

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**APLICACIÓN DE LA PROSPECCION GEOFISICA UTILIZANDO EL
METODO SCHLUMBERGER PARA LA EXPLORACION DEL AGUA
SUBTERRÁNEA EN CANTON LOS MAGUEYES, COLONIA SANTA
LUCIA, MUNICIPIO DE AHUACHAPAN.**

PRESENTADO POR:

**JOSE ISIDRO GARCIA GALDAMEZ
NOEL BORROMEO LOPEZ BARAHONA
JOSE ERNESTO MUÑOZ ANGELES**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2011

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

:

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL

:

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO

:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO

:

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR

:

MSc. ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**APLICACIÓN DE LA PROSPECCION GEOFISICA UTILIZANDO EL
METODO SCHLUMBERGER PARA LA EXPLORACION DEL AGUA
SUBTERRÁNEA EN CANTON LOS MAGUEYES, COLONIA SANTA
LUCIA, MUNICIPIO DE AHUACHAPAN.**

Presentado por :

**JOSE ISIDRO GARCIA GALDAMEZ
NOEL BORROMEO LOPEZ BARAHONA
JOSE ERNESTO MUÑOZ ANGELES**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**ING. EDGAR ALFREDO GAVIDIA PAREDES
MSc.ING. DAVID ENOC ESCOBAR**

San Salvador, Abril de 2011

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

ING. EDGAR ALFREDO GAVIDIA PAREDES

MSc. ING. DAVID ENOC ESCOBAR

AGRADECIMIENTOS

Al iniciar nuestros estudios en la Universidad de El Salvador llegamos con muchos propósitos, ilusiones y sueños que alcanzar y con un objetivo principal graduarnos de Ingenieros civiles, hoy con el pasar de los años llegamos a tan ansiada meta con la satisfacción de ver reflejado todo el esfuerzo que nos acredita como Ingenieros civiles, mas orgullosos no podemos sentirnos y agradecidos con la vida y especialmente con nuestros seres queridos por habernos acreditado la responsabilidad de sacar adelante una carrera Universitaria. El camino estuvo lleno de dificultades y obstáculos que superamos gracias al esfuerzo colaboración de muchas personas, que de una manera directa o indirecta nos brindaron su apoyo y nos acompañaron en este largo camino, por eso este pequeño espacio de nuestro trabajo de graduación queremos dedicarlo y agradecer.

A nuestros asesores de tesis, Ingeniero EDGAR ALFREDO GAVIDIA PAREDES e Ingeniero DAVID ENOC ESCOBAR por brindarnos todo su apoyo, comprensión y conocimiento para llevar a cabo este trabajo de graduación con éxito ya que sin la participación de ellos no hubiera sido posible la realización de ésta investigación.

Al Ingeniero David Enoc Escobar por su tiempo, dedicación y acompañamiento en cada una de la visitas de campo que realizamos durante este trabajo de investigación.

A la Universidad de El Salvador por habernos permitido realizar nuestros estudios superiores y brindarnos los conocimientos y prepararnos como profesionales a través de la Escuela de Ingeniería Civil.

A la Escuela de Ciencias Naturales y Matemáticas en coordinación con la Escuela de Ingeniería Civil, por su apoyo facilitándonos desarrollar este trabajo de investigación mediante el préstamo del equipo.

A los Licenciados Tomas Soriano, Francisco Paul Rivera por el apoyo y acompañamiento durante las visitas de campo a la comunidad Los magueyes.

A la comunidad Los Magueyes por su colaboración y hospitalidad en cada una de las visitas de campo realizadas durante esta investigación.

Al Ing. Mario Roberto Nieto Lovo, Decano de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y al Director de la Escuela de Ingeniería Civil Ing. Fredy Orellana por su apoyo brindado en nuestro trabajo de graduación.

A todos los amigos y compañeros de la Universidad que durante este arduo pero placentero camino nos han brindado su amistad y acompañamiento, compartiendo mutuamente las alegrías y tristezas que la vida nos ha presentado en estos años tan maravillosos que hemos compartido juntos, especialmente a nuestro compañero y amigo de mil batallas Erick Elías Cabrera por su amistad y acompañarnos durante una etapa de nuestro trabajo de graduación.

BORROMEIO, ERNESTO E ISIDRO.

DEDICATORIA

Quiero aprovechar este espacio de mi trabajo de graduación para dedicar y agradecer a todas aquellas personas que de una forma directa o indirecta me han apoyado y acompañado en este arduo camino.

Mi trabajo de graduación lo dedico a la ENERGIA DIVINA "DIOS", por darme fortaleza, esperanza y enseñarme el camino correcto de la vida, brindándome día con día las cosas necesarias para vivir con gratitud y especialmente por darme una hermosa familia a quienes amo tanto.

A mis padres ISIDRO GARCIA MONGE y MARIA ENMA GALDAMEZ DE GARCIA, porque a pesar de todas las dificultades y obstáculos que la vida misma ha presentado, me han guiado con su amor, paciencia, conocimiento y enseñanza, dejando hasta su vida y corazón en cada esfuerzo para que me convirtiera en un profesional y especialmente en un ser humano de bien. Gracias mamá, gracias papá , que dios derrame sobre ustedes muchas bendiciones, y que este triunfo que no es más que el final de uno y el principio de muchos, vaya para con ustedes y puedan sentirse orgullosos, no de mi, si no de ustedes que son los artífices de este éxito cosechado porque sembraron, cuidaron y abonaron la esperanza de un día verme convertido en un profesional, y aunque a veces los asechaba la incertidumbre, porque de alguna manera nunca fue fácil económicamente hablando, nunca dejaron de confiar en mí, más entonces fue cuando me brindaron el mayor apoyo más orgulloso y agradecido no puedo sentirme de ustedes, gracias benditos padres.

A mis hermanos ABRAHAN GARCIA, DEYSI GARCIA, BLANCA MIRIAN GARCIA y FRANCISCO GARCIA por confiar y apoyarme sin ninguna objeción en este proyecto que hoy se da por culminado, acompañándome y apoyándome en las decisiones más difícil que he tomado, aun sabiendo que el camino estaría lleno de muchos obstáculos siempre han estado en esos momentos en cuanto los he necesitado.

A mi hermano MANUEL GARCIA (Q.D.D.G), a mi abuela MARIA MONGE (Q.D.D.G), por todas las alegrías que compartieron cuando aun formaban parte de esta vida y que desdichadamente vi morir, gracias les recordare y llevare en mi corazón siempre.

A mi abuela JUANA VARELA por su amor y cuidarme cuanto pudo y por haberme dado una madre tan maravillosa.

A alguien muy especial a quien amo mucho, mi novia JENY GUARDADO, gracias amor por compartir tantos momentos lindos de su vida conmigo, por su comprensión y acompañarme durante todos estos años de estudio.

A mis compañeros de tesis NOEL LOPEZ y ERNESTO MUÑOZ, por su amistad, tiempo y dedicación durante el desarrollo de este trabajo graduación, que dios les bendiga siempre, gracias compañeros.

No quiero morirme sin ver una cosa:
Ver este País enderezado, porque así como está, está muy pando.
¿Y cómo se va enderezar?
Usando la verdad y haciendo la Justicia.
Padre JON CORTINA 1934-2005.

José Isidro García Galdamez

DEDICATORIA

Para mis padres ANGELA GUILLERMINA BARAHONA DE LOPEZ y MARCOS JOSE LOPEZ MEJIA, por su comprensión y ayuda en momentos difíciles y menos difíciles. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

Gracias mamá y papá por darme la suficiente confianza y apoyo en la realización de mis estudios, este triunfo es de ustedes.

A mi hermano menor ALEX WALTER PONCE, que forma una parte fundamental en mi vida gracias a tu compañía y cariño demostrado, espero tener siempre un espacio en tu corazón no solo por ser mi hermano sino también por ser el mejor amigo que tengo.

Hermano este triunfo lo comparto contigo y te invito a luchar para superarte en la vida, recuerda que siempre tendrás mi apoyo incondicional.

A mi tío EDWARD BARAHONA por ser un apoyo incondicional en momentos difíciles y por ser un modelo de persona a seguir en mi vida, gracias tío por todos los consejos que me ha dado yo los he tomado y he tratado de reproducirlos en el desarrollo de mi vida, este triunfo también es suyo tío.

A mi novia SARA BEATRIZ por quererme y aceptarme tal como soy, desde que te conocí siempre me diste el apoyo moral que necesitaba para seguir adelante en mis estudios, gracias por todos los bellos momentos que me has dado espero seguirlos compartiendo durante toda mi vida a tu lado , este triunfo también te lo dedico a ti.

A mis abuelos FELICITA LIMA (Q.D.D.G), JULIO BARAHONA (Q.D.D.G) y AMINTA VDA. DE LOPEZ por ser como unos padres para mí y que siempre estuvieron a mi lado mostrando su

cariño y amor, abuelos siempre estarán presentes en mi corazón, los quiero mucho y jamás los defraudaré.

A mis compañeros en la Universidad que dejaron de existir físicamente CARLOS MAURICIO BELTRAN (Q.D.D.G) y CARLOS ANTONIO RODRIGUEZ (Q.D.D.G), grandes amigos y hermanos aunque no están presentes pero este logro académico es de ustedes también.

También le quiero dedicar este logro a mi tía ROXANA BARAHONA y a WALTER PONCE por la ayuda que recibí de ellos cuando la necesitaba.

A mis amigos y compañeros de tesis JOSE ISIDRO GARCIA GALDAMEZ y JOSE ERNESTO MUÑOZ ANGELES, que compartimos momentos memorables en la Universidad, compañeros misión cumplida, ahora a seguir luchando porque este es el inicio de otra etapa en nuestras vidas, les deseo éxitos y siempre espero mantenerme en contacto con ustedes amigos.

La manera cómo se presentan las cosas no es la manera como son;
y si las cosas fueran como se presentan la ciencia entera sobraría.

KARL MARX

Noel Borromeo López Barahona

DEDICATORIA

Primeramente quiero darle gracias a Dios Todopoderoso por darme vida, sabiduría y conocimiento en todo este tiempo y así poder finalizar mis estudios; sin él, no me encontraría terminando mi trabajo de graduación.

En segundo lugar, quiero dedicar este triunfo a mis Padres, José Gabriel Muñoz y Ana María Ángeles; por su apoyo incondicional; ya que ellos siempre tuvieron confianza en mí y pendientes de mi carrera.

A mis hermanos, Carlos Eduardo y Gabriel Gustavo, que de alguna u otra manera siempre aportaron su granito de arena para apoyarme.

A mi hija, Alisson Fabiola Muñoz, que con sus caricias y juegos; me daban fuerzas para seguir adelante y finalizar este trabajo.

A mi esposa, Sonia Carolina, por darme un apoyo incondicional a lo largo de mi carrera, que siempre estuvo dándome consejos para estudiar; que con su amor incondicional, me ayudo a levantar cabeza cuando la agachaba.

A mis compañeros de trabajo de graduación, por ser un buen grupo de trabajo y por su comprensión.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis compañeros de la Universidad, que en algún momento, cuando me decepcionaba, siempre me brindaban ánimos y apoyo para llegar a estas circunstancias.

¡MUCHAS GRACIAS A TODOS!

José Ernesto Muñoz Angeles

INDICE GENERAL

Pag.

CAPITULO I

ANTEPROYECTO

1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Objetivos	3
1.5 Alcances	4
1.6 Limitaciones	5
1.7 Justificación	5
1.8 Visita de Campo	5

CAPITULO II

AGUAS SUBTERRANEAS

2.1 Aguas Subterráneas	12
2.1.1 Origen de las Aguas Subterráneas	12
2.1.2 Infiltración del Agua en el Suelo	16
2.1.3 Formación de Acuíferos	22

CAPITULO III

MÉTODOS DE PROSPECCION GEOFISICA.

