de suelos, se puede aplicar a suelos con (**n**) estratos, siempre que cumplan las condiciones favorables que se detallaran en la sección *condiciones de aplicación de los Sondeos Eléctricos Verticales*.

- **Tipos de investigación por resistividad eléctrica**

La aplicación de la resistividad eléctrica en suelos es con la finalidad de conocer la forma, composición y dimensiones de estructuras o formaciones en el subsuelo, esto a partir de medidas realizadas desde la superficie. Nos brinda información para trazar la cartografía de resistividades aparentes del subsuelo que nos permitirá contar con información de las diferentes formaciones geológicas. La resistividad eléctrica se divide en dos tipos, la cuales se diferencian en función a la dirección que se ejecutan respecto a la superficie del terreno: En forma perpendicular a la superficie (Sondeo Eléctrico Vertical) o paralela a ella (Perfil Eléctrico Vertical).

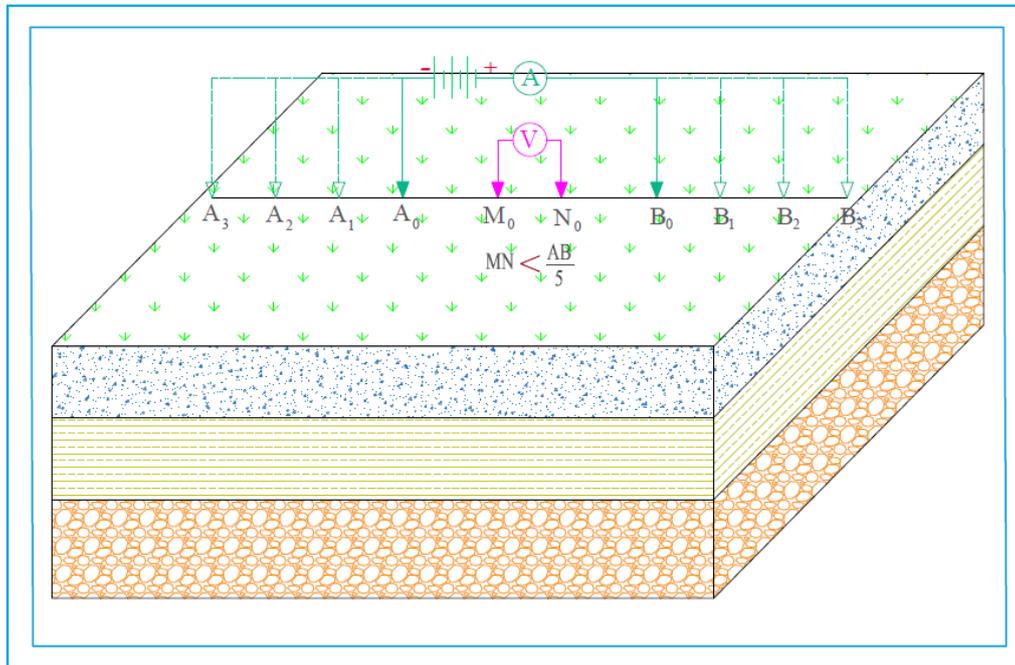
- *Sondeo eléctrico vertical (SEV)*

La aplicación del Sondeo Eléctrico Vertical nos permite generar información necesaria para la determinación de los cambios verticales de las propiedades geoelectricas del subsuelo, consiste en la inyección de corriente eléctrica continua a la tierra proveniente de una fuente artificial a través de un par de electrodos (AB). Luego a través de otro par de electrodos de (MN) colineales a (AB), se mide el diferencial de potencial eléctrico entre ambos, (Custodio, E. y Llamas, MR., 2001).

Luego relacionado los resultados de los Sondeos Eléctricos Verticales, de un perfil es posible establecer la existencia en el subsuelo de diferentes “capas geoelectricas”, que representan otros estratos o formaciones geológicas cuya naturaleza puede deducirse de la resistividad de cada una, siempre que se disponga de información geológica suficiente. En cambio, la información suministrada por un Sondeo Eléctrico Vertical aislado es, en general, pobre e

insegura, por lo que los Sondeo Eléctrico Vertical suelen agruparse en alineamientos más o menos rectilíneos, (Principios de Geofísica Aplicada – Apéndice).

En la siguiente figura ilustraremos gráficamente el procedimiento básico del dispositivo Schlumberger en la aplicación de un Sondeo Eléctrico Vertical.



**Figura 8:** Ejecución de un sondeo eléctrico vertical.

**Fuente:** Adaptado de: Hidrología Subterránea (Custodio, E. y Llamas, MR. 2001).

- **Perfil electro resistivo (PER)**

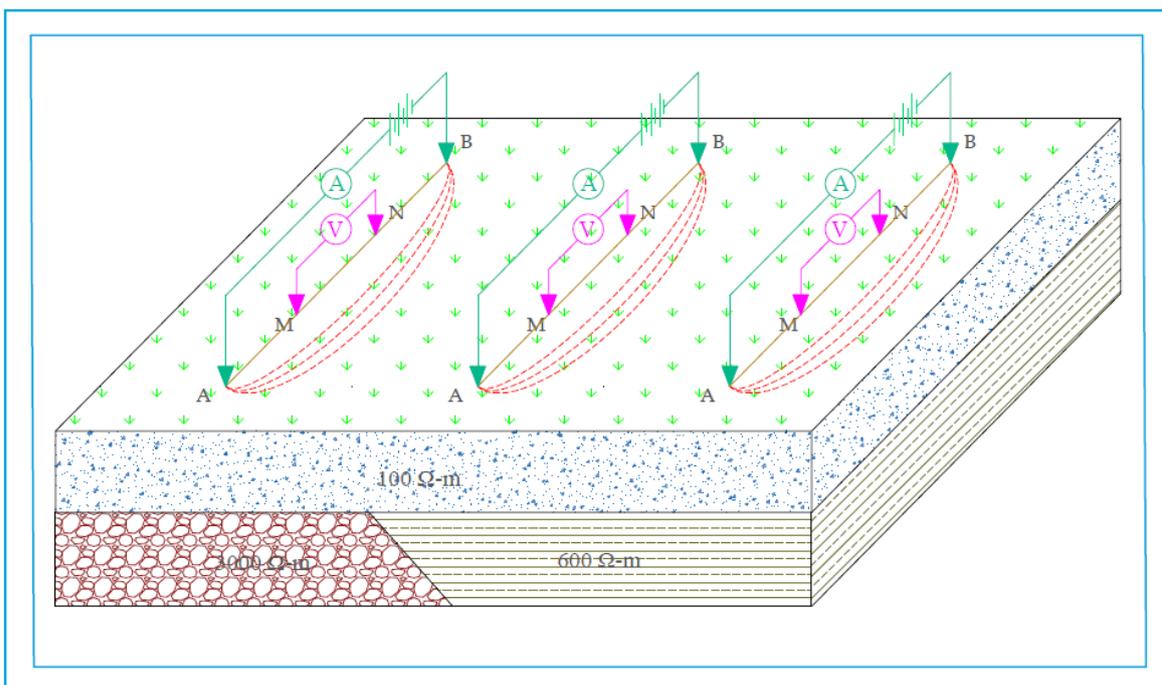
Más comúnmente conocidas como “*calicatas eléctricas*”; el nombre de perfil eléctrico resistivo es empleado por Garcia Yague; ya que las “*calicatas eléctricas*” haría entender que se trata de una investigación puntual, lo que sería erróneo; ya que los (PER) se utilizan para obtener perfiles de gran longitud y poca profundidad.

El perfil eléctrico resistivo consiste en la aplicación de un dispositivo análogo al que se emplean en los Sondeos Eléctricos Verticales, donde se estudia también la resistividad aparente, con la separación de los electrodos de emisión de corriente (AB) constantes o variables, luego todo el dispositivo se desplaza de una medición a otra en una dirección determinada denominada perfil eléctrico. Esto permite estudiar el corte geológico a lo largo de la línea de observación, se trata pues, de un método de investigación horizontal, a profundidad aproximadamente constante, muy adecuada para detectar contactos geológicos

verticales o inclinados., cambios laterales de facies, metalizaciones, diques y otros cuerpos o estructuras que se presentan heterogeneidades laterales de resistividad.

Su interpretación, aunque puede hacerse cuantitativamente mediante el empleo de curvas patrón es esencialmente cualitativa y basada en los mapas de isorresistividades; estas curvas patrón son diferentes a las que utilizamos en esta investigación para la interpretación de los SEV, (Nociones de Hidrogeología para Ambientólogos, Pulido, A. 2007).

En la figura 9, se representa un perfil eléctrico resistivo en el cual el desplazamiento fue perpendicular al arreglo (AMNB).



**Figura 9:** Perfil Electro Resistivo (PER).

**Fuente:** Adaptado de: Prospección Geoeléctrica (Estrada, L. 2012).

#### • Aplicación de los Sondeos Eléctricos Verticales

Para la aplicación de los Sondeos Eléctricos Verticales nos hemos basado en Ernesto Orellana, quien menciona que estos se aplican para los siguientes casos de investigación.

- Estudios estructurales para investigaciones petroleras
- Investigación en aguas subterráneas
- Estudios geotécnicos
- Estudios para ingeniería civil

- **Condiciones de aplicación de los SEVs**

Una vez obtenidas las curvas de gabinete, la interpretación se hace por comparación con las curvas maestras de dos capas y los cuatro ábacos correctores (A, H, K y Q), por ello se debe de cumplir con las condiciones teóricas con las que se hizo el tratamiento matemático de dichas curvas maestras, para ello tendremos en cuenta lo que Ernesto Orellana argumenta.

Para la aplicación de los Sondeos Eléctricos Verticales, la exigencia principal, es que las formaciones geológicas o capas que se desea distinguir, presenten suficiente contraste de resistividad que haga posible su diferenciación eléctrica.

En cuanto a la horizontalidad de los estratos, los Sondeos Eléctricos Verticales se aplican a los estratos geológico cuya pendiente de inclinación máxima del terreno sea 12 %, considerando para ello los estratos son paralelos, siendo este un requisito menos estricto para los SEV profundos, es decir del orden de los kilómetros, (Astier, JL 1975).

Se exige que las formaciones geológicas donde se realice los SEVs posean una cierta homogeneidad lateral, lo que exige tener especial cuidado en el emplazamiento.

- **Ventajas e inconvenientes en la aplicación de los SEVs**

Las ventajas que encontramos cuando aplicamos los SEVs son las siguientes:

- Es un método que se aplica desde la superficie para hacer investigaciones del subsuelo a profundidades pequeñas del orden de los metros, así como a grandes profundidades del orden de los kilómetros.
- El costo es bajo y fácil aplicación, esto en comparación con otros métodos que se utilizan para estudiar los subsuelos, como por ejemplo la perforación de pozos.
- No se requiere de mucha especialización para el manejo y alguna eventual reparación del equipo (resistivímetro).

En cuanto a los inconvenientes que se presenta la aplicación de los SEVs tenemos:

- Puesto que para la interpretación se utiliza el ábaco de dos capas (curvas patrón), existe dificultades para una correcta interpretación de las curvas obtenidas en gabinete.
- Las perturbaciones que producen las corrientes telúricas, esto para grandes separaciones de los electrodos de potencial (MN).
- Se presentará perturbaciones de origen industrial cuando se realiza Sondeos Eléctricos Verticales cercanos a una toma-tierra industriales, esto genera la alteración en la interpretación y por tanto de los resultados.
- Se necesita conocer la geología del lugar para realizar una buena interpretación de los resultados obtenidos.

- **Dispositivos de medición**

Para la aplicación de un Sondeos Eléctrico en el campo, se distribuye los electrodos con un orden definido, denominado dispositivo electródico. En el arreglo Schlumberger, el arreglo consiste en cuatro electrodos alineados y simétricos al centro del sondeo; se trabaja con cuatro electrodos dos de corriente (AB) y dos de potencial (MN), para eliminar las resistencias de contacto de los electrodos con el terreno.

Aplicando la ecuación (12) de la sección (fórmulas) nos permite calcular la resistividad del terreno, siempre que este sea homogéneo e isótropo. Pero en realidad esto no se cumple pues el terreno es heterogéneo y anisótropo por lo que se obtiene es un promedio ponderado de resistividades denominado resistividad aparente.

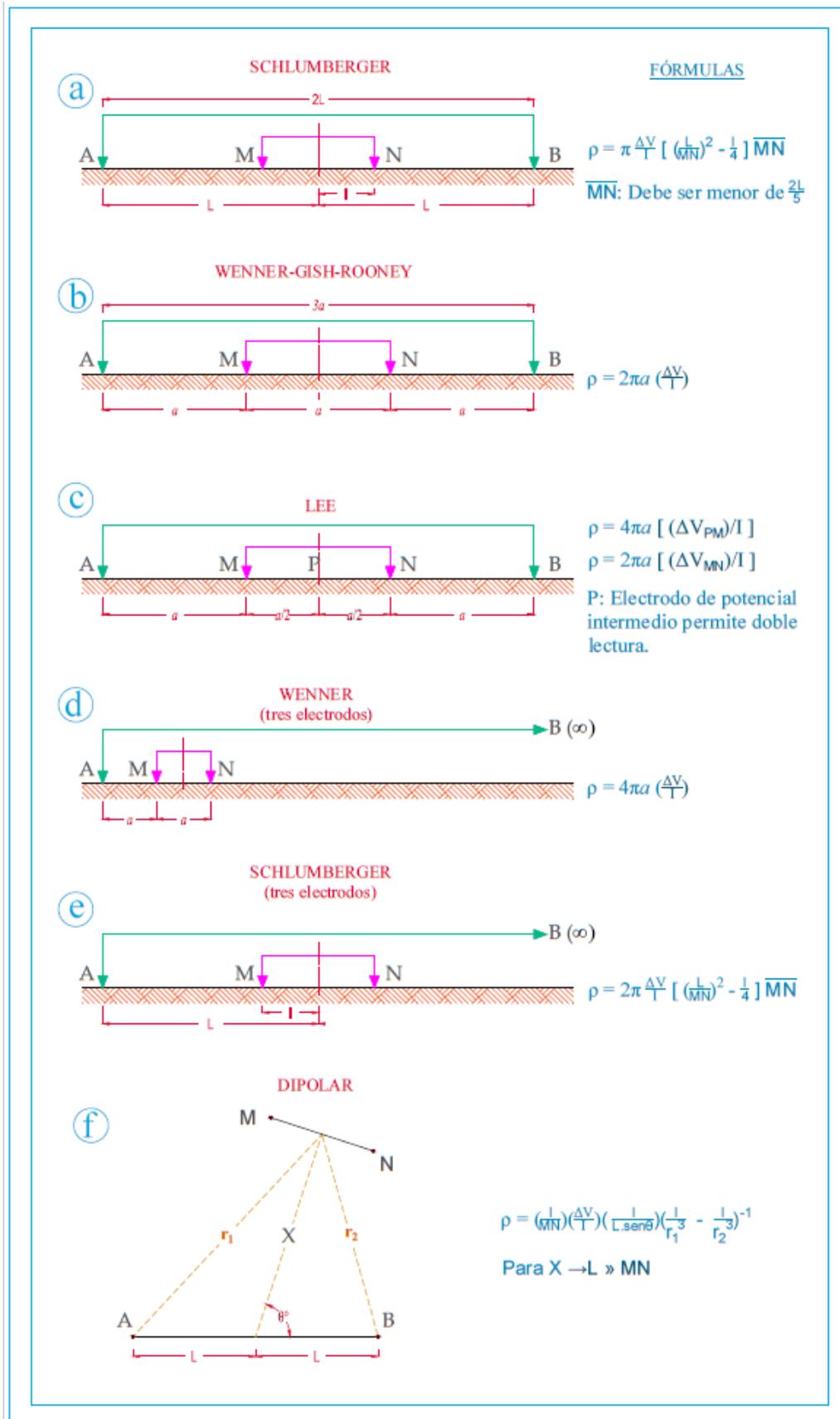
Para la aplicación de la ecuación (12) se tiene que conocer las distancias de separación entre los electrodos, estas distancias son datos que ingresan para realizar los cálculos. Para realizar los trabajos más rápidamente se dispone de electrodos con dispositivos que permitan su rápida fijación en el terreno que para este caso se utilizó varillas de cobre para (MN) y Clavos de acero para los electrodos (AB).

De acuerdo al arreglo que tengan estos dispositivos se clasifican en dos grupos: El primero y más usado, todos los electrodos están alineados de forma colineal; en el segundo y más reciente las parejas de electrodos de corriente y potencial se independizan, estos son los llamados dipolares, en la figura 10, se representan los de uso más frecuente y se incluyen las formulas resultantes, (Custodio, E. y Llamas, MR. 2001).

Las principales escuelas son dos; la primera y más aplicada por los americanos e ingleses y la segunda es más aplicada por los franceses, rusos y españoles. El método Schlumberger es de gran utilidad cuando los aparatos de medición son pocos inteligentes; también cuando se requiere conocer las resistividades de estratos más profundos sin necesidad de realizar muchas mediciones como seria si aplicamos el método Wenner.

Para esta investigación se ha utilizado dos multímetros digitales de gran precisión, de los cuales uno se utiliza para medir la corriente eléctrica y el otro la diferencia de potencial; estos equipos son económicos y de gran precisión; estos son el (DT9208M-digital Multimeter) cuya rango para medir voltaje va desde los 200 mV hasta los 1000 V, en cuanto a la resistencia el rango de medición es desde los  $200\Omega$  hasta los  $2000\text{ M}\Omega$ , para la corriente eléctrica el rango de medida de estos equipos varía desde los 20mA hasta los 20A, cuyos equipos trabajan en un rango de temperatura de 0 a  $50^{\circ}\text{C}$ . Se utilizó el dispositivo Schlumberger, el cual requiere de instrumentos más sensibles que Wenner, pero es de más fácil de operar en campo.

Luego para la interpretación de las curvas obtenidas después de un tratamiento de los datos, se requiere de las llamadas curvas patrón para cada dispositivo. Arce H. nos presenta: a) Las curvas de dos capas para los dispositivos Wenner y Schlumberger; b) Las curvas de corrección por el método del punto auxiliar; y c) Las curvas de composición de Ebert. Las dos últimas se utilizan para la interpretación de sondeos que presentan de tres estratos a más, pero solamente para el arreglo Schlumberger. A continuación, presentamos los arreglos antes descritos.



**Figura 10:** Dispositivos de medición.

**Fuente:** Adaptado de: Hidrología Subterránea (Custodio, E. y Llamas, MR. 2001).

- **Ejecución de un sondeo eléctrico vertical**

Para la ejecución de un sondeo eléctrico vertical se debe tener en cuenta la técnica de campo y el equipo a utilizar para realizar las mediciones; pues ambas son de gran importancia, ya que datos de campo mal tomados se traducen en curvas de resistividad aparente de baja calidad, lo que impide su correcta interpretación posterior. En cuanto al equipo se refiere en el libro de Canto Figueroa.

Sobre la técnica aplicada en campo, no guiamos por los apuntes de Griffiths, los cuales le hace para el arreglo Schlumberger, y está relacionado a fugas, empalmes y trazado de la curva de campo, además nos sugiere que el operador debe de ser una persona que conozca del tema y así eliminar las posibles causas de error que puedan presentar durante la ejecución del SEV; a continuación, pasaremos a detallar cada uno de los apuntes.

- **Fugas**

Esto sucede cuando los cables que unen la fuente de alimentación con los electrodos (AB), se pelan en algún punto, el motivo más común puede ser por el constante rozamiento entre el cable y el terreno; por estas partes peladas sirve para que parte de la corriente se pierda y pase al terreno produciendo una fuga. Como el campo eléctrico varía con el cuadrado de la distancia, así los errores son grandes aun siendo las aberturas muy pequeñas; para evitar la fuga de corriente, se recomienda hacer constantemente pruebas de fuga de la siguiente manera; se desconecta uno de los electrodos (A) o (B) y observamos las posibles lecturas en el amperímetro, que de ser cero significará que no existen fugas, hay que tener en cuenta que los mandos del equipo deben estar en posición de encendido y de preferencia al máximo voltaje; hay que probar cada uno de los electrodos (A) y (B).

- **Empalmes**

Se presenta empalmes en la curva de campo cuando el voltímetro que está conectado a la línea (MN), pierde sensibilidad al momento de la lectura de datos, esto sucede cuando los electrodos de corriente (AB) están muy separados, esto hace que las lecturas siguientes serán pequeñas para longitudes (AB) grandes, ante esto se pasa a medir con una distancia (MN) mayor (recordar que  $MN < AB/5$ ), obteniéndose así un empalme. Para que el empalme sea correcto deben de hacerse por lo menos dos veces las mediciones para el mismo (AB), es decir una lectura para la última (MN), y la otra para la nueva posición. El salto que presenta

la curva en el empalme se debe a la disminución de la profundidad de penetración debida a la menor longitud entre los electrodos de corriente (AB) y los de potencial (MN), esto para la primera medición, si el empalme está bien realizado, este salto será bien pequeño.

#### ▪ **Trazado de la curva de campo**

En el trabajo de campo, durante la ejecución de un Sondeo Eléctrico Vertical, debemos de contar con un ábaco especial para corregir posibles errores de medición. Este ábaco proporciona los diferentes valores de la constante  $K = \pi \frac{(L^2 - b^2)}{2b}$ , que multiplicándolo por la constante  $\frac{\Delta V}{I}$  obtenemos la resistividad correspondiente.

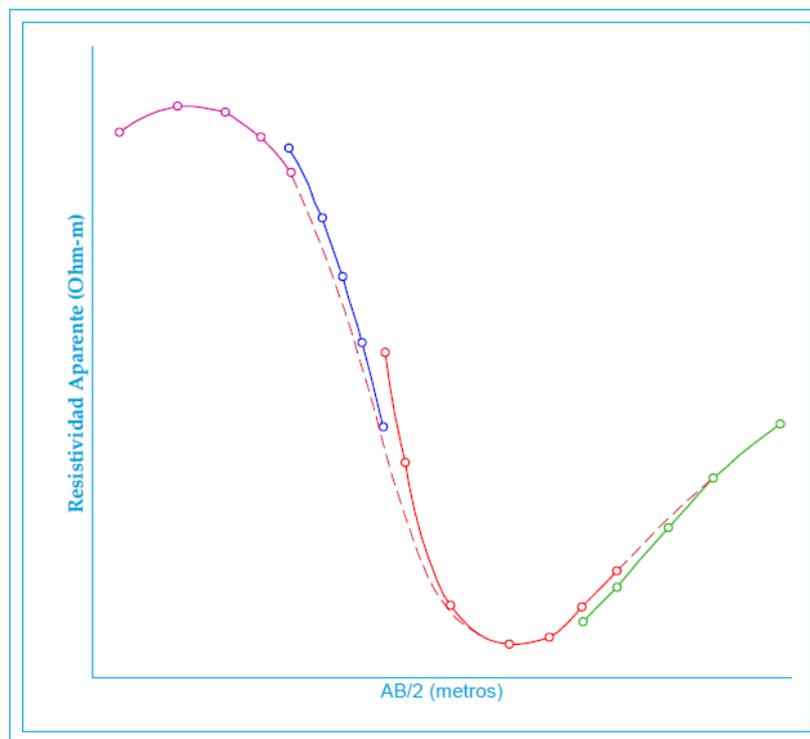
#### ▪ **Dibujo de las curvas en un sondeo eléctrico vertical**

Los datos obtenidos en campo se dibujan en escala logarítmica, con un módulo igual a 6.25 cm, ya que este es el tamaño en el que están dibujadas las curvas maestras que se han utilizado para la interpretación. En el eje de las abscisas se colocan los valores de (AB/2) y en el eje de las ordenadas los valores correspondientes a la resistividad aparente, obteniéndose los pares ordenados los cuales unimos con un segmento de línea. Cabe mencionar que en las primeras aplicaciones se utilizaba un papel transparente para poder utilizar los ábacos de interpretación y corrección, pero en la actualidad contamos con softwares como el autocar que nos facilita el trabajo.

Es de gran importancia el suavizado de las curvas obtenidas en campo. Si el trabajo se ha realizado sobre un terreno de estratos aproximadamente horizontales y lateralmente homogéneos; utilizando el instrumental adecuado y tomando las precauciones del caso, la curva de resistividad aparente obtenida será suave y continua, pero si presenta alguna discontinuidad es indicativo de presencia de heterogeneidad lateral o topográfica. Asimismo, si presenta una capa de pequeño espesor y poco contraste de resistividad, puede introducir una pequeña inflexión que desaparecería en caso de suavizar la curva, y con ello la posibilidad de detectar dicha capa. Debido al interés de ambas cuestiones, se deduce lo poco conveniente que resultaría suavizar las curvas ya que se trataría de una curva no real.

Al respecto, la Ccompagnie Generale de Geophysique (C.G.G.) dice lo siguiente: “Para no introducir como variable extra a la proporción  $\frac{m}{r}$  ( $m = \frac{MN}{2}$ ,  $r = \frac{AB}{2}$ ), todo el cálculo

matemático está hecho asumiendo una separación infinitamente pequeña de los electrodos de potencial (M) y (N), es decir es considerado el campo eléctrico en un punto situado a la mitad entre los electrodos (A) y (B) (para la elaboración de las curvas maestras). Una aproximación muy simple facilita el actual campo de mediciones para ser reducido al caso ideal de  $m = 0$ , Mientras que la proporción  $\frac{m}{r}$  no exceda  $\frac{1}{5}$ , basta para trasladar los puntos de la curva de campo hacia la izquierda, una distancia equivalente a una reducción de las abscisas ( $\frac{AB}{2}$ ) de 0 a 6%, de acuerdo al caso. La curva así corregida representa los cambios de la resistividad aparente como una función de  $\frac{AB}{2}$  con  $m = 0$ , (C.G.G. pág., 04 traducida del inglés). Esto se muestra en la figura 11, que a continuación presentamos.



**Figura 11:** Empalmes en la curva de un SEV (según la C.G.G.)

**Fuente:** Adaptado de: Ccompagnie Generale de Geophysique (CGG).

Lo expuesto por la C.G.G. nos da a entender que, en los empalmes, el tramo siguiente de la curva sufre un desplazamiento pequeño hacia la izquierda. Esto corrobora lo dicho por Orellana acerca de los empalmes: Los saltos del valor de la resistividad se deben a una disminución de la profundidad de penetración (*revisar sección empalmes*); pero si analizamos llegamos a la conclusión de que todo el siguiente tramo debe desplazarse hacia la izquierda, pero si sufrir deformaciones.

En algunos casos, en las curvas originales de los SEVs, este desplazamiento total hacia la izquierda parece lograr un encaje perfecto en los diferentes tramos de la curva, pero mostrando desplazamientos de más del 6%; sin embargo, en la mayoría de los gráficos de los SEVs originales veremos que al desplazar cada una de las porciones de la curva general hacia la izquierda, no siempre se logra un empalme perfecto. Lo anteriormente expuesto, nos indica la existencia de dos criterios para empalmar la curva de campo.

- Sin suavizar el empalme de la curva.
- Desplazar los tramos de ésta hacia la izquierda (con lo que se verificaría un cierto suavizado en los empalmes solamente).

Las observaciones realizadas en las curvas discontinuas de los SEVs, nos permiten adoptar una combinación de los dos criterios anterior mencionados: Como en los empalmes de los SEVs existen dos pares de puntos con el mismo ( $AB/2$ ), se tiene que eliminar un punto en cada par. Esta eliminación se hará de tal manera que se verifique un pequeño desplazamiento hacia la izquierda en la parte inicial del siguiente tramo discontinuo, sin ser muy rígidos en esto, pues el punto elegido debe de tener datos de campo consistentes.

Finalmente, obtendremos una curva continua, cuyos puntos han sido unidos por tramos rectos, con lo que podemos pasar a la siguiente fase: que es la clasificación de la curva.

#### ▪ **Clasificación de las curvas de un sondeo eléctrico vertical**

Para que los datos obtenidos en campo sean interpretables los Sondeos Eléctricos Verticales se deben de realizar en terrenos formados por estratos horizontales y suelos homogéneos, En muchos casos la realidad se acerca a esta descripción teórica como ara que los resultados sean aprovechables. Para otros casos el procedimiento no es válido.

Para un corte geoelectrico de " $n$ " capas se compone de los siguientes datos:  $n$  valores de resistividad y  $n - 1$  espesores, puesto que no se conoce el espesor de la última capa ya que se considera de espesor infinito, así tenemos:

#### ▪ **Corte geoelectrico de dos capas**

Los que no llevan una denominación especial y solo presentan dos posibilidades; la primera de que la resistividad del primer estrato sea mayor a la resistividad que presenta el segundo

estrato, y la segunda posibilidad es que la resistividad que presenta el segundo estrato sea mayor que la resistividad del primer estrato; en estos dos posibles casos para realizar la interpretación solamente se necesita del ábaco de las curvas maestras de dos capas.

- $\rho_1 > \rho_2$
- $\rho_1 < \rho_2$

▪ **Corte geoelectrico de tres capas**

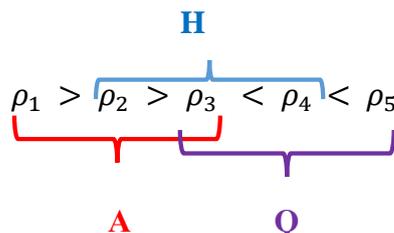
Para el caso en que el terreno presente tres estratos, se presenta cuatro situaciones y cada una de ellas tiene una denominación con las letras A, H, K y Q, y para su interpretación se utiliza además del ábaco de curvas maestras de dos capas de ábacos correctores para cada tipo de curva.

- Tipo A:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$
- Tipo H:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$
- Tipo K:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$
- Tipo Q:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

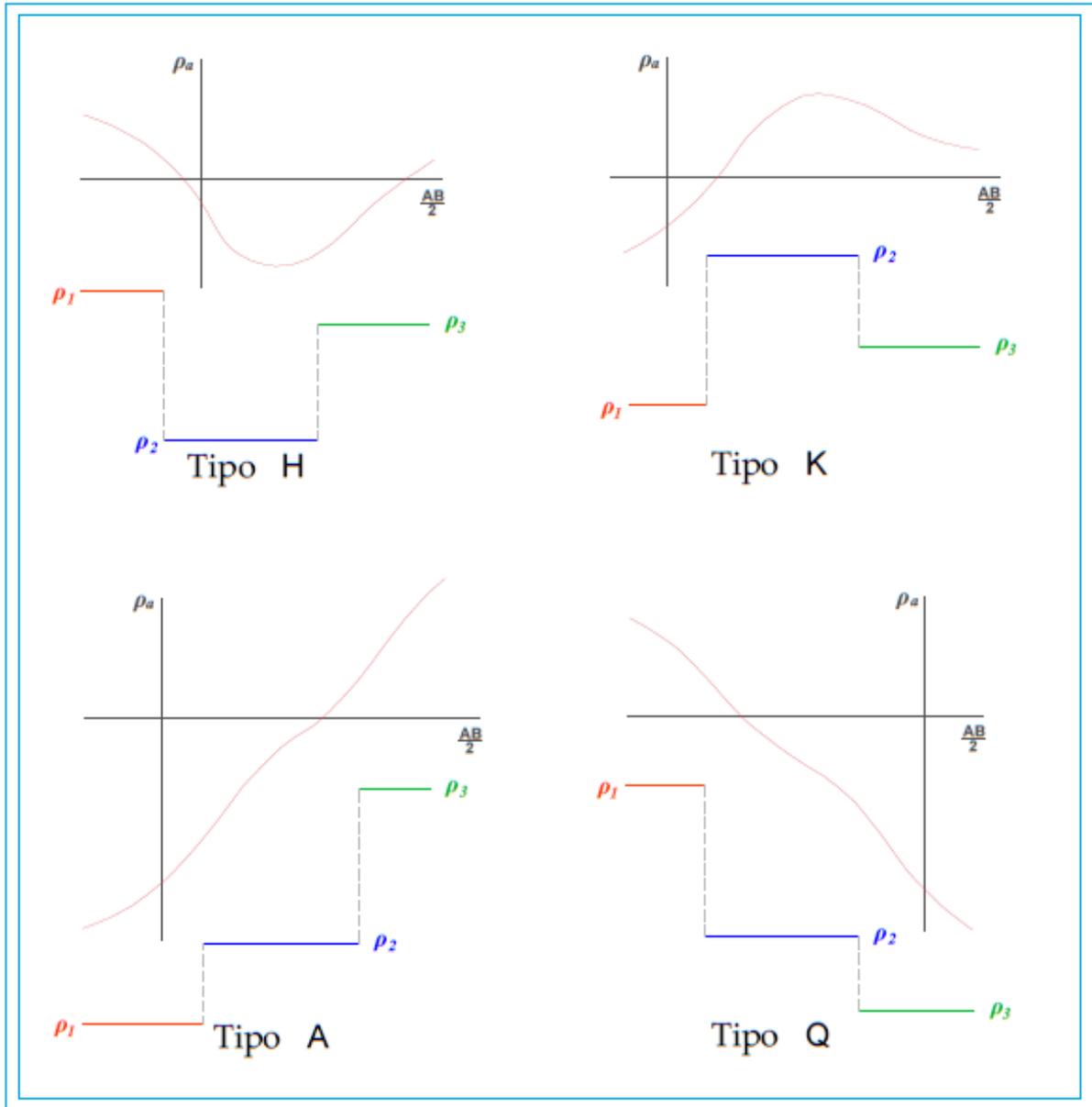
Para realizar una correcta interpretación es de mucha utilidad que el encargado conozca a detalle las cuatro clases de curvas para terrenos de tres capas, y es por eso que se las presenta en la figura 12, además hay que tener en cuenta que, para las curvas tipo H y K se puede dar el caso que:  $\rho_1 > \rho_3$  o  $\rho_1 < \rho_3$ .