3.1 Propiedades Eléctricas de las Rocas	28
3.2 Generalidades de la Prospección Geofísica	30
3.2.1 Aplicación de la Prospección Geofísica a la Ingeniería Civil	30
3.3 Métodos de Prospección Geofísica	31
3.3.1 Métodos Eléctricos	31
3.3.1.1 Calicatas Eléctricas	31
3.3.1.2 Sondeos Eléctricos Verticales	32
3.3.1.2.1 Método Dipolo-Dipolo	34
3.3.1.2.2 Método Wenner	35

3.3.1.2.3 Método Schlumberger	36
3.3.2 Métodos Gravimétrico	38
3.3.3 Método Magnético	39
3.3.4 Método Electromagnético	40
3.3.5 Métodos Sísmicos	41
3.3.5.1 Método de Refracción Sísmica	42
3.3.5.2 Método de Reflexión Sísmica	43

CAPITULO IV

REALIZACION DEL LEVANTAMIENTO GEOFISICO UTILIZANDO EL METODO SCHLUMBERGER EN LA ZONA DE ESTUDIO

4.1 Aspectos Generales para el Desarrollo del Levantamiento	46
4.2 Información Previa	47
4.2.1 Ubicación de la Zona de Estudio	47
4.3 Descripción de las Características Hidrológicas del lugar de Estudio	48
4.4 Equipo Necesario para el Levantamiento	49
4.5 Procedimiento del Levantamiento	51
4.6 Resultados del Levantamiento	52

CAPITULO V

ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

5.1 Procesamiento de los Datos	55
5.1.1 Descripción del Programa de Cómputo	55
5.2 Análisis y Resultados del Modelo Utilizando el Programa DCINV	60

CAPITULO VI

INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

6.1 Resultados Preliminares Litológicos de la Zona	64
--	----

6.2 Ubicación del Pozo a Perforar	66
CAPITULO VII	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
7.1 Conclusiones	69
7.2 Recomendaciones	71
BIBLIOGRAFIA	73
ANEXOS	77
MAPA GEOLOGICO	78
MAPA TOPOGRAFICO	
GLOSARIO DE TERMINOS	79

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1a y b Pozo, Bomba y Cisterna Existentes	7
Figura 1.2 Ubicación de Pozo y Tanques Existentes	8
Figura 1.3 Vegetación de la Zona	9
Figura 1.4 Suelo con Presencia de Material Arcilloso	10
Figura.1.5a y b Areas para Sondeos	10
Figura 1.5c Area para Sondeo	11
Figura 2.1 Corrientes Influentes y Corrientes Efluentes	18
Figura 2.2 Acuífero Libre	23
Figura 2.3 Acuífero Confinado	23
Figura 2.4 Acuífero semiconfinado	24
Figura 2.5 Acuíferos colgados	25
Figura 2.6 Relación entre acuíferos	25
Figura 2.7 Acuíferos Acuícludos	26
Figura 2.8 Acuífero Acuitardo	27
Figura 2.9 Acuífero Acuífugo	27
Figura 3.1 Arreglo Calicatas Eléctricas	32
Figura 3.2 Arreglo Sondeo Eléctrico Vertical. SEV	34
Figura 3.3 Arreglo Método Dipolo – Dipolo	35
Figura 3.4 Arreglo Método Wenner	36
Figura 3.5 Arreglo método Schlumberger	38
Figura 4.1 a y b Equipo a Utilizar en el Levantamiento de Sondeos Eléctricos Verticales	49
Figura 4.2 Hoja de campo para registro de datos geofísicos	50
Figura 4.3 Toma de datos del Sondeo No1, y Grafico preliminar	52
Figura 4.4 Toma de datos sondeo No 2, y Grafico preliminar	53
Figura 4.5 Toma de datos sondeo No 2, y Grafico preliminar	54
Figura 5.1 Introducción de los datos de campo en un bloc de notas	57
Figura 5.2 Ambiente del programa DCINV	58
Figura 5.3 Diferentes opciones y propiedades del DCINV	59
Figura 5.4 Modelo sondeo N°1	60
Figura 5.5 Modelo del Sondeo N°2	61
Figura 5.6 Modelo del Sondeo N°3	62
Figura 6.1 Diagrama de la Posible Litología del lugar de Estudio	65
Figura 6.2 Ubicación de los sondeos las alternativas posibles para la perforación del pozo	67

INDICE DE TABLAS

	Pag
Tabla 2.2 Distribución del agua lluvia en distintos terrenos y sus características	21
Tabla 3.1 Resistividad de algunos minerales y rocas	30
Tabla 3.2 Resistividades de las aguas según el medio en que se encuentre	30
Tabla 3.3 Resumen de los métodos de prospección geofísica	45
Tabla 4.1 Datos de precipitación de la Cuenca del Rio Escalante de 1990 – 1995	49
Tabla 4.2 Equipo para el levantamiento de datos geofísicos	50
Tabla 5.1 Resumen de espesores de los estratos del sondeo N° 1	61
Tabla 5.2 Resumen de espesores de los estratos del sondeo N° 2	62
Tabla 5.3 Resumen de espesores de los estratos del sondeo N° 3	63
Tabla 6.1 Materiales y sus resistividades	65
Tabla 6.2 Resumen de la litología probable	66
Tabla 7.1 Resumen de capas y sus resistividades	70

RESUMEN EJECUTIVO

La prospección geofísica es una herramienta importante en la exploración de las aguas subterráneas en una zona determinada, son métodos indirectos que resultan ser económicos y precisos al momento de decidir los lugares óptimos para la perforación.

En el Cantón Los Magueyes, Colonia Santa Lucía, Municipio de Ahuachapán la problemática de escasez de agua es un inconveniente que posee la comunidad para el desarrollo de la misma, el Cantón ya cuenta con un pozo que distribuye el recurso hídrico a los habitantes de la zona pero este no es suficiente pues no logra abastecer de una forma constante a la población, ya que ellos lo reciben de una forma racionada.

En el presente trabajo de graduación se utilizó el método eléctrico de prospección geofísica conocido como Schlumberger. La razón por la cual escogimos utilizar este arreglo es porque es más eficiente en cuanto a la exploración que deseamos realizar ya que esta metodología nos permite obtener las variaciones verticales de la resistividad con mayor precisión que se puedan encontrar en el subsuelo, y por el otro lado el aspecto económico, porque este método no se necesita de gran cantidad de personal de campo para desarrollar la investigación.

Se realizaron 3 levantamientos en la zona de estudio, ubicados estratégicamente con el fin de tener datos representativos de la investigación, obteniéndose así el nivel freático al que se encuentra la zona analizada y auxiliándonos del programa DCINV (Direct Current Inverse) logramos establecer a qué profundidad se encontraba el agua, además se poseía los datos del pozo existente y se tuvo cierta semejanza con los datos obtenidos comparados con los datos del pozo existente con lo cual se hicieron una serie de conclusiones y recomendaciones al final del documento, esto con el objetivo de dar una propuesta para la ubicación de un pozo y que en el futuro pueda ser desarrollado y explotado en beneficio de la comunidad.

CAPITULO I

ANTEPROYECTO

1.1 INTRODUCCION

Desde la antigüedad el hombre siempre se ha interesado por comprender todos los fenómenos que ocurren en la tierra, surgiendo de esta manera muchas ciencias que se han dedicado a su estudio, entre ellas se encuentran los métodos de exploración geofísica que se dedican a estudiar en forma cuantitativa los procesos naturales en la Tierra. Hoy en día existen métodos e instrumentos que se han ido desarrollando para esta medición, por ejemplo, causadas por los cambios en las propiedades físicas del subsuelo, ondas electromagnéticas, ondas sísmicas, el magnetismo terrestre, la fuerza de gravedad, etc.

Desde sus inicios los métodos de exploración han alcanzado grandes éxitos en la búsqueda de yacimientos, efectuando algunos descubrimientos espectaculares de depósitos de minerales, aguas subterránea, estructuras arqueológica entre otros y que gracias a los avances tecnológicos se han perfeccionado y transformado con el fin de lograr un mejor desarrollo y bienestar de la humanidad. No obstante, los métodos de exploración de geofísica no siempre son útiles de encontrar directamente los depósitos, sino que su éxito depende de detectar estructuras geológicas que indican la existencia de recursos naturales de gran valor económico. Para esto es necesario de seleccionar el método de prospección que más se adecue al recurso buscado.

En general, al aplicar los conocimientos de prospección geofísica se deben hacer todos los estudios respectivos que aseguren el hallazgo de posibles depósitos, valiéndose para ello de varios métodos geofísicos: magnéticos, gravimétricos, eléctrico, electromagnético, sísmico y el método radiométrico, los cuales se aplicarán dependiendo de la sensibilidad del método a las propiedades físicas de roca relacionada con el recurso buscado.

En nuestro trabajo de graduación, se implementará el método eléctrico, específicamente el Schlumberger, para la investigación de acuíferos, en Cantón los Magueyes, Colonia Santa Lucia Municipio de Ahuachapán ya que esta metodología es una de las más indicadas para correlacionar adecuadamente las mediciones geofísicas de resistividad con los estratos geológicos permeables.

1.2 ANTECEDENTES

La prospección geofísica incluye el conjunto de técnicas físicas y matemáticas, aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda y estudio de las características de recursos naturales útiles como petróleo, aguas subterráneas, minerales, carbón etc. O de vestigios arqueológicos, entre otros por medio de observaciones geofísicas efectuadas en la superficie de la tierra.

La utilización de la prospección eléctrica como tal fue desarrollada en California por primera vez en la década de 1920 por Conrad y Marcel Schlumberger, por lo que fueron los primeros pasos que se dieron para el desarrollo de la metodología que se presenta en este trabajo.

Hay diferentes tipos de exploración tanto directas como indirectas, para nuestro caso, los directos son aquellos en que para llegar a identificar un acuífero subterráneo se realizan una serie de perforaciones para lograr determinar la localización del vital recurso. El método indirecto que se aplicara en este trabajo es un método que con la ayuda del equipo apropiado se inyecta corriente al subsuelo mediante la interpretación de las resistividades detectadas de las diferentes estructuras geológicas del subsuelo se puede establecer la ubicación y profundidad del acuífero.

Por ello nuestro tema a desarrollar tiene por principio aplicar los métodos de prospección geofísica específicamente Schlumberger para la exploración de las aguas subterráneas. Estas son técnicas poco difundidas en el sector de ingeniería pero bastante útiles para la localización de este vital recurso, además esperamos que este trabajo presente aportes de beneficio a nuestra carrera.

Para aplicar esta metodología se ha seleccionado el Cantón los Magueyes en el Municipio de Ahuachapán en donde se necesita identificar, si existe un acuífero subterráneo y su respectiva profundidad para que luego pueda ser explotado utilizando por medio de pozos de bombeo en un futuro inmediato en beneficio de la comunidad.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en nuestro país y en muchas regiones del mundo, el abastecimiento de agua para satisfacer las distintas necesidades del ser humano ha venido decreciendo constantemente, esto debido a la deforestación, contaminación del agua, la mala distribución y aprovechamiento del recurso.

La escasez de agua potable es uno de los mayores problemas que afecta a los habitantes de las regiones aledañas al área de estudio, actualmente en la zona bajo estudio se cuenta con un pozo administrado por ANDA, el cual ya no tiene la capacidad de abastecer a toda la población debido al crecimiento poblacional que ha tenido dicha región en los últimos años, por lo que muchos de los habitantes se han visto en la necesidad de adquirir el recurso de zonas donde el mismo no cuenta con la calidad necesaria para el consumo humano lo que trae graves riesgos en la salud de los pobladores, ya que no cuentan con el recurso para cubrir sus necesidades personales lo que facilita la proliferación de enfermedades.

Debido a este problema, el trabajo consiste en la aplicación de la prospección geofísica utilizando una técnica geoelectrica (método Schlumberger), para la investigación del agua subterránea en Cantón los Magueyes Municipio de Ahuachapán, con el propósito de encontrar un área donde el nivel freático esté a una profundidad considerable, para que posteriormente sea posible la explotación del acuífero mediante la perforación de pozos y así dicha población tenga una fuente de abastecimiento segura para satisfacer sus necesidades.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Aplicar la prospección geofísica para la exploración de las aguas subterráneas, utilizando el método Schlumberger en Cantón los Magueyes Municipio de Ahuachapán, con la finalidad de encontrar el acuífero para que a continuación se logre la explotación del mismo y beneficiar a la comunidad.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la profundidad a la que se encuentra el posible acuífero en Cantón los Magueyes Municipio de Ahuachapán.
- Determinar las características resistivas de los diferentes estratos que se encuentran sobre el acuífero y a partir de ello identificar de ser posible la litología probable que se encuentra sobre o alrededor del acuífero.
- Utilizar un programa especializado de cómputo para analizar e interpretar los resultados de resistividad aparente medidos en el campo, y que pueda estar a disposición de todo Ingeniero Civil que desee hacer uso de esta técnica.
- Elaborar una metodología clara que pueda servir de referencia a nuestros ingenieros que se involucren en la búsqueda de recursos acuíferos en otras zonas en El Salvador.

1.5 ALCANCES

Tomando en cuenta los aspectos arriba mencionados, el presente trabajo de graduación se tendrá las siguientes consideraciones:

- Se realizarán al menos tres sondeos en la zona de estudio con el método Schlumberger tomando los datos correspondientes desde un resistivímetro, para luego procesarlos e interpretarlos con criterios geológicos y auxiliados con programas de cómputo que ayudaran a determinar con una adecuada precisión la profundidad a que se encuentra el acuífero.
- Se harán visitas de campo auxiliados de mapas topográfico, hidrológico y geológico que permitan seleccionar un lugar donde haya mayor recarga hídrica en el área de interés y que servirá de base para realizar la investigación.
- La zona de estudio comprenderá un área de 5 km².

1.6 LIMITACIONES

- No se observó ninguna limitación que nos impidiera realizar el trabajo de graduación.

1.7 JUSTIFICACIONES

La disponibilidad de los recursos hídricos a nivel mundial es una fuente de vida, y el hombre en su afán de adquirirlo, durante épocas muy remotas ha ido aplicando distintos métodos para la obtención del valioso recurso, valiéndose para ello, de los avances tecnológicos y de equipos cada vez más desarrollados que facilitan la exploración y explotación del mismo, para satisfacer las distintas necesidades para una mejor calidad de vida.

Las aguas superficiales en el país como son el río Acelhuate, río Sucio y otros, están contaminadas debido a la educación ambigua de nuestro país, por lo tanto se ha llevado a la exploración y explotación de aguas subterráneas que están menos expuestas a contaminantes por la profundidad a la que se encuentran. El presente trabajo de graduación se hace con el fin de contribuir a la sociedad con la búsqueda de posibles mantos acuíferos en lugares determinados, para abastecer comunidades, por medio de la aplicación de métodos de prospección geoeléctrica.

Cabe aclarar aquí que antes de utilizar el recurso directo de la perforación es conveniente realizar estudios de investigación para ubicar el pozo en lugares convenientes y con mayor probabilidad de detectar el recurso acuífero. Esto contribuirá a disminuir considerablemente los tiempos y costos en la búsqueda del recurso.

1.8 VISITA DE CAMPO A CANTON LOS MAGUEYES

Una parte importante de este trabajo de graduación, es el levantamiento geofísico utilizando el método Schlumberger para explorar las aguas subterráneas en el Cantón Los Magueyes con el

fin de identificar un acuífero que permita la perforación de un futuro pozo. Por lo que la visita de campo es de mucha importancia para conocer los pormenores del lugar, y así identificar zonas estratégicas que reúnan las condiciones necesarias para los distintos sondeos a realizar, además tener un contacto directo con la población para observar sus necesidades en cuanto al uso del agua y las diferentes limitaciones del mismo.