▪ **Corte geoelectrico de cuatro a más capas**

La clasificación se realiza por combinación de las anteriores, a continuación, presentamos un terreno con cinco estratos del tipo AHQ.



En el proceso de interpretación se hace uso de las “cruces verdaderas” y las “cruces auxiliares” al mismo tiempo (*ver sección Interpretación de un Sondeo Eléctrico Vertical*). La clasificación se realiza en forma precisa conforme se va realizando la interpretación de la curva, pues no siempre es posible clasificar en la primera inspección visual.



**Figura 12:** Clasificación de las curvas de 3 capas

**Fuente:** Adaptado de: Hidrología Subterránea (Custodio, E. y Llamas, MR. 2001).

- **Interpretación de un sondeo eléctrico vertical**

Para la interpretación se utilizará el ábaco de dos capas constituido por una serie de curvas suficientemente densas y empleando el método del punto auxiliar y el de las curvas de composición de Ebert, cuyo procedimiento es el siguiente.

- Se superpone el SEV sobre el ábaco de dos capas y se traslada aquel, conservando paralelo los ejes de los dos gráficos, hasta que el primer tramo de la curva SEV coincida con una de las curvas del ábaco de dos capas o una interpolada. Conseguida la coincidencia se dibuja con lápiz negro en el SEV la situación del punto de origen (coordenadas  $\rho_1=1$  y  $h=1$  en el ábaco de dos capas) mediante una cruz y un círculo que la enmarque, punto que llamamos “primera cruz”. Con lápiz de otro color, por ejemplo, rojo, se dibuja en el SEV la curva elegida (figura 14.a). La situación de la primera cruz en el SEV nos indica ( $\rho_1$ ) y ( $h$ ) (en el ejemplo  $\rho_1 = 130 \text{ ohmios.metro}$  y  $h = 9$ ). La asíntota de la curva, dibujada en rojo en el SEV, nos facilita  $\rho_2$  (En el ejemplo  $\rho_2 = 350 \text{ ohmios.metro}$ ). Si el sondeo eléctrico (SEV) corresponde al caso de dos capas el problema queda resuelto. En nuestro caso, es de tres capas, del tipo K ( $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ), como se deduce de la curva obtenida, y se prosigue del modo siguiente.
- Se sitúa el SEV sobre el ábaco corrector correspondiente, en este caso del tipo K, y se desplaza conservando los ejes paralelos y de modo que la primera cruz se encuentre en el eje vertical del ábaco corrector (suponemos que se utilizan los ábacos de Money-Orellana) hasta que una de las curvas dibujadas en el ábaco corrector, o una interpolada, tenga la misma asíntota que la ( $\rho_2$ ), dibujada en el SEV con lápiz rojo en la primera operación efectuada. Conseguida la coincidencia, se dibuja en el SEV la curva elegida con lápiz de un color diferente, por ejemplo, de color verde (figura 14.b).

El ábaco de dos capas y los ábacos correctores de los tipos A,H,K y Q se muestran en el Anexo N° 02.

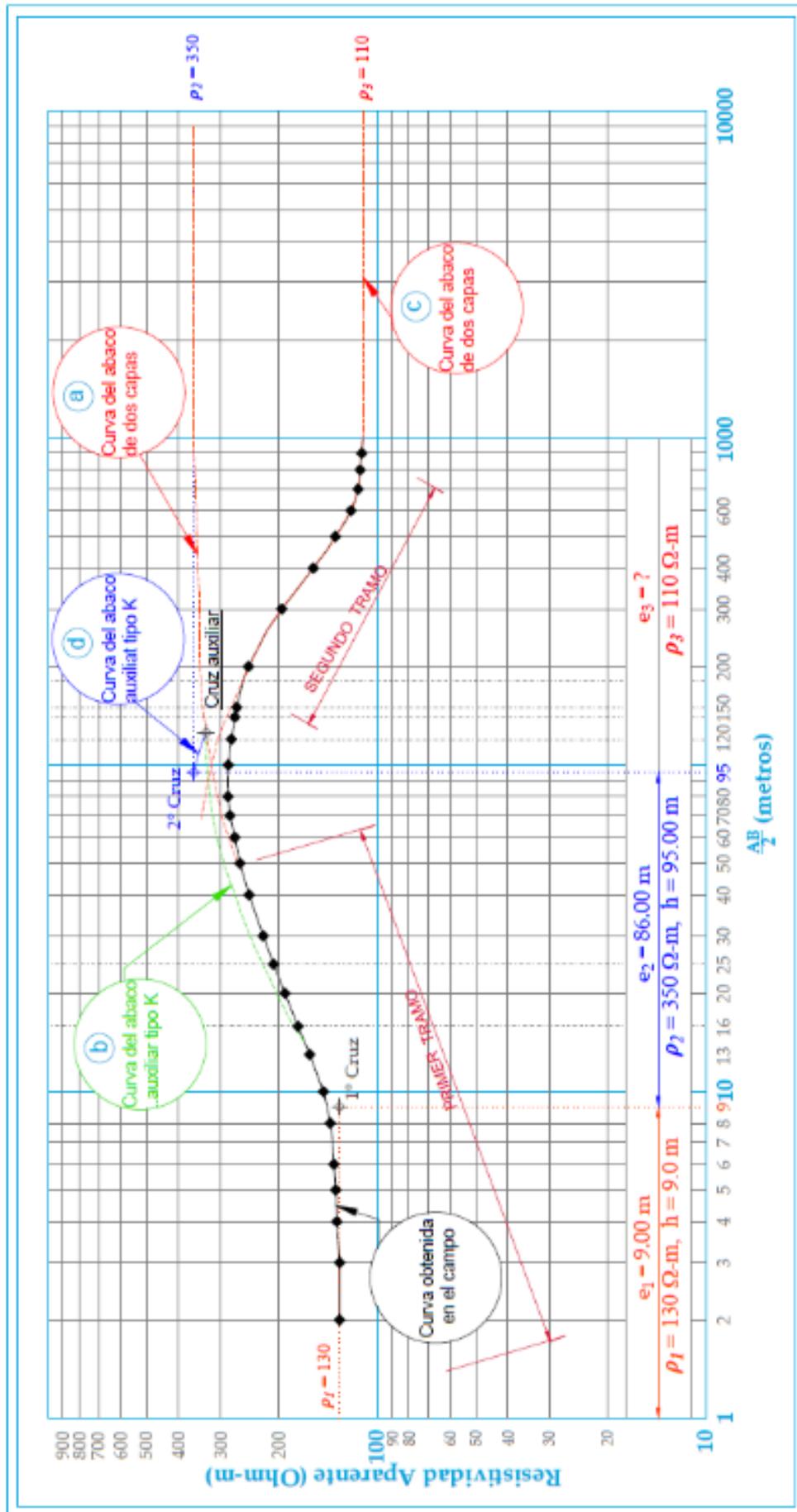
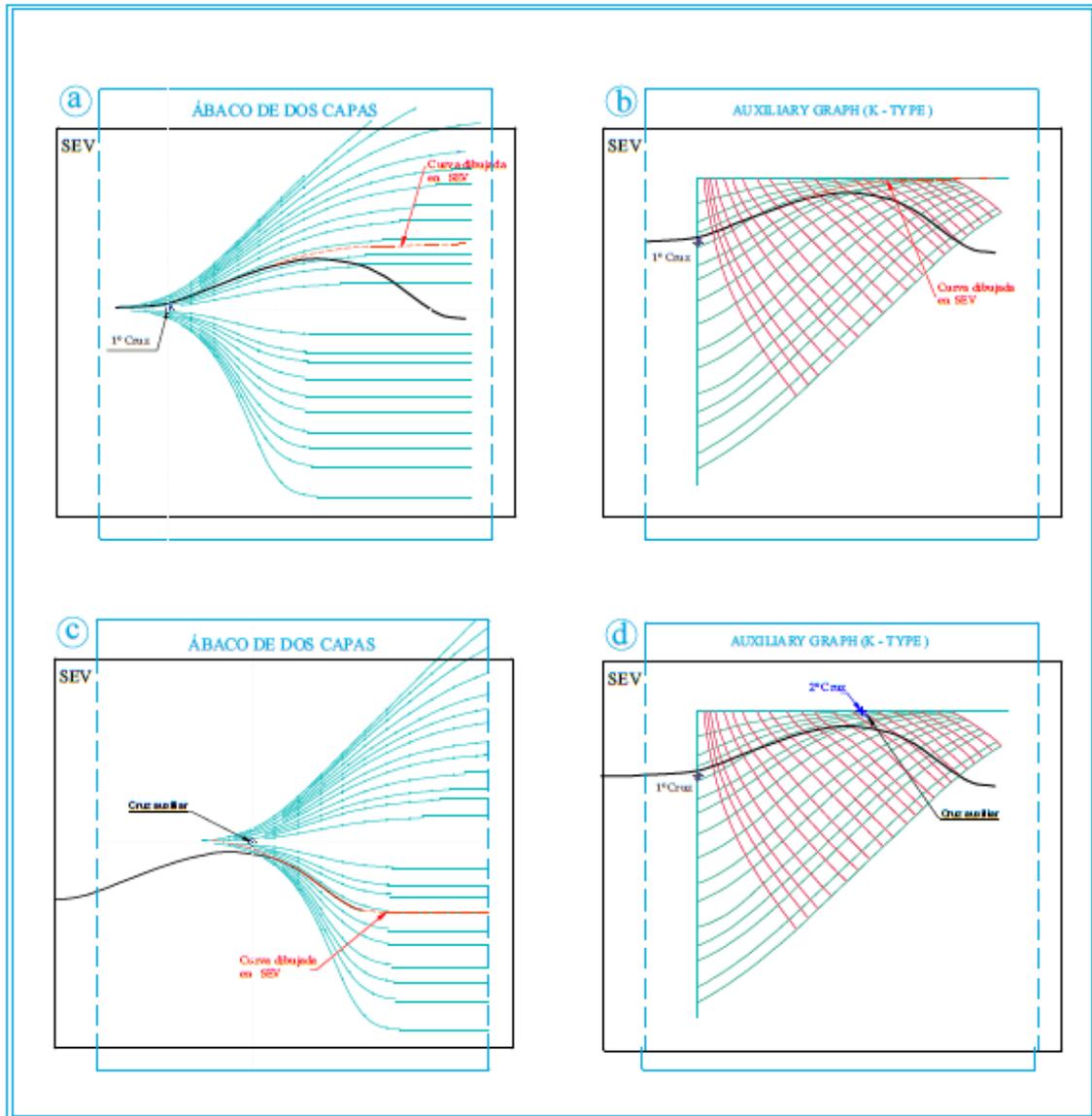


Figura 13: Interpretación de un SEV

Fuente: Adaptado de: Hidrología Subterránea (Custodio, E. y Llamas, MR. 2001).



**Figura 14:** Proceso de Interpretación de un SEV

**Fuente:** Adaptado de: Hidrología Subterránea (Custodio, E. y Llamas, MR. 2001).

- Se sitúa de nuevo el SEV sobre el ábaco de dos capas y se desplaza de forma que, conservando los ejes paralelos, el punto-origen se encuentre siempre sobre la última curva dibujada, de color verde, hasta que el segundo tramo del SEV coincida con una de las curvas dibujadas en el ábaco de dos capas o una interpolada (figura 14.c). Conseguida la coincidencia, se dibuja con color rojo en el SEV la curva elegida en el ábaco de dos capas y se sitúa el punto-origen de este ábaco con una cruz en negro. A esta cruz se le va a llamar segunda cruz auxiliar.
- Se sitúa de nuevo el SEV sobre el ábaco corrector K, en la misma posición que permitió dibujar la curva de color verde, es decir, la primera cruz sobre el eje vertical,

y la asíntota ( $\rho_2$ ) sobre el eje horizontal del ábaco corrector. Por la segunda cruz auxiliar pasan una curva del ábaco corrector, o una interpolada, que cruza la empleada para dibujar en el SEV la curva verde. Utilizando esta curva, se traslada la segunda cruz auxiliar dibujando su recorrido con otro color por ejemplo azul, hasta alcanzar el eje horizontal del ábaco correcto, donde se dibuja una cruz en negro con un círculo que la remarque (Figura 14.d). Esta cruz se llama segunda cruz y nos indica las ordenadas y las abscisas los valores de ( $\rho_2$ ) y ( $h_2$ ). En este caso  $\rho_2 = 350 \text{ ohmios} - \text{metro}$  y  $h_2 = 95 \text{ m}$ . Como en la operación 3° habíamos dibujado la asíntota correspondiente a ( $\rho_3$ ), en nuestro caso  $110 \text{ ohmios} - \text{metro}$ , el problema queda resuelto.

Si es del tipo H o Q, el ábaco corrector es en apariencia diferente y habrá de utilizarse situando su origen en la primera cruz. Esta diferente presentación de los ábacos correctores tiene como finalidad separar el haz de curvas correctoras y favorecer la elección de la que se utiliza. La cruz auxiliar también se traslada hacia arriba en estos casos, apoyándose en las curvas con esta orientación de los ábacos correctores hasta alcanzar el eje horizontal; luego se traslada verticalmente hacia abajo hasta situar sobre la asíntota ( $\rho_2$ ) y dibujar la segunda cruz.

Los ábacos correctores tienen unos números en cada una de sus curvas, que permiten obtener numéricamente la resistividad ( $\rho_2$ ) en función de ( $\rho_1$ ) y el espesor ( $e_2$ ) en función de ( $e_1$ ). Los números son precisamente los coeficientes  $\rho_2/\rho_1$ , en las curvas que van de izquierda a derecha y  $e_2/e_1$  en las que van de abajo hacia arriba, por lo tanto, bastará multiplicar por esos números ( $\rho_1$ ) para obtener ( $\rho_2$ ) y ( $e_1$ ) para obtener ( $e_2$ ). En este caso, para la profundidad obtenemos 9.5 que, multiplicado por el espesor de la primera capa, igual a la profundidad de su muro, 9 m, nos da 86 m. No olvidar que de esta forma se obtiene los espesores, no las profundidades.

Para el caso de más de tres capas, el proceso mecánico es el mismo: Una vez realizado el proceso descrito, se abandona el primer tramo de la curva del SEV y se consideran los tramos segundo y tercero, tratándola con el ábaco corrector correspondiente. La cruz auxiliar obtenida y utilizada en el proceso anterior, que llamamos segunda cruz auxiliar, se utiliza como si fuera la primera cruz en el nuevo sondeo SEV que resulta de prescindir del primer tramo y se obtiene una nueva cruz auxiliar, que llamaremos tercera cruz auxiliar, relacionada con el espesor de la tercera

capa, que sirve de apoyo al siguiente proceso, si el sondeo SEV tuviera más de tres capas. El espesor de la tercera capa, se deduce de los números incluidos en los ábacos correctores, que indican en este paso la relación de espesores entre la tercera capa y una primera hipotética, materializada por la cruz auxiliar, equivalente, en sus efectos sobre los potenciales superficiales, a las dos anteriores.

Por último, insistimos que el método es gráfico y, por tanto, la exactitud de las resistividades y espesores o profundidades obtenidas será la propia del dibujo por lo que, si se utiliza el cálculo numérico, los resultados deben redondearse, ya que en el mejor de los casos no es posible reducir el error a menos del 5%.

El método general que recomendamos para la interpretación de los sondeos eléctricos verticales es el siguiente:

- 1°. Aplicación de los ábacos de dos capas y los correctores. Método de Ebert.
- 2° Comprobación de los obtenidos con los ábacos de curvas de más de dos capas.
- 3°. Si se trata de un tema importante y se dispone de medios, calcular y construir curvas teóricas a base de las profundidades y resistividades obtenidas. Si la curva calculada no coincide con la obtenida en el campo, modificar los valores de partida hasta obtener una curva prácticamente coincidente con la de campo, que nos daría la solución más correcta.

El segundo paso es obligado, ya que impedirá errores importantes en la interpretación de los sondeos cuyas curvas no sean tan fáciles de abordar como la del ejemplo, figura 13.

El tercer paso se justifica cuando existen capas con espesores pequeños en relación con los paquetes que la limitan y la profundidad a la que se encuentra.

- **Consideraciones sobre la interpretación de un SEV**

En la interpretación de un Sondeo Eléctrico Vertical. Orellana, en las notas al libro de Griffiths, advierte lo siguiente: Aunque mediante la interpretación de las curvas de resistividad aparente se obtienen los espesores y las resistividades de cada capa geoelectrónica, la forma de dichas curvas no depende de cada una de estas variables directamente, sino que

lo hace a través de unas funciones ( $T$ ) y ( $S$ ), a las que Maillet denominó “parámetros de Dar Zarrouk” y cuya definición (simplificada ya que suponemos que las capas son homogéneas e isotrópicas – observación del autor) damos a continuación.

Supóngase un corte geoelectrico caracterizado por sus parámetros ( $e_1$ ) y ( $\rho_1$ ). En este corte, la corriente fluirá en una cierta dirección que, dada la naturaleza vectorial de la intensidad de corriente, podemos descomponer en sus componentes según la dirección de la estratificación y la normal a ella. Para esta segunda componente, las capas se comportan como conductores asociados en serie, y la corriente encontrará una resistencia total que será la suma de las resistencias parciales a cada capa. Si dentro de una de estas capas idealizamos un prisma recto de base cuadrada, arista unidad y perpendicular a la estratificación, su resistencia será  $T_i = e_i \cdot \rho_i$  y por tratarse de conductores en serie, la resistencia total de las ( $n$ ) primeras capas será  $T = \sum^n e_i \cdot \rho_i$ .

Esta magnitud  $T$  ( o  $T_i$ ) se llama “resistencia transversal unitaria”. Análogamente, para la componente de la corriente según la estratificación, las capas se comportan como conductores en paralelo, por lo que la conductancia del corte será la suma de las conductancias de las capas que lo forman. Si dentro de una de estas capas consideramos ahora el mismo prisma antes citado en dirección normal a la anterior, su conductancia será  $S_i = e_i/\rho_i$  y, por tratarse de conductores en paralelo, la conductancia total de las ( $n$ ) primeras capas será  $S = \sum^n e_i/\rho_i$ .

#### ▪ Principio de equivalencia

Este principio tiene su origen en el hecho ya aludido de que las curvas de resistividad aparente no dependen directamente de los parámetros ( $e_1$ ) y ( $\rho_1$ ) del corte, sino que lo hacen a través de la ( $T$ ) y la ( $S$ ). Por este motivo, puede suceder que cortes geoelectricos notablemente diferentes entre sí expresados en términos de espesores y resistividades, den lugar a curvas de resistividad aparente que difieren entre sí en menos del error experimental (algunos autores dicen en menos del 5%), debido a que tienen la misma ( $T$ ) o ( $S$ ). En el primer caso se trata de una “equivalencia en  $T$ ” y en el segundo una “equivalencia en  $S$ ”. El fenómeno aparece cuando una capa tiene grande una de las magnitudes ( $T$ ) o ( $S$ ) y la otra muy pequeña respecto de los mismos parámetros de las capas suprayacentes. Asi por ejemplo, el corte  $e_1 = 1, \rho_1 = 1, e_2 = 1, \rho_2 = 40, \rho_3 = \infty$  y el  $e_1 = 1, \rho_1 = 1, e_2 = 2, \rho_2 = 20, \rho_3 = \infty$  son equivalentes en ( $T$ ), pues ambos casos es  $T_2 = 40, S_2 < S_1$  y,

consecuentemente, sus correspondientes curvas de resistividad aparente diferirán en menos del error experimental.

#### ▪ Principio de superposición

Este principio alude al hecho de que, en ciertas condiciones, una capa pase inadvertida en la curva de resistividad aparente del corte correspondiente. Según Maillet, este fenómeno tiene lugar cuando existe una capa de pequeño espesor y resistividad comprendida entre las de las capas adyacentes.

De las consideraciones de estos dos principios, se deduce que, si bien cada corte da lugar a una curva única de resistividad aparente, lo contrario no es cierto, y una misma curva puede deberse a cortes geoelectricos muy dispares, aunque la ambigüedad de la solución no es tan grande como la existente en prospección gravimétrica. Además, no existe total correspondencia entre las capas geoelectricas y los estratos geológicos y, con frecuencia, un mismo estrato aparece representado por varias capas geoelectricas y recíprocamente. Así, por ejemplo, un mismo estrato arenoso cuya parte inferior estuviese húmeda, daría lugar a dos capas geoelectricas de las que la superior sería más resistiva. (Geofísica Aplicada para Ingenieros y Geólogos, pág. 78 – 80).

#### • Resistividad del agua

Un parámetro fundamental en la resistividad eléctrica de suelos es la resistividad del agua subterránea donde se ha realizado la exploración, es así que se ha procedido a calcular la resistividad del agua subterránea de dos maneras: La primera es con un equipo multiparámetros obteniendo un valor de  $15.36 \Omega \cdot m$ , la segunda manera como se obtuvo fue utilizando los multitester del equipo que se ha utilizado para medir la resistividad del terreno en el Fundo La Victoria – UNC. En la fotografía siguiente se muestra el equipo mutiparámetros utilizado.



**Fotografía 1:** Equipo multiparámetros para medir resistividad eléctrica del agua.

Para la medición de la resistividad con el equipo construido, se ha tomado una muestra de agua de 1.5 litros del pozo ubicado en el Fundo La Victoria, a una temperatura de 18.5 °C, y se procedió a calcular la resistividad de la muestra de agua, obteniéndose como resultado  $\rho_{agua} = 15.26 \Omega - m$ , de lo que se deduce que existe presencia de agua en las capas geoelectricas que presenten resistividades menores a este valor, pero también a su vez, mientras menor sea este valor, mayor seria la concentración de arcillas en esta capa. Finalmente tener en cuenta que, si dichas capas están por debajo del nivel freático y presentan resistividades mayores al valor de la resistividad del agua, estos estratos presentarían mayo concentración de arenas y/o gravas, las cuales presenta mayor permeabilidad que las capas con valores de resistividades bajos.

#### **b. Equipo de medición de resistividad eléctrica**

Para realizar esta investigación se ha procedido a construir un equipo al cual se le ha denominado resistivímetro, el cual nos permite medir la resistividad aparente del suelo, mediante la colocación en el terreno de cuatro electrodos ubicados colonialmente; los electrodos (AB) miden la intensidad (corriente), y los electrodos (MN) la diferencia de potencial (Voltaje), se utilizó corriente continua puesto que las fuentes de energía son cinco baterías de moto de 12 voltios; a continuación presentamos una fotografía del equipo construido.



**Fotografía 2:** Equipo para medir resistividad eléctrica de suelos.

El equipo que se ha construido para la medición de la resistividad eléctrica de suelos, el cual tiene varios componentes, los cuales pasaremos a detallar a continuación.

- **Fuente de energía**

Se emplea como fuente de energía a cinco (5) baterías de moto de 12 voltios, las que generan corriente continua y están conectados en serie; para otros casos también se puede utilizar los grupos electrógenos o a la red eléctrica doméstica, pero estos a diferencia de las baterías emiten corriente alterna la cual con un rectificador es convertida a corriente continua. Con la ayuda de un componente (selector de corriente) se puede lograr diferentes tensiones de aplicación para inyectar y obtener diferentes lecturas para una misma disposición de electrodos; de las lecturas obtenidas se calculará el promedio, representando este la resistividad aparente del terreno.

- **Cables**

Se ha utilizado el cable de luz THW 12 azul de sólido, por ser fabricados y diseñados para conducir electricidad; el material principal del cual son fabricados es el cobre por su alto grado de conductividad. Estos cables están compuestos de un material conductor, un material aislante, una capa de relleno y una cubierta. Durante la ejecución de un SEV en el

campo se debe prevenir el desgaste de la cubierta por rozamiento con el terreno, ya que el desgaste de estos dejaría a la intemperie al material conductor lo que provocaría la fuga de corriente y por consiguiente la alteración de las lecturas.

- **Equipo de medida**

Se utilizó el multítester o multímetro digital, el cual es un instrumento que nos permite medir magnitudes eléctricas como corrientes y potenciales (tensiones), o magnitudes eléctricas pasivas como la resistencia; las medidas se pueden realizar tanto para corriente continua como para corriente alterna. Respecto a los milivoltímetros, la literatura revisada sugiere que tengan una gran impedancia de entrada, superior a un  $M\Omega$  (Megaohm).

Actualmente hay equipos de  $10 M\Omega$  y hasta  $100 M\Omega$  de impedancia de entrada, este límite mínimo de impedancia es para tener mayor exactitud, pues al hacer la lectura de voltaje conectamos al milivoltímetro en paralelo con el terreno; y si su impedancia es pequeña.



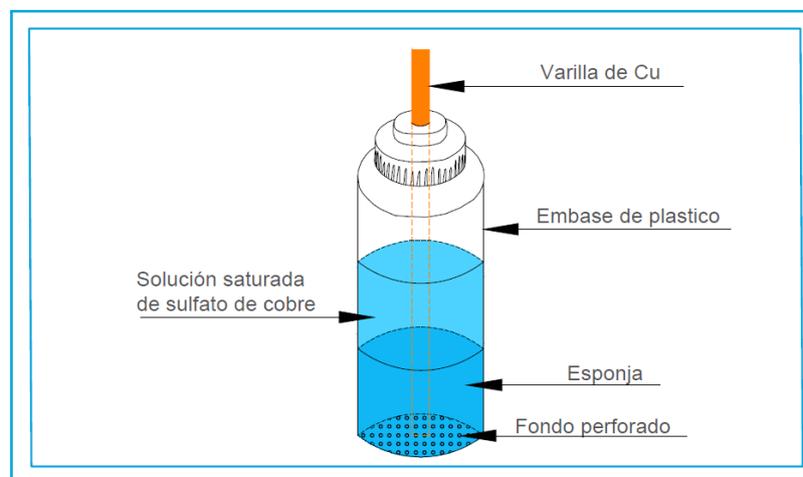
**Fotografía 3:** Multitesrters digitales empleados para la toma de lecturas.

- **Electrodos de corriente**

Los electrodos son conductores eléctricos y en este caso se colocan al final de cada cable en la línea (AB), o línea de emisión de corriente; estos electrodos pueden ser de diferentes materiales unos más conductores que otros, pudiendo utilizarse clavos comunes con una longitud apropiada que sea de fácil manejo en el terreno; se opta por los de 8 pulgadas (20.32 centímetros).

- **Electrodos de potencial**

Electrodos que se colocan al final de la línea (MN) correspondientes a los cables de potencial, estos electrodos tienen que ser “impolarizables” y que según Cantos Figueroa: “consisten estos electrodos, en líneas generales, en un tubo de cobre embutido en un vaso poroso que contiene una solución saturada de sulfato de cobre en cristales. Tubo y vaso están envueltos por una cubierta de caucho o plástico, menos en la parte inferior que queda al descubierto y es la que hace contacto con el terreno. Cuando una corriente atraviesa el circuito, descompone una pequeña parte del sulfato, pero esta se renueva inmediatamente por la disolución de una cantidad equivalente de la misma sal, presente en forma de cristales, de forma que la disolución de sulfato queda siempre a la misma concentración, evitando así la polarización del electrodo, (Tratado de Geofísica, pág. 391).



**Figura 15:** Electrodo de potencial impolarizable

**Fuente:** Adaptado de la tesis: Abastecimiento de agua para usos complementarios de la Universidad Nacional de Cajamarca con la aplicación de método de la resistividad eléctrica de suelos en el estudio hidrogeológico; (Cerdán Moreno, CA. 1997).

- **Eliminador de potencial espontáneo (SP)**

Consiste en medir entre dos puntos del terreno, cual es la diferencia de potencial eléctrica generada de forma natural en el terreno; al respecto Cantos Figueroa, recomienda tener cuidado al momento de realizar las lecturas en el voltímetro, hay que corregir el potencial espontáneo. Hay instrumentos que tienen integrado un dispositivo para compensación de estos potenciales; pero para los instrumentos que no tiene se puede corregir las lecturas, midiendo el potencial espontáneo en el voltímetro, cuando las baterías no están conectadas, y luego restamos está a las medidas realizadas cuando las baterías están conectadas. O bien

con un circuito auxiliar incorporado en el equipo, del que se toma una tensión igual y opuesta al potencial espontáneo. De esta forma se lleva el voltímetro a cero.

### **2.3. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.**

El agua subterránea desempeña un papel fundamental en la salud y la economía de las sociedades. Con respecto a esto no hay estadísticas completas sobre la proporción del suministro de agua en las zonas urbanas, pero más de 1000 millones de habitantes de ciudades en Asia y 150 millones en América Latina dependen directa o indirectamente, de manantiales, pozos y norias. Esto se debe a su costo relativamente bajo y a su calidad por lo general buena, el agua subterránea ha sido a menudo la fuente preferida para las redes públicas de abastecimiento de aguas potable y se explota ampliamente para usos privados domésticos e industriales.

Para la captación de agua subterránea y lograr su uso razonable debemos de conocer los procesos y factores que afectan la circulación del agua en el subsuelo, para ello a continuación detallaremos cada uno de los conceptos que tengan que ver con el agua subterránea.

#### **a. Ciclo hidrológico del agua**

El ciclo hidrológico del agua consiste en la continua circulación de humedad y de agua sobre nuestro planeta. El ciclo no tiene principio ni fin, pero se considera que se genera en el agua de los océanos. La radiación solar lleva el agua de los océanos hasta la atmósfera proceso llamado evaporación, luego en la atmósfera se acumulan dando lugar a la formación de nubes. Bajo ciertas condiciones, la humedad contenida en las nubes se condensa y se precipita a tierra en forma de lluvia, granizo o nieve.

La fuente de casi todas las reservas de agua dulce las constituyen la precipitación que cae sobre las áreas terrestres. Parte de la precipitación, una vez que ha humedecido el follaje y el terreno, escurre sobre la superficie hasta llegar a los ríos; a esto es lo que se denomina escorrentía superficial. Otra parte de la precipitación se infiltra en el suelo. Una buena parte de esta se queda en la zona radicular de las plantas y eventualmente es devuelta a la superficie por estas mismas, o mediante el fenómeno de la capilaridad. Sin embargo, otra parte percola por debajo de la zona radicular y mediante la influencia de la gravedad continua su movimiento descendente hasta que llega al depósito subterráneo.

Una vez que se incorpora al depósito subterráneo, el agua que ha percolado se desplaza a través de los poros de los materiales y puede reaparecer en la superficie en aquellas zonas que se hallan en zonas inferiores al nivel que se infiltraron. El agua subterránea descarga naturalmente en estos sitios en forma de manantiales (afloramiento de agua) y también por percolación dispersa manteniendo así el caudal en época de estiaje de los ríos (flujo base).

Así pues, el ciclo hidrológico constituye un sistema mediante el cual la naturaleza hace circular el agua desde los océanos hasta la atmósfera y la regresa en forma de precipitación hacia la tierra. Las fuerzas involucradas en este proceso son: La radiación solar, la gravedad terrestre, la atracción molecular y la capilaridad (El Agua subterránea y los Pozos, Edward E. y Johnson. INC.). En la figura 16, se muestra el ciclo hidrológico del agua.

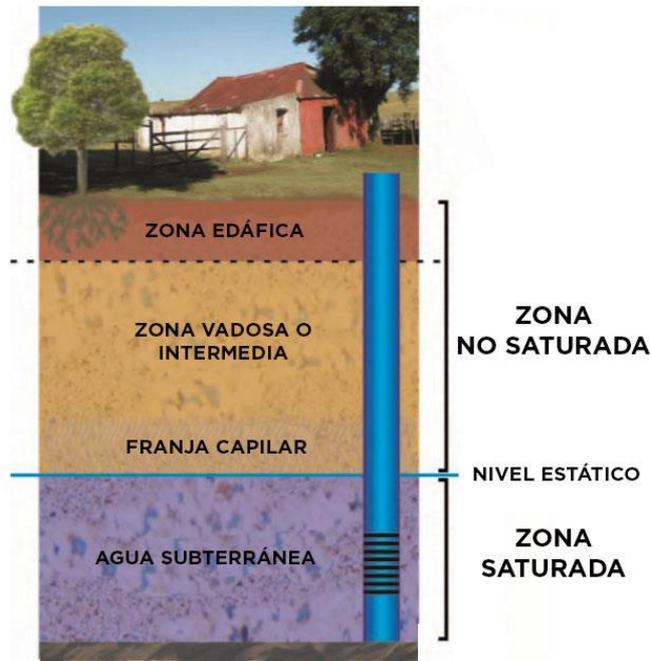


**Figura 16:** Ciclo hidrológico del agua.

**Fuente:** Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

### **b. Distribución del agua en el perfil del suelo**

El agua subterránea está contenida en las fracturas de las rocas o en los poros de los suelos no consolidados; viendo en un perfil de suelo este presenta dos zonas bien definidas: Zona saturada y zona no saturada; estas dos están separadas por la denominada tabla de agua, que para el caso de un acuífero libre toma el nombre de nivel freático.



**Figura 17:** Perfil hidrogeológico del subsuelo.

**Fuente:** Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

- **Zona no saturada o vadosa**

Es el espacio comprendido desde la superficie de la tierra hasta el nivel donde todos los poros del subsuelo se encuentran llenos de agua, Esta zona puede no existir en regiones muy húmedas o tener varios centenares de metros de espesor en las regiones áridas. La zona vadosa se caracteriza porque coexisten material mineral, agua, aire, y otros gases. A la vez esta zona se subdivide en tres: Capa de agua del suelo, zona intermedia y zona capilar.

- **Capa de agua del suelo**

Se ubica inmediatamente debajo de la superficie, es la parte desde donde las plantas a través de sus raíces extraen el agua para su desarrollo. El espesor de esta capa depende del tipo de suelo y vegetación, el espesor será cero cuando la tabla de agua coincide con la superficie del terreno; y será como máximo de 10 m, cuando la tabla de agua está muy profunda.

- **Zona intermedia**

Se encuentra entre la capa de agua del suelo y la zona capilar. Existe solo si la tabla de agua está a más de 10 m de profundidad. Se caracteriza porque los niveles de humedad permanecen invariables e iguales a la capacidad de campo.

- **Zona capilar**

Se ubica inmediatamente debajo de la zona intermedia y yace sobre la zona de saturación. El agua del borde capilar es el agua subterránea contenida en los pequeños intersticios sometidos a una ascensión capilar. Es espesor de esta capa depende de la granulometría del suelo; pudiendo variar desde escasos centímetros en suelos de granulometría gruesa hasta varios metros en los de granulometría fina.

- **Zona saturada**

Se refiere a la zona del medio poroso que está saturada por agua y se ubica debajo de la zona no saturada y puede llegar a extenderse hasta grandes profundidades. Se caracteriza por que todas las cavidades y los intersticios se encuentran llenos o saturados de agua. A esta es la que denominamos agua subterránea.

### **c. Formación geológica**

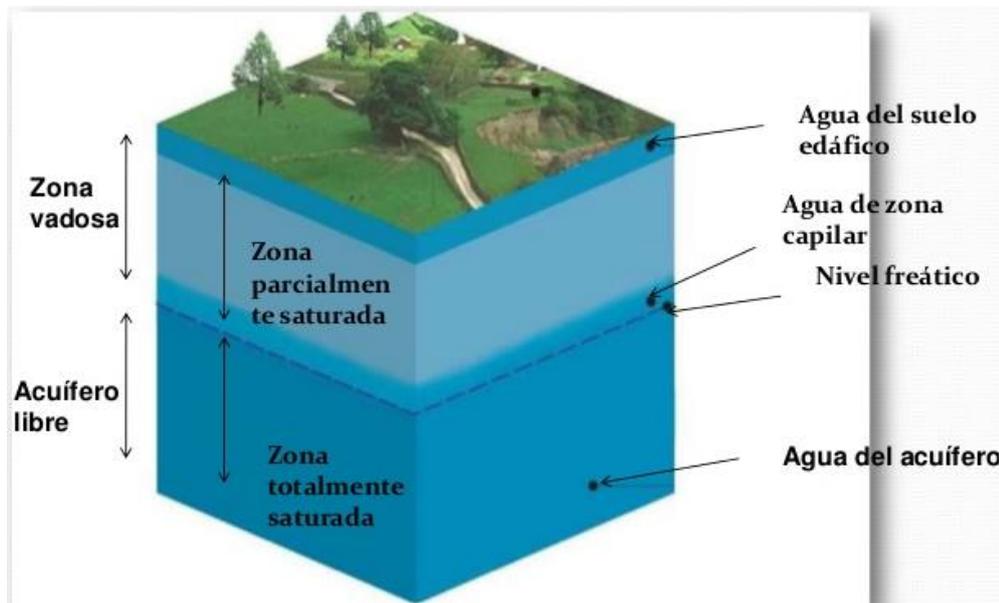
Dentro de las formaciones geológicas tenemos a los **acuíferos**, los cuales son aquellos estratos que almacena y transmite agua en cantidades suficientes para ser aprovechado como recurso; se tiene también los **acuifugos**, que son las formaciones geológicas impermeables, por lo tanto, no almacenan ni transmiten agua un ejemplo de estos son las rocas sanas. Los **acuicludos** son formaciones geológicas que, aunque son permeables no almacenan ni transmiten agua en cantidades suficientes para ser aprovechadas por el hombre, tenemos como ejemplo a las arcillas de baja permeabilidad. Los **acuitardos** son formaciones geológicas que almacenan grandes volúmenes de agua pero que no transmiten o transmiten con dificultad del agua. Desde el punto de vista de la explotación del agua subterránea nos interesa estudiar los acuíferos, es por ello que a continuación clasificaremos los acuíferos.

- **Tipos de acuíferos**

Siendo los acuíferos formaciones geológicas que almacena y transmiten cantidades importantes de agua y caracterizándose por poseer una permeabilidad significativa, a continuación, clasificamos los acuíferos de acuerdo a la presión hidrostática.

- ***Acuífero freático o libre***

Son aquellos en donde el límite superior de la zona saturada es una superficie física (lugar geométrico) de los puntos en los que el agua subterránea se encuentra a la presión atmosférica. En cualquier punto por debajo de la superficie freática el agua está a una presión mayor que la atmosférica (está a presión atmosférica más la correspondiente al peso de la columna de agua que carga sobre ese punto).



**Figura N°. 18:** Acuífero libre.

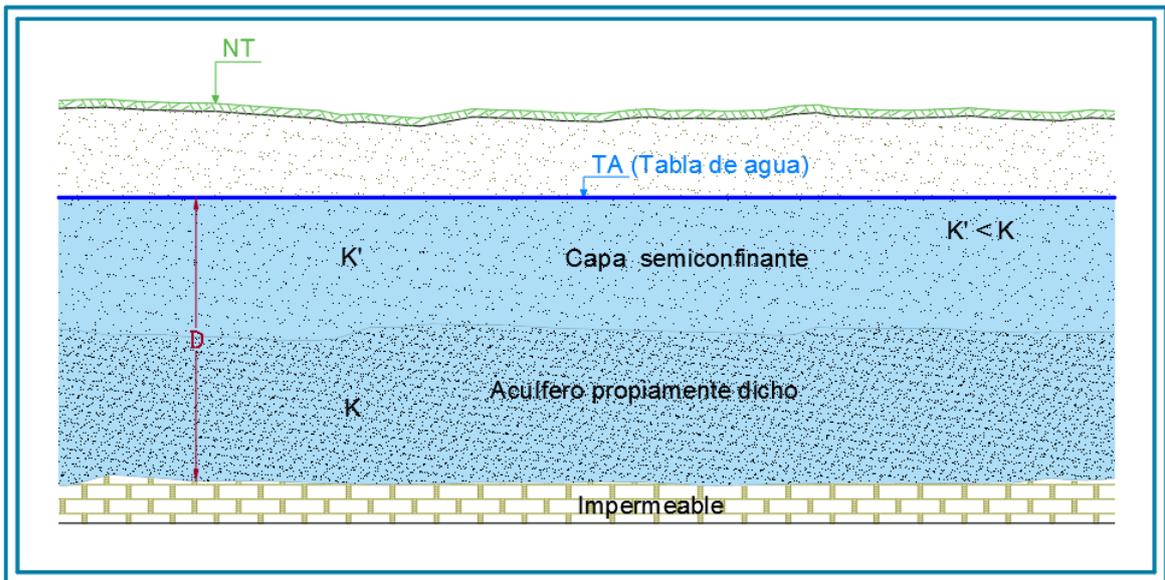
**Fuente:** Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

- ***Acuífero confinado o artesiano***

Este acuífero está siempre saturado de agua y en todos sus puntos el agua se encuentra a una presión mayor que la atmosférica, esto debido a que se encuentra entre dos estratos impermeables. Si perforamos un pozo el agua ascenderá hasta alcanzar un equilibrio entre la presión a la que se encuentra sometido y la presión atmosférica.

- ***Acuífero semilibre***

Formación casi confinada en la que la conductividad hidráulica  $K'$  de la capa superior semipermeable es tan grande que la componente horizontal de flujo en esta capa no puede despreciarse. La conductividad hidráulica  $K'$  de la capa semiconfinante es ligeramente menor que la conductividad hidráulica  $K$  del acuífero. (Ortiz Vera, Santos Oswaldo, Hidráulica de Aguas Subterráneas).

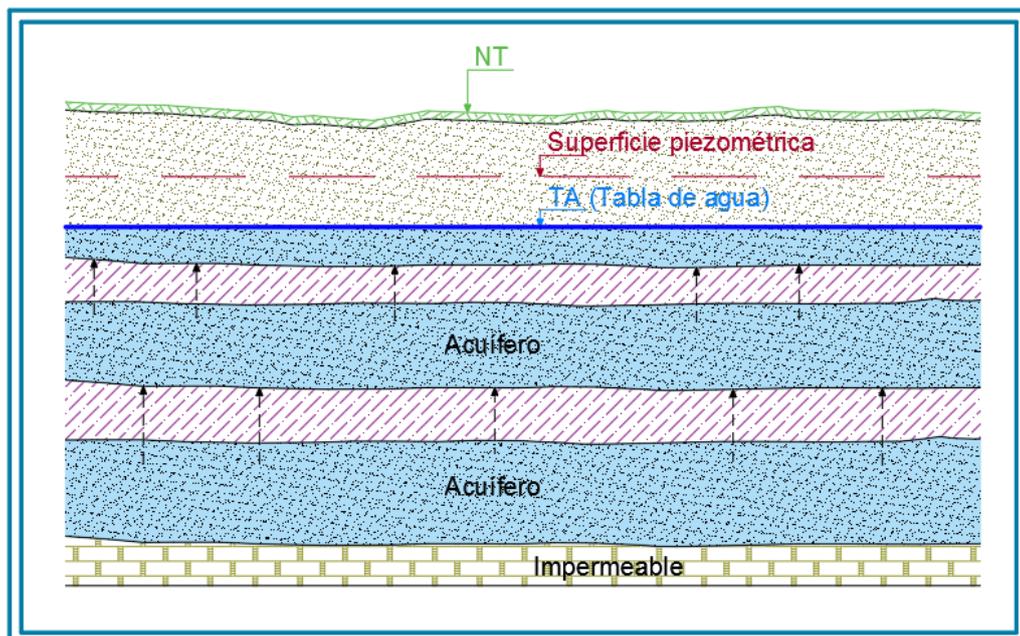


**Figura 19:** Acuífero semilibre.

**Fuente:** Adaptado de: Hidrología (S. N. Davis y R. De Wiest).

- **Acuífero semiconfinado**

Formación geológica completamente saturada de agua y que se encuentra limitado en la parte superior por un estrato poco permeable y el límite inferior por una capa impermeable o semipermeable. Se denomina capa semipermeable a aquella que tiene una conductividad hidráulica relativamente, (Ortiz Vera Oswaldo, “Hidráulica de aguas subterráneas” pág. 08).

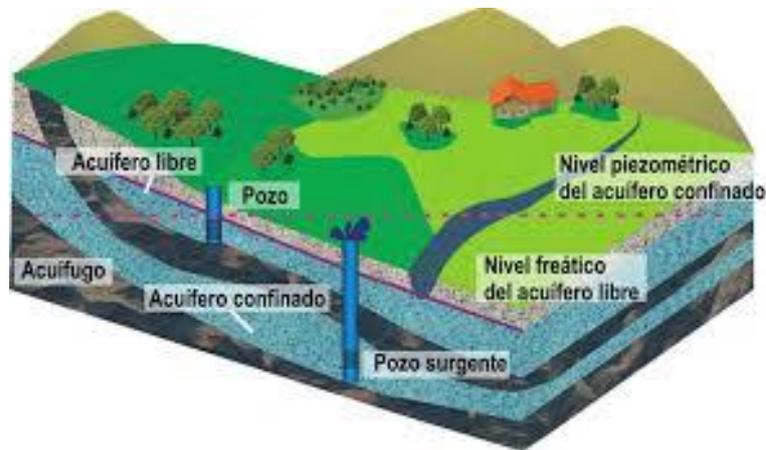


**Figura 20:** Acuífero semiconfinado.

**Fuente:** Adaptado de: Hidráulica Subterránea (Ortiz Vera SO).

- **Acuífero confinado**

Corresponden a formaciones geológicas, completamente saturadas de agua, confinadas entre dos capas o estratos que podemos asumir como impermeables. Por lo tanto, en estos casos el agua del acuífero está sometido a una presión de confinamiento, que será igual a la suma de la presión hidrostática más la presión litostática de la capa impermeable (y del resto del terreno suprayacente, esto si lo hubiera).

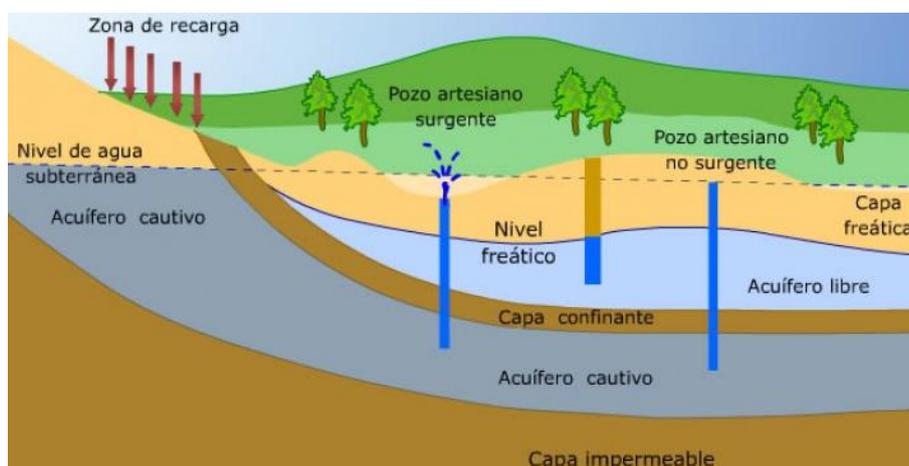


**Figura 21:** Acuífero confinado.

**Fuente:** Hidrología para Ambientólogos (Pulido Bosch, A. 2007).

- **Funciones de las capas acuíferas**

Las aberturas y los poros en una formación geológica sirven para transmitir agua, los cuales pueden considerarse como una red de tubos intercomunicados a través de los cuales fluye el agua desde las áreas de recarga a las zonas de descarga. Esta red de tubos por lo tanto sirve para proporcionar almacenamiento y flujo al acuífero.



**Figura 22:** Perfil hidrogeológico en estratos acuíferos con pozos.

**Fuente:** Hidrología para Ambientólogos (Pulido Bosch, A. 2007).

▪ ***Función almacenamiento***

Con la función de almacenamiento están relacionadas dos propiedades de los suelos: La porosidad y el coeficiente de almacenamiento.

➤ ***Porosidad (n).***

Es la relación existente entre el volumen de vacíos ( $V_v$ ) y el volumen total ( $V_t$ ) La porosidad se mide en porcentaje y es un índice que nos determina la cantidad de agua del suelo que se puede almacenar en un acuífero y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (15)$$

➤ ***Coficiente de Almacenamiento (S).***

Es el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma de acuífero de base unitaria y altura de del espesor saturado ( $b$ ), cuando el potencial hidráulico varía la unidad. Es un parámetro adimensional y se expresa así:

$$S = \gamma b(m_e \beta + \alpha) \quad (16)$$

Donde:

$\gamma$  = Peso específico del agua

$b$  = Espesor saturado del acuífero

$\alpha$  = Módulo de compresibilidad del acuífero

$\beta$  = Módulo de compresibilidad del agua:  $\beta = 4.8 \times 10^{-10} m^2/N$

En un acuífero libre el  $S = m_e$  ya que el agua ocupa los huecos, en cambio en un acuífero confinado el agua y el acuífero están comprimidos y el agua que libera el acuífero cuando se le extrae por ejemplo mediante un bombeo, proviene exclusivamente de la descompresión (componente elástico); no del almacenamiento. Luego de terminar el bombeo el acuífero sigue completamente saturado, solo que ligeramente descomprimido. A esa agua que libera gracias a la descompresión, pero permaneciendo saturado el acuífero, se le denomina coeficiente de almacenamiento elástico.

▪ **Función conducción**

La propiedad del suelo que está relacionada con la conducción del agua se le conoce como permeabilidad.

➤ **Conductividad Hidráulica (K).**

Es el caudal de agua que circula por una sección de acuífero con altura la unidad, anchura la unidad, bajo un gradiente hidráulico unitario. Representa la facilidad que tiene una roca para que el agua circule a su través. La permeabilidad (K) depende tanto del medio físico como del fluido que lo atraviesa.

$$K = k_0 * \frac{\gamma}{\mu} \quad (17)$$

Donde:

$\gamma$  = Peso específico del agua

$\mu$  = Viscosidad cinemática del agua

$k_0$  = Permeabilidad intrínseca del suelo:  $k_0 = Cd^2$

$C$  = Factor forma; depende de la roca (estratificación, textura, porosidad, etc)

$d^2$  = Diámetro medio curva granulométrica corresponde al paso del 50%

La conductividad hidráulica es proporcional a la diferencia de presión y velocidad del flujo entre dos puntos que están en condiciones laminares o no turbulentas, y se expresa mediante la ecuación conocida como la ley de Darcy.

$$V = \frac{K(h_1 - h_2)}{L} \quad (18)$$

Donde:

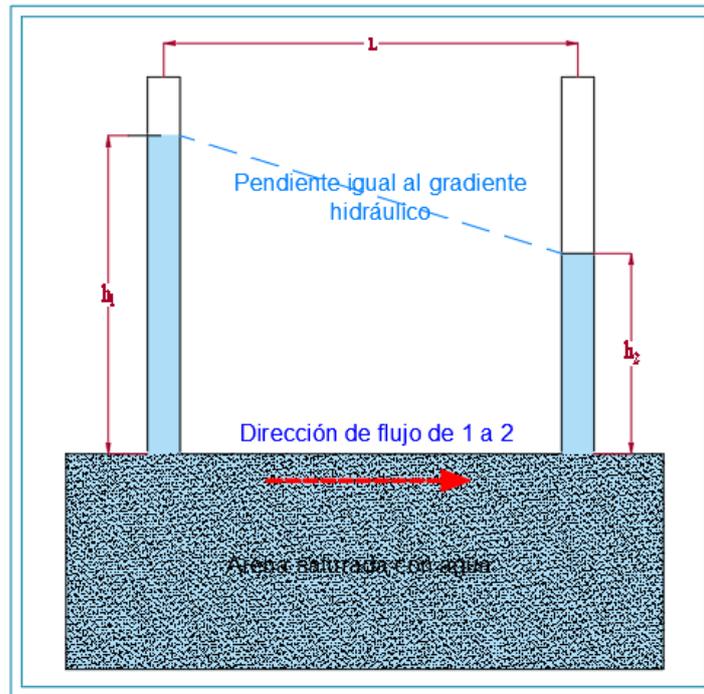
$V$  = Velocidad del flujo *m/dia*.

$h_1$  = Presión en el punto de entrada en *mca*.

$h_2$  = Presión en el punto de salida en *mca*.

$L$  = Longitud de la sección del conducto en *m*.

$K$  = Permeabilidad.



**Figura 23:** Arena saturada con agua, mostrando la diferencia de presión.

**Fuente:** Adaptado de: Prospección y Explotación de las Agua Subterráneas (G. Castany).

La ecuación (18), se puede expresar de la siguiente manera.

$$V = KI \quad (19)$$

Donde:

$$I = \frac{(h_1 - h_2)}{L} = \text{Gradiente hidráulico o pendiente de la tabla de agua}$$

La cantidad de flujo por unidad de tiempo a través del área de una sección transversal dada puede obtenerse a partir de la ecuación (27) multiplicando la velocidad de flujo por esa área.

$$Q = AV = KIA \quad (20)$$

Donde:

$Q$  = Cantidad de flujo por unidad de tiempo

$A$  = Área de la sección transversal

Basándonos en la ecuación 20, el coeficiente de almacenamiento puede definirse como la cantidad de agua que fluirá a través de una unidad del área de la sección transversal del material poroso en la unidad de tiempo, bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad ( $I = 1$ ) a una temperatura específica de 15.5°C.

Considerando una sección transversal vertical de una capa acuífera cuyo ancho es igual a la unidad y con espesor total ( $m$ ), gradiente hidráulico ( $I$ ), y coeficiente de permeabilidad promedio ( $K$ ), vemos por medio de la ecuación (28) que el gasto ( $q$ ), a través de esta sección transversal se obtiene mediante:

$$q = KmI \quad (21)$$

El producto ( $Km$ ) de la ecuación anterior se conoce como el coeficiente de transmisibilidad o transmisividad ( $T$ ) de una capa acuífera y se define como el gasto a través de la sección transversal vertical de una capa acuífera cuyo ancho es la unidad y cuya altura es el espesor total de la capa cuando el gradiente hidráulico es la unidad.

$$T = Km \quad (22)$$

Donde:

- $T$  = Transmisividad
- $K$  = Coeficiente de permeabilidad
- $m$  = Espesor del acuífero

#### • Red de flujo

Una red de flujo puede concebirse como un enrejado de dos familias de líneas mutuamente ortogonales las equipotenciales (líneas de igual carga) y las líneas de flujo o líneas de corriente (trayectoria de las partículas de agua), están dispuestas de tal manera que, como regla, las líneas de corriente acaben en líneas equipotenciales, y viceversa, delineando, en parte, el dominio del movimiento. La excepción a esta regla aparece cuando se presenta una superficie de rezume. Para poder elaborar una red de flujo es preciso que el movimiento satisfaga los criterios de independencia del tiempo y de homogeneidad, que tenga lugar paralelamente al plano de la red que, tenga validez de la ley de Darcy.

Las redes de flujo pueden construirse tanto para el estudio del movimiento en una sección vertical como en un plano horizontal. La mayoría de sus aplicaciones corresponden al estudio de la filtración a través de diques, presas y estructuras similares, estas redes suelen corresponder a secciones verticales. También pueden elaborarse redes para el estudio de movimientos horizontales utilizando mapas de isopiezas (Stanley, N. 2009).

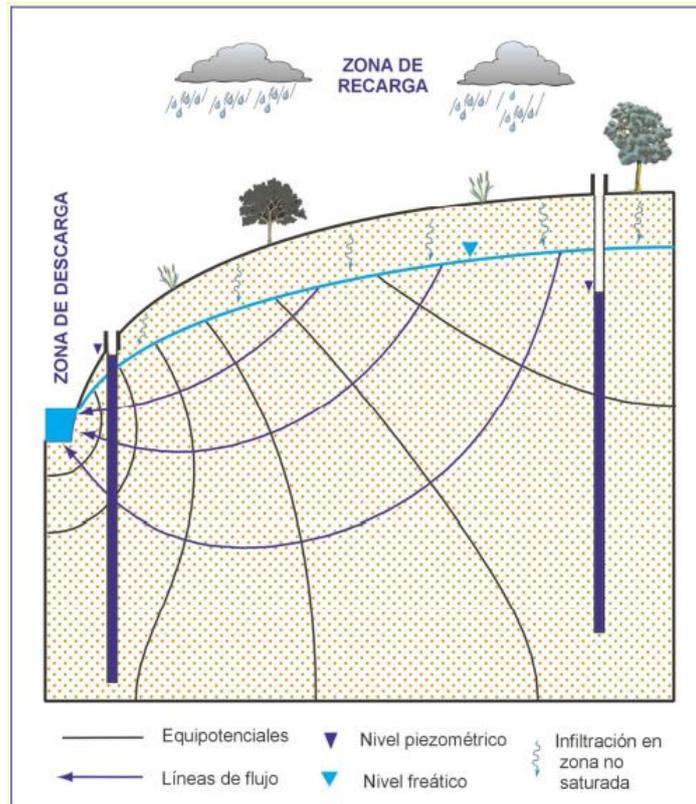
- ***Líneas equipotenciales***

Se denomina líneas equipotenciales cuando se habla de un sistema unidimensional o bidimensional, pero si se trata de un sistema tridimensional se denomina superficies equipotenciales, y son el lugar geométrico de los puntos que tienen el mismo potencial hidráulico. Se trata de superficies o líneas en las que el agua subterránea tiene la misma energía en todos sus puntos, (Martinez, A. 2006).

- ***Líneas de flujo***

Se llama línea de flujo o línea de corriente, a la línea que constantemente es tangente al vector velocidad definido en un medio poroso a partir de la ley de Darcy. Matemáticamente sería la envolvente del vector velocidad. Una trayectoria sería una línea, más o menos tortuosa, que constituiría el lugar geométrico de las sucesivas posiciones de una partícula de agua en su movimiento a través de un medio poroso, (Martinez, A. 2006).

Otra definición más sencilla, nos dice que son curvas que presentan de forma idealizada el itinerario seguido por las partículas de agua en su movimiento a través del medio saturado.



**Figura 24:** Red de flujo.

**Fuente:** Yelamos y Villarroba, 2008

## **2.4. EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El agua subterránea es el recursos que en mayor cantidad se tiene en cuanto a agua dulce se refiere y se puede utilizar en diferentes usos como: Agua para uso poblacional, para riego, agua para uso pecuario, agua para uso en minería, agua para uso en las industrias; para el caso del Fundo La Victoria de la Universidad Nacional de Cajamarca, el agua se utiliza en los tres primeros; es decir: Agua para uso poblacional, agua para riego y uso pecuario; para cada uno de ellos la demanda de agua requerida se calcula de diferente manera.

### **a. Calculo de la Demanda de Agua para uso Poblacional**

Para realizar el cálculo de la demanda de agua para uso poblacional, se tiene que determinar antes varios parámetros como: la población futura a la cual se va a beneficiar, la dotación por persona la cual depende de la zona donde esté ubicada (costa, sierra o selva); además de ello también se tiene que tener periodo de diseño del proyecto. A continuación, detallaremos cada uno de los parámetros.

#### **• Población de Diseño**

Se adoptará el criterio más adecuado para determinar la población futura, tomando en cuenta para ello datos censales u otra fuente que refleje el crecimiento poblacional, los que serán debidamente sustentados. Deberá proyectarse la población para un periodo de 20 años.

#### **• Periodos de diseño**

Para proyectos de poblaciones o ciudades, así como para proyectos de mejoramiento y/o ampliación de servicios en asentamientos existentes, el período de diseño será fijado por el proyectista utilizando un procedimiento que garantice los períodos óptimos para cada componente de los sistemas. Los periodos de diseño de los diferentes componentes del sistema se determinarán considerando los siguientes factores:

- Vida útil de las estructuras y equipos
- Grado de dificultad para realizar la ampliación de la infraestructura
- Crecimiento poblacional
- Economía de escala

Los periodos de diseño máximos recomendables, son los siguientes

- Capacidad de las fuentes de abastecimiento: 20 años
- Obras de captación: 20 años
- Pozos: 20 años
- Plantas de tratamiento de agua de consumo humano, reservorio: 20 años.
- Tuberías de conducción, impulsión, distribución: 20 años
- Equipos de bombeo: 10 años
- Caseta de bombeo: 20 años

- **Dotación de agua**

La dotación promedio diaria anual por habitante, se fijará en base a un estudio de consumos técnicamente justificado, sustentado en informaciones estadísticas comprobadas. Si se comprobara la no existencia de estudios de consumo y no se justificará su ejecución, se considerará por lo menos para sistemas con conexiones domiciliarias una dotación de 180 l/hab/d, en clima frío y de 220 l/hab/d en clima templado y cálido. Para programas de vivienda con lotes de área menor o igual a 90 m<sup>2</sup>, las dotaciones serán de 120 l/hab/d en clima frío y de 150 l/hab/d en clima templado y cálido.

Para sistemas de abastecimiento indirecto por surtidores para camión cisterna o piletas públicas, se considerará una dotación entre 30 y 50 l/hab/d respectivamente. Para habitaciones de tipo industrial, deberá determinarse de acuerdo al uso en el proceso industrial, debidamente sustentado. Para habilitaciones de tipo comercial se aplicará la Norma IS.010 Instalaciones Sanitarias para Edificaciones.

- **Variaciones de consumo**

En los abastecimientos por conexiones domiciliarias, los coeficientes de las variaciones de consumo, referidos al promedio diario anual de la demanda, deberán ser fijados en base al análisis de información estadística comprobada. De lo contrario se podrán considerar los siguientes coeficientes:

- Máximo anual de la demanda diaria: 1,3
- Máximo anual de la demanda horaria: 1,8 a 2,5

- **Demanda contraincendios**

- Para habilitaciones urbanas en poblaciones menores de 10,000 habitantes, no se considera obligatoria demanda contra incendio.
- Para habilitaciones en poblaciones mayores de 10,000 habitantes, deberá adoptarse el siguiente criterio:
  - El caudal necesario para demanda contra incendio, podrá estar incluido en el caudal doméstico; debiendo considerarse para las tuberías donde se ubiquen hidrantes, los siguientes caudales mínimos:
    - Para áreas destinadas netamente a viviendas: 15 l/s.
    - Para áreas destinadas a usos comerciales e industriales: 30 l/s.

- **Volumen de contribución de excretas**

Cuando se proyecte disposición de excretas por digestión seca, se considerará una contribución de excretas por habitante y por día de 0,20 kg.

- **Caudal de contribución de alcantarillado**

Se considerará que el 80% del caudal de agua potable consumida ingresa al sistema de alcantarillado.

- **Caudal de Infiltración**

Asimismo, deberá considerarse como contribución al alcantarillado, el agua de infiltración, asumiendo un caudal debidamente justificado en base a la permeabilidad del suelo en terrenos saturados de agua freáticas y al tipo de tuberías a emplearse, así como el agua de lluvia que pueda incorporarse por las cámaras de inspección y conexiones domiciliarias.

- **Agua de lluvia**

En lugares de altas precipitaciones pluviales deberá considerarse algunas soluciones para su evacuación, según lo señalado en la norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano.

## b. Cálculo de la Demanda de Agua para uso Agrícola

El cálculo del uso del recurso hídrico en el sector agrícola se acota a partir de la estimación del agua extraída con fines agrícolas, mediante la agregación del uso consuntivo y el agua extraída no consumida; Se excluyen de la medición de demanda agrícola las tierras en descanso (rastrajo, barbecho) y los pastos naturales, cuya demanda se satisface mediante los ciclos de precipitación. Para el cálculo de la necesidad hídrica de los cultivos se tiene en cuenta los siguientes factores:

- **Evapotranspiración Potencial (ETp)**

Determina la cantidad de agua consumida en un determinado periodo de tiempo, para determinar la ETp existen varios métodos, pero para las condiciones climáticas del valle de la ciudad de Cajamarca el método de Penman es el que da valores similares a los medidos lisimétricamente.

- **Coefficiente de uso Consuntivo (Kc)**

Nos permite estimar el consumo de agua de un cultivo en cualquier estado de desarrollo, que viene a ser la relación entre la evapotranspiración del cultivo en cuestión (ETc) y la evapotranspiración potencial lisimétrica del cultivo de referencia (ETo), es decir:

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad (23)$$

Este coeficiente depende de cada especie vegetal de acuerdo a las condiciones específicas de desarrollo, exigencias fisiológicas propias, ritmo vegetativo, época de siembra y cosecha, variedad, etc. El valor se pondera cuando se tiene varios cultivos simultáneamente dentro de un proyecto determinado. Se considera además que el coeficiente **Kc** está en función de cuatro fases de desarrollo del cultivo, que son:

- **Fase Inicial:** Nos permite estimar valores de germinación y crecimiento inicial hasta el 10% de cobertura vegetal.
- **Fase de Desarrollo:** Estima valores desde el final de la fase inicial hasta la cobertura efectiva (70% - 80%).

- **Fase de Medidos del Periodo:** Desde la cobertura efectiva hasta el momento de iniciarse la maduración.
- **Fase de Finales del Periodo:** Desde el final de la anterior hasta que se llega a la plena maduración o la recolección.

- **Evapotranspiración del Cultivo (ETc)**

Se refiere a que el consumo de agua se da en condiciones reales del medio, teniendo en cuenta las variaciones de humedad del suelo y una cubierta vegetal existente, se calcula con ecuación siguiente:

$$ETc = Kc * ETo \quad (24)$$

Donde:

- $ETc$  = Evapotranspiración del cultivo, (mm/día).
- $Kc$  = Coeficiente de uso consuntivo, (adimensional).
- $ETo$  = Evapotranspiración potencial lisimétrica, (mm/día).

- **Precipitación Confiable (PP75%)**

El agua la obtenemos en forma de lluvia, cuyos volúmenes varían de mes a mes y de año a año; por lo que es necesario calcular el valor de la precipitación mensual al 75 % de persistencia o precipitación confiable, denominado también al 75% de probabilidades (seguridad de presentarse en 3 de cada 4 años).

- **Precipitación Efectiva (PPef)**

Es la fracción de precipitación que pasa a formar parte de la humedad del suelo luego de haberse liberado del agua gravitacional.

$$PP_{ef} = PP_{75\%} * (1 - ct) \quad (25)$$

Donde:

- $PP_{ef}$  = Precipitación efectiva, (mm/mes).
- $PP_{75\%}$  = Precipitación al 75 % de probabilidad, (mm/mes).
- $ct$  = Coeficiente de pérdidas totales, que incluye además de la escorrentía, pérdidas por percolación y evaporación como se muestra en el siguiente cuadro.

**Tabla 3:** Coeficiente de pérdidas totales (Ct).

Tipo de Vegetación	Pendiente (%)	Francoareno so	Francoarcillosolimo – Francolimoso	Arcilloso
<b>Forestal</b>	0 – 5	0.1	0.3	0.4
	5 - 10	0.25	0.35	0.5
	10 - 30	0.3	0.5	0.6
<b>Praderas</b>	0 – 5	0.1	0.3	0.4
	5 - 10	0.15	0.35	0.55
	10 - 30	0.2	0.4	0.6
<b>Terrenos cultivados</b>	0 – 5	0.3	0.5	0.6
	5 - 10	0.4	0.6	0.7
	10 - 30	0.5	0.7	0.8

**Fuente:** Pizarro. F. “Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos”.

- **Requerimiento Neto ( $R_{neto}$ )**

Es el déficit de humedad del suelo respecto a la precipitación efectiva; es decir:

$$R_{neto} = ETc - PPef \quad (26)$$

Donde:

$R_{neto}$  = Requerimiento neto, en (mm/mes).