También la visita de campo nos permite identificar la topografía de la zona, el tipo de vegetación, zonas de recarga, cantidad de población, tipo de suelo, la red de distribución existente y el tipo de organización que posee la comunidad en cuanto al manejo y distribución del agua en el Cantón Los Magueyes.

Un factor primordial y por el cual se ha designado realizar la investigación en dicho lugar es por la falta del recurso, pues actualmente no se cuenta con un suministro continuo debido a que el pozo existente, ubicado en el Cantón los Magueyes, y que para un mayor alcance del proyecto cuando se dio apertura en 1978 por PLANSABAR, fue de brindarle el servicio a los Cantones El Barro y Cantón Ashapuco. Con el crecimiento de la población el suministro ha venido decreciendo constantemente de tal forma que reciben el agua cada tres días en cada uno de los cantones y luego se suspende el servicio, existen en la comunidad familias a las que no les llega el agua hasta sus hogares, y adquieren el recurso de cantareras ubicadas dentro del Cantón y en otros casos se adquiere el recurso de quebradas cercanas a la comunidad, el cual es utilizado específicamente para otras necesidades como lavar ropa. El proyecto actual cuenta con dos tanques uno con capacidad de almacenamiento de 200 metros cúbicos y el otro con capacidad de 50 metros cúbicos hasta donde el recurso llega mediante bombeo y luego se suministra por gravedad a los diferentes cantones. Un aspecto importante es que la distribución del agua potable y mantenimiento del equipo de bombeo corre por cuenta de la comunidad a través de una Junta De Agua que está compuesta por las diferentes directivas de dichos cantones,

El Cantón los Magueyes cuenta con cuatro caseríos, Los Magueyes, Santa Lucía, Los bonito y caserío El Vallecito y cuenta con una población de 5,365 habitantes, además los Cantones El Barro y Ashapuco cuentan con una población de 7,180 y 3,639 habitantes respectivamente, por lo que el pozo actual está brindando un suministro de agua a 16,184 habitantes.



Figura 1.1a Pozo y Cisterna



Figura 1.1b Bomba

El pozo ubicado en el Cantón Los Magueyes (figura 1.1a y 1.1b). Posee una profundidad 91.4 m. y un nivel estático de 18.30 mts que este a su vez como mencionamos anteriormente abastece a los cantones Los Magueyes, El Barro y Ashapuco con un caudal de 4.88 l/s. Dicho pozo genera diariamente 800 m³ de agua, en la que se ubican dos bombas (figura 1.1a y 1.1b). Una de 50 HP que trabaja 16 horas y otra de 30 HP que lo hace durante 4 horas, esto con el objetivo de realizar una eficiente distribución del agua.

El agua llega mediante bombeo al tanque de 200m³ y al de 50m³ lo hace mediante rebombeo por medio de una bomba de 7HP colocada en la línea de impelencia, para luego distribuirla por gravedad a los diferentes cantones a través de la red de distribución.

ESQUEMA DE UBICACION DE DEL POZO Y TANQUES EXISTENTE EN CANTON LOS MAGUEYES

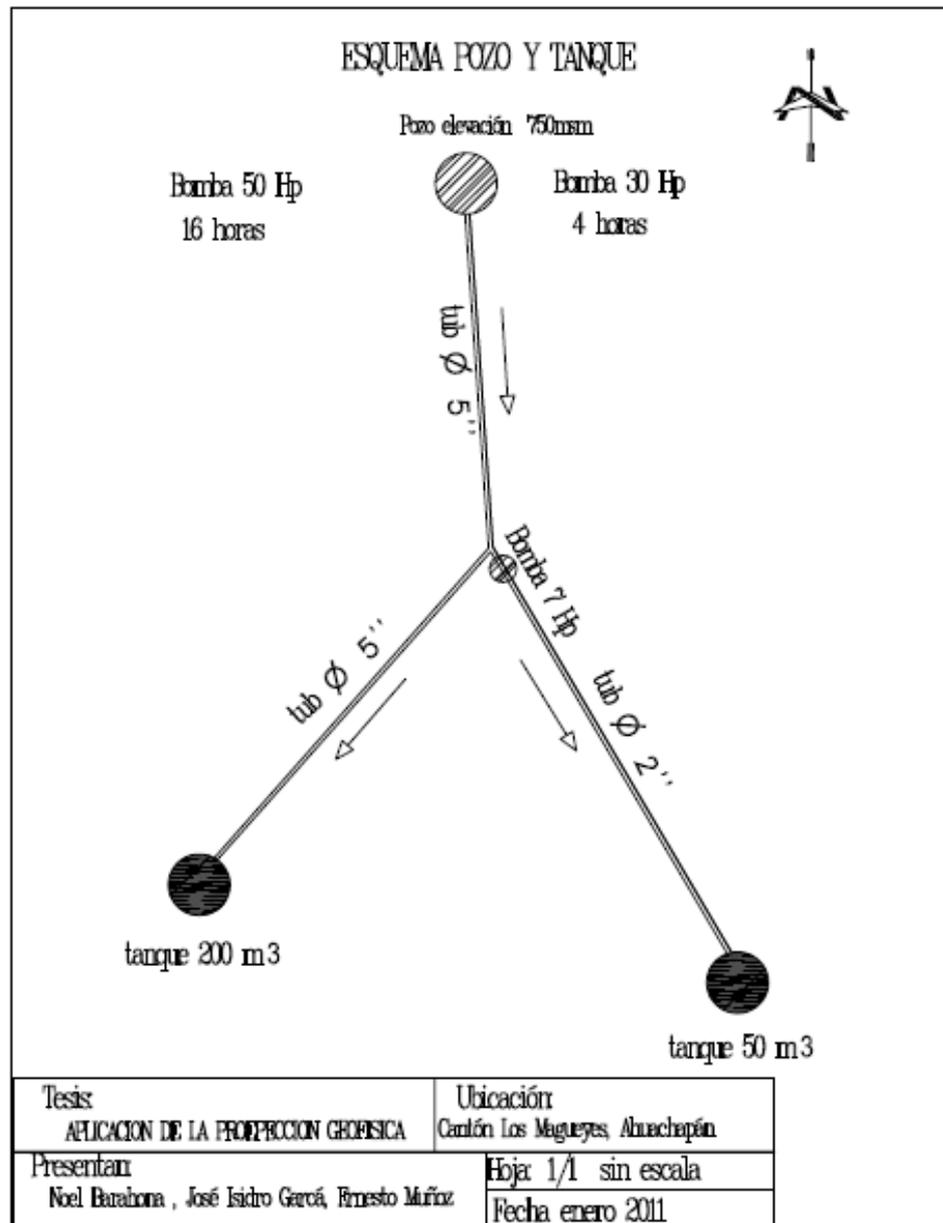


Figura 1.2 ubicación de pozo y tanques existentes

La figura 1.2 representa la ubicación del pozo y tanques de almacenamiento de agua en el Cantón los Magüeyes, las características de la línea de impelencia, y bombas utilizadas para la extracción.

GEOGRAFIA DE EL CANTON LOS MAGUEYES MUNICIPIO DE AHUACHAPAN

El Cantón los magueyes está situado a 3km del municipio de Ahuachapán y 103 km de distancia de la ciudad capital San Salvador, con coordenadas geográficas, latitud(DMS) 13°55'60"N, longitud 89°49'00"W, altitud 790msm y está limitado al Norte por El Cantón Ashapuco y la carretera CA-8; al Este por El Municipio de Santa Ana; al Sur por Concepción de Ataco, Apaneca y Tulapa; y al Oeste por El municipio de Ahuachapán. El clima de esta zona es muy caluroso las temperaturas oscilan entre los 22° y 27°C.

TOPOGRAFIA DE LA ZONA

El Cantón Los Magueyes en El municipio de Ahuachapán está situado "en la Meseta Central con topografía más o menos plana, con predominio de pendientes menores del 15%". (Monografía de Ahuachapán, 2003).

TIPO DE VEGETACION



Figura. 1.3 Tipo de vegetación.

La vegetación está constituida por bosques húmedo subtropical fresco, bosque muy húmedo subtropical y bosque muy húmedo montano bajo. Las especies arbóreas más notables son: Ceibas, Pinos, Pepetos y Madre Cacao (Monografía de Ahuachapán, 2003). Figuras 1.3a y 1.3b En los lugares frescos como Ahuachapán se observa mucha arboleda con vegetación abundante, siembra de café, maíz, frijoles, árboles frutales etc.

TIPO DE SUELO



Figura 1.4. Suelo con presencia de material arcilloso

Las figuras 1.4a y 1.4b tomadas durante las visitas de campo a la zona, muestran el tipo de suelo encontrado superficialmente en cada uno de los puntos elegidos para realizar los sondeos, y que mediante la aplicación de conocimientos básicos sobre suelos (Ensayo Visual-Manual), se determinó que son suelos con mucha presencia de materiales arcillosos, y sobre los cuales se tendrán resultados más puntuales cuando se analicen los datos de resistividades y modelos arrojados por el programa de cómputo, DIRECT CURRENT INVERSE (DCINV), sobre la litología de las diferentes capas de suelo. (Capítulo VII)

AREAS ESTRATEGICAS PARA REALIZAR LOS SONDEOS GEOFISICOS



Figura 1.5a Area para Sondeo 1



Figura 1.5b Area para Sondeo 2



Figura 1.5c Area para Sondeo 3

Las figuras 1.5a, b y c representan las áreas seleccionadas para realizar los levantamientos geofísicos ya que estas proporcionan condiciones adecuadas para llevar a cabo dicha investigación, las cuales presentan una superficie bastante plana, buena visibilidad, además están aisladas de redes eléctricas y presentan una buena recarga hídrica.

El área para el sondeo número uno, figura 1.5a, está ubicada en un espacio destinado a actividades agrícolas con coordenadas geográficas $x=194672$, $y=1540924$ y elevación 700m.s.m, el área designada para realizar el sondeo número dos que se ilustra en figurara 1.5b, está situada a una distancia de aproximadamente 250 metros del pozo existente en dirección noroeste y coordenadas geográficas, $x=193553m$, $y=1541406m$ y elevación 778m.s.m. y para el sondeo tres figura 1.5c, un área a 150 metros del pozo existente en dirección suroeste con coordenadas geográficas $x=194967$; $y=1541286$ y elevación 765m.s.m.

CAPITULO II

AGUAS SUBTERRANEA

2.1 AGUAS SUBTERRANEAS

2.1.1 ORIGEN DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.

El origen de las aguas subterráneas es uno de los problemas que más han preocupado al hombre desde los tiempos más remotos. La teoría de la infiltración, que supone que todas las aguas subterráneas provienen bien de infiltración directa en el terreno de las lluvias o nieves, o indirecta de ríos o lagos, no ha sido aceptada universalmente, sino desde tiempos relativamente reciente. Por un explicable error colectivo, que duró decenas de siglos, los pensadores de la antigüedad aceptaban como axiomático que las precipitaciones atmosféricas no eran suficientes para mantener los grandes caudales subterráneos que emergían espontáneamente o eran alumbrados por la mano del hombre en algunos puntos de la superficie terrestre.

No se conservan datos sobre el pensamiento de las civilizaciones orientales antiguas en relación con los orígenes de las aguas subterráneas. Sólo a partir de los antiguos griegos se conocen sus teorías al respecto. Es sorprendente la falta de experimentación que acompaña a las teorías antiguas, algunas de ellas realmente inteligentes e imaginativas, pero que hubieran sido fácilmente abandonadas mediante alguna simple medición o experimentación directa.

La mayoría del agua subterránea se origina como agua meteórica que cae como precipitación en forma de lluvia o nieve. Si no se pierde por la evaporación, transpiración de las plantas o escorrentía, el agua se infiltra en el terreno. Al principio ciertas cantidades de agua de precipitación que cae en el suelo seco se retienen fijamente como una película en la superficie y en los micro poros de las partículas del suelo. La mayoría de las rocas contienen un gran número de espacios abiertos llamados intersticios, aberturas o poros, en los cuales el agua puede ser almacenada y a través de los cuales puede moverse. El agua que llena parcialmente los intersticios es llamada agua superficial o vadosa y se encuentra en la zona de aireación. Inmediatamente por debajo de esta y donde los intersticios o aberturas se hallan completamente

lentos de agua, está la zona de saturación. El agua contenida en esta zona es llamada agua subterránea.

La verdadera fuente de casi todas las reservas de agua dulce la constituye la precipitación que cae sobre el área terrestre. Parte del agua lluvia se percola por debajo de la zona radicular de las plantas y mediante la influencia de la gravedad continua su movimiento descendente hasta que llega al depósito subterráneo. Prácticamente toda el agua subterránea se origina como agua superficial. La ecuación básica del agua subterránea que permite una aproximación de la disponibilidad de agua subterránea, puede ser establecida considerando todos aquellos factores del ciclo hidrológico que tienen un efecto directo en el flujo y almacenamiento del agua en el acuífero. La ecuación puede ser formulada como sigue:

$$V = \text{RECARGA} - \text{DESCARGA}$$

Donde V es el cambio en el almacenamiento subterráneo durante un determinado periodo.

El agua subterránea puede circular y almacenarse en el conjunto del estrato geológico: este es el caso de suelos porosos como arenosos, de piedra y aluvión. Puede circular y almacenarse en fisuras o fallas de las rocas compactas que no son en ellas mismas permeables, como la mayoría de rocas volcánicas y metamórficas. El agua corre a través de la roca y circula en fisuras localizadas y dispersas. Las rocas compactas de grandes fisuras o cavernas son típicamente calizas.

Factores que condicionan la presencia y el movimiento del agua subterránea

La presencia y el movimiento del agua subterránea están condicionados por ciertos factores entre los que se cuentan como más importantes.

- a) La precipitación,
- b) La forma del terreno,
- c) La geología,
- d) La presencia o ausencia de vegetación.

La Precipitación: Es importante considerar a la precipitación, si se toma en cuenta que la mayor parte del agua del subsuelo proviene de la infiltración de la lluvia. Las zonas lluviosas constituyen, en mayor o menor grado, zonas de alimentación del agua subterránea, por lo que en las zonas secas el agua subterránea no proviene de la infiltración directa, procede de regiones lejanas o cercanas, en donde la lluvia se infiltra y llega lentamente hasta ellas. La precipitación es muy importante en dos aspectos, en su cantidad y en su duración.

La forma del terreno: Este aspecto interesa a la hidrología tanto superficial como subterránea, ya que el relieve da lugar a la formación de las cuencas hidrográficas, indicando así el camino que seguirá el agua al caer a la superficie.

Por lo que se refiere a la hidrogeología, la forma del terreno es importante, porque el agua tendrá mayor o menor oportunidad de infiltrarse y, además, porque el agua infiltrada va a seguir una trayectoria determinada por dicho factor; así, en una región montañosa la pendiente del terreno por una parte, dará más facilidad al agua para escurrir que para infiltrarse y, por otra, el agua que llegue a la zona de saturación tendrá un movimiento hacia las zonas más bajas en donde el movimiento del agua será más lento y facilitará su acumulación, o también, según la constitución del terreno, el agua puede salir en forma de manantiales en las laderas de las montañas. En una zona más o menos plana el agua tendrá mayor oportunidad de infiltrarse y habrá más facilidad de encontrar depósitos mayores de agua subterránea, ya que ahí se tiene tanto el agua infiltrada localmente como la descarga de regiones montañosas vecinas.

La forma del terreno es fundamental, pues en general las partes altas constituyen zonas potenciales de recarga y las bajas de descarga del flujo de agua subterránea.

Las corrientes fluviales pueden influir en el aumento de agua del subsuelo, especialmente en la época de lluvia. Las zonas de descarga, además de manantiales, pueden estar representadas por cuerpos de agua, humedales, suelos salinos, entre otros.

La Geología: El aspecto geológico desempeña un papel muy importante en la hidrogeología, ya que la velocidad de movimiento depende de la estructura y composición litológica de las

formaciones, para que el agua pueda transitar por el subsuelo. Las diferentes formaciones poseen ciertas propiedades que son definitivas para poder constituir buenos acuíferos. Estas propiedades son la porosidad y la permeabilidad (o más estrictamente la conductividad hidráulica).

Entre materiales permeables tenemos:

- a) Muy permeables: Lavas cavernosas, Gravas, Arenas gruesas.
- b) Permeables: Arenas finas, Conglomerados, Areniscas, Calizas no muy fracturadas.
- c) Poco permeables: Gravas con arcillas, Margas, Calizas margosas.

La presencia o ausencia de Vegetación: Es un factor que en partes topográficamente altas influye en la infiltración y por lo tanto, contribuye a la recarga del agua subterránea. El suelo, hidrogeológicamente hablando está estrechamente ligado con la cubierta vegetal. Las raíces de las plantas y los animales propios del suelo lo horadan haciéndolo más poroso y dándole así oportunidad al agua para pasar a través de él. La vegetación puede facilitar la infiltración aun en los suelos duros y arcillosos.

En lo que respecta a este factor, es interesante hacer alusión a la existencia de ciertos tipos de plantas que se alimentan de la descarga del agua subterránea, que no pertenecen a un género o familia en especial, sino que su única característica en común es que satisfacen sus necesidades extendiendo sus raíces hasta el manto freático. A este grupo peculiar de plantas se le ha dado el nombre de freatófitas, pueden servir como indicadoras de la presencia de agua subterránea e inclusive de la calidad de la misma. Suelen presentarse en las márgenes de los ríos y son propias de regiones semiáridas, donde el agua subterránea aflora en forma permanente, no dependiendo de la precipitación directa en el área.

Movimiento o flujo del agua subterránea.

Un sistema hidrológico en el que se considera que el agua subterránea fluye en forma horizontal, y en el cual normalmente la información hidrológica se utiliza para describir un sistema estático

en un medio geológico considerado equivalente a un medio granular con propiedades (porosidad y permeabilidad), cuyo valor es igual en todas direcciones, rara vez se presenta en el medio natural.

Un sistema hidrológico subterráneo dinámico es más representativo de la realidad y las investigaciones en este campo toman en cuenta el movimiento vertical del agua subterránea. En acuíferos de gran espesor (1000 m o más), el flujo vertical controla el movimiento del agua subterránea, control que marca un comportamiento particular en las zonas de extracción por pozos, en especial en las zonas de recarga (hacia abajo) y en las de descarga (hacia arriba).

Si se detiene por un instante el flujo de agua subterránea, se puede estimar la forma de su movimiento en el plano horizontal y en el plano vertical, lo que resultará en la definición de áreas de recarga y áreas de descarga. Existen tres sistemas principales de flujo de agua subterránea que se establecen de acuerdo con la topografía y al marco geológico presente: local, intermedio y regional. Una topografía abrupta producirá varios sistemas locales, en cada topografía el agua entra y sale en el mismo valle. En algunos casos parte del agua de recarga podrá descargar en otro valle localizado a un nivel topográfico menor, esto definirá un sistema intermedio.

Todos estos flujos, en un ambiente natural, mantienen un recorrido separado, al igual que las corrientes marinas o las aguas de dos ríos antes de confluir para formar otra. Las zonas de recarga y descarga están estrictamente controladas por un flujo vertical con una componente de movimiento hacia abajo y hacia arriba, respectivamente. El despreciar estas componentes de flujo vertical del agua subterránea ha generado impactos ambientales serios y algunas veces irreversibles.

2.1.2 INFILTRACION DEL AGUA EN EL SUELO.

La infiltración se produce en el terreno por la acción conjunta de dos fuerzas, en donde interactúa la gravedad y la atracción molecular, las que pueden actuar en un mismo sentido o bien en forma opuesta, según las circunstancias. La magnitud de la infiltración y por lo tanto de la alimentación de las aguas subterráneas, se ve influenciada por dos tipos de condiciones; las que indican

relación con las precipitaciones, que constituyen la fuente misma de origen del agua, y las que indican relación con las condiciones del terreno, que son las responsables de las mayores o menores facilidades existentes para la infiltración y que determinan finalmente la proporción de las precipitaciones que pueden llegar a constituir una recarga de las aguas subterráneas. En este segundo tipo deben incluirse además las condiciones geológicas del subsuelo que son las que fijan la existencia y potencia de rellenos permeables, es decir, determinan la capacidad del subsuelo para recibir y regular el agua proveniente de las infiltraciones. De acuerdo con los conocimientos que se tienen del ciclo hidrológico, las precipitaciones que caen sobre la tierra siguen distintos caminos, los que en rasgos muy generales pueden resumirse en: una parte no alcanza a llegar al suelo siendo retenida por el follaje de la vegetación, esta parte que recibe el nombre de interceptación, es devuelta nuevamente a la atmósfera por evaporación. La parte que llega al suelo se mueve a través de la superficie de éste en un proceso designado como infiltración. Si la intensidad de las precipitaciones sobrepasa la capacidad de infiltración del terreno, se produce un movimiento de agua por superficie, conocido con el nombre de escurrimiento superficial, cuyo caudal en cada instante es igual a la diferencia entre la intensidad de la precipitación y la capacidad de infiltración del suelo.

Del agua infiltrada en el terreno, una parte vuelve por capilaridad a la superficie donde se evapora, o bien es extraída por las raíces de las plantas y utilizada en su proceso de transpiración, del resto del agua infiltrada otra porción queda destinada a completar la capacidad de retención del suelo en la zona no saturada e incluso su capacidad capilar ubicada inmediatamente sobre el nivel de saturación, mientras el saldo continúa su descenso por acción de la gravedad pasando a constituir lo que ya hemos designado como la recarga de las aguas subterráneas.

La recarga de la zona de saturación debida a la aportación de las precipitaciones atmosféricas puede descomponerse en tres etapas, que son:

- a) infiltración del agua desde la superficie al terreno que yace inmediatamente bajo ella
- b) movimiento descendente del agua a través de la zona de aireación o no saturada
- c) entrada del agua en la zona de saturación, donde pasa a formar parte de las propiamente llamadas aguas subterráneas.

Evidentemente, una parte del agua que entra en la zona de aireación vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración vegetal, perdiéndose así su incorporación a la zona de saturación.

Infiltración de las Corrientes Superficiales: Las corrientes se clasifican en general en dos categorías: corrientes influentes y corrientes efluentes (figura 2.1). En las primeras, el nivel de las aguas superficiales está por encima de la superficie freática libre y el agua pasa desde la corriente superficial a la zona de saturación. Por el contrario, una corriente se llama efluente si su nivel está por debajo del nivel freático y por tanto, recibe aportaciones de agua subterránea de los mantos de las laderas. En algunas regiones relativamente lluviosas, casi todas las corrientes de agua de flujo perenne o casi perenne son efluentes. En estas regiones, la recarga tiene lugar en las zonas existentes entre dos ríos o arroyos, de manera que las corrientes sirven como canales de drenaje natural que descargan el exceso de caudal de los almacenes subterráneos de agua. La recarga tiene lugar principalmente por la penetración vertical de la lluvia y del agua de las nieves en la inmediata vecindad de su punto de precipitación. Sin embargo, cuando la intensidad de precipitación de lluvia o nieve es superior a la velocidad con que puede infiltrarse el agua a través de la superficie del terreno, este exceso de precipitación correrá sobre la superficie en la dirección de su máxima pendiente.

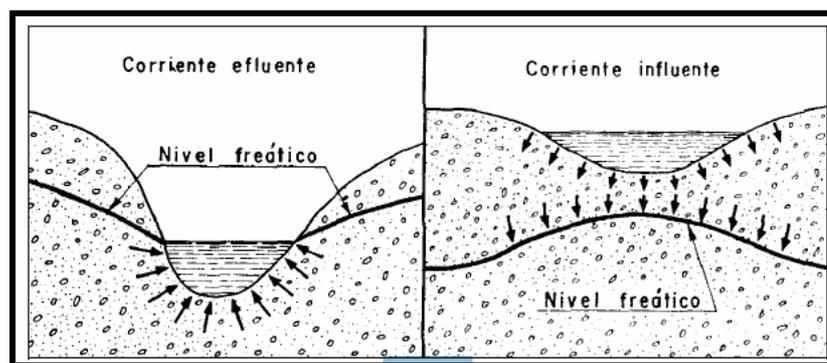


Figura 2.1 Corrientes influentes y corrientes efluentes (<http://www.cec.uchile.cl>)

Condiciones determinantes de la recarga

Las condiciones que determinan la velocidad y caudal de la recarga de aguas subterráneas pueden ser de dos categorías: aquellas relacionadas con la precipitación, como verdadera fuente de abastecimiento, y aquellas relacionadas con la facilidad de entrada del agua en el terreno, las cuales determinan la proporción de agua de lluvia o nieve que alcanza los depósitos subterráneos.

La precipitación varía grandemente en cantidad de unos sitios a otros y es también notablemente variable con el tiempo en cualquier sitio determinado. La recarga de agua subterránea varía mucho también de un sitio a otro y de unas épocas a otras, no sólo porque las condiciones de entrada son también variables, sino también porque, incluso con las mismas condiciones de toma, la relación de la recarga a la precipitación varía grandemente con la cantidad y distribución de las precipitaciones y según tengan lugar como lluvia o como nieve.

En general, la proporción de precipitación que puede transformarse en aguas subterráneas aumenta con la precipitación, pero sólo hasta un cierto límite. Si las precipitaciones tienen lugar en forma de lluvias ligeras y dispersas pueden todas ellas ser absorbidas por el terreno. Las lluvias que tienen lugar después de que la falta de humedad del suelo ha sido satisfecha son precisamente las que tienen utilidad en la recarga del almacén de aguas subterráneas.

La cantidad de recarga en cada área determinada depende grandemente de la distribución de la precipitación. Una cantidad dada de precipitación durante la época de crecimiento vegetal producirá la máxima recarga si tiene lugar en un período de lluvia persistente de intensidad tal que se infiltre con la misma rapidez que va cayendo. Si por el contrario, cae distribuida en lluvias intermitentes a lo largo de un período de tiempo considerable, puede ser más beneficiosa para las cosechas, pero de esta agua muy poca o ninguna cantidad puede atravesar el terreno vegetal para llegar a la zona de saturación. Por otra parte, si la precipitación tiene lugar en forma de aguacero de gran intensidad y corta duración, solamente una pequeña parte puede infiltrarse en el suelo y todavía otra menor puede alcanzar las zonas de saturación, ya que la mayor parte del agua correrá en forma de escorrentía directa hacia corrientes superficiales.

Una característica evidentemente decisiva en la recarga subterránea es la topografía del terreno. En zonas con grandes pendientes, la escorrentía es máxima y por tanto, las infiltraciones

mínimas. Las grandes llanuras de materiales sedimentarios permeables constituyen a este respecto las zonas de infiltración más eficaces.

La extensión de la cuenca receptora tiene también influencia decisiva en la cantidad de agua infiltrada en ella. La recarga aumentará si la cuenca directa de precipitación está aumentada con las aportaciones de corriente superficiales que recogen e infiltran las aguas recogidas en las montañas, en las cuales la intensidad de precipitación suele ser mayor.