$ETc$  = Evapotranspiración del cultivo, en (mm/mes).

$PPef$  = Precipitación efectiva, en (mm/mes).

- **Requerimiento Bruto o Dotación de Riego ( $R_{bruto}$ )**

Es igual al requerimiento neto más las pérdidas por conducción, distribución y aplicación del sistema de riego. Es el gasto mínimo que debe aportar la fuente de abastecimiento de agua para cubrir los requerimientos hídricos de los cultivos del proyecto.

$$R_{bruto} = \frac{R_{neto}}{Ei} \quad (27)$$

Donde:

$R_{bruto}$  = Requerimiento bruto, en (mm/mes).

$R_{neto}$  = Requerimiento neto, en (mm/mes).

$Ei$  = Eficiencia de irrigación.

- **Eficiencia de Riego**

El riego nunca es eficaz al 100%, hay que dejar un margen para restituir las pérdidas evitables e inevitables, entre ellas la percolación profunda y la escorrentía superficial. La eficiencia del uso del agua para riego, se divide en cuatro componentes que son:

**Eficiencia de Conducción:** Es la relación existente entre el agua que el sistema de conducción entrega a las fincas ( $A_f$ ) y el agua originalmente captada ( $A_o$ ), y representa la eficiencia de conducción ( $E_c$ ). Los valores varían entre el 30% y 85%.

$$E_c = \frac{A_f}{A_o} \quad (28)$$

- **Eficiencia de Aplicación:** La eficiencia de aplicación ( $E_a$ ) es la relación entre el agua almacenada en la zona de las raíces ( $A_a$ ) y el agua recibida por la finca ( $A_f$ ).

$$E_a = \frac{A_a}{A_f} \quad (29)$$

( $E_a$ ) representa hasta cierto punto la habilidad del irrigador para aplicar el agua de manera uniforme y precisa en la zona de absorción de las plantas. El grado de nivelación del terreno, el método de riego que se use, el planteamiento general de la finca, hecho en función de las características físicas y topográficas del suelo y el manejo y control del agua, durante el riego, son los factores que principalmente determinan el valor de **Ea**, en una finca dada. Estudios realizados por Israelsen indican que el valor de  $E_a$  varía entre el 3% y el 93%.

- **Eficiencia de Uso:** La eficiencia de uso ( $E_u$ ) es la relación entre el agua transpirada por las plantas ( $A_t$ ) y el agua almacenada en la zona radicular ( $A_a$ ), o sea:

$$E_u = \frac{A_t}{A_a} \quad (30)$$

El agua transpirada es igual al agua almacenada en zona de las raíces ( $A_a$ ) menos el agua que se evapora en la superficie del suelo, sobre cuyo control se puede ejercer muy poca influencia. Pero el volumen de agua que se evapora del suelo es muy pequeño en comparación con la que se pierde por infiltración de tal manera que los valores de  $E_u$  son altos, por lo general mayores del 90%.

$$E_i = \frac{At}{Ao} = \frac{Af}{Ao} * \frac{Aa}{Af} * \frac{At}{Aa} * \quad (31)$$

Con base en los valores que se han indicado anteriormente para cada una de las eficiencias estudiadas, los valores de  $E_i$  varían entre 0.8% cuando se reúnen las condiciones más adversas, y 75% cuando se darían las más óptimas condiciones.

- **Lamina de Riego a Aplicar**

Doorembos, J. y Pruitt, W. manifiestan al respecto: Cuando el agua es abundante y existen las facilidades adecuadas, el riego se planifica para asegurar y lograr el óptimo desenvolvimiento fisiológico y rendimiento de los cultivos. En otros términos, se riega para mantener la evapotranspiración en su intensidad máxima durante el ciclo de desarrollo. Entre las determinaciones más importantes relacionadas con el riego fisiológico figuran: a) Evapotranspiración máxima representada por el  $ET_c$ ; b) Frecuencia o intervalos de riegos; c) Lámina a aplicar en cada oportunidad; d) Consumo total de agua; e) Húmeda en el suelo asociada al umbral óptimo de riego. El riego técnico incluye, además, consideraciones de eficiencia y aspectos relacionados con el diseño de distribución y aplicación del agua y la conservación del sistema. A continuación, se presenta un cuadro que contiene los valores promedios de los cálculos de riego.

**Tabla 4:** Balance hídrico para el valle de Cajamarca, considerando un promedio de 30 años (1963 – 1992) Estación “Augusto Weberbauer”

	Etp: PENMAN							ALMACENAMIENTO: 100 mm					
FACTOR	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	TOTAL
$ET_p(\text{mm/mes})$	108.19	115.80	122.76	128.70	129.89	118.73	99.96	106.33	102.30	96.72	88.50	98.58	1316.46
PP	12.30	28.90	67.20	57.90	72.40	74.50	94.50	109.10	62.20	27.60	9.40	6.50	622.50
VAR.HUM.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.77	-2.77	0.00	0.00	0.00	
ALM.AGUA SUELO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.77	0.00	0.00	0.00	0.00	
$E_{tr}$	12.30	28.90	67.02	57.90	72.40	74.50	94.50	106.33	64.97	27.60	9.40	6.50	622.32
D.A.	95.89	86.90	55.56	70.80	57.49	44.23	5.46	0.00	37.33	69.12	79.10	92.08	693.96
E.A.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ESC.Y PERD.SUBB.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Fuente:** Tesis: Abastecimiento de agua para usos complementarios de la Universidad Nacional de Cajamarca con la aplicación de método de la resistividad eléctrica de suelos en el estudio hidrogeológico; (Cerdán Moreno, CA. 1997).

### c. Cálculo de la Demanda de Agua para uso Pecuario

Para el cálculo del agua demandada para los animales, la cual es fundamental para su nutrición y crecimiento, y la obtienen de tres fuentes; la contenida en el alimento, la que se

produce durante el proceso de asimilación de los mismos y el agua de bebida; en este estudio nos ocuparemos del cálculo del agua de bebida.

Es fundamental conocer la cantidad de agua que tomarán los animales en el momento más crítico para poder adecuar el sistema de abrevadero. Los requerimientos netos de agua de un animal están dados por la cantidad de agua necesaria para mantener el balance corporal. Las mismas equivalen a la suma de las pérdidas de agua en heces y orina, pérdidas evaporativas para disipación del calor, más el agua retenida en el cuerpo en tejidos para crecimiento y preñez, así como la secretada en leche. Estas cantidades no son fijas, sino que varían en función de numerosos factores. Los factores que afectan los requerimientos de agua (consumo potencial) pueden ser agrupados en tres tipos principales:

- **Relativos al ambiente:** Temperatura ambiente, variación diaria de temperatura, humedad relativa, lluvia y viento.
- **Relativo a la dieta:** Principalmente el contenido de humedad, nitrógeno, fibra y sal del alimento.
- **Relativo al animal:** Peso vivo, estado fisiológico, nivel productivo, consumo diario de materia seca.

El requerimiento de agua varía de acuerdo al peso corporal del animal, así como a la edad, puesto que los animales jóvenes y altamente productivos consumen más agua que los animales viejos y menos productivos. A continuación, se muestra una tabla del consumo potencial de agua en animales según su peso, estado fisiológico y temperatura.

**Tabla 5:** Consumo potencial de agua según su peso, estado físico y temperatura

TEMPERATURA	VACAS LACTANDO	VACAS SECAS	ANIMALES EN CRECIMIENTO	ANIMALES EN TERMINACION	
	409 Kg	409 Kg	108 Kg	364 Kg	454 Kg
4	43.00	25.00	15.00	28.00	33.00
10	48.00	27.00	16.00	30.00	36.00
14	55.00	31.00	19.00	34.00	41.00
21	64.00	37.00	22.00	41.00	48.00
27	68.00		25.00	47.00	55.00
32	61.00		36.00	66.00	78.00

**Fuente:** Adaptado de Winchester y Morris, 1996 citado por NRC, 1996.

## **2.5. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL SUELO**

El valle de Cajamarca está compuesto por suelos no consolidados, los cuales son aquellas formaciones geológicas cuya estructura sólida está compuesta por materiales granulares sin cementar. La conductividad hidráulica de estos medios está básicamente condicionada por la magnitud y disposición geométrica de su porosidad intergranular o primaria.

Este tipo de formaciones suelen mostrar una serie de características muy favorables para su explotación del agua subterránea. La clasificación de estos materiales puede hacerse en función de su génesis, de este modo es posible diferenciar los siguientes grupos.

Depósitos procedentes de la sedimentación fluvial y coluvial, depósitos deltaicos, depósitos no consolidados de relleno de fosas tectónicas y cuencas sedimentarias en general, depósitos procedentes de agentes de sedimentación y transporte eólico, depósitos de arroyos efímeros en las zonas costeras y depósitos procedentes de agentes de sedimentación y transporte glaciario, esto lo podemos verificar en, (Fcihs. 2009).

Los suelos del valle de la ciudad de Cajamarca principalmente son: Depósitos que fueron arrastrados por las corrientes, depósitos de antiguos lagos, depósito glaciario, depósitos por la erosión de los vientos y depósitos generados por la gravedad terrestre.

### **a. Suelos de origen aluvial**

Se refiere no solo a los suelos derivados de aluvión, sino también a los suelos en plano de inundación y deltas en proceso de formación, con características heredadas del aluvión mismo y sin secuencia genética en sus horizontes. La distribución de las capas está relacionada con los continuos cambios de las corrientes naturales de agua, que depositan materiales de acuerdo a su caudal, las corrientes más rápidas depositan arenas y partículas más gruesas, mientras que las corrientes lentas depositan limo y arcilla. Los suelos aluviales pueden tener algunas características que reflejan la zona climática en la cual se desarrolla, a pesar de no poseer una secuencia genética definida de sus horizontes; sin embargo, a medida que pasa el tiempo se va meteorizando y se desarrolla en perfil, (Mosquera López, L., 1967).

### **b. Suelos de origen coluvial**

Transportados principalmente por la influencia de la gravedad y localizados en la base de las pendientes fuertes, están formados por fragmentos de rocas desprendidas de las laderas

de montañas y constituidos en parte por materiales gruesos y pedregosos, pues en ellos la edificación física ha dominado sobre la química.

A pesar de que algunos suelos aluviales y coluviales son de baja fertilidad, poseen una alta fertilidad, pues a medida que la meteorización avanza, se van liberando, del material parental, elementos nutritivos para las plantas, (Mosquera López, L., 1967).

### **c. Suelos de origen lacustre**

Los lagos y lagunas son cuerpos de agua que se forman en cuencas o depresiones donde el agua se almacena y cuya vida dura unos cuantos miles de años, limitada por las condiciones climáticas y geológicas de su entorno, desaparece a causa de la erosión y la paulatina acumulación del sedimento en el lecho lacustre. Los procesos de depósitos que ocurren en los lagos son influenciados por condiciones climáticas y por una variedad de factores físicos, químicos y biológicos, esto da origen al tipo de roca sedimentaria, la cual se forma en estratos cuasi horizontales.

Los depósitos lacustres provienen principalmente de los ríos, los sedimentos se depositan a lo largo de la rivera, particularmente en la desembocadura de los ríos, donde se forman abanicos aluviales o deltas, que se extienden al interior del lago o laguna. La deposición se da de la siguiente manera, las gravas y arenas se depositan en las riveras, en tanto que los limos y arcillas alcanzan el centro del lago y/o laguna, (Díaz Rodríguez, JA., 2006).

### **d. Suelos de origen glaciar**

Son materiales transportados y depositados por el hielo-deshielo y están formados por tillitas y morrenas su composición es muy heterométrica y su distribución es altamente errática (andan de un lugar a otro) y este depósito se divide en dos, el primero es fluvio-glaciar este depósito contiene partes desde gravas gruesas hasta rocas y el segundo es lacustre-glaciar este depósito contiene fracciones más finas predominado las rocas y las estructuras laminadas.

La característica principal de estos depósitos es la heterogeneidad y anisotropía, puesto que son suelos muy sensibles a la alta presión intersticial producidos por las lluvias torrenciales

y por el deshielo. En estos depósitos son muy repetidos los fenómenos de solifluxión y de descontrol de laderas, (Gonzales de Vallejo, L., 2012).

#### **e. Suelos del valle de Cajamarca**

El origen más inmediato de los suelos del Valle de Cajamarca lo encontramos en la era Cenozoica. Durante esta era tuvieron lugar los movimientos orogénicos más intensos y definitivos que hicieron plegar todos los sedimentos del Geosinclinal Andino por encima del nivel del mar.

Durante el periodo cuaternario, el principal agente externo que ha influido en la formación del relieve actual del valle de Cajamarca, ha sido y sigue siendo el agua, bien como agente de erosión o como agente de deposición en forma de glaciares, ríos o lagos, al parecer con más intensidad durante el último retroceso de los hielos al culminar la última gran glaciación global. Este sería a su vez el origen, dentro de este valle, del “Lago Humboldt”, del que tenemos referencias por el Dr. en Ciencias Geológicas Isaac Torres, quien anotó en su tesis doctoral lo siguiente: “Pese a la falta de evidencias de lechos lacustres o huellas a nivel de agua dejados por un lago temporal interandino, después de un examen minucioso sobre la dirección del antiguo drenaje y topografía regional, se puede aceptar la existencia de un antiguo reservorio post-glaciar y que en mérito a su observador lo llamaremos Lago Humboldt. Fuera de los escasos depósitos de rodados, conglomerado-arenoso, arcillas, etc. Dispuestos horizontalmente en una sección de 20 m, de potencia en una de las quebraditas al sur de la campiña (no se indica cual exactamente), cerca de Jesús y distante del curso actual del río, no se podrían tener mayores evidencias para discutir este asunto bajo el punto de vista sedimentológico, (Nota preliminar de la geología del valle de Cajamarca).

En conclusión, debemos esperar que los suelos del Fundo La Victoria al igual que los suelos de la ciudad universitaria de la Universidad Nacional de Cajamarca, al estar dentro del Valle de Cajamarca, serán de naturaleza lacustre, aluvial y glaciar. Quedando por determinar cuál de estas características es la predominante, esto se especifica en la tesis denominada, (Abastecimiento de Agua para Usos Complementarios de la Universidad Nacional de Cajamarca con la Aplicación de Método de la Resistividad Eléctrica de Suelos en el Estudio Hidrogeológico. Cerdán Moreno, CA; Huamán Rojas, CE; Malpica Becerra, JE. 1997).

## **2.6. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS**

### **a. Resistencia eléctrica**

Es la oposición que presentan los materiales para que fluya la corriente eléctrica a través de ellos. Esta dificultad que encuentra la corriente para circular se debe a las colisiones que se da entre los electrones que se desplazan por el material y los átomos del propio material. Además, la resistencia eléctrica de una determinada muestra de material conductor depende del tamaño y forma del conductor, del material que está compuesto y de su temperatura; y la unidad en que se mide es en ohm. (H. hubcher J. Klaue; W. Pfluger S. Appelt. 1991).

### **b. Resistividad eléctrica**

La resistividad eléctrica es una propiedad específica de la materia que mide la dificultad que presenta una sustancia para conducir la corriente eléctrica. Entre mayor sea la resistividad de un material, menor será su capacidad para conducir la corriente eléctrica. A diferencia de la resistencia, que depende de la forma del conductor, la resistividad sólo depende del material del que está hecho el conductor, y no de su forma; por lo anterior, se dice que la resistividad es una propiedad intensiva y la unidad en que se mide es en ohm-m. (H. hubcher J. Klaue; W. Pfluger S. Appelt. 1991).

### **c. Sondeo eléctrico vertical**

Se denomina así a una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción. Cuando el dispositivo empleado es simétrico, o asimétrico con un electrodo en el “infinito”, y durante la medición permanecen fijos el azimut del dispositivo y el centro del segmento MN, se denomina Sondeo Eléctrico Vertical, (Mingarro Marin, F. 1996).

### **d. Acuífero**

Formación geológica que almacena agua y que es capaz de transmitirla de manera que puede ser aprovechada como recurso. El agua de superficie se infiltra a través del suelo hasta encontrarse con una capa impermeable; entonces se acumula y llena los poros y fisuras de las rocas, dando lugar a una zona de saturación. El agua subterránea puede brotar de modo natural (manantiales o fuentes) o ser extraída mediante pozos u otros elementos de captación.

Las características fundamentales de un acuífero son la baja velocidad en el movimiento del agua subterránea, los grandes volúmenes de reserva y el gran tiempo de renovación del agua en el sistema, (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 2009).

#### **e. Conductividad hidráulica**

Propiedad tensorial del medio que refleja la capacidad del mismo a que el agua circule a través suyo. Una componente direccional de este tensor se define como el caudal que circula a través de una sección unitaria de un acuífero, bajo un gradiente hidráulico unitario. Este parámetro presenta una gran variabilidad natural, de manera que en una formación aparentemente homogénea sus valores pueden variar tres o cuatro órdenes de magnitud, (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 2009).

#### **f. Perfil estratigráfico**

Es aquel que se realiza a partir de datos de perforaciones, de datos de prospección geofísica, o bien de cortes naturales o artificiales del terreno que muestran las rocas que conforman la columna estratigráfica, mediante los cuales se puede reconstruir la estratigrafía del suelo, (Arche A. 2010).

#### **g. Perfil geológico**

El perfil geológico o corte geológico se define como una sección vertical o perfil interpretativo de la superficie terrestres, para cuya realización se utilizan los datos obtenidos del mapa geológico. Es decir, un corte geológico es la interpretación de la información geológica disponible en una zona, representada en un corte o sección, (Silgado, A. Tardón A. 2010).

#### **h. Perfil geoelectrico**

Es representación de un corte del terreno en donde nos muestra que para cada una de las capas de las que está compuesta la estratigrafía del terreno, nos muestra un valor de resistividad diferente, (Suárez, J. y Zuñiga, H. 2013).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDIO

Esta investigación ha sido realizada en el Fundo La Victoria, en un área de 52.8981 hectáreas, y un perímetro de 4408.20 metros, cuyo predio pertenece a la Universidad Nacional de Cajamarca, el cual en 82.26 % está sembrado pastos (Rye – Grass), pero también tenemos zonas donde se siembran alfalfa, maíz, zanahoria, papa; además de estos también se tiene parcelas demostrativas donde los alumnos de la escuela académico profesional de Ingeniería Agrónoma realizan sus experimentos sembrado lechuga, brócoli, col, rabanito, cebolla china, entre otras verduras.

Geográficamente el área donde se ha realizado la investigación se ubica entre los paralelos  $7^{\circ} 11' 03''$  y  $7^{\circ} 11' 42''$  de latitud sur, y entre los meridianos  $78^{\circ} 27' 13''$  y  $78^{\circ} 27' 45''$  de longitud oeste. Limita al norte con el río Cajamarquino, al sur una parte limita con propiedad de terceros y otra parte con la carretera hacia La Victoria, al este limita con Propiedad de terceros y al oeste limita con propiedad de terceros; toda esta información fue adquirida de la Comisión de Gestión del Patrimonio Institucional de la UNC.

Políticamente el Fundo La Victoria propiedad de la Universidad Nacional de Cajamarca, pertenece al centro poblado de la Victoria, distrito de Llacanora, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca.

Administrativamente los recursos hídricos del Fundo La Victoria están dentro del ámbito de la Autoridad Local del Agua Cajamarca (ALA Cajamarca), bajo la dirección de la Autoridad Administrativa de Agua VI Marañón.

El Fundo a Victoria está ubicado al sureste del valle de la ciudad de Cajamarca; este por ser de origen aluvial está conformado por estratos, cuyos sus suelos están formados en mayor cantidad por limos y arcillas en la parte superficial, en partes más profundas encontramos la presencia de estratos arenosos, gravosos y la combinación de ellos, lo cual nos da indicios de la presencia de acuíferos que pueden tener un alto rendimiento al momento de la extracción de agua; esto se ha corroborado en los pozos ubicados en los alrededores del área en investigación, así como también de la descarga que hace el acuífero al río cajamarquino el cual se ubica al lado este del área donde se ha realizado esta investigación.

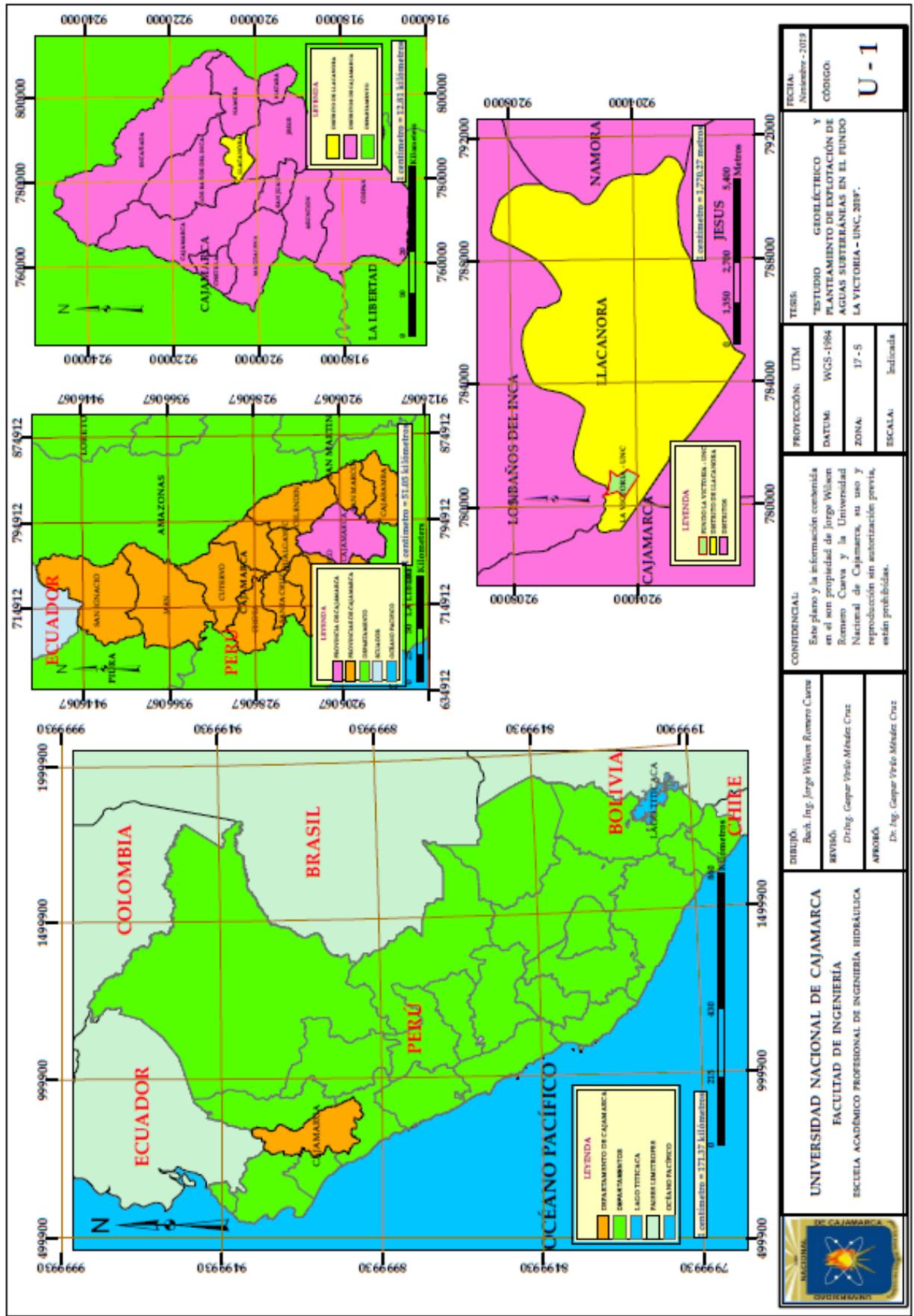


Figura 25: Plano de ubicación de la zona de estudio.

El río cajamarquino se comporta como un río efluente o ganador, debido a la aportación que va recibiendo de la escorrentía subterránea. Esto se suele dar en los valles aluviales de zonas húmedas y lluviosas donde hay poca explotación del agua subterránea; cuando decimos que hay poca explotación nos referimos a la zona donde se realizó el estudio, mas no así a todo el valle de la ciudad de Cajamarca.

### **3.2. UBICACIÓN TEMPORAL**

El desarrollo de la presente investigación fue llevado a cabo durante los meses de abril y mayo del presente año, durante este tiempo se ha realizado un total de veinticuatro (24) sondeos eléctricos verticales, de los cuales cuatro (04) fueron para realizar la validación de los datos y los veinte (20) restantes fueron sondeos de exploración.

### **3.3. MATERIALES**

Para el desarrollo de esta investigación se ha utilizado varios materiales, los cuales se enumerará a continuación para cada uno de los trabajos realizados.

#### **a. Levantamiento topográfico**

- 01 GPS Trimble XH 6000 de precisión milimétrica.
- 01 wincha de 5 m.

#### **b. Inventario de pozos**

- 01 GPS Garmin Oregon 550.
- 01 Wincha de 5 m.
- 01 Wincha de 50 m.

#### **c. Ejecución de Sondeos eléctricos verticales**

- Equipo para medir resistividad eléctrica de suelos.
- 05 Celulares.
- 01 Wincha de 50 m.
- 01 Wincha de 5 m.
- Sulfato de cobre.
- Agua.

#### **d. Gabinete**

- 01 Laptop Toshiba.
- 01 impresora.
- Calculadora Voyage 200.
- Softwares (Microsoft Word, Excel, Power Poin, ArcGis 10.5, AutoCad Civil 3d-2019).

### **3.4. EQUIPO DE RESISTIVIDAD ELECTRICA DE SUELOS**

El equipo con el que se ha medido la resistividad eléctrica de suelos (resistivímetro) ha sido ensamblado por el tesista; este nos permite medir la resistividad hasta una profundidad de 200 m, esta profundidad de investigación depende directamente de la separación de los electrodos AB, puesto que la teoría revisada nos especifica que la profundidad del alcance de las líneas de corriente son la mitad de la separación de los electrodos inyectores de corriente. En la siguiente fotografía podemos ver el equipo de resistividad eléctrica de suelos, junto al operador (tesista).



**Fotografía 4:** Equipo para medir resistividad de suelos (resistivímetro).

### **3.5. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS Y CARACTERISTICAS FISICAS**

#### **a. Demografía**

El lugar donde se ha realizado esta investigación es el Fundo La Victoria – UNC, ubicado en el valle de la ciudad de Cajamarca, provincia y departamento de Cajamarca. El departamento de Cajamarca está ubicado al norte del Perú, cuya superficie es de 33 318 km<sup>2</sup>,

representando el 2.6 % del territorio nacional. Sus límites son: Por el norte con la república del Ecuador, por el este limita con el departamento de Amazonas, por el sur con el departamento de la Libertad y por el oeste con los departamentos de Lambayeque y Piura. Políticamente el departamento de Cajamarca está dividido en 13 provincias y 127 distritos, la capital del departamento es la ciudad de Cajamarca. El departamento de Cajamarca tiene una población total de 1 507 486 habitantes (INEI), en dicho departamento las actividades económicas que más se practican son la minería y la agrícola – pecuaria.

### **b. Fisiografía**

El Fundo La Victoria está ubicado dentro del valle de la ciudad de Cajamarca, cuyos suelos son de origen sedimentario y fueron formados por depósitos fluvio-glacial y glacial; cuyos sedimentos son en su mayoría material fino (limos y arcillas) los cuales provienen del material extraído por los glaciares de las formaciones cretácicas y terciarias colindantes. Después del derretimiento de las masas de hielo estos sedimentos se vieron afectados por procedimientos de sedimentación fluvial que los acomodaron en forma de llanuras. Las zonas del valle de Cajamarca se componen esencialmente de arcillas, por lo mismo que las zonas colindantes están constituidas básicamente de (calizas, andesitas, entre otras).

### **c. Geología**

Los suelos del Fundo La Victoria – UNC, pertenecen a la siguiente clasificación.

- Era : Cenozoico
- Periodo : Cuaternario
- Formación : Depósitos fluvio-glaciares y lacustres
- Litología : Arenas, limos y arcillas derivadas de calizas con rocas volcánicas.

### **d. Clima**

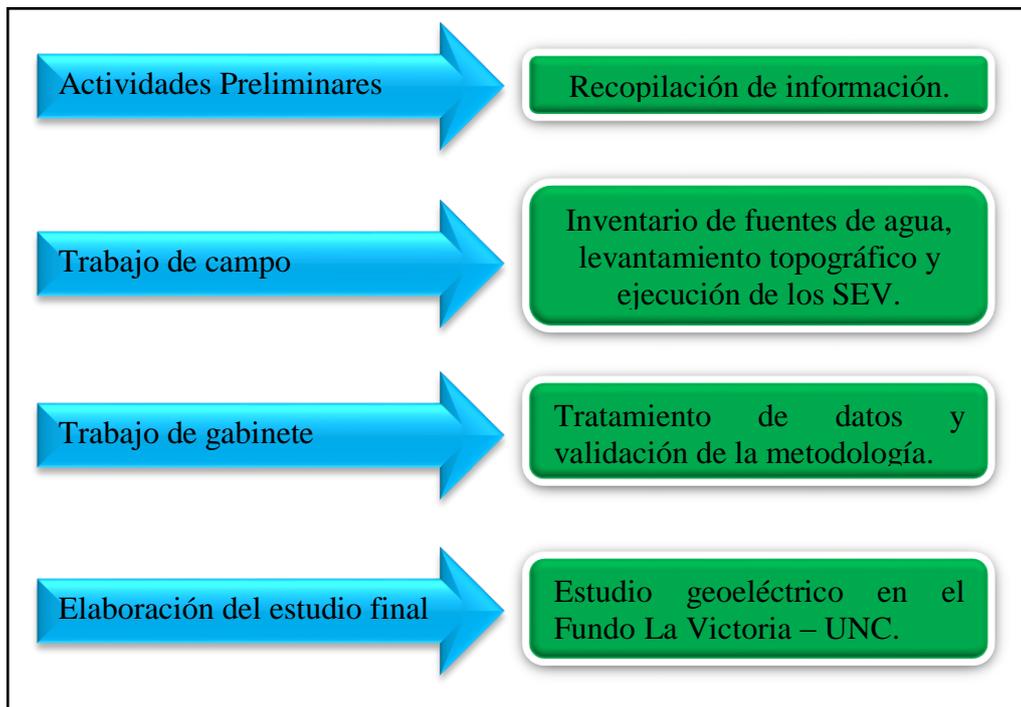
El valle de Cajamarca presenta un clima sub-húmedo y templado, y presenta dos periodos muy diferenciados: Un periodo lluvioso que va desde el mes de noviembre hasta el mes de abril; y otro periodo de estiaje que va desde el mes de junio hasta setiembre. En el mes de octubre cae lluvias esporádicas.

La temperatura media está en relación inversa a la altitud, observándose un promedio de 14 °C en el periodo más lluvioso y de 13 °C en el periodo de estiaje. La humedad al igual que

la precipitación pluvial tienen la misma gradiente de variación, siendo mayor durante el periodo de lluvias y menor durante el estiaje; es así que se tiene la humedad relativa de 63% en la época de lluvias y de 56% para la época de sequía. Los vientos son generalmente moderados; pero en el mes de agosto se presentan fuertes vientos del promedio de 107.95 km/día (fuente: Adefor).

### 3.6. METODOLOGÍA

La metodología es el conjunto de pasos a seguir de manera clara y detallada donde se explica el procedimiento que se ha llevado a cabo para realizar una investigación, es decir se describe como se ha llegado desde los objetivos hasta las conclusiones; utilizando para ello un lenguaje sencillo para poder explicar cada uno de los procedimientos.



**Figura 26.** Secuencia de actividades para realizar la investigación

#### a. Actividades Preliminares

Esta actividad ha consistido en la recopilación de información de estudios geofísicos anteriores realizados en el valle de la ciudad de Cajamarca; los cuales fueron fundamentales para realizar el trabajo de gabinete. La información se ha obtenido de las instituciones: Municipalidad provincial de Cajamarca, Autoridad Administrativa del Agua VI Marañón y de la Universidad Nacional de Cajamarca.

- **Autoridad Administrativa del Agua VI Maraón:**

De esta institución se ha obtenido el estudio: Regularización de Perforación y Licencia de uso de Agua Subterránea del Pozo Tubular de propiedad del Centro Poblado Cerrillo Bajo. La información contenida aquí nos ha servido para realizar la comparación de resultados con los obtenidos con el equipo ensamblado por el tesista y de esta manera realizar la validación de los mismos.

- **Municipalidad Provincial de Cajamarca:**

Se ha obtenido el: Estudio de mecánica de suelos con fines de cimentación del nuevo coliseo de Cajamarca. El cual contiene información de calicatas, sondajes del tipo SPT, refracción sísmica.

- **Universidad Nacional de Cajamarca:**

Se ha obtenido la tesis denominada: “Abastecimiento de Agua para Usos Complementarios de la UNC con Aplicación del Método de Resistividad Eléctrica de Suelos en el Estudio Hidrogeológico”, y el estudio denominado “Estudio de la Dirección de Flujo de Aguas Subterráneas en el Fundo La Victoria”, realizado por Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.

## **b. Trabajo de Campo**

Esta etapa de la investigación ha consistido en realizar el inventario de fuentes de agua en los alrededores del Fundo La Victoria, así como también el levantamiento topográfico del área de estudio y la ejecución de los sondeos eléctricos verticales paramétricos y de exploración. Para realizar los trabajos se ha utilizado un GPS Garmin 550, una wincha de 50 m y un equipo para medir resistividad de suelos.