La intensidad de la recarga debida a las corrientes superficiales influentes depende grandemente del estado del lecho de las corrientes. Aunque el terreno por el que transcurre un río sea muy permeable, la infiltración puede ser reducida, a causa de que el lecho se haya impermeabilizado por arrastres de limos arcillosos o por deposiciones calizas que cementen los materiales del fondo. Cuando el río está sujeto a crecidas fuertes, éstas suelen lavar los depósitos impermeables y aumentar la capacidad de infiltración del lecho del río. Los embalses de regulación tienden a anular este efecto beneficioso de lavado, al suprimir las grandes avenidas. Por otra parte, los embalses son favorables a la infiltración en cuanto decantan el agua de elementos arcillosos finos, de modo que las deposiciones impermeables limosas aguas abajo pueden ser más reducidas.

DISTRIBUCION DE AGUA LLUVIA EN TERRENOS Y SUS CARACTERISTICAS				
	Naturaleza del terreno	Evaporación %	Escorrentía %	Infiltración%
1	Terreno arcilloso horizontal sin intercalaciones de bancos permeables	75	22	3
2	terreno arcilloso silíceo con algo de caliza horizontal	50	5	45
3	El mismo caso 1, pero con pendiente del terreno	53	45	2
4	El mismo caso 2, pero con pendiente del terreno	45	20	35
5	Terreno a base de areniscas compactas y poco fisuradas	50	20	30
6	Terrenos de areniscas deleznable con fisuras	35	5	60
7	Terrenos calizos horizontales y poco fisurados	65	15	20
8	Terrenos calizos horizontales, pero muy poco fisurados	45	5	50
9	Terrenos dolomíticos trituradas (gravas miloníticas)	20	0	80
10	Terrenos calizos fisurados y en pendiente pronunciada	25	5	70
11	Terrenos graníticos y gneísicos, no descompuestos en superficie	60	30	10
12	Terrenos graníticos no descompuestos en superficie, pero sin zona semidescompuesta	50	15	35
13	Terrenos graníticos, descompuestos en superficie y con zona inferior semidescompuesta	20	5	75
14	Terrenos pizarrosos no descompuestos	50	25	25
15	Terrenos pizarrosos, descompuestos o con predominio de pizarras arcillosas	50	40	10

Tabla 2.2 Distribución del agua lluvia en distintos terrenos y sus características

2.1.3 FORMACION DE ACUIFEROS.

Un acuífero es una formación geológica subterránea compuesta de grava, arena o piedra porosa, capaz de almacenar y rendir agua. Las condiciones geológicas e hidrológicas determinan su tipo y funcionamiento. Por ejemplo, se espera que mientras mayor sea la porosidad de las rocas (variante entre 5 y 20 por ciento), según el tipo de roca, más agua produzca el acuífero.

El agua subterránea se encuentra en forma de un solo cuerpo continuo o también en estratos separados. Puede encontrarse tanto en materiales rocosos Consolidados (roca dura) como en materiales sueltos no consolidados (roca suave).

Cualquier tipo de esta, dura o suave, puede constituir un acuífero si es suficientemente poroso y permeable. Las rocas sedimentarias aunque constituyen un 5% de la corteza terrestre, contienen alrededor del 95 % del agua subterránea. Se hallan ampliamente distribuidas y son poseedoras de excelentes propiedades acuíferas, mientras que las rocas ígneas y metamórficas poseen propiedades que limitan la formación de acuíferos de primer orden. De acuerdo con el grado de confinamiento de las aguas que contienen, los acuíferos pueden clasificarse en cuatro tipos:

Acuíferos libres. También llamados no confinados o freáticos (figura 2.1). Son formaciones geológicas en las cuales el agua satura los poros se encuentra descansando sobre un estrato impermeable y la superficie superior constituye el nivel freático; o bien puede descansar sobre un estrato semipermeable, con percolación vertical a un manto más profundo. El agua contenida en los poros en la superficie superior del acuífero se encuentra sometida a presión atmosférica, tal como si estuviera contenida en un recipiente abierto.

En cualquier nivel dentro de un acuífero libre, la presión hidrostática es equivalente a la profundidad desde la superficie libre hasta el punto en cuestión, y puede expresarse en metros de agua. El nivel freático define el límite de saturación del acuífero libre y coincide con la superficie piezométrica. Su posición no es fija sino que varía en función de las épocas secas o lluviosas.

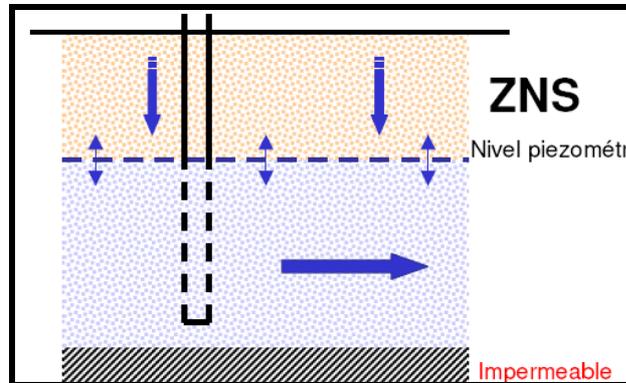


Figura 2.2 Acuífero libre (<http://muchomasquesimpleagua.blogspot.com/>)

Acuíferos confinados: Son formaciones geológicas en las cuales el agua que satura los poros se encuentra sometida a una presión hidrostática superior a la presión atmosférica, por lo tanto al perforarles el agua fluye hacia afuera del mismo. En este caso el acuífero yace entre estratos impermeables situados por encima y debajo del acuífero (figura 2.3), o sea se halla confinado y no existe zona no saturada. En muchos casos, las formaciones que confinan a un acuífero de este tipo poseen alguna permeabilidad de manera que cuando el nivel piezométrico cae por debajo del acuitardo, ocurre recarga por percolación vertical desde los acuíferos superiores.

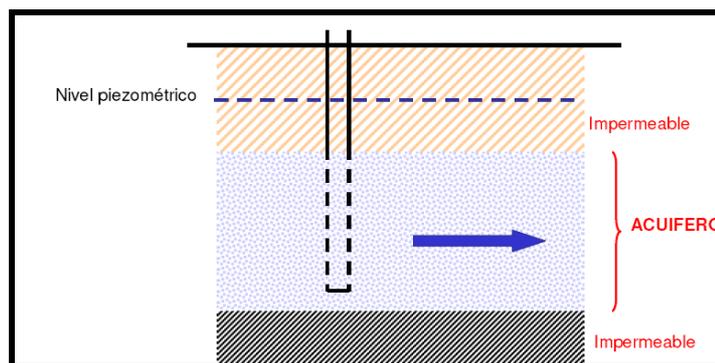


Figura 2.3 Acuífero Confinado (<http://muchomasquesimpleagua.blogspot.com/>)

Acuíferos Semiconfinados: Los acuíferos semiconfinados (figura 2.4), son acuíferos completamente saturados sometidos a presión que están limitados en su parte superior por una

capa semipermeable (acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (acuicierre o acuífugos) o también por otro acuitardo. En este tipo de acuífero, la disminución de la carga piezométrica originada por el bombeo, por ejemplo, inducirá un flujo vertical del agua contenida en el acuitardo, que actuará como recarga del acuífero. Las características del acuitardo confinante en un acuífero semiconfinado son tales que puede ignorarse la componente horizontal del flujo en el acuitardo. Un mismo acuífero puede ser libre, confinado y semiconfinado según sectores.

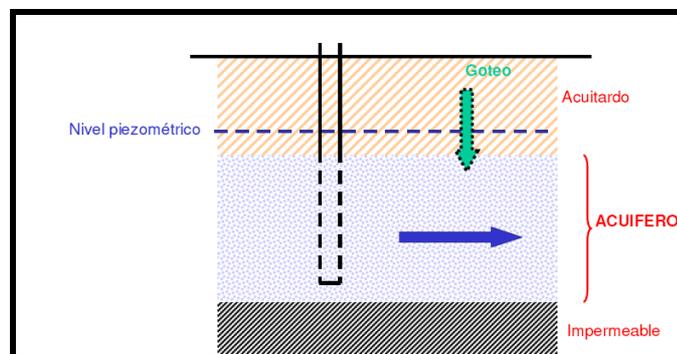


Figura 2.4 Acuífero semiconfinado (<http://muchomasquesimpleagua.blogspot.com/>)

Acuíferos colgados: Se producen ocasionalmente cuando, por efecto de una fuerte recarga, asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable. Algunas veces se da una capa de material más o menos impermeable por encima del nivel freático. El agua que se infiltra queda atrapada en esta capa para formar un lentejón, que normalmente tiene una extensión limitada sobre la zona saturada más próxima. Los acuíferos colgados son más comunes de lo que se pueda suponer, aunque quizá sólo ocupan unos pocos centímetros de espesor, o sólo se alimenten después de una recarga muy excepcional. No suponen un recurso muy fiable, ya que a veces se puede perforar del todo y el pozo construido facilita el drenaje del agua contenida en el lentejón hacia la zona saturada (figura 2.5).

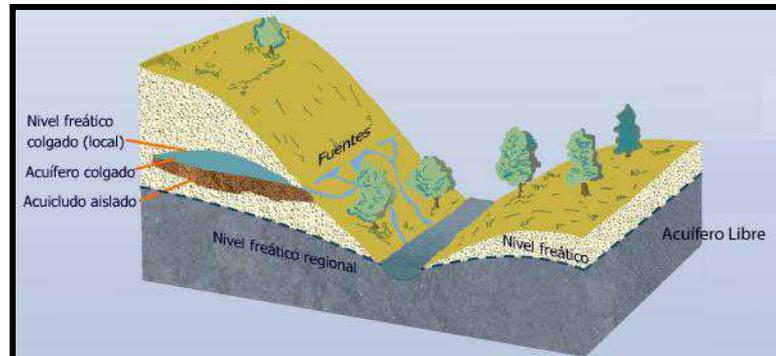


Figura 2.5 Acuíferos colgados

(http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc_sub_acuifero.html)

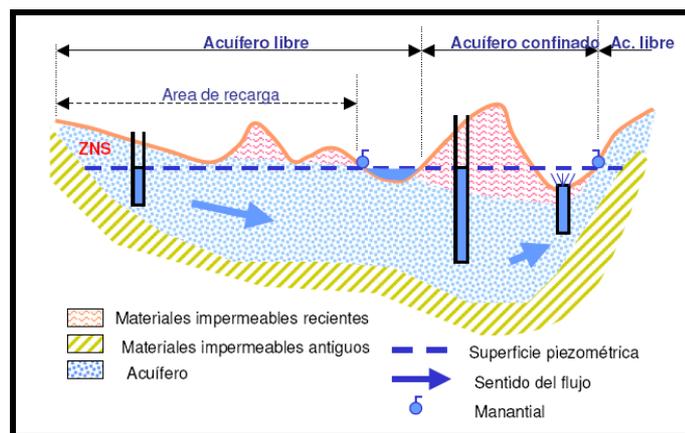


Figura 2.6 Relación entre acuíferos. (<http://muchomasquesimpleagua.blogspot.com/>)

CLASIFICACION DE LOS ACUIFEROS.

Los acuíferos son las formaciones de mayor interés bajo el punto de vista de la circulación subterránea de las aguas y desde luego, bajo la perspectiva del aprovechamiento humano. La importancia de las otras formaciones es diferente: por ejemplo un acuitardo puede suministrar, aunque sea muy lentamente, considerables volúmenes de agua a lo largo del tiempo a un acuífero infrayacente si la disposición de ambos lo permite, mientras que los acuícludos y acuífugos al obstaculizar o impedir el movimiento del agua a su través, son las formaciones que

propician que las aguas se almacenen en el subsuelo y, con frecuencia, determinan la dirección en la que mueven.

Los materiales geológicos del subsuelo tienen muy distinta capacidad para almacenar y transmitir el agua. En función de esta capacidad, una formación geológica puede ser clasificada como:

Acuicludos: Son formaciones que contienen agua en su interior pero que no la pueden transmitir. Esto sucede por ejemplo en las arcillas, que aunque pueden llegar a contener grandes cantidades de agua porque son materiales sumamente porosos (hasta un 50%), no la transmiten dado el pequeño tamaño de sus poros (figura 2.7).



Figura 2.7 acuíferos Acuicludos.

(http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc_sub_acuifero.html)

Acuitardos: Son formaciones que también pueden almacenar agua, pero que la transmiten con lentitud. Como el agua fluye lentamente hacia los pozos, estos tardarán mucho tiempo en recuperar de nuevo su nivel después de una extracción. Por esto el caudal que se podría extraer es considerablemente menor que en el caso de un acuífero, de manera que resulta poco rentable para el abastecimiento humano, aunque podrían ser suficientes para abastecimiento a pequeñas comunidades. Un ejemplo de este tipo serían los materiales detríticos mal clasificados, como una mezcla de arenas y arcillas (figura 2.8).

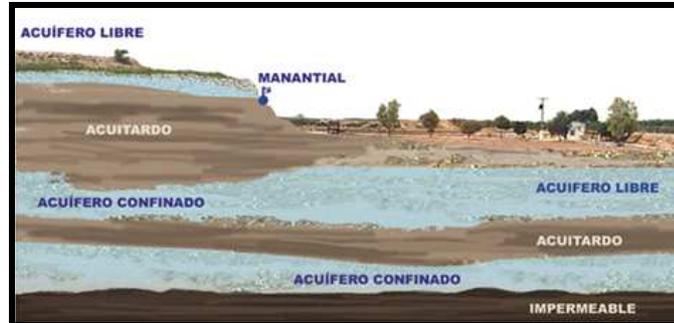


Figura 2.8 Acuífero Acuitardo. (www.ucm.es/agua/esc_sub_acuifero.html)

Acuífugos: Los Acuífugos figura 2.9, son aquellas formaciones geológicas absolutamente impermeable que no pueden almacenar agua, ni transmitirla, como ocurre por ejemplo en un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación. Los materiales que rodean el acuífero son desde semi impermeables a semipermeables.