- **Inventario de Fuentes de Agua:**

El inventario de pozos perforados y/o excavados realizado en las inmediaciones del Fundo La Victoria es un complemento para esta investigación, dicho inventario ha consistido en precisar las coordenadas geográficas de ubicación (Este, Norte) y cota de cada uno de los pozos, el trabajo se ha realizado en campo con la ayuda de un GPS Garmin Oregon 550. También se han tomado datos como: Diámetro del pozo, tipo de pozo (excavado y/o

perforado) además se ha calculado el nivel estático, también se ha determinado el tipo de uso que se le está dando al agua (doméstico, riego o sin uso), También se ha tomado los nombres de los dueños de los predios donde están ubicados los pozos, y el lugar donde están ubicados. Cabe recalcar que estos pozos forman parte del inventario que se realizó para el estudio denominado drenaje del valle de la ciudad de Cajamarca, por lo que para esta investigación se volvió a verificar el estado en que se encuentran.

Los datos obtenidos del inventario de fuentes de agua subterránea, como en nivel estático nos han servido para determinar el descenso del agua respecto del nivel del terreno en la fecha que se hizo la toma de datos; otros datos como el tipo de uso nos permitirá identificar qué el uso que se le está dando al agua extraída del sub suelo.

El inventario de fuentes de agua, constituye una actividad básica de conocimiento de las características físicas, su distribución espacial y estado de uso actual de estas fuentes. Asimismo, también, es imprescindible como fuente de información para la planificación de su óptimo uso y adecuada descripción del funcionamiento hidrológico de la cuenca.

Cabe señalar que estos pozos no son los únicos que existen en la zona; pues al momento de realizar el trabajo de campo se encontró muchos más, pero los propietarios de los predios no nos han permitido ingresar para realizar la toma de datos.

- **Levantamiento Topográfico:**

El levantamiento topográfico del área que comprende el Fundo La Victoria se ha realizado con GPS Trimble XH 6000 de precisión milimétrica, el cual funciona con una red de 24 satélites como mínimo y los cuales están distribuidos uniformemente alrededor de la órbita terrestre.

En el área de estudios tomando en cuenta los desniveles de terreno se ha tomado las coordenadas este y norte, además de la cota de 558 puntos en total en toda el área, los cuales han sido descargados en un formato Excel con extensión cvs delimitado por comas, para luego pasarlos al programa AutoCAD Civil 3D 2019; donde se ha generado las curvas de nivel con un intervalo de 5 m, obteniendo así el plano en planta (2D) y plano en tres dimensiones (3D).

Posteriormente sobre este plano generado del terreno, se ha procedido a realizar la cuadrícula de 160 x 160 m, cuyos vértices han sido elegidos para realizar los Sondeos Eléctricos Verticales, es decir la distancia de separación entre cada Sondeo Eléctrico Vertical es de 160 m, para ello se ha tenido en cuenta la bibliografía, que nos indica que para que un estudio hidrogeológico se considere que está hecho a detalle la distancia de separación entre cada (SEV) no debe exceder los 300 m.

Del levantamiento topográfico también se ha determinado que en el Fundo La Victoria - UNC presenta una colina rocosa ubicada en la parte oeste, siendo esta la parte más alta que encontramos en el área donde se ha realizado la investigación. En el Anexo N° 03, se presenta el plano topográfico a curvas de nivel con intervalo de 5 m y la ubicación de los SEVs.

Realizado ya la topografía del área que corresponde al Fundo La Victoria y teniendo el equipo para medir la resistividad de suelos (resistivímetro) se ha procedido a buscar información de lugares donde se cuente con pozos perforados y/o escavados los cuales cuenten con información estratigráfica para realizar la estandarización del equipo y posterior validación de la metodología.

- **Sondeos Eléctricos Verticales Paramétricos:**

Estos SEV paramétricos son indispensables en los estudios geofísicos, más aún si se emplea la resistividad eléctrica de suelos, pues nos permitirá interpretar geológicamente a los SEVs de exploración que se realizaron en la zona de estudio. Estos SEVs paramétricos necesitan de una base de datos previa para su interpretación inicial y su posterior validación.

En tres (03) SEV paramétricos, se han realizado para una abertura máxima de la línea de emisión de corriente (electrodos AB) de 400 m, esto con el objetivo de obtener la máxima profundidad de exploración posible, para el caso del SEV paramétrico realizado en el Centro Poblado de Cerrillo Bajo, sólo se hizo para una abertura máxima de 50 metros, esto debido a que no se contaba con mayor área despejada para la abertura de los electrodos AB.

- ***Sondeo eléctrico vertical paramétrico coliseo QÑ 01***

Fue realizado en el punto con coordenada UTM – WGS 84; E: 776816.90, N: 9207307.65, Cota: 2677 msnm; a 1 m de distancia de donde se realizó el ensayo SPT – 02 en el año 2008 para el estudio geotécnico del coliseo de Cajamarca.

En la ejecución de este SEVP – QÑ 01 se ha obtenido ocho valores de resistividad diferentes, lo que nos indica la presencia de la misma cantidad de estratos, esto hasta una profundidad máxima de 200 m, los resultados mostramos en la tabla 6 de la sección 4.4.a.



**Fotografía 5:** Ejecución SEV paramétrico N° 01, en Qapac Ñan.

- ***Sondeo eléctrico vertical paramétrico coliseo QÑ 02***

Realizado en el punto con coordenada UTM – WGS 84; E: 776841.90, N: 9207407.75, Cota: 2678 msnm; a 1 m de distancia de donde se realizó el ensayo SPT – 05, para el estudio geotécnico del coliseo de Cajamarca.

Con la ejecución de este SEVP – QÑ 02 se ha obtenido seis valores de resistividad diferentes, lo que nos indica la presencia de la misma cantidad de estratos, esto hasta una profundidad máxima de estudio de 200 m, cuyos resultados mostramos en la tabla 7 de la sección 4.4.b.

- ***Sondeo eléctrico vertical paramétrico pozo Cerrillo Bajo***

Fue ejecutado en el punto con coordenada UTM – WGS 84; E: 777635.00, N: 9211187.00, Cota: 2701 msnm; a 1 m de donde se ha perforado en el año 2012 el pozo que actualmente abastece con agua potable a dicho sector de la población.

Con la ejecución de este SEVP – CB 01 se ha obtenido cuatro valores de resistividad diferentes, lo que nos indica la presencia de la misma cantidad de estratos, esto hasta una profundidad máxima de estudio de 50 m puesto que no se cuenta con mayor área libre para la extensión de la línea de emisión de corriente AB. Los resultados los presentamos en la tabla 8 de la sección 4.4.c.

▪ ***Sondeo eléctrico vertical paramétrico pozo Fundo La Victoria***

Fue ejecutado en el punto con coordenada UTM – WGS 84; E: 780466.89, N: 9204377.81, Cota: 2638.70 msnm; a 1 m de donde se ha excavado el pozo para aprovechamiento del agua subterránea. Cabe recalcar que, si bien este pozo no cuenta con los datos de estratigrafía, pero si se cuenta con el dato de profundidad del nivel freático.



**Fotografía 6:** Toma de dato del nivel estático en el pozo del Fundo La Victoria.

Con la ejecución de este SEVP – FV 01 se ha obtenido siete valores de resistividad diferentes, lo que nos indica la presencia de la misma cantidad de estratos, esto hasta una profundidad máxima de estudio de 200 m, los resultados los presentamos en la tabla 9 de la sección 4.4.d.

Realizado la validación de la metodología a emplear en esta investigación es que se procede a realizar los Sondeos Eléctricos Verticales de exploración en el Fundo La Victoria – UNC. En total se ha realizado veinte (20) SEVs de exploración, los cuales nos permitirá determinar los estratos que componen el acuífero hasta una profundidad de 200 metros; además determinaremos el nivel freático en cada uno de los puntos.

- **Sondeos Eléctricos Verticales de Exploración:**

La investigación que se ha llevado a cabo ha consistido en realizar en la zona de estudio veinte (20) Sondeos Eléctricos Verticales de exploración, los cuales fueron realizados en los puntos previamente seleccionados en la sección (*levantamiento topográfico*) del presente capítulo. Luego del procesamiento de datos se obtenido los veinte perfiles geoelectricos de resistividad, desde A-A hasta S-S, en cada uno de los perfiles también se pudo determinar el nivel freático. Estos SEV se han realizado aplicando el arreglo Schlumberger, cuyo arreglo es en forma lineal y con cuatro electrodos (dos de corriente y dos de potencial).

El sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos inyectores de corriente A y B dejando los electrodos detectores M y N fijos y a una distancia inicial de 0.40 m, en torno a un punto central fijo P. las distancias de separación entre los electrodos AB/2 es en forma ascendente cuyas distancias de separación son de: 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 13, 16, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120, 140, 150, 180 y 200 m.

En cuanto a la separación de los electros que miden la diferencia de potencial MN, se debe de cumplir que  $AB/5 > MN$ , para que las lecturas registradas en los multiterster sean considerados válidos. Estos Sondeos Eléctricos Verticales se han realizado para una abertura máxima de la línea de emisión de corriente (electrodos AB) de 400 m, esto con el objetivo de obtener la máxima profundidad de exploración.

### **c. Trabajo de Gabinete**

El trabajo en gabinete ha consistido en determinar la cantidad de agua que se requiere en el Fundo La Victoria; así como también realizar el proceso de la información obtenida en el campo, realizando el análisis y la interpretación de los datos; por cuestiones didácticas y para un mejor entendimiento el trabajo de gabinete en esta investigación se ha dividido en las siguientes etapas.

- **Calculo de la demanda de agua:**

Para el cálculo del requerimiento de agua en el Fundo La Victoria – Universidad Nacional de Cajamarca sea realizado por separado las demandas de agua poblacional, agua para riego y agua para uso pecuario.

- ***Calculo de la Demanda de Agua para uso Poblacional***

Para el cálculo de la demanda de agua para uso poblacional se ha empleado los datos del INEI (Instituto de Estadística e Informática), y se ha empleado el método geométrico que es el que emplea esta institución para determinar la tasa de crecimiento poblacional de 1.1 % anual. Además de la población que vive permanente, también hay alumnos de la Escuela Académico Profesional de Agronomía de los cursos: Oleicultura, Fisiología Vegetal y Cereales en un promedio de 40 alumnos por curso, haciendo un total de 120 alumnos. También los alumnos de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Hidráulica de los cursos: Construcciones Hidráulicas I y II, en los cuales en un promedio de 40 alumnos por curso se tendría 80 alumnos.

Los alumnos que realizan sus prácticas en mencionado fundo lo hacen una vez por semana, que en el día más concurrido tendríamos 210 personas (200 alumnos + 5 catedráticos + 5 habitantes permanentes).

Para una dotación de 120 L/hab\*día, obtendríamos

$$Q = 210 \text{ hab} * \left( \frac{120 \text{ L}}{\text{hab} * \text{ día}} \right)$$

$$Q = 0.29 \text{ L/s}$$

- ***Calculo de la Demanda de Agua para Riego***

Para el cálculo de la necesidad hídrica de los cultivos que se siembran en el Fundo La Victoria se tuvo en cuenta que el 82.26 % del área está sembrado pastizales como rye grass, es decir 43.5151 ha, 1.5 ha se utiliza para sembrar alfalfa, 1.5 ha para sembrar maíz, 1 ha para sembrar papa, 0.5 ha para sembrar zanahoria y 0.5 ha se utilizan como parcelas demostrativas para sembrar verduras y hortalizas. En el Anexo N° 04 se muestra los cálculos del requerimiento de agua para riego.

▪ **Calculo de la Demanda de Agua para uso Pecuario**

Para el cálculo del agua demandada para los animales, la cual es fundamental para su nutrición y crecimiento, y la obtienen de tres fuentes; la contenida en el alimento, la que se produce durante el proceso de asimilación de los mismos y el agua de bebida; en este estudio nos ocuparemos del cálculo del agua de bebida. En el Fundo La Victoria – UNC, se tiene 50 vacas lecheras y 20 vacas secas, de donde haciendo los cálculos con los datos de la tabla 5 se obtiene y para una temperatura promedio de 14 °C.

$$Q = 50 \text{ vaca} * \left(55 \frac{L}{\text{dia} * \text{vaca}}\right) + 20 \text{ vacas} * \left(31 \frac{L}{\text{dia} * \text{vaca}}\right)$$
$$Q = 3370.00 \text{ L/dia}$$

• **Procesamiento de los datos de los SEVs:**

Ya realizado cada uno de los SEVs en el campo en cada uno de los puntos, en trabajo de gabinete se ha procesado los datos para determinar la validez de cada uno de ellos. Esto es que cuando las curvas obtenidas o los empalmes no fueron satisfactorios (deformación o saltos excesivos) se ha repetido el SEV. El procesamiento de datos de ha realizado en una hoja del software Excel, y cuyos resultados los presentamos en el Anexo N° 05, y de acuerdo a los siguiente.

- Los datos de campo se han procesado en una hoja de cálculo en el software Excel.
- Las condiciones de “válido” o “eliminado” de cada valor de resistividad obtenido ( $R_i$ ) lo determina el valor promedio de resistividad para cada punto de la curva de resistividad para cada punto de la curva de resistividad aparente y sobre todo el valor probable ( $V_{ic}$ ) de cada uno de los 5 datos de un punto en la curva.
- El valor probable de  $V_{ic}$  el cual no está incluido en los cuadros, se calcula despejando  $\Delta V$  en la fórmula de resistividad (ver dispositivo Schlumberger en la figura 8) y reemplazando los valores b, L y la corriente (I) tomados en campo, y el valor de  $\rho$  por el  $R_{prom}$ . El cuál es el promedio de los  $R_i$  “validos”.
- Cuando la diferencia entre  $V_0$  y  $V_i$  es muy grande, la diferencia entre  $V_{ic}$  y  $V_{ic}$  probable puede ser del orden de algunos milivoltios, sin que el valor  $R_i$

correspondiente carie mucho del valor de  $R_{prom}$ , considerándosele como “valido”. Esto sucede sobre todo en el inicio de cada tramo de la curva de resistividad aparente.

- Cuando la diferencia entre  $V_0$  y  $V_i$  es de regular a pequeña, la diferencia entre  $V_{ic}$  y  $V_{ic}$  probable debe ser menor a  $0.5 \text{ mV}$ , pues esta diferencia es tolerante por el redondeo que realiza el voltímetro al realizar la lectura. En este caso, sino se cumple lo expuesto, el valor de  $R_i$  correspondiente será eliminado.
- Al elimina el valor de  $R_i$  de los 5 con que cuenta cada emplazamiento, variará  $R_{prom}$ , por lo que se vuelve a analizar la conveniencia o no de eliminar determinado valor de  $R_i$ , hasta que las diferencias entre  $V_{ic}$  y  $V_{ic}$  probable sean satisfactorias, es decir que expliquen la razón de los valores “validos” o incluso la de los “eliminados”.
- Por ultimo si los valores de  $R_i$  son muy dispares, se analizará la conveniencia de tomar alguno de dichos valores como más representativos o incluso de no tomar en cuenta ninguno de los cinco valores, es decir, eliminar el punto correspondiente en el dibujo de la curva del SEV.

#### ▪ ***Dibujo de las curvas de SEVs***

El dibujo de las curvas fue realizado en el software Civil 3D. Primero se ha dibujado las curvas sin ningún empalme ni dato eliminado (SEV original, el cual no se ha incluido) el cual nos sirve como guía para hacer los empalmes de los diferentes tramos de un SEV. Obtenida la curva continúa después de empalmar los diferentes tramos (SEV continuo) se he precedido a su interpretación utilizando para ello las curvas maestras. Al momento de hacer el empalme, se ha procedido a eliminar los dos últimos puntos del tramo anterior, para luego unir los puntos restantes mediante líneas rectas.

#### ▪ ***Interpretación de las curvas de los SEVs***

Realizado ya el empalme de las curvas, se obtiene una sola curva, sin saltos; ahora el siguiente paso a seguir es la interpretación de la misma, para lo cual se precede de acuerdo a las siguientes fases.

### **- Interpretación Geofísica**

Consiste en la determinación de las resistividades verdaderas, los espesores y las profundidades de cada una de las capas geoeléctricas de un Sondeo eléctrico Vertical, a excepción de la última capa, pues su espesor no se podrá determinar.

En esta fase de la interpretación existe cierta subjetividad en cuanto a los fundamentos matemáticos del método, debido a los principios de equivalencia y de superposición (ver página 37 y 38), que conllevarían a obtener diferentes interpretaciones geofísicas para una misma curva, pero puede individualizarse la interpretación correcta si nos guiamos de los resultados de los SEVs paramétricos previamente correlacionados.

La interpretación geofísica se ha realizado por el método de las curvas de composición de Ebert, los resultados de la interpretación se presentan en el Anexo N° 06.

A medida que vamos interpretando de preferencia debemos ir dibujando las columnas electro-estratigráficas de cada SEV, ubicándolo en el corte respectivo para poder facilitar la siguiente fase, que es la interpretación geológica.

### **- Interpretación Geológica**

Consiste en correlacionar cada valor de resistividad de las capas de los diferentes SEVs de cada perfil con un determinado tipo de suelo, para ello se debe tener un amplio conocimiento del área donde se realiza la investigación, esto se logra con la recopilación de información (sondajes mecánicos, pozos, calicatas, estudios geológicos); mejor aún si se cuenta con datos hidrogeológicos (Hidroisoipsas, isoprofundidades, SEVs paramétricos).

Esta interpretación se realiza en los perfiles geoeléctricos que se dibujó en la fase anterior, las columnas electro-estratigráficas. Como primera aproximación de la correlación de capas geoeléctricas, se puede unir gráficamente todas las capas que tienen resistividades similares y después asignar a cada capa un determinado tipo de suelo.

Después se analiza el perfil geológico obtenido para la validación estratigráfica de las capas de las columnas de cada SEV. Si el resultado difiere mucho, se realiza una nueva validación estratigráfica, hasta obtener un perfil geológico consistente con la realidad.

- **Validación de la metodología:**

Para la validación de la metodología utilizada se ha tenido que comparar los resultados de la interpretación geofísica de los Sondeos Eléctricos Verticales paramétricos realizados con el resistivímetro, con la estratigrafía obtenida previamente de los sondajes mecánicos y/o calicatas hechas en anteriores estudios; además de la comparación con la información hidrogeológica recopilada en campo. Se han realizado en el valle de la ciudad de Cajamarca cuatro (04) Sondeos Eléctricos Verticales paramétricos, cuya comparación de resultados con los estudios anteriores los mostramos en las figuras 27, 28, 29 y 30.

- **Determinar el requerimiento de agua:**

Para determinar el requerimiento de agua en el Fundo La Victoria, se ha tenido que calcularlas tres demandas de agua que actualmente se utiliza en el Fundo La Victoria, las cuales son: Demanda de agua para uso poblacional, demanda de agua para regadío y demanda de agua para uso pecuario.

El cálculo de la demanda de agua para consumo humano se ha empleado los datos del INEI (Instituto de Estadística e Informática), y se ha utilizado el método geométrico que es el que emplea esta institución. Para el cálculo de la necesidad hídrica de los cultivos que se siembran en el Fundo La Victoria se ha tenido en cuenta los factores como: Evapotranspiración potencial (ETp), Coeficiente de uso consuntivo (Kc), evapotranspiración del cultivo (ETc), precipitación confiable (PP<sub>75%</sub>), Precipitación efectiva (PP<sub>ef</sub>), requerimiento neto (R<sub>neto</sub>), requerimiento bruto (R<sub>bruto</sub>), eficiencia de riego y lámina de riego a aplicar. Para el cálculo del agua demandada para los animales, la cual es fundamental para su nutrición y crecimiento, y la obtienen de tres fuentes; la contenida en el alimento, la que se produce durante el proceso de asimilación de los mismos y el agua de bebida; en este estudio nos ocuparemos del cálculo del agua de bebida.

- **Caracterización del acuífero:**

Para la caracterización del acuífero del Fundo La Victoria se ha tenido en cuenta las dos características fundamentales: capacidad de almacenar agua subterránea y capacidad de permitir el flujo del agua subterránea. Como se sabe el grado en que se presentan estas propiedades varía mucho de una formación geológica a otra y su magnitud puede variar con

en cada estrato geológico. Esto hace que cada unidad acuífera varíe su capacidad de almacenamiento, entre sedimentos granulares no consolidados y rocas.

- **Dirección de flujo del agua subterránea:**

La dirección de flujo que tiene las aguas a través de los suelos, cuyas trayectorias y presiones de poros son extremadamente complejas debido a la forma aleatoria en que la permeabilidad puede variar de un punto a otro y en diferentes direcciones. Una forma de representar el flujo del agua a través de un suelo se puede representar esquemáticamente por líneas de flujo, las cuales representan la trayectoria que toman las partículas de agua en movimiento, puesto que el agua tiende a desplazarse en los acuíferos libres de una zona de mayor gradiente hidráulico a una zona de menos gradiente hidráulico.

- **Planteamiento de explotación de aguas subterráneas:**

El planteamiento de la explotación del agua subterránea se ha realizado teniendo en cuenta el requerimiento de agua que necesita el Fundo La Victoria para los diferentes usos. La explotación del recurso hídrico subterráneo se realizará a través de perforaciones de los cuales deben de estar ubicados en zonas más favorable, es decir donde los estratos arenosos sean de mayor potencia.

#### **d. Elaboración del estudio final**

La elaboración del estudio y redacción es la parte final de esta investigación, la cual ha consistido en ordenar la teoría, los cálculos obtenidos, el dibujo de los planos y la impresión del trabajo para su presentación final.

## IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. REQUERIMIENTO DE AGUA EN EL FUNDO LA VICTORIA - UNC

Se ha determinado el requerimiento de agua para uso poblacional, agua para riego y agua para uso pecuario. Para el cálculo de la cantidad de agua para uso poblacional, se ha tenido en cuenta los pobladores permanentes (guardiánes del fundo) y los temporales (alumnos de la Universidad Nacional de Cajamarca) los cuales van a realizar sus trabajos experimentales. En cuanto al requerimiento de agua para riego se ha tenido en cuenta que la mayor parte del fundo está sembrado pasto (Rye grass), pero también se siembra papa, maíz, zanahoria, alfalfa y hortalizas, pero en menores extensiones de terreno. La cantidad de agua para uso pecuario se ha determinado teniendo en cuenta que en el fundo se tiene vacas lecheras y vacas secas (vacas que nos están dando leche).

*Discusión de resultados:* Realizando los cálculos de los requerimientos de agua en el Fundo La Victoria – UNC, se ha determinado que el agua para riego es el que se necesita en mayor volumen, seguido de agua para uso pecuario y finalmente y en menor cantidad se necesita de agua para uso poblacional.

### 4.2. INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se ha realizado el inventario de fuentes de aguas subterránea (pozos perforados y/o excavados) en las inmediaciones del Fundo La Victoria, esto nos ha permitido conocer la situación de explotación en la que se encuentra el acuífero en esta parte del valle de la ciudad de Cajamarca. En el Anexo N° 07 presentamos un cuadro con el inventario de pozos en una hoja Excel.

*Discusión de resultados:* De los 20 pozos inventariados 19 de ellos han sido construidos de forma manual (excavados), solamente 1 de ellos es tubular. El agua subterránea que se extrae se utiliza para uso poblacional y para uso doméstico. El pozo de mayor profundidad es de 21 metros, los niveles estáticos varían desde 0.1 m hasta los 16.85 m.

#### **4.3. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO**

Se ha realizado el levantamiento topográfico de toda el área que comprende al Fundo La Victoria, obteniendo un área total de 52.8981 ha y un perímetro de 4408.20 metros, este dato fue corroborado con el área y perímetro que indican en los planos que nos facilitó la oficina de patrimonio de la Universidad Nacional de Cajamarca, la cual nos entregó el plano en planta. De esta área 4.883 ha corresponden a terreno rocoso (colina de arenisca), y el resto 48.0151 ha corresponde a terreno llano.

El área presenta una topografía llana, casi horizontal, la cual es propicia para la aplicación de los Sondeos Eléctricos Verticales; cabe aclarar que el terreno presenta una colina rocosa (arenisca) en la parte noroeste del Fundo La Victoria. El terreno donde se ha realizado esta investigación presente una pendiente que varía del 1 % al 5%, lo que lo hace un terreno propicio para la aplicación de los SEVs, los cuales se pueden aplicar a suelos que presenten pendientes de hasta 12%.

**Discusión de resultados:** El Fundo La Victoria – UNC presenta en mayor porcentaje una topografía llana, pero también ubicamos una colina rocosa (arenisca) ubicada al este de la zona donde se ha realizado la investigación.

#### **4.4. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SEVs**

Para realizar esta parte de la investigación nos agenciamos de información previa, como son pozos perforados y/o ensayos STP que cuenten con el perfil estratigráfico detallado con el objetivo de realizar la validación de los datos; para ello se ha recurrido a la Autoridad Nacional del Agua, por ser la institución encargada de llevar un registro de fuentes hídricas superficiales y subterráneas. De la información obtenida se ha seleccionado aquellos pozos que cuenten con información estratigráfica y aquellos ensayos STP donde se haya aplicado la prospección geofísica.

También se ha obtenido información de los estudios geofísicos y geotécnicos para la cimentación del coliseo del Gran Qapac Ñan; esta información se obtuvo de la Municipalidad provincial de Cajamarca. De toda la información recabada se ha seleccionado cuatro puntos dos pozos y dos ensayos STP los cuales cuentan con estudios geotécnicos y geofísicos, en cada uno de ellos y a una distancia de 1 m se ha ejecutado un sondeo eléctrico vertical para la validación de los datos, obteniendo lo siguiente.

**a. Sondeos Eléctrico Vertical Paramétrico QÑ 01**

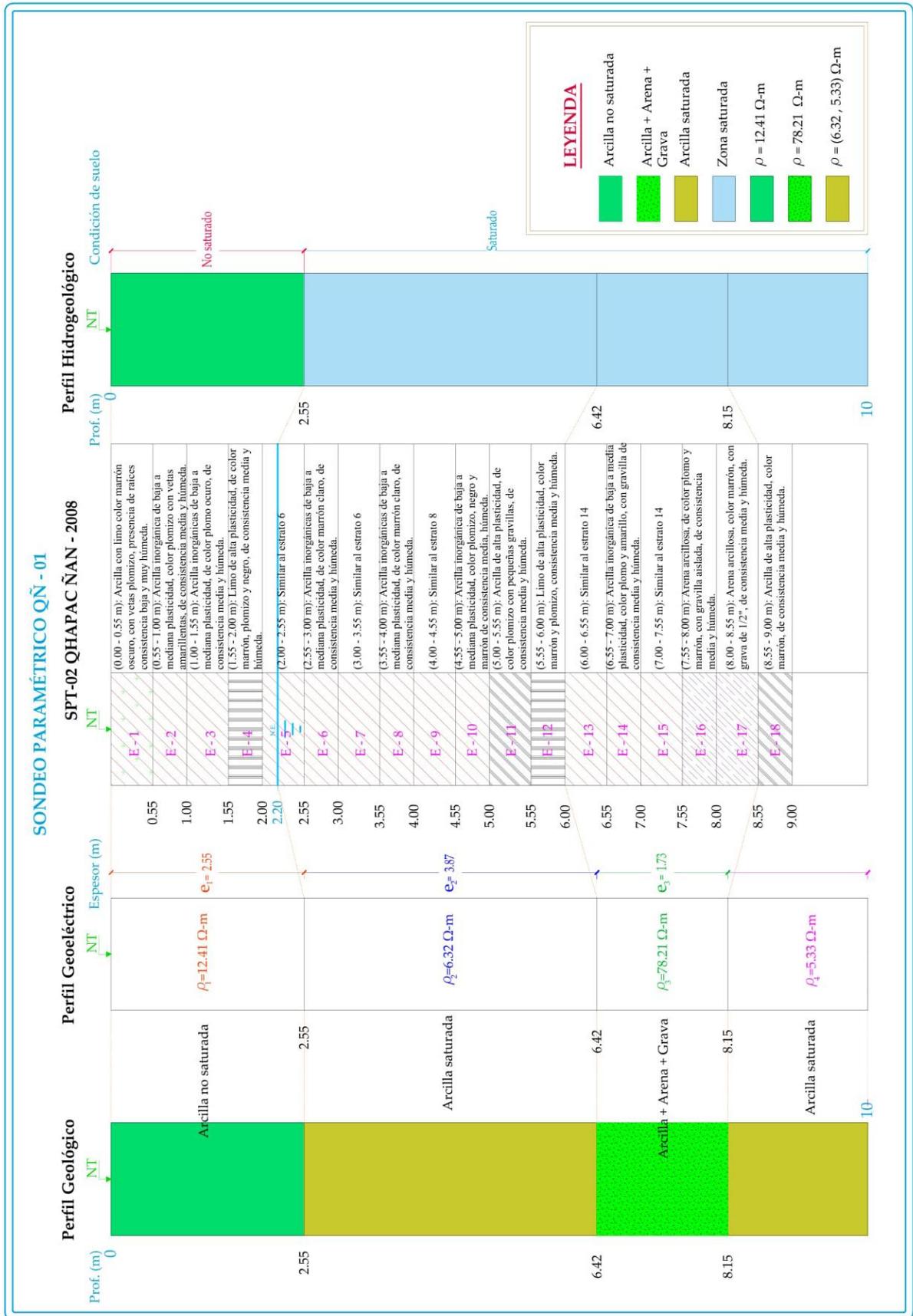
Este Sondeos Eléctrico Vertical se ha ejecutado a 1 metro de distancia de donde en el año 2008 se ejecutó el ensayo STP - 02 para la cimentación del nuevo coliseo de la ciudad de Cajamarca. De la ejecución de este Sondeo Eléctrico Vertical Paramétrico, con el resistivímetro construido para esta investigación se ha encontrado ocho valores de resistividades diferentes, lo que nos indica que existe la misma cantidad de estratos geológicos; y cuyos valores encontrados los mostramos en la siguiente tabla número 6.

**Tabla 6:** Resistividades encontradas en el SEVP – QÑ 01.

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	2.55	2.55	12.41
2.55	6.42	3.87	6.32
6.42	8.15	1.73	78.21
8.15	12.41	4.26	5.33
12.41	23.7	11.29	33.21
23.7	68.3	44.6	81.21
68.3	138.71	70.41	8.11
138.71	200	-	117.11

**Discusión de resultados:** Luego de realizar la comparación entre los cuatro primeros valores de resistividad obtenidos con el resistivímetro y los datos obtenidos en el ensayo STP – 02 del año 2008, podemos notar una buena correlación entre los dos estudios (ver figura 27), esto es favorable y concluimos que los datos obtenidos en el sondeo ejecutado son válidos.

Comparando los dos estudios podemos notar que para una resistividad de  $12.41 \Omega - m$ , le corresponde el estrato constituido por arcillas no saturadas; seguidamente para una resistividad de  $6.32 \Omega - m$ , le corresponde el estrato compuesto por arcillas saturadas; para una resistividad de  $78.21 \Omega - m$ , le corresponde un estrato compuesto por arcilla, arena y grava; luego encontramos nuevamente una resistividad de  $5.33 \Omega - m$ , le corresponde el estrato compuesto por arcilla saturada.



**Figura 27:** SEV Paramétrico – QÑ 01 vs ensayo STP – 02, 2008

### b. Sondeo eléctrico vertical paramétrico coliseo QÑ 02

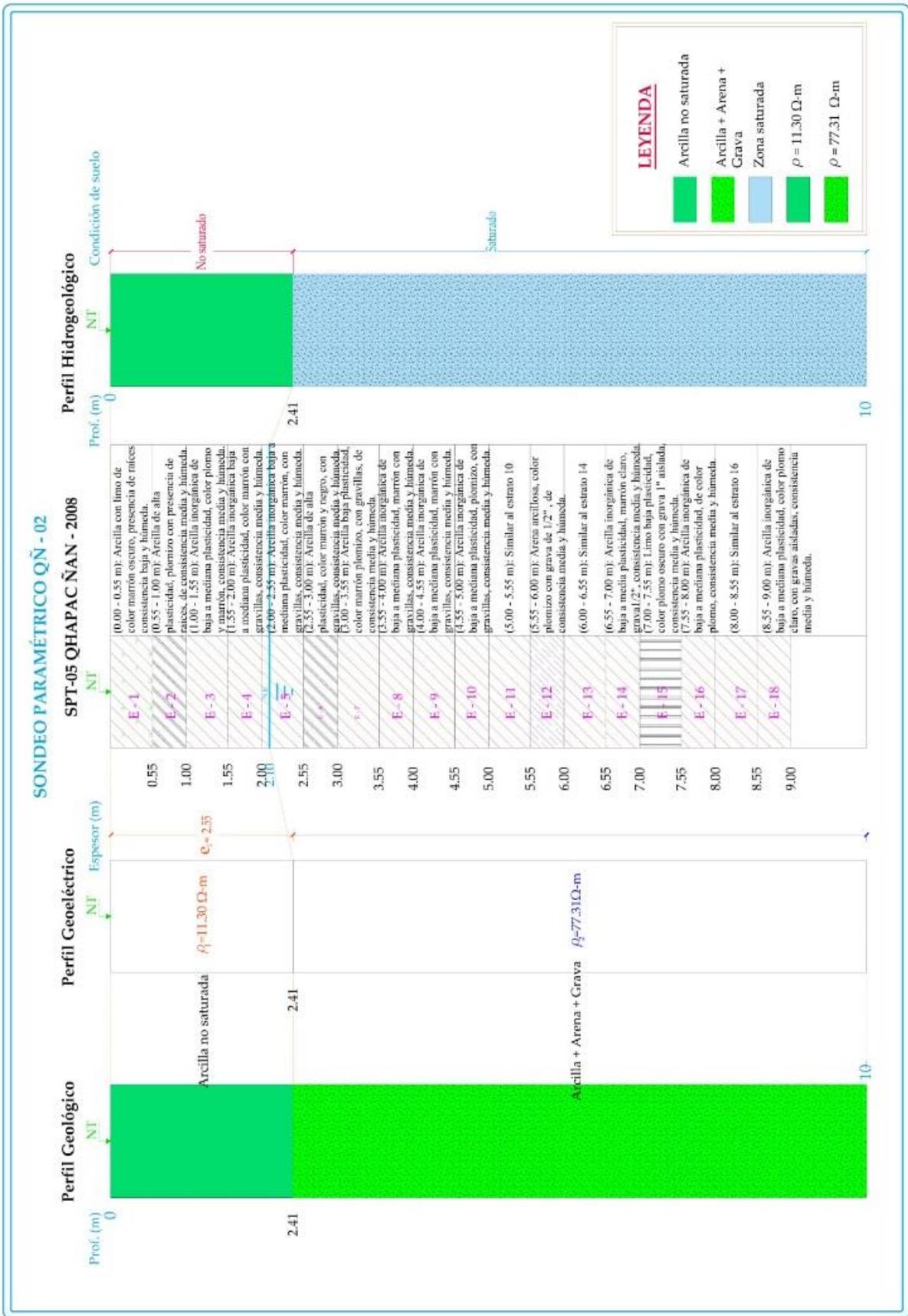
Este Sondeos Eléctrico Vertical se ha ejecutado a 1 metro de distancia donde en el año 2008 se ejecutó el ensayo STP - 05 para la cimentación del nuevo coliseo de la ciudad de Cajamarca. De la ejecución de este Sondeo Eléctrico Vertical Paramétrico, con el resistivímetro construido se ha encontrado seis valores de resistividades diferentes, lo que nos indica que existe la misma cantidad de estratos geológicos; y cuyos valores encontrados los mostramos en la siguiente tabla número 7.

**Tabla 7:** Resistividades encontradas en el SEVP – QÑ 02.

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	2.41	2.41	11.3
2.41	12.31	9.9	77.31
12.31	27.12	14.81	119.01
27.12	59.34	32.22	69.21
59.34	112.33	52.99	8.88
112.33	200	-	29.54

**Discusión de resultados:** Luego de realizar la comparación entre los dos primeros valores de resistividades obtenidos con el resistivímetro y los datos obtenidos en el ensayo STP - 05 del año 2008, podemos notar que existe una buena correlación entre los dos estudios (ver figura 28), y al igual que en caso anterior, estos datos son favorable ya que nos conlleva a la validación de los datos obtenidos en el sondeo ejecutado.

Comparando los dos estudios podemos notar que para una resistividad de  $11.30 \Omega - m$ , le corresponde el estrato constituido por arcillas no saturadas; seguidamente para una resistividad de  $77.31 \Omega - m$ , le corresponde un estrato compuesto por arcilla, arena y grava.



**Figura 28:** SEV Paramétrico – QÑ 02 vs ensayo STP – 05, 2008

### c. Sondeo eléctrico vertical paramétrico pozo Cerrillo Bajo.

Este Sondeos Eléctrico Vertical se ha ejecutado a 1 metro de distancia donde en el año 2012 se perforó el pozo para abastecimiento de agua potable de dicho sector. De la ejecución de este Sondeo Eléctrico Vertical Paramétrico, con el resistivímetro y hasta una profundidad de 50 metros se ha encontrado cuatro valores de resistividades diferentes, lo que nos indica que existe la misma cantidad de estratos geológicos; y cuyos valores encontrados los mostramos en la siguiente tabla número 8.

**Tabla 8:** Resistividades encontradas en el SEVP – CB 01.

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	2.22	2.22	16.34
2.22	15.79	13.57	26.45
15.79	20.91	5.12	9.18
20.91	50	-	29.09

**Discusión de resultados:** Luego de realizar la comparación entre las 4 resistividades obtenidas con el resistivímetro y los datos del perfil estratigráfico del pozo perforado en el centro poblado de Cerrillo Bajo, podemos notar que existe una buena correlación entre los dos estudios (ver figura 29), por consiguiente, pasamos a la validación de los datos obtenidos en el sondeo eléctrico vertical.

Comparando los dos estudios podemos notar que para una resistividad de  $16.34 \Omega - m$ , le corresponde el estrato constituido por arcillas no saturadas; para una resistividad de  $26.45 \Omega - m$ , le corresponde un estrato compuesto por arena, limo y arcilla; seguidamente para una resistividad de  $9.18 \Omega - m$ , le corresponde el estrato compuesto por arcillas saturadas; luego encontramos nuevamente una resistividad de  $31.08 \Omega - m$ , le corresponde el estrato compuesto por arena, limo y arcilla.

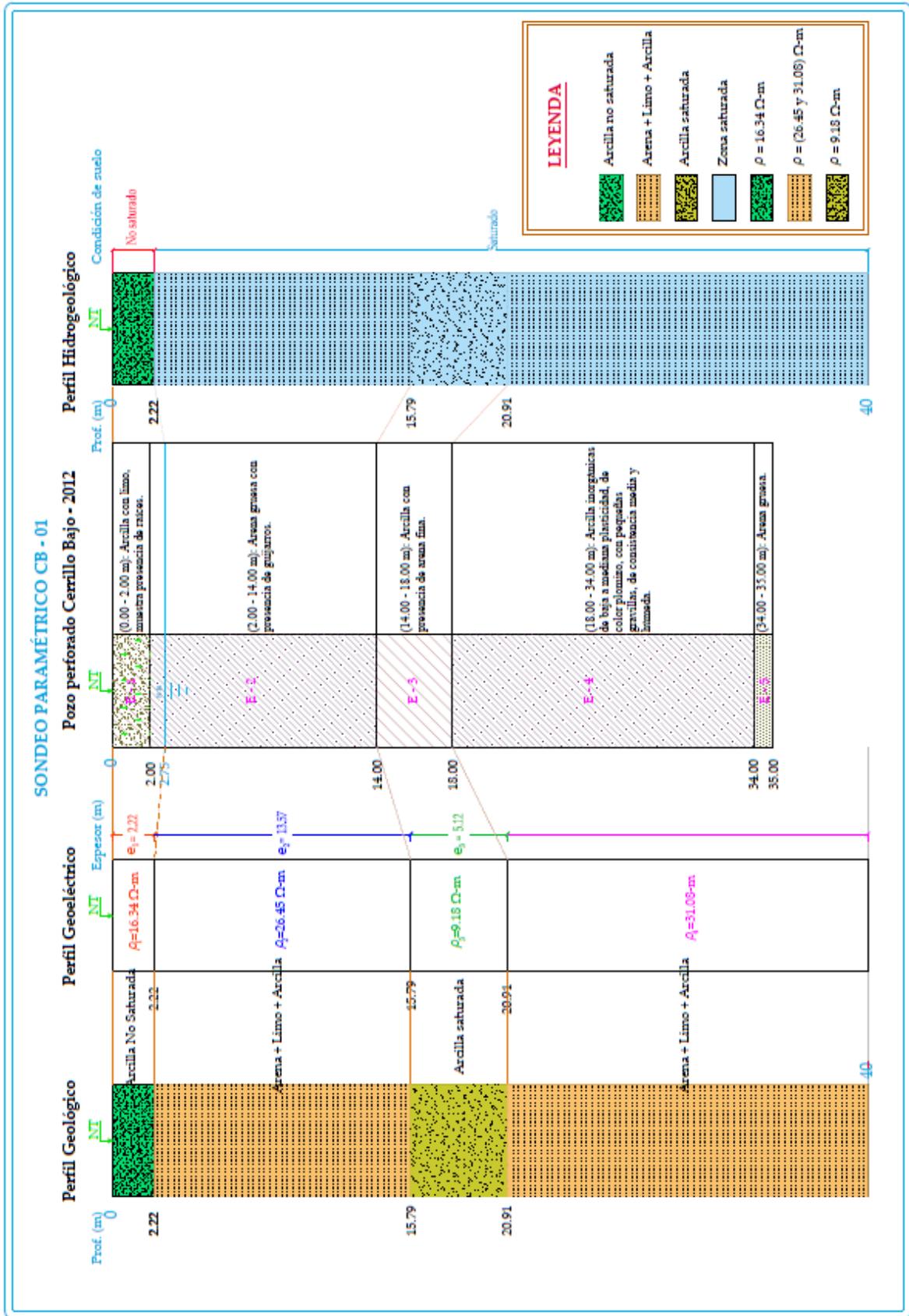


Figura 29: SEV Paramétrico pozo Cerrillo Bajo vs estratigrafía pozo Cerrillo Bajo

#### d. Sondeo Eléctrico Vertical Paramétrico Pozo Fundo La Victoria

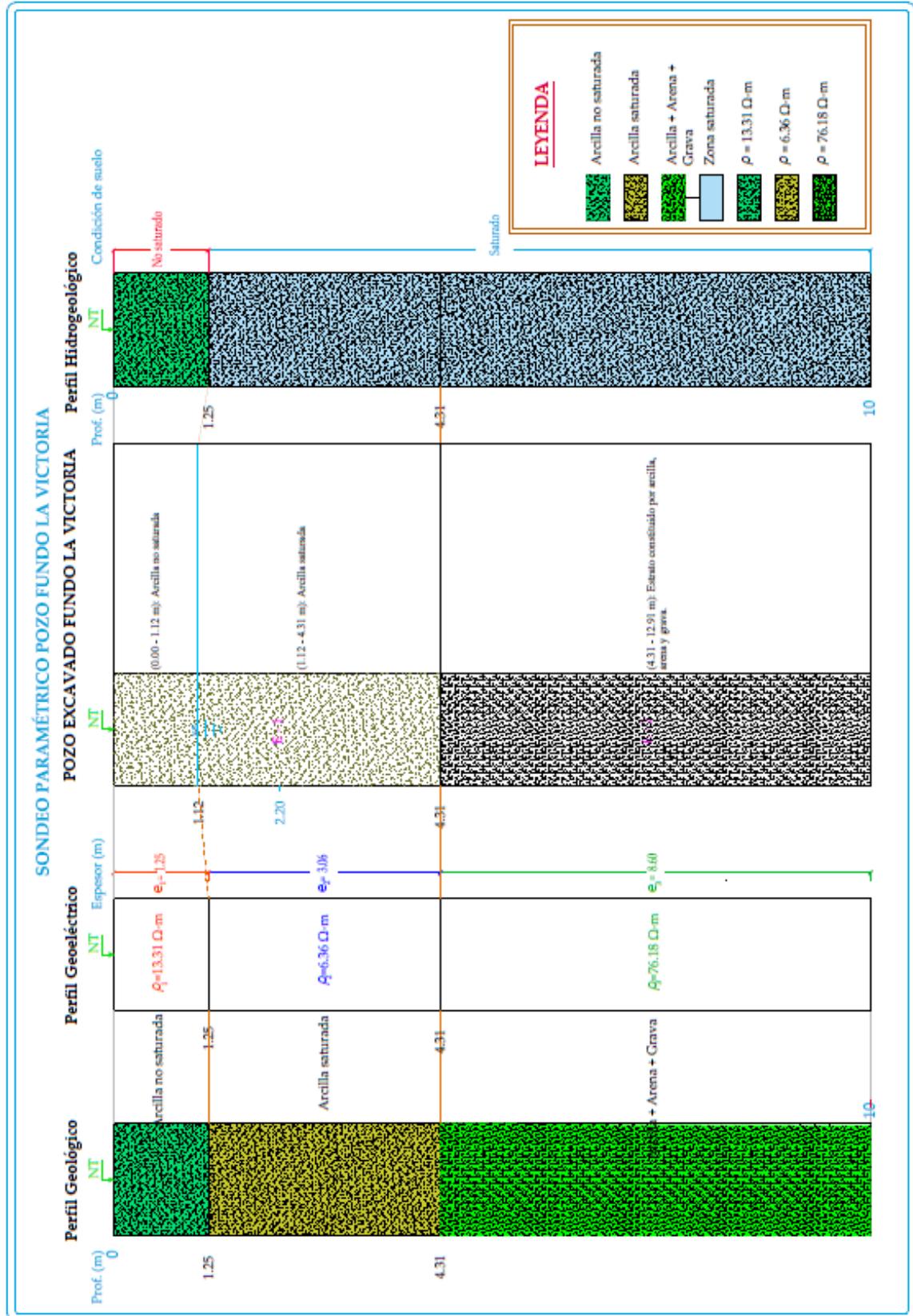
Este Sondeos Eléctrico Vertical se ha ejecutado a 1 metro de distancia donde se ha excavado el pozo con fines de aprovechamiento de agua. De la ejecución de este Sondeo Eléctrico Vertical Paramétrico, con el resistivímetro y hasta una profundidad de 200 metros se ha encontrado siete valores de resistividades diferentes, lo que nos indica que existe la misma cantidad de estratos geológicos; y cuyos valores encontrados los mostramos en la siguiente tabla número 9.

**Tabla 9:** Resistividades encontradas en el SEVP – FV 01.

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.25	1.25	13.31
1.25	4.31	3.06	6.36
4.31	12.91	8.6	76.18
12.91	43.13	30.22	124.21
43.13	78.2	35.07	80.91
78.2	128.41	50.21	9.84
128.41	200	-	77.14

**Discusión de resultados:** Luego realizando la comparación entre el primer dato de resistividad obtenido con el resistivímetro y el dato de nivel freático del pozo, podemos notar que existe una buena correlación entre los dos datos (ver figura 30), por consiguiente, pasamos a la validación de los datos obtenidos en el sondeo eléctrico vertical.

Comparando los dos estudios podemos notar que para una resistividad de  $13.31 \Omega - m$ , le corresponde el estrato constituido por arcillas no saturadas; seguidamente para una resistividad de  $6.36 \Omega - m$ , le corresponde el estrato compuesto por arcillas saturadas; luego encontramos una resistividad de  $76.18 \Omega - m$ , le corresponde el estrato compuesto por arcilla, arena y grava.



**Figura 30:** SEV Paramétrico pozo Fundo La Victoria vs Nivel Estático pozo Fundo La Victoria

#### 4.5. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES DE EXPLORACIÓN

Se realizaron 20 Sondeos Eléctricos Verticales de exploración en el Fundo La Victoria, utilizando el equipo construido por el tesista y aplicando el método Schlumberger; la profundidad máxima de investigación fue de 200 metros, y donde se ha encontrado diferentes valores de resistividades, y espesores de los estratos geológicos, cuyos resultados los mostramos en los cuadros siguientes.

**Tabla 10:** Resistividades encontradas en el SEV – 01 (A - A).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.11	1.11	15.78
1.11	6.12	5.01	5.31
6.12	10.37	4.25	74.44
10.37	44.41	34.04	118.16
44.41	66.91	22.5	81.88
66.91	101.21	34.3	7.18
101.21	200	-	81.63

**Tabla 11:** Resistividades encontradas en el SEV – 02 (B - B).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.05	1.05	12.24
1.05	5.12	4.07	7.73
5.12	12.74	7.62	80.41
12.74	33.69	20.95	116.22
33.69	74.39	40.7	76.74
74.39	115.04	40.65	8.16
115.04	200	-	84.81

**Tabla 12:** Resistividades encontradas en el SEV – 03 (C - C).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.18	1.18	11.24
1.18	4.91	3.73	8.53
4.91	12.49	7.58	77.16
12.49	37.38	24.89	112.23
37.38	72.12	34.74	81.14
72.12	132.13	60.01	5.51
132.13	200	-	76.71

**Tabla 13:** Resistividades encontradas en el SEV – 04 (D – D).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.94	1.94	16.11
1.94	5.07	3.13	5.29
5.07	9.94	4.87	79.04
9.94	37.01	27.07	120.27
37.01	61.87	24.86	83.37
61.87	109.16	47.29	7.03
109.16	200	-	74.39

**Tabla 14:** Resistividades encontradas en el SEV – 05 (E – E).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	2.73	2.73	18.11
2.73	5.51	2.78	9.18
5.51	9.33	3.82	73.71
9.33	27.24	17.91	118.94
27.24	60.12	32.88	76.42
60.12	116.37	56.25	6.64
116.37	200	-	80.11

**Tabla 15:** Resistividades encontradas en el SEV – 06 (F – F).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	5.28	5.28	125.6
5.28	9.42	4.15	8.12
9.42	21.37	11.94	78.81
21.37	32.64	27.07	123.04
32.64	78.81	46.17	81
78.81	104.32	25.51	9.06
104.32	200	-	386.15

**Tabla 16:** Resistividades encontradas en el SEV – 07 (G – G).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.32	1.32	14.77
1.32	6.21	4.89	8.11
6.21	11.23	5.02	81.36
11.23	39.94	28.71	122.18
39.94	70.08	30.14	79.92
70.08	110.43	40.35	9.03
110.43	200	-	72.16

**Tabla 17:** Resistividades encontradas en el SEV – 08 (H – H).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.17	1.17	13.19
1.17	5.31	4.14	8.04
5.31	14.24	8.93	81.84
14.24	43.71	29.47	117.29
43.71	75.13	31.42	80.67
75.13	114.24	39.11	6.61
114.24	200	85.76	73.34

**Tabla 18:** Resistividades encontradas en el SEV – 09 (I – I).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmiosmetro
Desde	Hasta		
0	1.45	1.45	16.1
1.45	3.11	1.66	5.88
3.11	12.34	9.23	76.71
12.34	34.37	22.03	124.23
34.37	70.75	36.38	81.84
70.75	114.12	43.37	9.79
114.12	200	-	85.88

**Tabla 19:** Resistividades encontradas en el SEV – 10 (J – J).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmiosmetro
Desde	Hasta		
0	1.93	1.93	16.35
1.93	5.53	3.6	7.14
5.53	15.17	9.64	80.81
15.17	35.33	20.16	118.82
35.33	68.37	33.04	74.45
68.37	123.48	55.11	7.71
123.48	200	-	76.52

**Tabla 20:** Resistividades encontradas en el SEV – 11 (K – K).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmiosmetro
Desde	Hasta		
0	1.22	1.22	12.74
1.22	5.12	3.9	6.38
5.12	14.63	9.51	82.18
14.63	33.21	18.58	112.33
33.21	60.02	26.81	88.27
60.02	123.31	63.29	5.38
123.31	200	-	84.43

**Tabla 21:** Resistividades encontradas en el SEV – 12 (L – L).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.1	1.1	16.1
1.1	4.11	3.01	7.22
4.11	11.25	7.14	75.56
11.25	37.39	26.14	119.18
37.39	61.61	29.22	84.44
61.61	110.11	43.5	7.12
110.11	200	-	89.89

**Tabla 22:** Resistividades encontradas en el SEV – 13 (M – M).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.09	1.09	14.63
1.09	3.88	2.79	5.21
3.88	13.19	9.31	120.46
13.19	33.12	19.93	7.34
33.12	84.66	51.54	76.14
84.66	200	-	115.34

**Tabla 23:** Resistividades encontradas en el SEV – 14 (N – N).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.18	1.18	17.24
1.18	4.24	3.06	8.18
4.24	11.21	6.97	80.01
11.21	30.16	18.95	121.49
30.16	74.44	44.28	80.12
74.44	128.83	54.39	6.36
128.83	200	-	71.17

**Tabla 24:** Resistividades encontradas en el SEV – 15 (Ñ – Ñ).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmiosmetro
Desde	Hasta		
0	2.41	2.41	132.32
2.41	8.11	5.7	6.18
8.11	16.15	8.04	83.18
16.15	37.59	21.44	124.44
37.59	86.32	48.73	76.25
86.32	108.21	21.89	6.42
108.21	200	-	367.84

**Tabla 25:** Resistividades encontradas en el SEV – 16 (O – O).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmiosmetro
Desde	Hasta		
0	2.48	2.48	16.14
2.48	4.8	2.32	8.04
4.8	18.34	13.54	84.49
18.34	31.18	12.84	126.31
31.18	68.37	37.19	79.92
68.37	200	-	131.63

**Tabla 26:** Resistividades encontradas en el SEV – 17 (P – P).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmiosmetro
Desde	Hasta		
0	1.61	1.61	16.77
1.61	7.29	5.68	7.28
7.29	11.41	4.12	78.13
11.41	36.65	25.24	126.33
36.65	84.23	47.58	80.37
84.23	200	-	5.65

**Tabla 27:** Resistividades encontradas en el SEV – 18 (Q – Q).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.91	1.91	19.84
1.91	6.19	4.28	6.36
6.19	12.76	6.57	75.11
12.76	41.12	28.36	118.84
41.12	77.83	36.71	81.26
77.83	200	-	6.28

**Tabla 28:** Resistividades encontradas en el SEV – 19 (R - R).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.23	1.23	13.34
1.23	4.45	3.22	7.24
4.45	9.36	4.91	78.88
9.36	25.39	16.03	119.92
25.39	84.49	59.1	76.27
84.49	200	-	8.68

**Tabla 29:** Resistividades encontradas en el SEV – 20 (S – S).

Profundidad (m)		Espesor (m)	Resistividad en Ohmios-metro
Desde	Hasta		
0	1.15	1.15	18.93
1.15	5.12	3.97	9.44
5.12	9.94	5.03	73.77
9.94	30.32	20.17	115.81
30.32	72.17	41.85	77.84
72.17	200	-	9.36

**Discusión de resultados:** En los sondeos eléctricos verticales encontramos que los estratos están claramente diferenciados por los valores de las resistividades, las cuales varían desde un valor de 5.28  $\Omega - m$ , cuyo valor corresponde a las arcillas saturadas, hasta 386.15  $\Omega - m$ , correspondiente a la roca fija.

#### **4.6. CARACTERIZACIÓN DEL ACUIFERO**

La caracterización del acuífero del Fundo La Victoria y teniendo en cuenta la hidrogeología local se ha clasificado el acuífero de acuerdo al tipo de material que lo constituye y se ha determinado que estamos frente a un acuífero poroso; si se hace la clasificación de acuerdo al grado de presión al que está sometido, estamos frente a un acuífero freático.

*Discusión de resultados:* En el Fundo La Victoria encontramos un acuífero freático, en donde los estratos geológicos están constituidos por arcillas, limos, arenas y su combinación.

#### **4.7. DIRECCIÓN DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El agua subterránea fluye en la dirección en que decrece el potencial hidráulico total, de manera que, si se mantienen constantes todos los demás factores, la cuantía del movimiento de aquella en el seno de la zona saturada depende del gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua. Para la construcción de la red de flujo de esta investigación se ha trabajado con los datos del nivel estático de cada uno de los veinte (20) Sondeos Eléctricos Verticales. En el Anexo N° 08 se presenta el plano de dirección de flujo de aguas subterráneas en el Fundo La Victoria.

*Discusión de resultados:* En el Fundo La Victoria la dirección de flujo de aguas subterráneas viéndolo en plano en planta es en dirección este, es decir van hacia el río cajamarquino, de donde se concluye que el acuífero alimenta al río (río ganador), puesto que el acuífero alimenta al río.

#### **4.8. DETERMINAR LUGARES DONDE PERFORAR POZOS**

De acuerdo a la investigación realizada se ha identificado dos lugares donde realizar la perforación de pozos, donde estos tendrán un mayor rendimiento, esto debido a que los estratos geológicos que lo conforman tiene una mayor potencia en comparación con los estratos arcillosos, debido a que los estratos arcillosos se caracterizan por tener una mejor conductividad hidráulica en comparación con otro tipo de suelo.

*Discusión de resultados:* Los pozos donde los estratos arenosos son de mayor potencia que los arcillosos, tienen un mejor rendimiento al momento de la extracción de agua.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

1. El requerimiento de agua en el Fundo La Victoria se ha determinado para tres actividades por separado, de lo cual se ha obtenido que: Para uso poblacional se requiere de 0.29 l/s, agua para riego se requiere de 601201.68 m<sup>3</sup>/año y para uso pecuario se requiere de 3370.00 l/día.
2. Se ha inventariado veinte (20) pozos excavados en las inmediaciones del Fundo La Victoria; de los pozos inventariados el de mayor profundidad es de 21 m, el de menor profundidad tiene 2 m, el agua que se extrae de estos pozos se utiliza para uso doméstico, riego y para ambos usos. Los pozos en esta zona del valle se encuentran distribuidos de forma irregular claramente condicionada por la ubicación de las viviendas.
3. El levantamiento topográfico en el Fundo La Victoria propiedad de la Universidad Nacional de Cajamarca se llevó a cabo con un GPS Trimble XH 6000 de precisión milimétrica, con el cual se ha obtenido las coordenadas en el sistema WGS 1984 UTM Zona 17S, con la información obtenida se ha elaborado los plano a escala conveniente, de donde se ha obtenido que el área total es de 52.8981 hectáreas, en cuanto a la topografía del terreno encontramos que el 90.77 % del área presenta una topografía llana, también encontramos una colina rocosa (arenisca) ubicada al este de mencionado Fundo. Realizando la delimitación de la zona de investigación, encontramos los siguientes límites:  
  
Norte: Rio Cajamarquino  
Este: Con propiedad de terceros  
Oeste: Propiedad de terceros  
Sur: Carretera al Centro Poblado La Victoria y propiedad de terceros
4. En cuanto a los Sondeos Eléctricos Verticales paramétricos se ha realizado la comparación de los datos obtenidos en estudios anteriores como los ensayos SPT los cuales cuentan con datos de estratigrafías; con los datos obtenidos con el equipo construido (resistivímetro), llegando a concluir que la metodología aplicada es válida, debido a la similitud de los resultados.

5. Realizado los veinte (20) Sondeos Eléctricos Verticales de exploración y luego de realizar la interpretación de los resultados, se ha llegado a la conclusión que los materiales de los cuales están formados los estratos geológicos en el acuífero son: Arcillas, arenas, gravas y la combinación de estos materiales. Las resistividades del suelo varían desde  $5.28 \Omega - m$  cuyo valor corresponde a las arcillas saturadas, hasta  $386.15 \Omega - m$  cuya resistividad corresponde a la roca dura.
6. Realizando la caracterización del acuífero del Fundo La Victoria – UNC, se ha encontrado que estamos frente a un acuífero poroso, esto haciendo la clasificación de acuerdo a los materiales que lo constituyen; haciendo la clasificación de acuerdo a presión tenemos un acuífero libre.
7. La dirección de flujo de las aguas subterráneas en el Fundo La Victoria se ha obtenido con los datos del nivel estático correspondientes a los meses de abril y mayo del año 2019. Para su trazo se ha utilizado la aplicación informática ArcGis 10.5, obteniéndose que el flujo presenta dirección y sentido hacia el este, con gradientes hidráulicos muy bajos ( $<8 \text{ ‰}$ ), llegando a la conclusión de que la dirección de flujo es hacia el río cajamarquino.
8. Se ha determinado dos lugares donde perforar pozos para la explotación del agua subterránea, los pozos estarán separados a más 100 m uno del otro esto para evitar la interferencia de pozos; los pozos se han ubicado en los puntos donde los estratos arenosos son de mayor potencia que los estratos arcillosos y/o arcillo-limosos, esto con el objetivo de obtener un mejor rendimiento del pozo. La ubicación de los pozos será en las coordenadas:

Pozo N° 01	E: 780647.15 m	N: 9204445.96 m
Pozo N° 02	E: 780728.71 m	N: 9204540.56 m

## **5.2. RECOMENDACIONES**

1. En cuanto a la ejecución de los Sondeos Eléctricos Verticales se recomienda el cumplimiento estricto de todos los pasos, condiciones y requerimiento para así poder obtener resultados confiables.
2. Debido a que en un futuro se construyan nuevos edificios y/o ambientes dentro del Fundo La Victoria; y esto implica el movimiento de tierras sufriendo variaciones así la topografía, por lo que se recomienda su verificación al momento de ejecución de un Sondeo Eléctrico Vertical, ya que el espesor del estrato aumentaría o disminuye, según el trabajo que se ha realizado ya sea excavación y o relleno.
3. Se recomienda a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca recopile los diferentes trabajos de exploración de suelos del valle de Cajamarca en un solo documento, pues tienen material abundante como para editar una monografía sobre la geología del valle de Cajamarca o sobre sus características mecánicas.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Custodio, E., y Llamas, MR. (2001). *Hidrología subterránea*. 2 ed. Barcelona, España: Omega.
- Astier, JL. (1998). *Geofísica Aplicada a la hidrología*. Madrid, España: Paraninfo.
- Bowles, JE. (1982). *Propiedades Geofísicas de los suelos*. Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill.
- Griffiths, D., y King, R. (1972). *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos*. Madrid, España: Ed. Paraninfo.
- Shiklomanov, IA. (1997). *World water resources*. St Petersburg, Russia:
- Cerdán Moreno, CA., y Huamán Rojas CE., y Malpica Becerra, JE. (1997). *Abastecimiento de agua para usos complementarios de la Universidad Nacional de Cajamarca con la aplicación de método de la resistividad eléctrica de suelos en el estudio hidrogeológico*. (tesis de pre grado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Arias, DE. (2011). *Exploración geotécnica – Realaciones geoelectricas*. Medellín, Colombia.
- Pimienta, J. (1980). *La captación de aguas subterráneas*, Barcelona, España.
- Bakkali, S., y Bouyalaqui, J. (2004). *Prospection Géophysique Appliquée à l'évaluation des Eaux Souterraines de Mediouna*. (Tanger, Maroc). Journal des Sciences Pour l'Ingénieur, J.S.P.I., Vol.4, pp. 13–22.
- Luis, A. (2012). *Estrada Prospección Geoeléctrica*, Universidad Nacional de Tucuman, Argentina.
- Kirsch, R. (2009). *Groundwater Geophysics*. 2nd Ed. Berlín, Alemania. Springer.
- Davis, SN., y De Wiest, R. (2009). *Hidrogeología*. Barcelona, España.
- Pulido, A. (2007). *Nociones de hidrogeología para ambientólogos*. Almería, España: Editorial Universidad de Almería.
- Cleary, R. (2007). *Aguas Subterráneas*. Tampa, Brasil.

Edward, E., y Johnson, I. (1975). *El Agua Subterránea y los Pozos*. Minesota, Estados Unidos. Primera edición.

Astier, J. (1975). *Geofísica Aplicada a la Hidrogeología*. Madrid, España: Cometa.

Rushton, K. (2003). *Groundwater Hydrology – Conceptual and Computational Models*. Birmingham, England.

Castany, G. (1975). *Prospección y Explotación de las Aguas Subterráneas*. Barcelona, España: Omega.

Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (2009). *Hidrogeología*. Barcelona, España.

Compagnie Generale de Geophysique. *Abaques de Sindage Electrique*, Segunda Edición.

## **VII. ANEXOS**

Anexo 1: Registro de sondajes STP – 02 y STP – 05.

Anexo 2: Abaco de dos capas, ábacos auxiliares del tipo A, H, K y Q.

Anexo 3: Plano topográfico a curvas de nivel y ubicación de los SEVs.

Anexo 4: Hoja de cálculo de requerimiento de agua para riego.

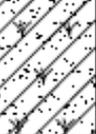
Anexo 5: Calculo de la resistividad del terreno en hoja excel.

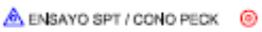
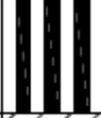
Anexo 6: Curvas obtenidas de los Sondeos Eléctricos Verticales, dibujados en AutoCAD Civil 3D - 2019.

Anexo 7: Inventario de fuentes de agua subterránea.

Anexo 8: Dirección de flujo de aguas subterráneas.