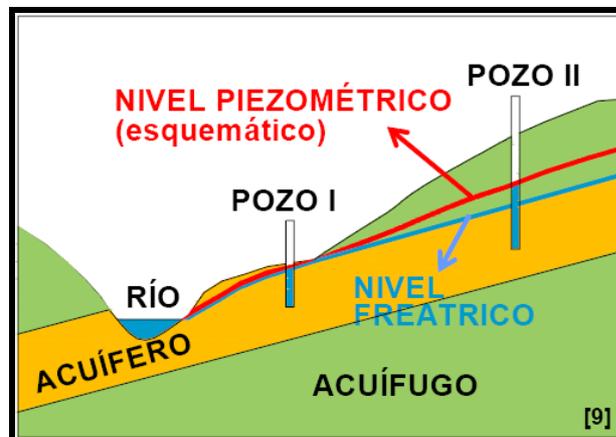


Figura 2.9 Acuífero Acuífugo. (www.ucm.es/agua/esc_sub_acuifero.html)

CAPITULO III

METODOS DE PROSPECCION GEOFISICA

3.1 PROPIEDADES ELECTRICAS DE LAS ROCAS

Las propiedades eléctricas de las rocas más importantes para la investigación de agua subterránea son tres.

- a) Constante dieléctrica
- b) Actividad electroquímica
- c) Resistividad

ACTIVIDAD ELECTROQUIMICA. Es la propiedad de las rocas de polarizarse al pasar por ellas la corriente eléctrica. Depende de la composición química de la roca y de la composición y concentración de los electrolitos disueltos en el agua subterránea, que está en contacto con las rocas. La actividad electroquímica determina la magnitud y el signo del voltaje desarrollado cuando la roca está en equilibrio con el electrolito.

CONSTANTE DIELECTRICA. El nombre proviene de los materiales dieléctricos, que son materiales aislantes o muy poco conductores por debajo de una cierta tensión eléctrica llamada tensión de rotura. El efecto de la constante dieléctrica se manifiesta en la capacidad total de un condensador eléctrico o capacitor.

RESISTIVIDAD. La resistividad eléctrica de cualquier material se define como la resistencia, en menor o mayor grado al paso de la corriente eléctrica, por unidad de área y de longitud con una intensidad conocida. Se designa por la letra griega rho minúscula (ρ), en unidades de ohmios por metro, ($\Omega \cdot m$). Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de la corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor.

Una roca homogénea, independiente de su litología, responde eléctricamente como un material aislante (resistividades del orden de 10^7 [$\Omega\cdot m$]), excepto en el caso de metales (resistividades del orden de 10^{-7} [$\Omega\cdot m$]),

Esta habilidad de las rocas de poder conducir corriente está directamente ligada a factores intrínsecos del material (porosidad, permeabilidad), y factores externos (sistemas hídricos de recarga, zonas de entrapamiento).

Los factores, que determinan la resistividad eléctrica de una roca, son los siguientes:

- Conductividad de los granos minerales
- Porosidad
- Composición química del agua, que llena los espacios porosos de la roca, como su salinidad por ejemplo.
- % saturación (S)
- Temperatura
- Presión

RESISTIVIDAD DE MINERALES Y ROCA

MINERALES Y ROCAS	RESISTIVIDAD ($\Omega\cdot m$)
Ígneas	2 a 4.8
Metamórficas	2 a 4.8
Areniscas	2.5 a 4
Calizas	2.5 a 4
Gravas	2.3 a 4
Arenas	2 a 3
Margas	0 a 1.7
Limos	1 a 2
Arcillas	0 a 1

Tabla 3.1 Muestra la resistividad de algunos minerales y rocas

TIPO DE AGUA	RESISTIVIDAD ($\Omega.m$)
Agua de lagos y arroyos de alta montaña	10^3 a 3×10^3
Aguas dulces superficiales	10 a 10^3
Aguas salobres superficiales	2 a 10
Aguas subterráneas	1 a 20
Aguas de lagos de montañas	0,1 a 1
Aguas marinas	0,03 a 10

Tabla 3.2 Resistividades de las aguas según el medio en que se encuentre

3.2 GENERALIDADES DE LA PROSPECCION GEOFISICA

3.2.1 APLICACION DE LA PROSPECCION GEOFISICA A LA INGENIERIA CIVIL

La aplicación de la geofísica a la ingeniería civil está tomando cada día más importancia ya que son técnicas no destructivas y económicas de las cuales los ingenieros podemos valernos para la investigación de las características del suelo donde la estructura estará cimentada, los métodos geofísicos permiten determinar la profundidad a la que se encuentra el estrato de roca dura, adecuada que sirve como cimiento a obras firmes para fundaciones, embalses, túneles, carreteras, puentes, edificaciones. También permite definir zonas de alta peligrosidad (Zona sísmica). De igual manera para conocer las condiciones actuales a que se encuentra una obra civil, la geofísica proporciona métodos como el Georadar que brindan una buena resolución sobre el estado de la estructura, la presencia de huecos, fisuras, la localización de la armadura, el espesor, la presencia de humedad entre otros.

Aplicaciones:

- Determinación del espesor de recubrimiento y del basamento.
- Localización de huecos.
- Estado de las estructuras antrópicas (hormigones, pavimentos, inspección técnica de edificaciones)

- Estudios anteriores y posteriores a la construcción de túneles.
- Detección y evaluación de fracturas.
- Determinación de resistividades para tomas de tierra.
- Análisis de estabilidad de taludes.
- Reconocimiento de macizos rocosos.
- Localización de objetos féreos (depósitos, canalizaciones, servicios).
- Medida de propiedades físicas de muestras de terreno.
- Determinación del nivel freático de una zona determinada

3.3 METODOS DE PROSPECCION GEOFISICA

3.3.1 METODOS ELECTRICOS

Los métodos eléctricos es una de las aplicaciones más importantes dentro de la prospección geofísica, por lo que se explicará cada uno de los arreglos que componen los métodos eléctricos.

Para lograr desarrollar esta metodología se utilizan cuatro electrodos, 2 de corriente (A y B), 2 de potencial (M y N) y la unidad resistiva (Trasmisor de corriente, receptor) al centro del arreglo.

Los métodos eléctricos de corriente continua se dividen en:

- Calicatas eléctricas
- Sondeos Eléctricos Verticales
 - Arreglo Dipolo – Dipolo
 - Arreglo Wenner
 - Arreglo Schlumberger

3.3.1.1 CALICATAS ELECTRICAS

Las calicatas eléctricas son una aplicación más de los métodos eléctricos, para la realización de este arreglo se necesitan 2 electrodos de corriente (A y B), 2 de potencial (M y N) y la unidad resistímetra al centro de la medición, que se encarga de enviar corriente y obtención de datos de potencial.

La finalidad de las calicatas eléctricas es el estudio de las variaciones laterales en la resistividad del subsuelo. Este método consiste en una investigación horizontal a profundidad aproximadamente constante.

Experimentalmente las calicatas eléctricas consisten en trasladar la misma vez los electrodos de corriente y potencial, manteniendo la separación entre ellos de manera constante, obteniéndose así un perfil de resistividades aparentes a lo largo del área seleccionada.

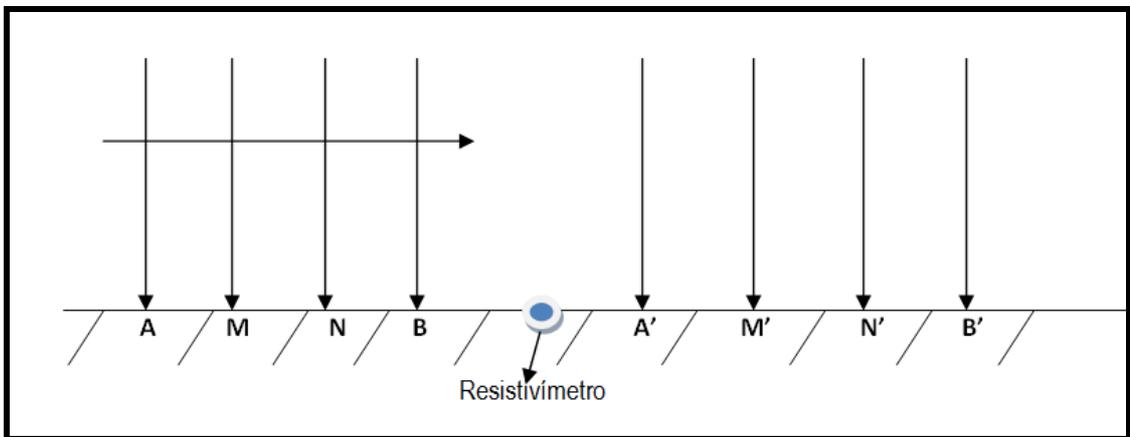


Figura 3.1 Arreglo Calicatas Eléctricas

3.3.1.2 SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

Dentro de los Métodos de Prospección Geofísica en general, los Sondeos Eléctricos Verticales son una herramienta de gran importancia en la investigación o exploración de acuíferos subterráneos, que es nuestro caso; sin embargo también se extiende al estudio de posibles plumas de contaminación en un área determinada, exploración para la búsqueda objetos arqueológicos, exploración de yacimientos geotérmicos, etc.

Los Sondeos Eléctricos Verticales nos permiten suministrar una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo y se puede determinar aproximadamente la distribución vertical de su resistividad, por lo que la finalidad de esta metodología es la determinación de las capas del subsuelo y las resistividades o conductividades eléctricas de la misma, esto mediante mediciones realizadas en el lugar de estudio.

En términos generales los SEV son una serie de determinaciones de resistividad aparente y que son efectuadas mediante un mismo dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción de corriente. Ya propiamente en el levantamiento se puede observar un arreglo en el cual incluyen 4 pares de electrodos, dos son utilizados para energizar o inyectar corriente al subsuelo y los otros dos para medir la diferencia de potencial, al centro se ubica la unidad resistiva que nos sirve como el centro de control para la inyección de la corriente y recepción de los datos del levantamiento geofísico. El producto final o lo que se busca obtener de un levantamiento utilizando el método SEV es el valor de resistividad aparente del sitio de exploración en función de la profundidad; la razón por la cual se denomina resistividad aparente es porque al realizar o aplicar un levantamiento utilizando SEV, la resistividad del subsuelo no es homogénea debido a que en este se puede encontrar, no solo un tipo de material, sino varios, y esto dependerá de la geología y profundidad.

Matemáticamente podemos definir a la resistividad aparente como $\rho = (\Delta V / I) K$

Donde:

ΔV = Diferencia de potencial obtenida de campo

I = Corriente aplicada al subsuelo

K = Coeficiente geométrico del dispositivo

La constante K depende del arreglo a utilizar, por lo que esta variable está asociada a la distancia entre los electrodos a utilizar en el levantamiento.

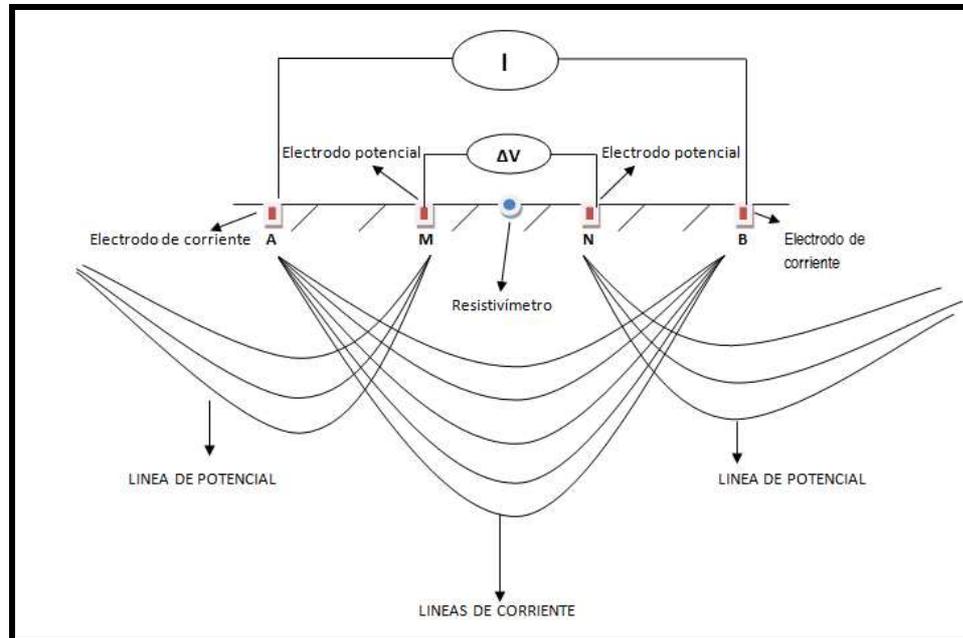


Figura 3.2. Arreglo sondeo eléctrico vertical

3.3.1.2.1 METODO DIPOLO-DIPOLO

El sondeo Dipolo – Dipolo es una variante más que ofrecen los métodos de resistividad geoelectrica, el cual consiste en emplear los mismos componentes mencionados anteriormente, como por ejemplo dos electrodos de corriente, dos electrodos de potencial y la unidad resistiva.

Este tipo de arreglo consiste en ubicar los electrodos de corriente (A y B) separados de los electrodos de potencial (M y N), por lo tanto la distancia entre A y B se mantiene constante al igual que entre M y N; la distancia que va aumentando la llamaremos “a” y es la que va separando de una manera gradual los electrodos de corriente de los electrodos de potencial.