**Anexo 1:** Registro de los sondajes STP – 02 y STP – 05.

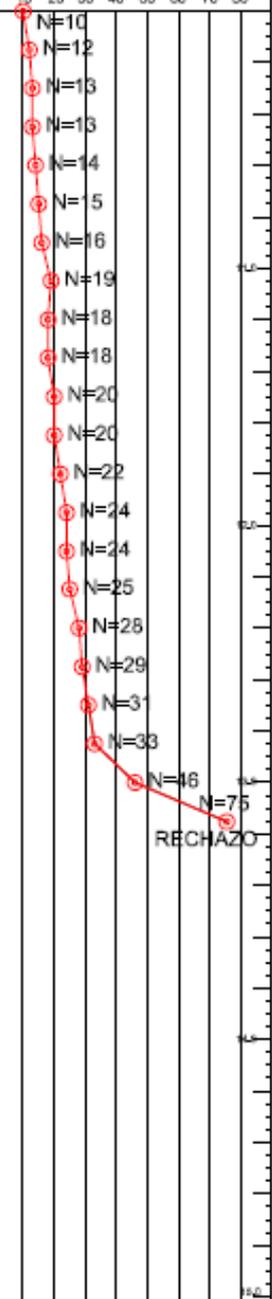
		EXPLORACION GEOTECNICA		REGISTRO DE PERFORACION		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">SPT-02</div>									
SOLICITADO		Augusto Ortiz de Zevallos		NIVEL FREATICO		2.20 mts.									
PROYECTO		Estudio de Mecánica de Suelos del Nuevo Coliseo de Cajamarca		REGISTRO		M.C.M									
UBICACION		Av. Atahualpa, Prov.Cajamarca-Dpto. Cajamarca		REVISADO POR		DR. J. ALVA									
PROFUNDIDAD		13.00 m		COTA (m.s.n.m.)		-									
				FECHA		AGOSTO - 2008									
PROF. (m)	CLASIFICACION		DESCRIPCION DEL MATERIAL	MUESTRA	HUMEDAD NATURAL Y LIMITES DE CONSISTENCIA			 ENSAYO SPT / CONO PECK 							
	SIMBOLO	SIMBOLO GRAFICO			W (%)	LL (%)	LP (%)	N° (GOLPES/PIE)							
								10	20	30	40	50	60	70	80
0.00	-		0.00 – 1.00m. Arcilla con limo de color marrón oscuro, con betas plomizo, presencia de raíces consistencia baja y muy húmeda.	S/M	-	-	-								
0.55	CL	A-6	0.55 – 1.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color plomizo con vetas amarillentas, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.28%, A=35.51%, F=64.21%.	M-1	20.60	34.58	13.27								
1.00	CL	A-7	1.00 – 1.55m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color plomo oscuro, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.36%, A=18.10%, F=81.52%.	M-2	21.80	42.30	21.65								
1.55	MH	A-7	1.55 – 2.00m. Limo de alta plasticidad, de color marrón, plomizo y negro, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.00%, A=11.95%, F=88.05%.	M-3	28.77	60.61	29.63								
2.00	CL	A-6	2.00 – 2.55m. Similar a M-4	S/M	-	-	-								
2.55	CL	A-6	2.55 – 3.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color marrón claro, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.13%, A=23.66%, F=74.21%.	M-4	19.09	38.51	15.65								
3.00	CL	A-6	3.00 – 3.55m. Similar a M-4	S/M	-	-	-								
3.55	CL	A-7	3.55 – 4.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color marrón claro, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.00%, A=14.65%, F=85.35%.	M-5	22.34	41.08	21.27								
4.00	CL	A-7	4.00 – 4.55m. Similar a M-5	S/M	-	-	-								
4.55	CL	A-6	4.55 – 5.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color plomizo, negro y marrón, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.12%, A=49.76%, F=50.12%.	M-6	22.46	35.33	20.60								
5.00															

			EXPLORACION GEOTECNICA		REGISTRO DE PERFORACION		SPT-02											
SOLICITADO		Augusto Oríz de Zevallos			NIVEL FREATICO		2.20 mts.											
PROYECTO		Estudio de Mecánica de Suelos del Nuevo Coliseo de Cajamarca			REGISTRO		M.C.M											
UBICACION		Av. Atahualpa, Prov.Cajamarca-Dpto. Cajamarca			REVISADO POR		DR. J. ALVA											
PROFUNDIDAD		13.00 m	COTA (m.s.n.m.)	-		FECHA		AGOSTO - 2008										
PROF. (m)	CLASIFICACION			DESCRIPCION DEL MATERIAL	MUESTRA	HUMEDAD NATURAL Y LIMITE DE CONSISTENCIA												
	SIMBOLO		SIMBOLO GRAFICO			W (%)	L.L. (%)	I.P. (%)	N° (GOLPES/PE)									
SUCS		AASHTO		10 20 30 40 50 60 70 80														
5.00	CH	A-7		5.00 - 5.55m. Arcilla de alta plasticidad, de color plomizo con pequeñas gravillas, consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.00%, A=12.48%, F=8752%.	M-7	34.90	58.06	37.55										
5.55	MH	A-7		5.55 - 6.00m. Limo de alta plasticidad, de color marrón, y plomizo de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=3.460%, A=11.44%, F=85.10%.	M-8	37.02	63.47	26.71										
6.00	CL	A-6		6.00 - 6.55m. Similar a M-9	S/M	-	-	-	N=9									
6.55	CL	A-6		6.55 - 7.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color plomo y amarillo, con gravillas aisladas de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=3.02%, A=39.85%, F=57.12%.	M-9	18.53	29.41	11.75										
7.00	CL	A-6		7.00 - 7.55m. Similar a M-9	S/M	-	-	-	N=43									
7.55	SC	A-6		7.55 - 8.00m. Arena arcillosa, de color plomo y marrón, con gravilla aislada, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=1.63%, A=58.83%, F=39.54%.	M-10	17.58	33.10	15.09										
8.00	SC	A-2-6		8.00 - 8.55m. Arena Arcillosa, de color marrón, con gravas de 1/2", de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=33.25%, A=46.21%, F=20.54%.	M-11	17.78	27.00	12.59										
8.55	CH	A-7		8.55 - 9.00m. Arcilla de alta plasticidad, de color marrón, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.00%, A=11.68%, F=88.32%.	M-12	41.05	57.22	30.15										
9.00									N=19									
									N=8									
									N=8									
									N=10									
									N=13									
									N=17									
									N=18									
									N=17									

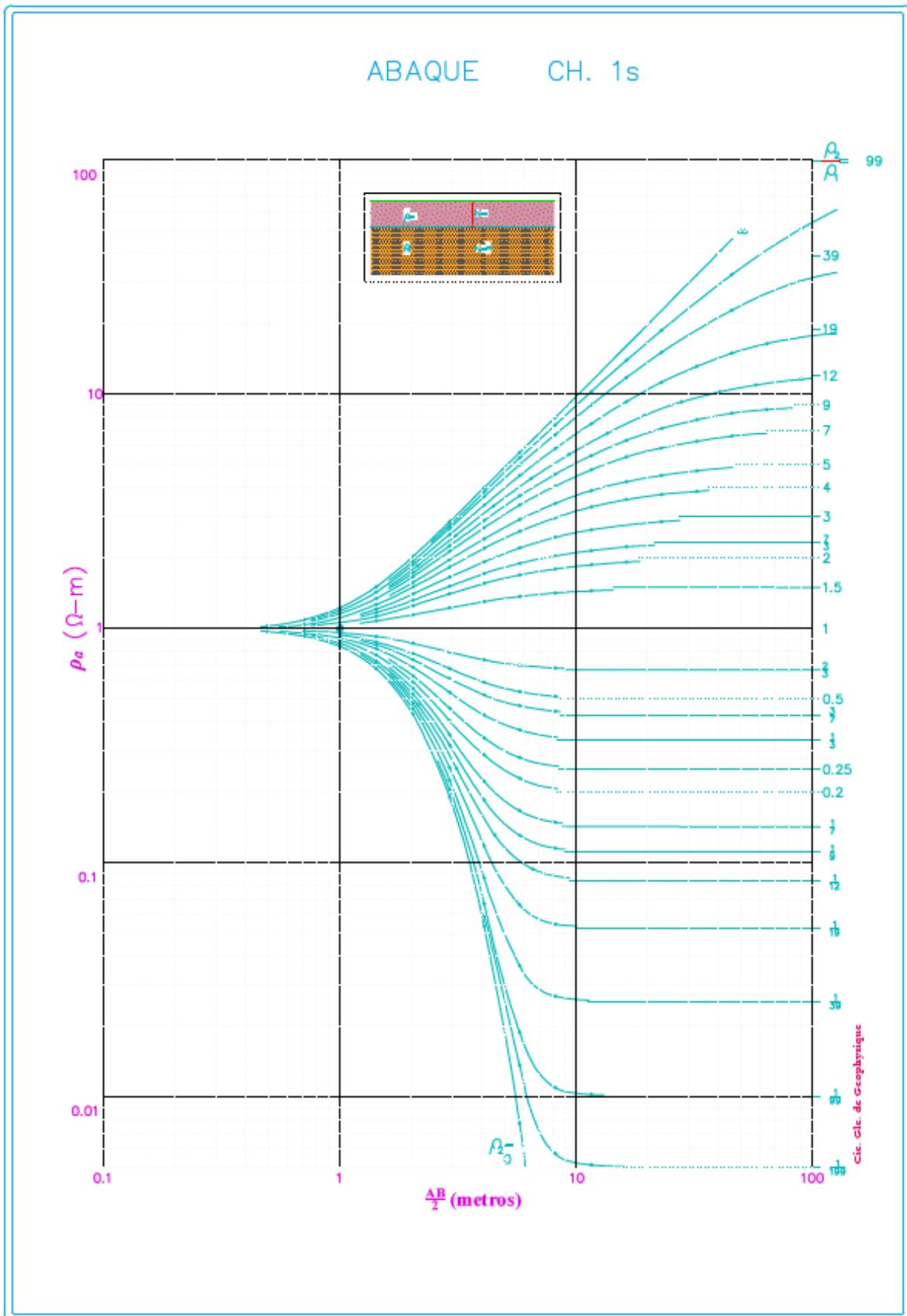
		EXPLORACION GEOTECNICA		REGISTRO DE PERFORACION		SPT-02		
SOLICITADO	Augusto Ortiz de Zevallos			NIVEL FREATICO	2.20 mts.			
PROYECTO	Estudio de Mecánica de Suelos del Nuevo Coliseo de Cajamarca			REGISTRO	M.C.M			
UBICACION	Av. Atahualpa, Prov.Cajamarca- Dpto. Cajamarca			REVISADO POR	DR. J. ALVA			
PROFUNDIDAD	13.00 m	COTA (m.s.n.m.)	-	FECHA	AGOSTO - 2008			
PROF. (m)	CLASIFICACION		DESCRIPCION DEL MATERIAL	MUESTRA	HUMEDAD NATURAL Y LIMITES DE CONSISTENCIA			▲ ENSAYO SPT / CONO PECK    ●
	SUCS	AASHTO			SIMBOLO GRAFICO	W (%)	LL (%)	
								10 20 30 40 50 60 70 80
11.0								N=18
								N=17
								N=20
								N=18
								N=16
								N=17
								N=16
								N=17
								N=17
								N=18
								N=19
								N=20
12.0								N=31
								N=30
								N=30
								N=33
								N=39
								N=42
13.0								N=74
								N=RECHAZO
14.0								
15.0								

 <b>HIDROENERGIA</b> <small>CONSULTORES EN INGENIERIA S.A.S.</small>		EXPLORACION GEOTECNICA		REGISTRO DE PERFORACION		<b>SPT-05</b>										
SOLICITADO	Augusto Oríz de Zevallos			NIVEL FREATICO	2-10 mts.											
PROYECTO	Estudio de Mecánica de Suelos del Nuevo Coliseo de Cajamarca			REGISTRO	M.C.M											
UBICACION	Av. Atahualpa, Prov.Cajamarca- Dpto. Cajamarca			REVISADO POR	DR. J. ALVA											
PROFUNDIDAD	13.15 m	COTA (m.s.n.m.)	-	FECHA	AGOSTO - 2008											
PROF. (m)	CLASIFICACION		DESCRIPCION DEL MATERIAL	MUESTRA	HUMEDAD NATURAL Y LIMITE DE CONSISTENCIA			 ENSAYO SPT / CONO PECK								
	SIMBOLO	SIMBOLO GRAFICO			W (%)	LL (%)	I.P. (%)	N° (GOLPES/PE)								
									10	20	30	40	50	60	70	80
0.00	-	-	0.00 - 0.55m. Arcilla con limo de color marrón oscuro, presencia de raíces consistencia baja y húmeda.	S/M	-	-	-									
0.55	CH	A-7	0.55 - 1.00m. Arcilla de alta plasticidad, de color plumizo con presencia de raíces, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.81%, A=7.53%, F=91.65%.	M-1	32.20	69.62	45.65									
1.00	CL	A-7	1.00 - 1.55m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color plumo y marrón, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.28%, A=23.97%, F=75.75%.	M-2	20.91	45.06	30.01									
1.55	CL	A-7	1.55 - 2.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color marrón con presencia de gravillas, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.20%, A=21.74%, F=78.06%.	M-3	22.15	41.87	25.18									
2.00	CL	A-6	2.00 - 2.55m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color marrón y negro con gravillas aisladas, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.88%, A=32.90%, F=66.23%.	M-4	21.38	45.78	21.82									
2.55	CH	A-7	2.55 - 3.00m. Arcilla de alta plasticidad, de color marrón negro, con pequeñas gravillas, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=8.69%, A=20.20%, F=71.11%.	M-5	25.43	59.99	37.60									
3.00	CL	A-7	3.00 - 3.55m. Arcilla de baja plasticidad, de color marrón plumizo, con gravillas aisladas, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=1.58%, A=18.01%, F=80.42%.	M-6	19.00	46.94	26.76									
3.55	CL	A-6	3.55 - 4.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color marrón, con pequeñas gravillas aisladas de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=12.67%, A=34.77%, F=52.56%.	M-7	15.96	37.72	17.65									
4.00	CL	A-7	4.00 - 4.55m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color marrón, con pequeñas gravillas aisladas de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.69%, A=9.88%, F=89.44%.	M-8	20.71	44.98	25.74									
4.55	CL	A-6	4.55 - 5.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color plumizo, con pequeñas gravillas, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.71%, A=22.80%, F=76.48%.	M-9	18.70	33.41	15.48									

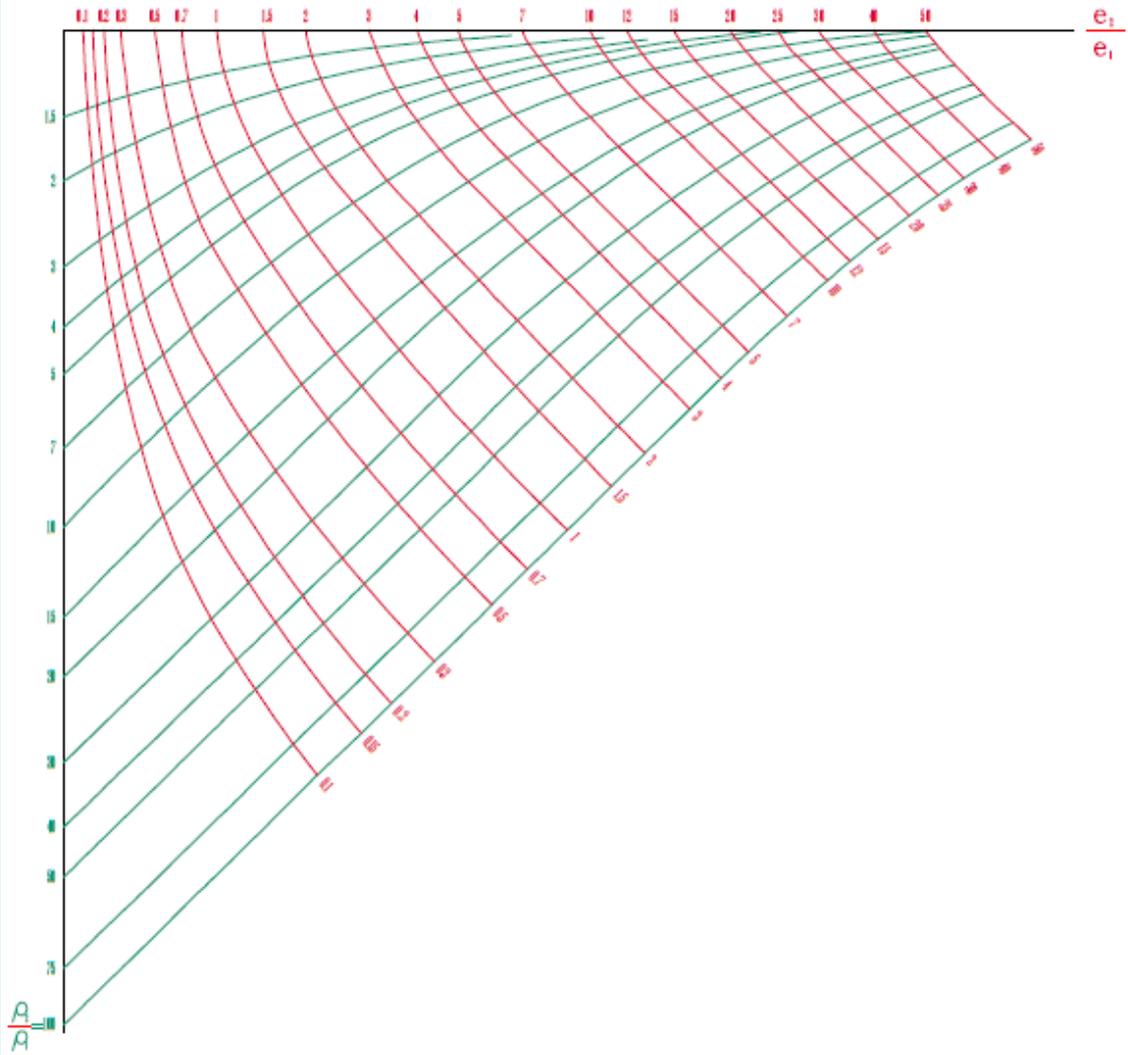
 <b>HIDROENERGIA</b> <small>CONSULTORES INGENIEROS S.R.L.</small>			EXPLORACION GEOTECNICA		REGISTRO DE PERFORACION		<b>SPT-05</b>										
SOLICITADO	Augusto Ortiz de Zevallos			NIVEL FREATICO	2.10mts.												
PROYECTO	Estudio de Mecánica de Suelos del Nuevo Coliseo de Cajamarca			REGISTRO	M.C.M												
UBICACION	Av. Atahualpa, Prov.Cajamarca- Dpto. Cajamarca			REVISADO POR	DR. J. ALVA												
PROFUNDIDAD	13.15 m	COTA (m.s.n.m.)	-		FECHA	AGOSTO - 2008											
PROF. (m)	CLASIFICACION			DESCRIPCION DEL MATERIAL	MUESTRA	HUMEDAD NATURAL Y LÍMITES DE CONSISTENCIA			 ENSAYO SPT / CONO PECK 								
	SUCS	AASHTO	SIMBOLO GRAFICO			W (%)	LL (%)	LP (%)	N° (GOLPES/PIE)								
									10	20	30	40	50	60	70	80	
5.00	CL	A-7		5.00 - 5.55m. Similar a M-9	S/M	-	-	-									
5.55	SC	A-7		5.55 - 5.85m. Arena arcillosa, de color plomizo con gravas de 1/2", de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=26.28%, A=33.33%, F=36.39%.	M-10	23.64	68.01	40.13									
6.00	SC	A-2-6		5.85 - 6.00m. Arena arcillosa, de color marrón y gravas de 1/2", de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=41.67%, A=67.39%, F=65.15%.	M-11	20.11	37.91	23.95									N=10
6.50	CL	A-6		6.00 - 6.55m. Similar a M-13	S/M	-	-	-									
7.00	CL	A-6		6.55 - 7.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color marrón claro con gravas de 1/2" aisladas, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=9.31%, A=29.26%, F=61.43%.	M-13	41.60	32.30	13.22									N=11
7.50	ML	A-7		7.00 - 7.55m. Limo de baja plasticidad, de color plomo oscuro con gravas de 1" aisladas, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=17.37%, A=26.90%, F=53.74%.	M-14	18.81	47.55	18.82									
8.00	CL	A-7		7.55 - 8.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color plomo, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=0.00%, A=38.82%, F=61.18%.	M-15	20.44	43.45	23.10									N=21
8.50	CL	A-7		8.00 - 8.55m. Similar a M-15	S/M	-	-	-									
9.00	CL	A-7		8.55 - 9.00m. Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, de color plomo claro, con gravas aisladas, de consistencia media y húmeda. Constituido por: G=8.39%, A=33.70%, F=57.91%.	M-16	26.62	44.51	19.59									N=10
9.50																	N=7
10.00																	N=8
																	N=8
																	N=8
																	N=9
																	N=10
																	N=10

 <b>HIDROENERGIA</b> <small>CONSULTORES EN INGENIERIA S.A.S.</small>		EXPLORACION GEOTECNICA		REGISTRO DE PERFORACION		<b>SPT-05</b>		
SOLICITADO	Augusto Orfíz de Zevallos			NIVEL FREATICO	2.10 mts.			
PROYECTO	Estudio de Mecánica de Suelos del Nuevo Coliseo de Cajamarca			REGISTRO	M.C.M			
UBICACION	Av. Atahualpa, Prov.Cajamarca-Dpto. Cajamarca			REVISADO POR	DRL J. ALVA			
PROFUNDIDAD	13.15 m	COTA (m.s.n.m.)	-	FECHA	AGOSTO - 2008			
PROF. (m)	CLASIFICACION		DESCRIPCION DEL MATERIAL	MUESTRA	HUMEDAD NATURAL Y LIMITES DE CONSISTENCIA			 ENSAYO SPT / CONO PECK 
	SIMBOLO SUCS	SIMBOLO AASHTO			SIMBOLO GRAFICO	W (%)	LL. (%)	
								

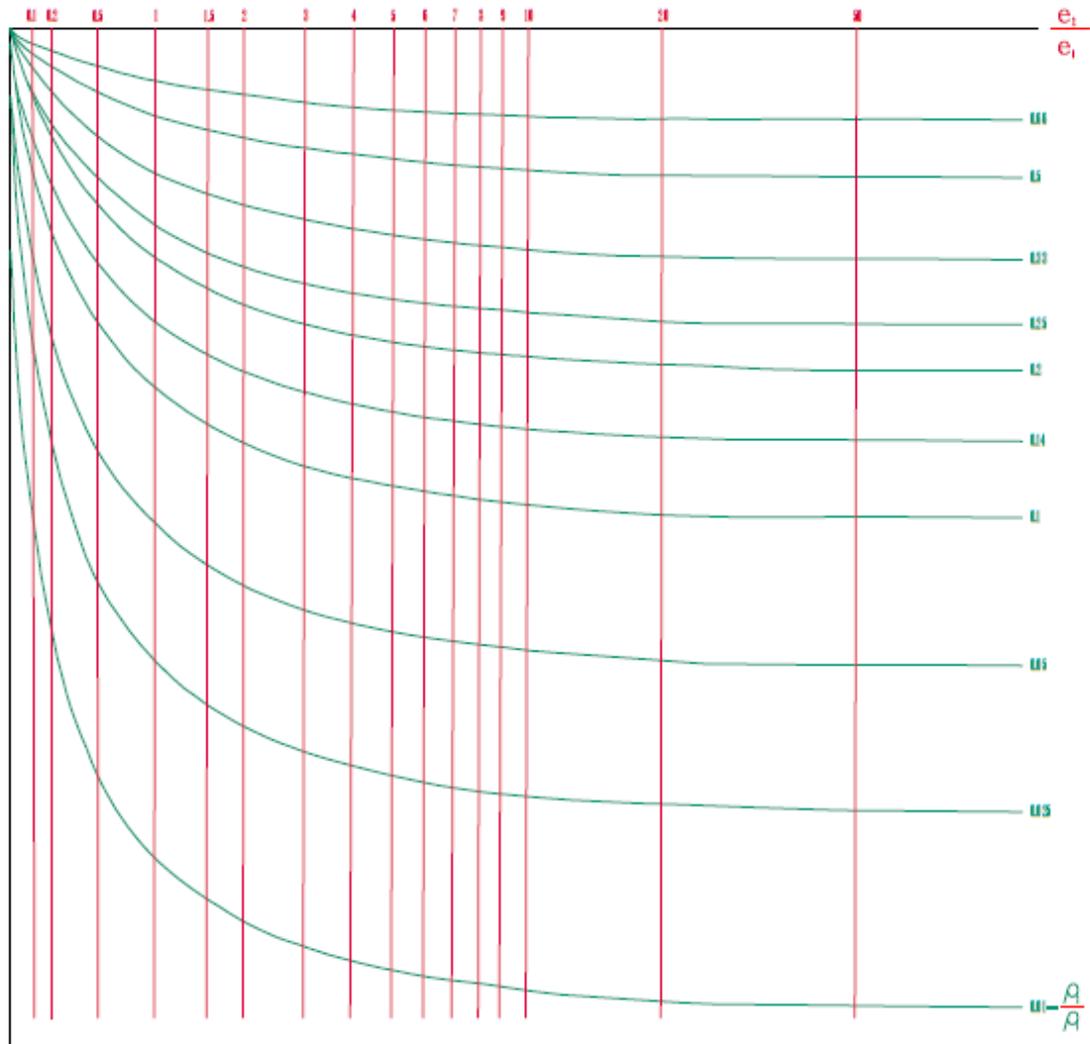
**Anexo 2:** Abaco de dos capas, ábacos auxiliares del tipo A, H, K, Q.



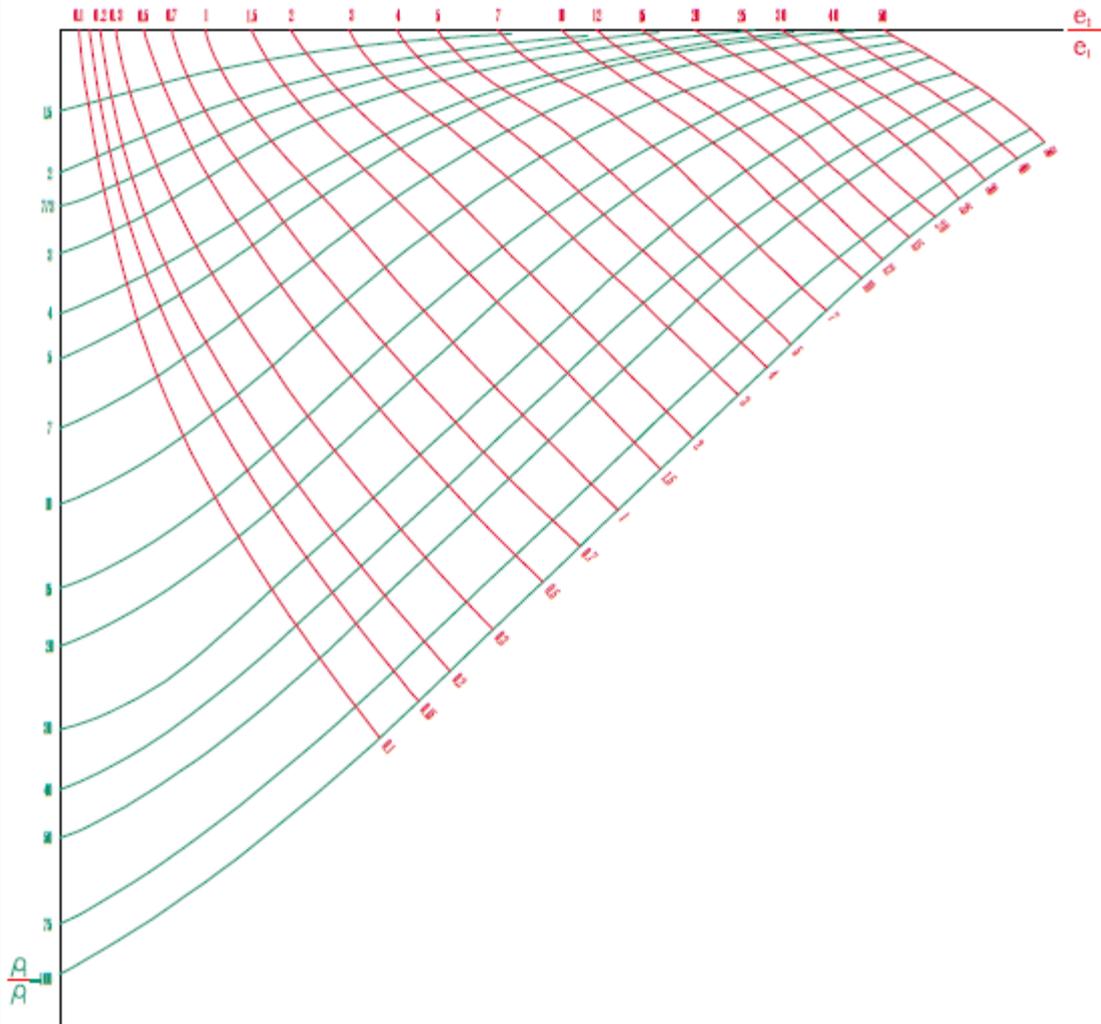
# AUXILIARY GRAPH (A – TYPE )



# AUXILIARY GRAPH (H - TYPE )

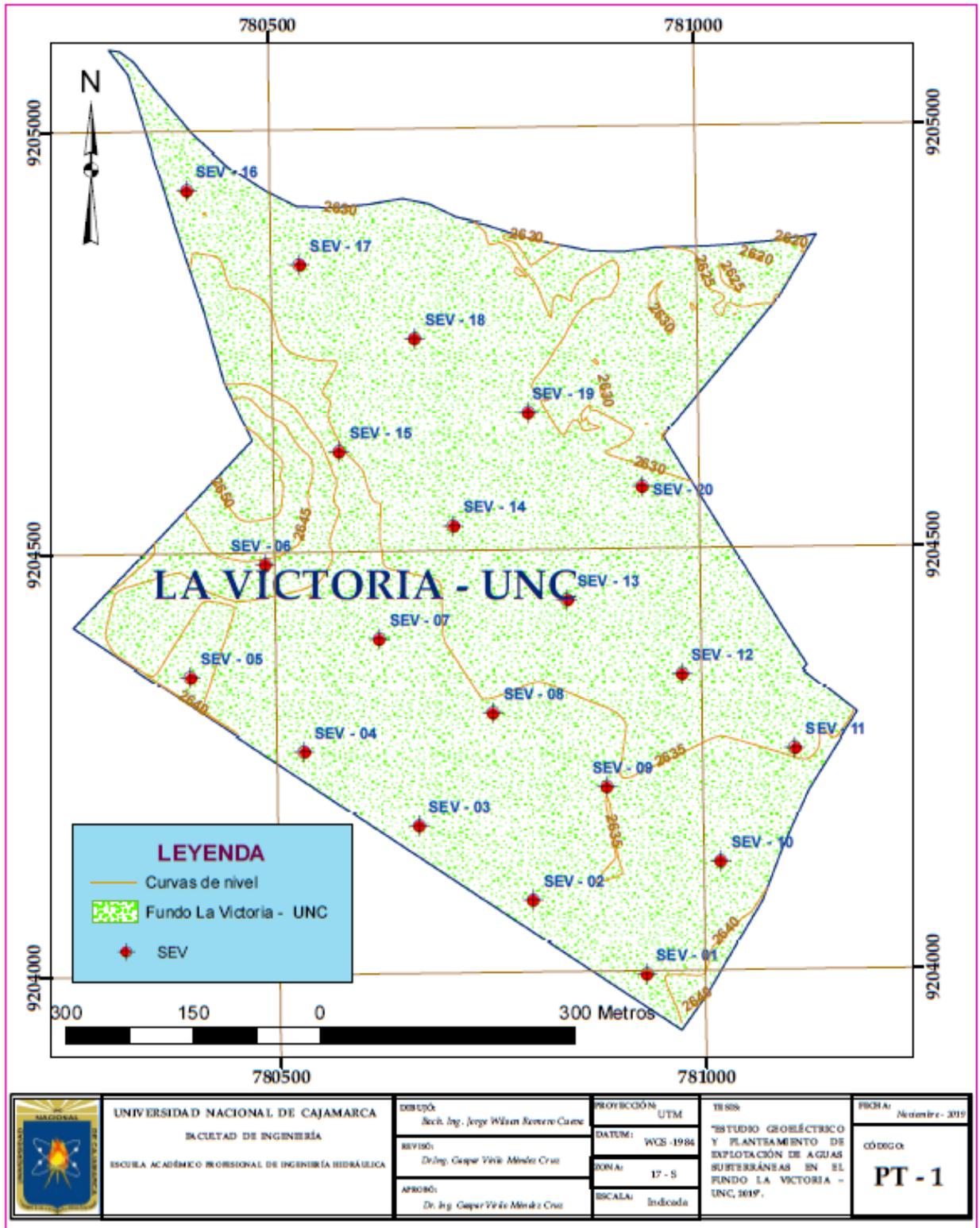


# AUXILIARY GRAPH (K – TYPE )





**Anexo 3:** Plano topográfico a curvas de nivel y ubicación de los SEVs.



### Anexo 4: Hola de cálculo de requerimiento de agua para riego

BALANCE HIDRICO																			
ALMACENAMIENTO: 100 mm																			
Etp: PENMAN	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
FACTOR	108.19	115.80	122.76	128.70	129.89	118.73	99.96	106.33	102.30	96.72	88.50	98.58	1316.46						
ET <sub>p</sub> (mm/mes)	12.30	28.90	67.20	57.90	72.40	74.50	94.50	109.10	62.20	27.60	9.40	6.50	622.50						
VAR.HUM.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.77	-2.77	0.00	0.00	0.00						
ALM.AGUA SUELO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.77	0.00	0.00	0.00	0.00						
Etr	12.30	28.90	67.02	57.90	72.40	74.50	94.50	106.33	64.97	27.60	9.40	6.50	622.32						
D.A.	95.89	86.90	55.56	70.80	57.49	44.23	5.46	0.00	37.33	69.12	79.10	92.08	693.96						
E.A.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
ESC.Y PERD.SUBB.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
CEDULA DE CULTIVO																			
AREA TOTAL:	52.8981 Ha		AREA SEMBRADA:		48.01 Ha														
PARAMETROS	AREA (Ha)																		
Numero de dias	31.00	28.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	
Kc maiz	1.50	1.20	1.08	0.75															
Kc Alfalfa	1.00	0.65	0.75	0.85															
Kc Papa	1.00																		
Kc Zanahoria	0.50		0.42	0.70	0.97	1.08	0.91												
Kc Rye - Grass	43.51	1.13	0.52	0.78	0.52	0.78	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.15	1.13	0.52	0.78	1.11	1.11	1.15	
Kc Hortalizas	0.50	0.80	0.82	0.87	0.96	1.04	1.11	1.11	1.11	1.11	1.16	1.16	1.17	1.12	0.98				
Area de terreno Cultivable (Ha)	46.51	47.01	47.01	45.51	45.51	45.51	45.51	45.51	45.51	45.51	45.51	45.51	46.01	46.01	47.51	47.01	47.01	47.01	
Kc ponderado	1.12	0.54	0.78	0.54	0.78	0.54	0.79	1.11	1.11	1.11	1.15	1.15	1.12	0.55	0.79	1.10	1.10	1.13	
Eto (mm/mes)	115.63	100.52	108.81	105.00	103.85	97.80	103.85	103.85	103.85	103.85	104.78	110.05	112.50	112.50	117.80	119.40	121.83	121.83	
Etc (mm/mes)	131.82	59.31	90.31	61.95	83.08	108.56	108.56	108.56	108.56	108.56	120.50	124.36	63.00	63.00	94.24	131.34	140.10	140.10	
PP Bruta al 75% (mm/mes)	55.88	70.88	81.83	46.65	20.70	7.05	4.88	9.23	21.68	50.40	43.43	54.30							
PP efectiva (mm/mes)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
Cl Coeficiente perdidas totales	27.94	35.44	40.92	23.33	10.35	3.53	2.44	4.62	10.84	25.20	21.72	27.15							
Requerimiento neto (mm/mes)	103.88	23.87	49.40	38.63	72.73	105.04	105.04	105.04	105.04	119.75	52.16	69.04							
Requerimiento bruto con 75% de Efic (mm/mes)	138.51	31.83	65.86	51.50	96.97	140.05	140.05	140.05	140.05	157.41	159.66	146.17							
Requerimiento bruto con 75% de Efic (l/seg/ha)	0.52	0.13	0.25	0.20	0.36	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.59	0.60	0.27	0.34	0.56	0.56	0.56	0.56	
REQUERIMIENTO DE AGUA DE LOS CULTIVOS																			
MES	AREA CULTIVAR MENSUAL (ha)	REQUERIMIENTO BRUTO (mm/mes)	REQUERIMIENTO BRUTO (m <sup>3</sup> /ha)	VOLUMEN DE AGUA (m <sup>3</sup> )															
Enero	46.51	138.51	1385.07	64419.45															
Febrero	47.01	31.83	318.27	14961.72															
Marzo	45.51	65.86	658.60	30960.79															
Abril	45.51	51.50	23437.65																
Mayo	45.51	96.97	969.73	44132.56															
Junio	45.51	140.05	63735.24																
Julio	45.01	157.41	70851.74																
Agosto	46.01	159.66	73459.57																
Septiembre	46.01	69.55	31998.42																
Octubre	47.51	92.05	43734.54																
Noviembre	47.01	146.17	68712.95																
Diciembre	47.01	150.60	70797.06																
<b>Total de agua anual</b>	<b>1300.15</b>	<b>1300.15</b>	<b>601201.68</b>																