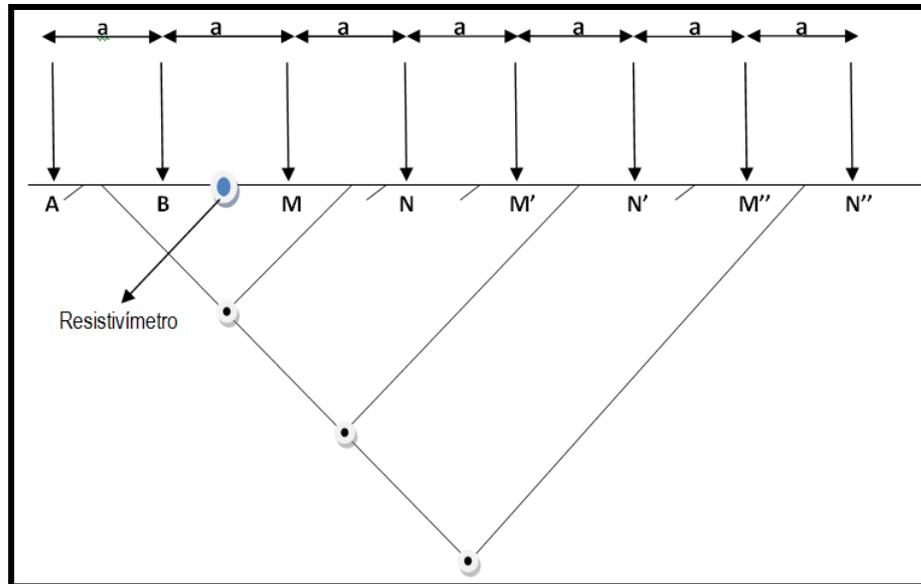


Figura 3.3 Arreglo dipolo – dipolo

3.3.1.2.2 METODO WENNER

El arreglo Wenner consiste en la misma aplicación y principios de los SEV, pero la variante en esta metodología es el tipo de separación que existe entre sus electrodos AB, BM y MN ya que esta distancia varia por un factor al que denominaremos “a” manteniéndola constante durante toda la medición.

La constante geométrica al utilizar el arreglo Wenner se calcula de la siguiente forma:

$$K = 2\pi n$$

a = Separación entre los electrodos AB, BM y MN

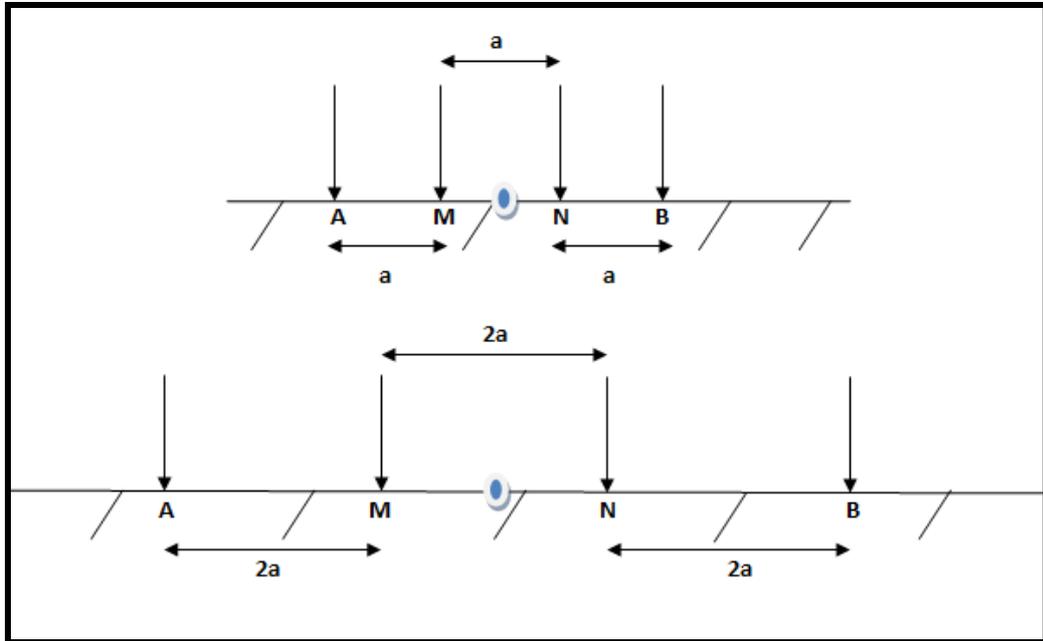


Figura 3.4 Arreglo wenner

En la figura podemos observar como la distancia "a" se va manteniendo constante entre los electrodos AM, MN y NB por cada medición.

Como en todo arreglo utilizando los SEV, siempre se tendrán que hacer uso de cuatro electrodos, dos de potencial y dos de corriente, dos pares de cables, agua con sal y la unidad resistiva para la inyección de la corriente y la recepción de los datos de resistividad aparente del sitio de exploración.

Una desventaja que posee el método Wenner es que a la hora de realizar el levantamiento, todos los electrodos tienen que modificarse por cada medida, por lo que se necesitará un mayor tiempo desarrollar este método.

3.3.1.2.3 METODO SCHLUMBERGER

El método geofísico empleado para la obtención de la resistividad de los materiales del subsuelo es el eléctrico, en su modalidad de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), con arreglo Schlumberger, para lo cual se utilizan 4 electrodos de acero inoxidable, 2 electrodos de corriente A y B, que son los que transmiten la corriente eléctrica al terreno y el otro par son los electrodos denominados de potencial M y N, los cuales detectan la diferencia de potencial que surge al transmitirse la corriente eléctrica, y conectados al aparato, se procesan los datos presentando los valores de resistividad aparente, los cuales a su vez multiplicados por una constante de proporcionalidad de acuerdo al arreglo y espaciamiento utilizado, se grafican en papel doble logarítmico obteniendo una curva de resistividad en función de la profundidad de exploración.

Una vez obtenida esta gráfica, se procesaron en nuestro caso los datos en la computadora utilizando el programa denominado "DCINV", en el cual hace una serie de iteraciones para estimar el modelo de capas iniciales, el cual se ajusta a la curva establecida para llegar a un modelo de capas final, por el método de inversión.

Al obtener este modelo de capas para cada SEV, se realiza una correlación entre éstos para construir las secciones geoelectricas, mismas que nos darán un panorama general de la estratigrafía del subsuelo.

Este arreglo no es aplicable en terrenos con excesiva pendiente, ni en terrenos cercanos a torres o plantas de energía eléctrica, ya que los datos obtenidos pueden llegar a tener un gran margen de error sobre el área de estudio.

La mayor ventaja que presenta este método es que al inyectar la corriente al subsuelo, se tiene mayor información de las variaciones verticales de las capas subterráneas en cuanto a las resistividades aparentes que se nos puedan presentar.

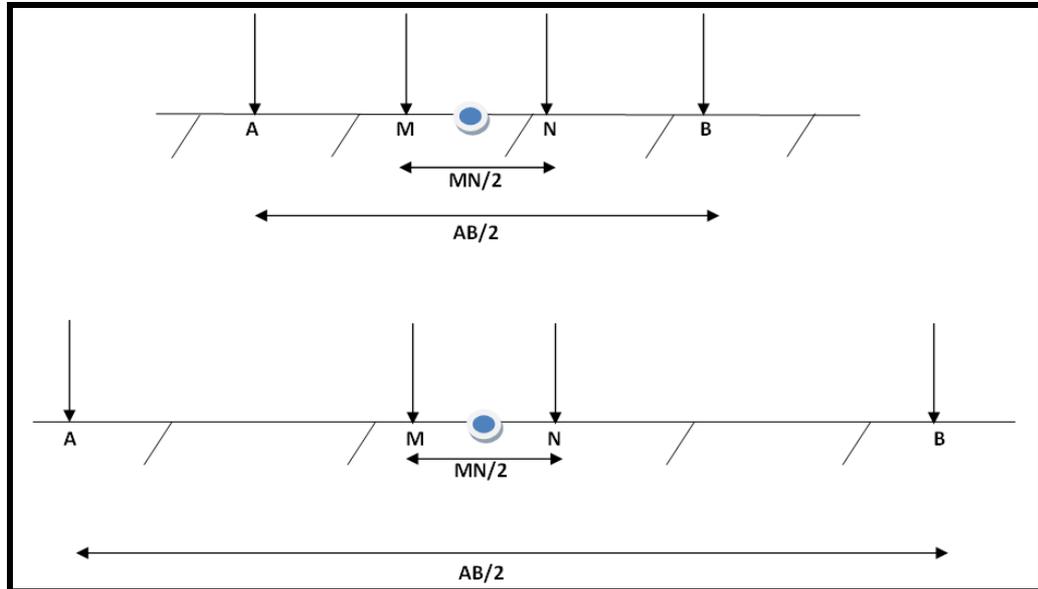


Figura 3.5. Arreglo Schlumberger

En la figura 3.5 podemos observar cómo se incrementa la distancia “ $AB/2$ ” entre A y B (electrodos de corriente), ya que al tener mayor distancia para inyectar corriente nos podemos introducir más en las capas del subsuelo proporcionándonos así mayor información acerca de las características litológicas de la zona. Por otro lado se hace una comprobación de los datos que se van obteniendo, esto mediante un empalme que se realiza a cierta distancia de la medición. Este empalme consiste en aumentar la distancia entre $MN/2$, éste dato obtenido tiene que ser relativamente parecido al de la medición anterior en la que no se aplico el empalme.

3.3.2 METODO GRAVIMETRICO

El método gravimétrico de prospección se basa en la medida en superficie de las pequeñas variaciones o anomalías de la componente vertical del campo de la gravedad terrestre. Con éstas se puede llegar a interpretar la situación de las masas en el subsuelo, ya que son causadas por una distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades, por lo que conociendo aquéllas se puede llegar a una interpretación más o menos probable de la situación

de las masas en el subsuelo, dependiendo del conocimiento geológico y de la distribución de densidades en profundidad.

Básicamente, el método por gravedad mide las variaciones laterales de la atracción gravitatoria del suelo que están asociadas a cambios de densidad próximos del subsuelo

Instrumentos de Medición de Gravedad

En los métodos de gravimetría se han utilizado tres tipos de instrumentos: La balanza de torsión, el péndulo y el gravímetro. El primero de estos, ideado en un principio con fines geodésicos hacia comienzos del siglo pasado, el péndulo tuvo un uso limitado para la exploración petrolífera, luego el gravímetro que desplazó a ambos, viene siendo utilizado casi desde entonces.

El gravímetro es un instrumento que mide directamente pequeñas variaciones en la componente vertical de la gravedad. Este instrumento puede determinar diferencias de 0.1 miligales y aun menores.

3.3.3 METODO MAGNETICO

El método magnético es el método geofísico de prospección más antiguo aplicable en la prospección petrolífera, en las exploraciones mineras y de artefactos arqueológicos.

En la prospección petrolífera el método magnético entrega informaciones acerca de la profundidad de las rocas pertenecientes al basamento. A partir de estos conocimientos se puede localizar y definir la extensión de las cuencas sedimentarias ubicadas encima del basamento, que posiblemente contienen reservas de petróleo.

En las exploraciones mineras se aplica el método magnético en la búsqueda directa de minerales magnéticos y en la búsqueda de minerales no magnéticos asociados con los minerales, que ejercen un efecto magnético mensurable en la superficie terrestre.

Además el método magnético se puede emplear en la búsqueda de agua subterránea. Por medio de estudios aeromagnéticos se puede también localizar zonas de fallas, de cizallamiento y de fracturas, que pueden albergar una variedad grande de minerales y dirigir a una mineralización.

El conocimiento de sistemas de fracturas y de acuíferos en rocas solidificadas cubiertas por una capa de depósitos aluviales puede facilitar la búsqueda y explotación de agua subterránea.

Hoy día en la prospección petrolífera se emplean magnetómetros instalados en aviones y en barcos. En los estudios de reconocimiento de depósitos minerales se emplean magnetómetros aeroportados.

Finalidad del Método Magnético

Las anomalías magnéticas detectadas a través de estudios magnéticos en terreno se explican con variaciones en las propiedades físicas de las rocas como la susceptibilidad magnética y/o la magnetización remanente de las rocas. Estas propiedades físicas solo existen a temperaturas debajo de la temperatura de Curie. En consecuencia los generadores de las anomalías magnéticas podemos hallar hasta una profundidad máxima de 30 a 40 km.

3.3.4 METODO ELECTROMAGNETICO

Los métodos electromagnéticos conocidos con la designación EM, utilizados en geofísica de exploración tienen como objetivo principal medir las variaciones de conductividad eléctrica aparente de la tierra en función de la profundidad y se fundamentan en el hecho de que un campo electromagnético producido por una antena o bobina por la que pasa una corriente alterna, se propaga a través del subsuelo, induciendo otras corrientes que se hallen en su recorrido, cuando esto ocurre una fuerza electromotriz o un voltaje se genera dentro del conductor, según la Ley de Faraday. Las corrientes inducidas ocurren en las capas superficiales y las magnitudes y distribución están en función de la frecuencia del trasmisor, energía, geometría y de las propiedades eléctricas del subsuelo o conductor. Por otra parte, Los EM constituyen el grupo de mayor diversidad tanto en metodologías como en instrumentos para llevar a cabo la toma de datos, resultando ser herramientas eficaces a la hora de abordar una gran variedad de problemas tales como: estudio de aguas subterráneas, cartografía de la intrusión marina, detección de vertidos de contaminantes, localización de cavidades o fallas

geológicas, exploración minera, investigación de recursos geotérmicos, etc. Siempre que éstos presenten cambios anómalos en conductividad eléctrica.