**Anexo 5:** Cálculo de resistividades del terreno en hoja Excel de los 2 primeros Sondeos Eléctricos Verticales.

Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) N ° 01										
AB/2 (m)	MN/2 (m)	Cte (K)	Voltaje (V)	Vo (mV)	Vi (mV)	Vi - Vo (mV)	I (mA)	"ρ" (Ohm-m)	Condición de "ρ"	"ρ" Prom. (Ohm-m)
2.00	0.40	15.07	12.00	1.00	18.50	17.50	23.10	11.42	Válido	11.43
			24.00	1.00	29.28	28.28	37.24	11.45	Válido	
			36.00	1.00	35.35	34.35	45.40	11.40	Válido	
			48.00	1.00	46.45	45.45	59.80	11.46	Válido	
			60.00	1.00	60.20	59.20	78.20	11.41	Válido	
3.00	0.40	34.70	12.00	3.00	12.57	9.57	36.50	9.10	Válido	9.14
			24.00	3.00	19.25	16.25	62.50	9.02	Válido	
			36.00	3.00	22.34	19.34	73.20	9.17	Válido	
			48.00	3.00	28.27	25.27	95.70	9.16	Válido	
			60.00	3.00	37.00	34.00	127.80	9.23	Válido	
4.00	0.40	62.17	12.00	4.00	7.27	3.27	26.10	7.79	Válido	7.76
			24.00	4.00	9.70	5.70	46.10	7.69	Válido	
			36.00	4.00	11.00	7.00	56.50	7.70	Válido	
			48.00	4.00	13.24	9.24	72.20	7.96	Válido	
			60.00	4.00	16.00	12.00	97.20	7.68	Válido	
5.00	0.40	97.50	12.00	5.00	7.32	2.32	31.20	7.25	Válido	7.26
			24.00	5.00	9.00	4.00	55.20	7.07	Válido	
			36.00	5.00	9.80	4.80	63.00	7.43	Válido	
			48.00	5.00	11.24	6.24	85.40	7.12	Válido	
			60.00	5.00	13.80	8.80	115.50	7.43	Válido	
6.00	0.40	140.67	12.00	7.00	8.90	1.90	36.70	7.28	Válido	7.31
			24.00	7.00	10.30	3.30	64.70	7.17	Válido	
			36.00	7.00	10.90	3.90	73.50	7.46	Válido	
			48.00	7.00	12.25	5.25	99.00	7.46	Válido	
			60.00	7.00	13.78	6.78	132.60	7.19	Válido	
8.00	0.40	250.57	12.00	7.00	8.10	1.10	34.20	8.06	Válido	8.12
			24.00	7.00	9.00	2.00	61.40	8.16	Válido	
			36.00	6.00	9.30	3.30	74.70	11.07	Eliminado	
			48.00	7.00	10.00	3.00	93.40	8.05	Válido	
			60.00	7.00	11.09	4.09	125.00	8.20	Válido	
10.00	2.00	75.36	12.00	1.00	3.36	2.36	18.90	9.41	Válido	9.47
			24.00	1.00	5.50	4.50	35.60	9.53	Válido	
			36.00	1.00	7.00	6.00	48.70	9.28	Válido	
			48.00	1.00	8.00	7.00	55.10	9.57	Válido	
			60.00	1.00	10.40	9.40	74.30	9.53	Válido	
13.00	2.00	129.53	12.00	1.00	2.64	1.64	17.40	12.21	Válido	12.20
			24.00	1.00	4.11	3.11	33.50	12.02	Válido	
			36.00	1.00	5.30	4.30	45.60	12.21	Válido	
			48.00	1.00	5.89	4.89	51.50	12.30	Válido	
			60.00	1.00	7.56	6.56	69.30	12.26	Válido	
16.00	2.00	197.82	12.00	1.00	2.85	1.85	25.20	14.52	Válido	14.52
			24.00	1.00	4.25	3.25	45.20	14.22	Válido	
			36.00	1.00	5.35	4.35	58.60	14.68	Válido	
			48.00	1.00	6.00	5.00	68.40	14.46	Válido	
			60.00	1.00	7.80	6.80	91.40	14.72	Válido	

20.00	2.00	310.86	12.00	2.00	3.58	1.58	28.40	17.29	Válido	17.34
			24.00	3.00	5.67	2.67	47.60	17.44	Válido	
			36.00	3.00	6.66	3.66	65.20	17.45	Válido	
			48.00	4.00	8.42	4.42	80.30	17.11	Válido	
			60.00	4.00	10.00	6.00	107.10	17.42	Válido	
25.00	2.00	487.49	12.00	4.00	4.66	0.66	15.70	20.49	Válido	20.30
			24.00	4.00	5.36	1.36	32.60	20.34	Válido	
			36.00	4.00	6.15	2.15	51.30	20.43	Válido	
			48.00	4.00	6.30	2.30	55.00	20.39	Válido	
			60.00	4.00	7.00	3.00	73.70	19.84	Válido	
30.00	6.00	226.08	12.00	3.00	6.93	3.93	37.00	24.01	Válido	23.99
			24.00	3.00	9.93	6.93	65.30	23.99	Válido	
			36.00	3.00	11.24	8.24	77.60	24.01	Válido	
			48.00	3.00	13.80	10.80	101.90	23.96	Válido	
			60.00	3.00	17.56	14.56	137.20	23.99	Válido	
40.00	6.00	409.25	12.00	3.00	5.26	2.26	31.70	29.18	Válido	29.30
			24.00	3.00	6.74	3.74	52.40	29.21	Válido	
			36.00	3.00	8.49	5.49	76.50	29.37	Válido	
			48.00	3.00	9.70	6.70	94.00	29.17	Válido	
			60.00	3.00	12.20	9.20	127.40	29.55	Válido	
50.00	6.00	644.75	12.00	4.00	6.38	2.38	46.00	33.36	Válido	33.39
			24.00	4.00	7.27	3.27	63.20	33.36	Válido	
			36.00	4.00	8.94	4.94	95.40	33.39	Válido	
			48.00	4.00	10.96	6.96	134.30	33.41	Válido	
			60.00	4.00	13.37	9.37	180.60	33.45	Válido	
60.00	12.00	452.16	12.00	1.00	3.55	2.55	30.10	38.31	Válido	38.37
			24.00	1.00	6.54	5.54	65.40	38.30	Válido	
			36.00	1.00	6.72	5.72	67.60	38.26	Válido	
			48.00	1.00	9.95	8.95	105.10	38.50	Válido	
			60.00	1.00	13.30	12.30	144.60	38.46	Válido	
70.00	12.00	622.24	12.00	2.00	5.00	3.00	45.20	41.30	Válido	41.83
			24.00	2.00	8.38	6.38	95.00	41.79	Válido	
			36.00	2.00	8.50	6.50	96.40	41.96	Válido	
			48.00	2.00	11.99	9.99	147.50	42.14	Válido	
			60.00	2.00	15.46	13.46	199.60	41.96	Válido	
80.00	16.00	602.88	12.00	2.00	3.31	1.31	17.50	45.13	Válido	45.23
			24.00	2.00	3.94	1.94	25.60	45.69	Válido	
			36.00	2.00	4.55	2.55	33.60	45.75	Válido	
			48.00	2.00	5.00	3.00	40.70	44.44	Válido	
			60.00	2.00	6.11	4.11	54.90	45.13	Válido	
100.00	20.00	753.60	<b>12.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.12</b>	<b>0.12</b>	<b>3.40</b>	<b>26.60</b>	<b>Eliminado</b>	50.04
			24.00	1.00	1.45	0.45	6.80	49.87	Válido	
			36.00	1.00	1.48	0.48	7.20	50.24	Válido	
			48.00	1.00	1.65	0.65	9.80	49.98	Válido	
			60.00	1.00	1.87	0.87	13.10	50.05	Válido	
120.00	20.00	1099.00	<b>12.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.20</b>	<b>0.20</b>	<b>3.30</b>	<b>66.61</b>	<b>Eliminado</b>	51.80
			24.00	1.00	1.21	0.21	4.40	52.45	Válido	
			36.00	1.00	1.26	0.26	5.60	51.03	Válido	
			48.00	1.00	1.30	0.30	6.40	51.52	Válido	
			60.00	1.00	1.38	0.38	8.00	52.20	Válido	

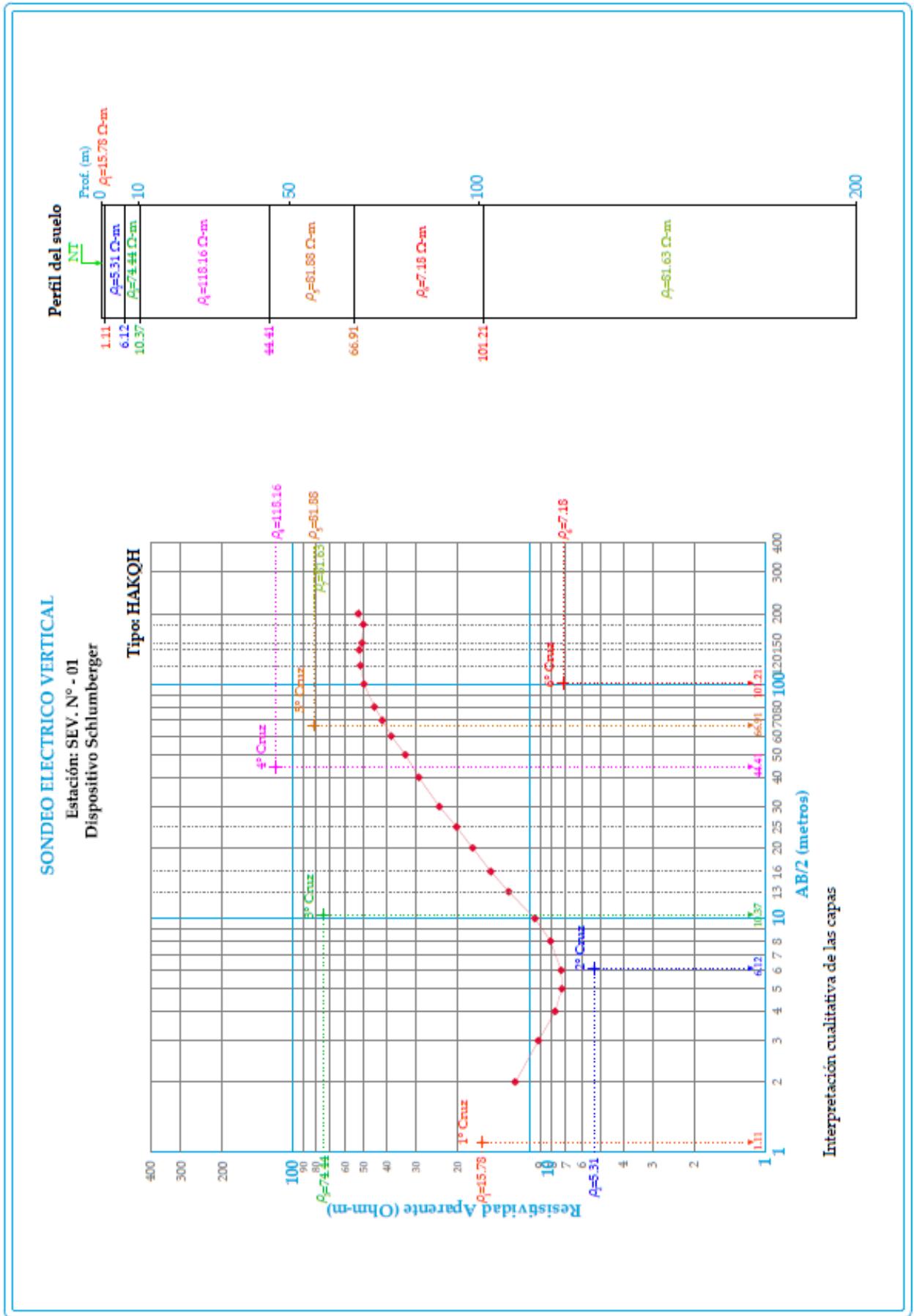
140.00	20.00	1507.20	12.00	5.00	5.73	0.73	21.10	52.14	Válido	52.10
			24.00	5.00	6.16	1.16	33.50	52.19	Válido	
			36.00	5.00	6.45	1.45	42.00	52.03	Válido	
			48.00	5.00	7.20	2.20	63.70	52.05	Válido	
			60.00	5.00	7.87	2.87	83.10	52.05	Válido	
150.00	20.00	1734.85	12.00	6.00	6.85	0.85	28.80	51.20	Válido	51.05
			24.00	6.00	7.24	1.24	42.30	50.86	Válido	
			36.00	6.00	7.70	1.70	57.70	51.11	Válido	
			48.00	6.00	8.52	2.52	85.70	51.01	Válido	
			60.00	6.00	9.40	3.40	115.50	51.07	Válido	
180.00	20.00	2512.00	<b>12.00</b>	<b>6.00</b>	<b>6.52</b>	<b>0.52</b>	<b>27.70</b>	<b>47.16</b>	<b>Eliminado</b>	50.32
			24.00	6.00	6.90	0.90	45.00	50.24	Válido	
			36.00	6.00	7.10	1.10	55.20	50.06	Válido	
			48.00	6.00	7.68	1.68	83.30	50.66	Válido	
			<b>60.00</b>	<b>6.00</b>	<b>8.40</b>	<b>2.40</b>	<b>109.90</b>	<b>54.86</b>	<b>Eliminado</b>	
200.00	20.00	3108.60	<b>12.00</b>	<b>6.00</b>	<b>6.70</b>	<b>0.70</b>	<b>47.70</b>	<b>45.62</b>	<b>Eliminado</b>	52.89
			24.00	6.00	7.33	1.33	78.10	52.94	Válido	
			36.00	6.00	8.64	2.64	155.20	52.88	Válido	
			48.00	6.00	9.12	3.12	183.54	52.84	Válido	
			<b>60.00</b>	<b>6.00</b>	<b>10.20</b>	<b>4.20</b>	<b>189.90</b>	<b>68.75</b>	<b>Eliminado</b>	

Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) N ° 02										
AB/2 (m)	MN/2 (m)	Cte (K)	Voltaje (V)	Vo (mV)	Vi (mV)	Vi - Vo (mV)	I (mA)	"ρ" (Ohm-m)	Condición de "ρ"	"ρ" Prom. (Ohm-m)
2.00	0.40	15.07	12.00	1.20	43.86	42.66	56.30	11.42	Válido	11.45
			24.00	1.20	56.85	55.65	73.20	11.46	Válido	
			36.00	1.20	85.00	83.80	111.00	11.38	Válido	
			48.00	1.20	125.50	124.30	163.30	11.47	Válido	
			60.00	1.20	136.00	134.80	176.60	11.50	Válido	
3.00	0.40	34.70	12.00	1.00	8.32	7.32	25.90	9.81	Válido	9.83
			24.00	1.00	10.45	9.45	32.90	9.97	Válido	
			36.00	1.00	15.70	14.70	52.20	9.77	Válido	
			48.00	1.00	23.00	22.00	78.30	9.75	Válido	
			60.00	1.00	30.40	29.40	103.60	9.85	Válido	
4.00	0.40	62.17	12.00	1.00	3.60	2.60	17.00	9.51	Válido	9.51
			24.00	1.00	6.16	5.16	33.80	9.49	Válido	
			36.00	1.00	6.50	5.50	35.90	9.52	Válido	
			48.00	1.00	8.40	7.40	48.60	9.47	Válido	
			60.00	1.00	10.40	9.40	61.00	9.58	Válido	
5.00	0.40	97.50	12.00	1.00	2.07	1.07	10.50	9.94	Válido	9.92
			24.00	1.00	2.71	1.71	16.80	9.92	Válido	
			36.00	1.00	3.20	2.20	21.60	9.93	Válido	
			48.00	1.00	3.74	2.74	27.00	9.89	Válido	
			60.00	1.00	4.38	3.38	33.30	9.90	Válido	
6.00	1.20	45.22	12.00	0.10	4.14	4.04	17.40	10.50	Válido	10.48
			24.00	0.10	6.63	6.53	28.10	10.51	Válido	
			36.00	0.10	7.20	7.10	30.50	10.53	Válido	
			48.00	0.10	9.30	9.20	40.40	10.30	Válido	
			60.00	0.10	12.40	12.30	52.50	10.59	Válido	
8.00	1.20	81.85	12.00	0.10	0.86	0.76	5.00	12.44	Válido	12.40
			24.00	0.10	1.07	0.97	6.50	12.21	Válido	
			36.00	0.10	1.45	1.35	9.00	12.28	Válido	
			48.00	0.10	1.65	1.55	10.00	12.69	Válido	
			60.00	0.10	2.10	2.00	13.20	12.40	Válido	
10.00	2.00	75.36	12.00	0.10	4.40	4.30	21.90	14.80	Válido	14.80
			24.00	0.10	7.00	6.90	35.20	14.77	Válido	
			36.00	0.10	8.93	8.83	44.90	14.82	Válido	
			48.00	0.10	13.28	13.18	66.80	14.87	Válido	
			60.00	0.10	17.30	17.20	87.90	14.75	Válido	
13.00	2.00	129.53	12.00	1.00	2.81	1.81	12.80	18.32	Válido	18.30
			24.00	1.00	3.64	2.64	18.50	18.48	Válido	
			36.00	1.00	4.72	3.72	26.60	18.11	Válido	
			48.00	1.00	6.70	5.70	40.50	18.23	Válido	
			60.00	1.00	8.70	7.70	54.30	18.37	Válido	
16.00	2.00	197.82	12.00	0.10	2.19	2.09	20.00	20.67	Válido	20.57
			24.00	0.10	3.25	3.15	30.70	20.30	Válido	
			36.00	0.10	4.29	4.19	40.10	20.67	Válido	
			48.00	0.10	6.37	6.27	59.90	20.71	Válido	
			60.00	0.10	7.88	7.78	75.10	20.49	Válido	

20.00	4.00	150.72	12.00	0.10	4.51	4.41	26.30	25.27	Válido	25.33
			24.00	0.10	7.06	6.96	41.50	25.28	Válido	
			36.00	0.10	8.95	8.85	52.80	25.26	Válido	
			48.00	0.10	13.46	13.36	79.40	25.36	Válido	
			60.00	0.10	18.00	17.90	105.80	25.50	Válido	
25.00	4.00	239.03	12.00	0.10	2.00	1.90	16.10	28.21	Válido	28.39
			24.00	0.10	2.93	2.83	23.80	28.42	Válido	
			36.00	0.10	4.16	4.06	34.10	28.46	Válido	
			48.00	0.10	6.33	6.23	52.40	28.42	Válido	
			60.00	0.10	8.52	8.42	70.80	28.43	Válido	
30.00	4.00	346.97	12.00	0.10	0.96	0.86	9.20	32.43	Válido	32.42
			24.00	0.10	1.45	1.35	14.50	32.30	Válido	
			36.00	0.10	1.90	1.80	19.30	32.36	Válido	
			48.00	0.10	2.86	2.76	29.40	32.57	Válido	
			60.00	0.10	3.81	3.71	39.70	32.42	Válido	
40.00	4.00	621.72	12.00	0.20	2.80	2.60	41.00	39.43	Válido	39.45
			24.00	0.20	4.25	4.05	63.40	39.72	Válido	
			36.00	0.20	5.32	5.12	81.70	38.96	Válido	
			48.00	0.20	8.10	7.90	123.70	39.71	Válido	
			60.00	0.20	10.68	10.48	165.20	39.44	Válido	
50.00	10.00	376.80	12.00	0.10	8.63	8.53	73.40	43.79	Válido	43.82
			24.00	0.10	17.42	17.32	149.00	43.80	Válido	
			36.00	0.10	23.35	23.25	200.00	43.80	Válido	
			48.00	0.10	31.16	31.06	267.00	43.83	Válido	
			60.00	0.10	37.46	37.36	321.00	43.85	Válido	
60.00	10.00	549.50	12.00	1.00	3.81	2.81	32.30	47.80	Válido	47.98
			24.00	1.00	6.80	5.80	66.30	48.07	Válido	
			36.00	1.00	9.75	8.75	100.70	47.75	Válido	
			48.00	1.00	12.98	11.98	136.20	48.33	Válido	
			60.00	1.00	16.00	15.00	171.90	47.95	Válido	
70.00	10.00	753.60	12.00	1.00	3.96	2.96	44.10	50.58	Válido	50.49
			24.00	1.00	6.90	5.90	87.70	50.70	Válido	
			36.00	1.00	9.72	8.72	130.50	50.36	Válido	
			48.00	1.00	12.73	11.73	175.80	50.28	Válido	
			60.00	1.00	18.30	17.30	258.00	50.53	Válido	
80.00	10.00	989.10	12.00	1.00	3.89	2.89	53.70	53.23	Válido	52.87
			24.00	1.00	6.84	5.84	110.20	52.42	Válido	
			36.00	1.00	9.92	8.92	166.50	52.99	Válido	
			48.00	1.00	13.51	12.51	234.00	52.88	Válido	
			60.00	1.00	19.11	18.11	339.00	52.84	Válido	
100.00	10.00	1554.30	12.00	0.10	1.44	1.34	39.10	53.27	Válido	53.37
			24.00	0.10	2.83	2.73	79.50	53.37	Válido	
			36.00	0.10	5.68	5.58	162.50	53.37	Válido	
			48.00	0.10	6.06	5.96	173.40	53.42	Válido	
			60.00	0.10	7.49	7.39	215.00	53.42	Válido	
120.00	24.00	904.32	12.00	0.10	3.44	3.34	59.00	51.19	Válido	51.14
			24.00	0.10	6.81	6.71	119.00	50.99	Válido	
			36.00	0.10	9.96	9.86	173.80	51.30	Válido	
			48.00	0.10	12.00	11.90	210.00	51.24	Válido	
			60.00	0.10	14.75	14.65	260.00	50.95	Válido	

140.00	24.00	1244.49	12.00	0.10	2.21	2.11	53.50	49.08	Válido	49.08
			24.00	0.10	4.44	4.34	109.60	49.28	Válido	
			36.00	0.10	6.45	6.35	162.80	48.54	Válido	
			48.00	0.10	8.00	7.90	199.70	49.23	Válido	
			60.00	0.10	10.00	9.90	250.00	49.28	Válido	
150.00	24.00	1434.20	12.00	0.10	0.69	0.59	18.40	45.99	Válido	45.60
			24.00	0.10	1.25	1.15	36.30	45.44	Válido	
			36.00	0.10	1.64	1.54	48.30	45.73	Válido	
			48.00	0.10	2.11	2.01	63.20	45.61	Válido	
			60.00	0.10	2.54	2.44	77.40	45.21	Válido	
180.00	24.00	2081.82	12.00	0.10	0.39	0.29	12.90	46.80	Válido	47.16
			24.00	0.10	0.67	0.57	25.00	47.47	Válido	
			36.00	0.10	0.92	0.82	36.30	47.03	Válido	
			48.00	0.10	1.17	1.07	47.20	47.19	Válido	
			60.00	0.10	1.40	1.30	57.20	47.31	Válido	
200.00	24.00	2578.99	12.00	0.10	0.27	0.17	9.00	48.71	Válido	49.35
			24.00	0.10	0.44	0.34	18.10	48.45	Válido	
			36.00	0.10	0.63	0.53	26.60	51.39	Válido	
			48.00	0.10	0.77	0.67	35.40	48.81	Válido	
			60.00	0.10	0.95	0.85	44.40	49.37	Válido	

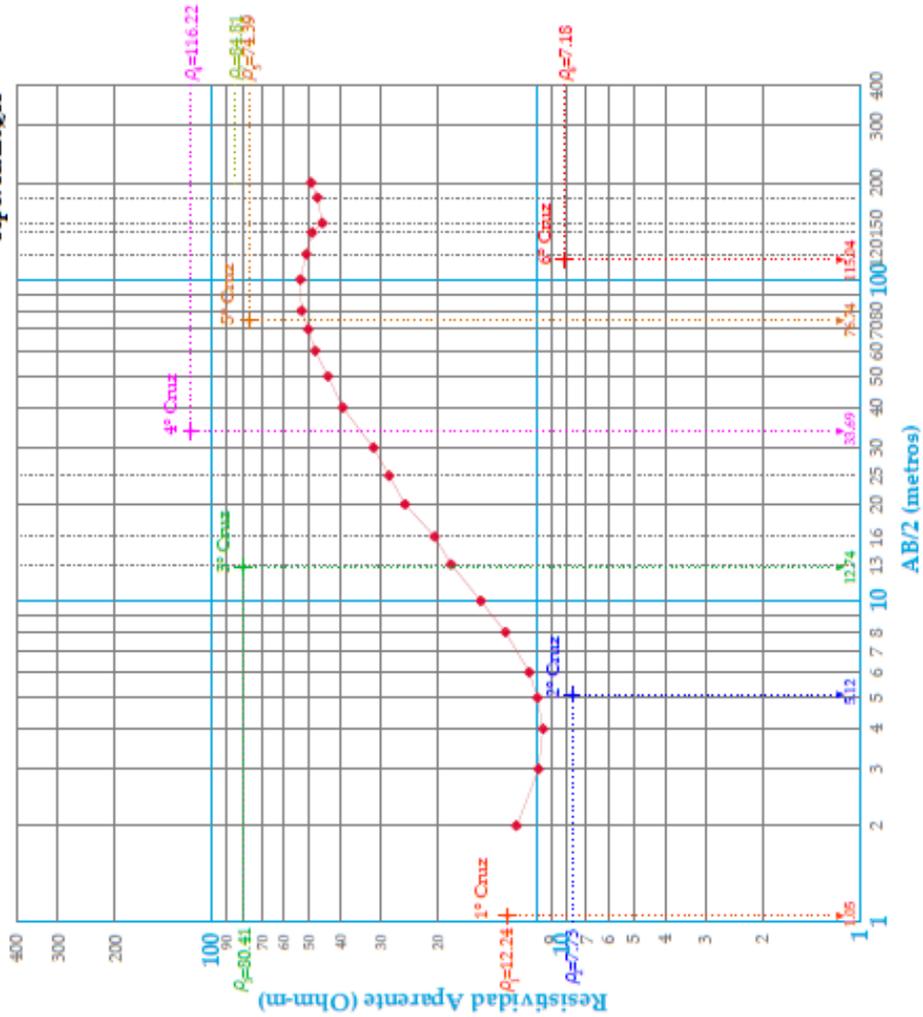
**Anexo 6:** Curvas obtenidas de los 2 primeros Sondeos Eléctricos Verticales.



### SONDEO ELECTRICO VERTICAL

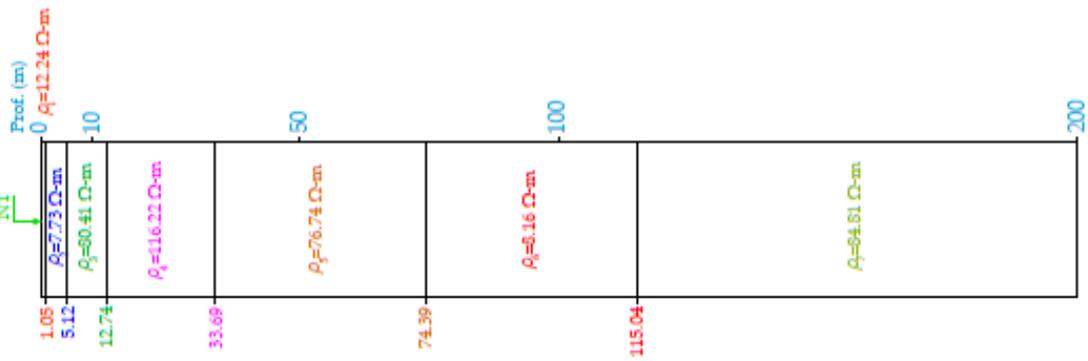
Estación: SEV. N° - 02  
Dispositivo Schlumberger

Tipo: HAKQH



Interpretación cualitativa de las capas

### Perfil del suelo



**Anexo 7:** Inventario de fuentes de agua subterránea.

CUADRO N° 03 : INVENTARIO DE POZOS CERCA AL FUNDO LA VICTORIA													
Pozo N°	Profundidad (m)	N.E. (m)	Diámetro (m)	Coordenadas		Cota (m.s.n.m)	Tipo de Construcción	Anillado/Sin anillar	Con caseta o al descubierto	Uso de Agua	Propietario	Centro Poblado	
				Este	Norte								
1	21.00	16.85	1.20	778110	9202829	2682	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Doméstico	Arce, Aurelia	Nuevo Paríamarca	
2	11.70	8.75	2.00	778271	9202968	2670	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Doméstico y riego	Machuca Murrugarra, Amilca	Nuevo Paríamarca	
3	5.85	2.00	1.80	779584	9202939	2663	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Riego	Ascencio Bardales, Mesías	Huacariz - San Antonio	
4	6.30	4.30	1.60	778878	9203386	2657	A mano	Anillado	Al descubierto	Riego	Ayac, Manuel	Huacariz	
5	7.60	4.00	1.80	778847	9203439	2663	A mano	Anillado	Al descubierto	Doméstico y riego	Ayac, Manuel	Huacariz	
6	9.50	3.60	1.35	778878	9203268	2657	A mano	Anillado	Al descubierto	Riego	Cruz, María Juana	Huacariz	
7	7.90	3.90	1.25	779065	9203207	2669	A mano	Anillado	Al descubierto	Riego	Salcedo, Roberto	Huacariz - San Antonio	
8	7.10	2.10	1.35	779274	9203393	2656	A mano	Anillado	Al descubierto	Doméstico y riego	Sangai, Eduardo	Huacariz - San Antonio	
9	3.00	1.00	2.00 x 2.50	779355	9203874	2652	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Doméstico (lavar la ropa)	Rosario, María Rosa	Huacariz	
10	6.50	2.25	Irregular	780395	9203696	2651	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Doméstico y riego	Tucto, Domitila	Los Suaces - La Collpa	
11	6.10	4.20	1.30	780992	9203281	2641	A mano	Anillado	Al descubierto	Doméstico	Limay, Mercedes	La Victoria	
12	2.10	0.70	1.10	779934	9203384	2649	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Riego	Ramos Huaman, Oscar	La Collpa	
13	2.00	0.10	1.10	779915	9203308	2645	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Riego	Ramos Huaman, Oscar	La Collpa	
14	4.00	3.80	Irregular	779724	9202878	2654	A mano	Anillado	Al descubierto	Riego	Castañeda, Hector	Huacariz	
15	15.30	12.20	Irregular	779645	9202770	2648	A mano	Anillado	Con caseta	Doméstico	Castañeda, Hector	Huacariz	
16	3.90	2.90	1.65	779098	9204299	2661	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Doméstico y riego	Cotrina, José Pedro	Huacariz	
17	9.62	5.00	Irregular	777858	9203752	2673	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Doméstico	Chicote, Julia	Huacariz - Bambamarca	
18	9.50	8.67	1.50	778428	9204685	2662	A mano	Sin anillar	Al descubierto	Doméstico	Quispe, Sebastiana	Huacariz - Bambamarca	
19	2.45	2.50	1.30	780461	9204360	2650	Tubular	Anillado	Al descubierto	Riego	UNC	Fundo La Victoria	
20	4.50	2.40	2.40	779679	9205515	2652	A mano	Anillado	Al descubierto	Doméstico	Flores, César	Huayrapongo	

**Anexo 8:** Dirección de flujo de aguas subterráneas