La versatilidad y gran resolución en la toma de datos, aspecto que permite el reconocer extensas áreas de terreno en un corto espacio de tiempo, son las dos principales virtudes de los métodos electromagnéticos en general. Además la no necesidad de contacto eléctrico con la superficie del terreno (no precisan electrodos), permiten incluso el realizar estudios tanto en barco como en avión.

Los métodos electromagnéticos proporcionan una gran variedad de técnicas para la investigación de aguas subterránea en el subsuelo, pero son los de campo próximo y artificial los de mayor importancia, dado que en éstos es el operador el que controla el dispositivo transmisor que genera el campo electromagnético primario, por tanto el hecho de poder definir las características de la onda primaria, nos permitirá controlar un parámetro tan importante como es la profundidad de investigación.

3.3.5 METODOS SISMICOS

Los métodos sísmicos representan una herramienta indispensable en la prospección geofísica. Esto debido a que mediante estos se obtiene una mayor cantidad de información en relación a estructuras presentes en el subsuelo, que en comparación con cualquier otro método de prospección geofísica. Entre los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se distinguen dos principalmente, los de refracción y los de reflexión sísmica. La base de estos métodos es la medición del tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre el sitio donde se generan las ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Cada uno de estos métodos se emplea dependiendo del objetivo, y la profundidad que se desee alcanzar en subsuelo.

Produciendo artificialmente unas ondas sísmicas y detectando los tiempos de llegada de las ondas producidas, una vez reflejadas o refractadas en las distintas formaciones geológicas, se puede obtener una imagen muy aproximada de las discontinuidades sísmicas. Estas discontinuidades coinciden generalmente con las discontinuidades estratigráficas.

3.3.5.1 METODO DE REFRACCION SISMICA

Estudia la respuesta del terreno cuando se propaga a través de él una onda de compresión (onda P) producida por medios mecánicos en la superficie. El método de refracción sísmica, es un método de reconocimiento general especialmente en trabajos de ingeniería civil, exploración petrolera, y estudios hidrogeológicos. Permite la localización de los acuíferos (profundidad del estrato), la posición y tamaño del acuífero. Este método es particularmente usado en reconocimiento de áreas donde prácticamente no se cuenta con información geológica de la zona. El parámetro que se analiza es la velocidad de propagación de la onda a través de los materiales del subsuelo en función de la compacidad de los mismos.

La sísmica de refracción resulta ser uno de los métodos de mayor utilidad en la prospección geofísica y la geotecnia, debido a que permite obtener información sobre las estructuras geológicas presentes en el subsuelo. Adicionalmente, la sísmica de refracción permite obtener información somera del subsuelo para generar modelos de velocidades y determinar el espesor y la profundidad de la roca. Este método estudia básicamente la propagación de las ondas en el subsuelo a partir de impulsos sísmicos, generados mediante el uso de una fuente, y geofonos colocados en el terreno, con el fin de adquirir registros sísmicos a través de los cuales se generan curvas distancia versus tiempo. Con estas curvas se logran generar modelos de capas con sus velocidades respectivas. En conjunto con los datos geológicos de campo, este modelo sísmico permite generar en profundidad un modelo tectónico y estratigráfico en áreas con poca información de superficie. Aunque dicho método posee poca resolución en escala vertical, es una importante herramienta cuando se requiere conocer las propiedades del subsuelo a poca profundidad ya que posee una gran resolución horizontal.

Principios básicos de sísmica de refracción

En un levantamiento de sísmica de refracción, una fuente que genera una perturbación sísmica la cual se propaga dentro del subsuelo; esta perturbación viaja pasando por puntos donde cambian las propiedades elásticas del medio. En esas interfaces, ocurre un proceso de partición de la energía, por lo cual una porción de la energía continúa su propagación hacia el interior de la

tierra, mientras que la otra porción regresa a la superficie, donde es registrada por dispositivos detectores (geófonos).

Estas perturbaciones sísmicas, originan los diferentes tipos de ondas que conocemos entre las cuales destacamos las ondas Love, ondas Rayleigh, ondas S y ondas P. Estas últimas son también conocidas como ondas longitudinales las cuales resultan de interés fundamental en la prospección con sísmica de refracción.

Equipos de Medición de refracción sísmica:

El equipo de medición de refracción sísmica se compone básicamente por una fuente generadora de ondas sísmicas, sensores que detectan las ondas (geófonos) y el equipo de adquisición y almacenamiento (sismógrafo).

3.3.5.2 METODO DE REFLEXION SISMICA

El método de reflexión sísmica se basa en las reflexiones del frente de ondas sísmicas sobre las distintas interfaces del subsuelo. Estas interfaces (reflectores) responden, al igual que en la refracción, a contrastes de impedancia que posteriormente se relacionaran con las distintas capas geológicas. Las reflexiones son detectadas por los receptores (geófonos) que se ubican en superficie y que están alineados con la fuente emisora. Dado que las distancias entre la fuente y los geófonos son pequeñas respecto a la profundidad de penetración que se alcanza.

Este método es el más empleado en prospección petrolífera ya que permite obtener información de capas muy profundas. Permite definir los límites del acuífero hasta una profundidad de 100 metros, su saturación (contenido de agua), su porosidad. Permite también la localización de los saltos de falla.

La sísmica de refracción y la sísmica de reflexión se diferencian particularmente por un elemento de geometría, es decir la refracción usa principalmente grandes distancias entre fuente receptor de tal manera que la onda sísmica viaje principalmente de manera horizontal, a lo largo del subsuelo, en vez de manera vertical.

Fuente Sísmica:

Principalmente lo que se desea es generar ondas sísmicas a través de una fuente controlada, es decir que pueda controlarse la localización y el tiempo. Entre las que podemos mencionar:

Fuentes de impacto: Generalmente mandarrías o martillos; la energía transmitida al suelo por este método no es muy grande, por lo cual se deben apilar varias veces los impactos al suelo, con el fin mejorar la señal de llegada y suprimir el ruido. Existen varias fuentes de impactos, medios mecánicos, por ejemplo dejando caer un gran peso de una altura de 2 a 3 metros.

Cargas explosivas: Representa un tipo de fuente que genera mayor energía; son usadas por lo general en prospección petrolera. La explosión puede ocurrir en un tiempo corto, de micro a milisegundos, dependiendo de la naturaleza y cantidad del explosivo como del material que rodea el sitio de explosión.

Disparos: Se utilizan balas o cartuchos; la energía generada es mayor que la producida por la fuente de impacto y por lo general menor al producido por las cargas explosivas.

RESUMEN DE METODOS DE PROSPECCION GEOFISICA PARA AGUAS SUBTERRANEAS.

METODOS	PRINCIPIOS	PARAMETROS OBTENIDOS
Geoeléctrico	Conductividad o resistividad eléctrica	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral, propiedades de las formaciones (arena-arcilla), salinidad del agua, plumas de contaminación
Sísmica de refracción	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Depósitos secos-saturados, espesores de diferentes estratos y detección de zonas de fracturamiento
Sísmica de reflexión	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Zonas de fallas, cartografías de estructuras de recubrimiento
Gravimetría	Densidad	Relleno-basamento
Magnetometría	Susceptibilidad magnética	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral
Electromagnetismo	Conductividad o resistividad eléctrica y magnetismo	Localización de las áreas más conductivas, detección de fracturas que no afloran en superficie

Tabla 3.3 Resumen de los métodos de prospección geofísica

CAPITULO IV

REALIZACION DEL LEVANTAMIENTO GEOFISICO UTILIZANDO EL METODO SCHLUMBERGER EN LA ZONA DE ESTUDIO

4.1 ASPECTOS GENERALES PARA EL DESARROLLO DEL LEVANTAMIENTO

Entre los aspectos generales a considerar para la investigación de aguas subterráneas utilizando métodos geofísicos específicamente el Schlumberger y que estos a su vez puedan ser aplicados por ingenieros civiles en el estudio de acuíferos subterráneos en una zona determinada son los siguientes:

- a) Visita preliminar a la zona de estudio que comprende un breve análisis hidrológico, incluyendo las áreas de posible recarga hídrica del lugar donde se desea realizar el levantamiento geofísico, durante la visita es conveniente auxiliarse de mapas topográficos y geológicos para tener una mejor idea de las características antes mencionadas.
- b) Definir la ubicación de los lugares donde se van a realizar los sondeos, esto dependerá de la magnitud del área a analizar, pues permitirá determinar el número de levantamientos a efectuar para lograr tener datos representativos de la zona de estudio.
- c) Tener en cuenta todos los componentes que comprende el levantamiento geofísico como el equipo a utilizar, verificar que se encuentre este en buenas condiciones y prepararlo con anticipación para evitar posibles equivocaciones que se puedan cometerse en el campo.
- d) Realización del levantamiento geofísico en el área ya definida, siempre tomando en cuenta las condiciones climáticas que puedan afectar el desarrollo del mismo así como evitar la interferencia con cables de alta tensión pues podrían afectar los datos que se obtengan en el campo.

- e) Posteriormente se realizara el trabajo de oficina que comprende el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en campo mediante un software de inversión para la interpretación sobre medidas de resistividad aparente.
- f) En base a los resultados obtenidos se puede inferir sobre las características litológicas de la zona de estudio y así poder determinar el sitio adecuado en donde se ubicara el pozo para el aprovechamiento de la comunidad.

4.2 INFORMACION PREVIA

4.2.1 UBICACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Cantón los magueyes está situado a 3km de El municipio de Ahuachapán y 103km de distancia de la ciudad capital San Salvador, con coordenadas geográficas, latitud(DMS) 13°55'60"N, longitud 89°49'00"W, altitud 790msm y está limitado al Norte por El Cantón Ashapuco y la carretera CA-8; al Este por El Municipio de Santa Ana; al Sur por Concepción de Ataco, Apaneca y Tulapa; y al Oeste por El municipio de Ahuachapán.

Posterior a un recorrido por el lugar y con el apoyo de mapas hidrológicos se seleccionaron tres áreas que permitieran realizar los sondeos geofísicos las cuales están ubicadas dentro de un área no mayor a los 5km² como se estableció en los alcances de este trabajo de investigación y lo suficientemente cerca una con respecto a la otra para correlacionar los resultados correspondientes a cada sondeo. Las cuales cuentan con las siguientes características.

El área seleccionada para realizar el sondeo número uno denominado S-1 esta al Suroeste respecto al pozo y al sureste respecto de la Planta Geotérmica de Ahuachapán con elevación de 700 m y realizado en la dirección norte sur. El sondeo numero dos, S-2 realizado en la dirección norte sur está ubicado en un área con elevación de 778 y al Noroeste respecto al pozo. El S-3 se realizo en una dirección sur oeste el cual tiene las siguientes coordenadas x: 194967, y: 1541286 y se encuentra al costado sur.

4.3 DESCRIPCION DE LAS CARACTERISTICAS HIDROLOGICAS DEL LUGAR DE ESTUDIO

El territorio nacional de El Salvador debido a la regionalización hidrográfica por el proyecto hidrometeorológico centroamericano ha sido dividido en diez grandes regiones hidrográficas o cuencas denominadas por las letras mayúsculas de la I a la J, las cuales aportan toda la información hidrológica del país, pero para intereses de este trabajo de investigación nos limitaremos a presentar la información correspondiente a la cuenca de interés dentro de la cual está situado el Cantón los Magueyes en el municipio de Ahuachapán del mismo departamento.

Ahuachapán está comprendido en dos grandes regiones hidrográficas; la región B comprende la cuenca del río Paz y tiene un área total de 2112km² de los cuales 929km² corresponden a territorio salvadoreño y 1183km² a Guatemala. La región C comprende las pequeñas cuencas que drenan desde Tacuba y el volcán de Santa Ana hacia el océano pacífico y tiene una extensión de 659km², representando esta última un 3% del territorio nacional y se encuentra casi totalmente en el departamento de Ahuachapán.

La estación lluviosa en el territorio salvadoreño se registra entre los meses de abril a noviembre, alcanzando registros de precipitación promedio anual en el departamento de Ahuachapán de entre los 1200 y 2400 milímetros de lluvia con índice de infiltración máximo de 675 milímetros de lluvia la topografía de la zona de Ahuachapán proporciona un relieve que oscila entre el 15% y 30% con bosques húmedo subtropical, muy húmedo subtropical y muy húmedo montano y sus formaciones pertenecen a depósitos aluviales recientes de limo, arena, grava, rocas piroclásticas y cenizas volcánicas las cuales proporcionan una gran capacidad de infiltración y es la razón por la cual el agua percola alcanzando profundidades de los 2 a los 100m donde se encuentran de moderadas a grandes cantidades de agua subterránea para la provisión de pozos y manantiales. Así la meseta central en la cual está situada la ciudad de Ahuachapán y otras regiones de la zona son consideradas de interés para la explotación de acuíferos.

Cuenca del Río Escalante

AÑO	PRECIPITACION	EVAPOTRANSPIRACION REAL	ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL	INFILTRACION (RECARGA)
	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)
1990	56,556,500	18,473,000	2,627,894	21,253,605
1991	86,677,500	63,791,000	2,627,894	6,101,605
1992	50,960,000	24,979,500	2,627,894	9,931,605
1993	68,386,500	30,849,000	2,627,894	22,963,605
1994	75,803,000	42,269,500	2,627,894	19,960,605
1995	69,797,000	45,363,500	2,627,894	9,291,605

Tabla 4.1 Datos de precipitación el Rio Escalante de 1990 – 1995 (tomado de monografía de Ahuachapán)

La Cuenca del Rio Escalante un área de aproximadamente 45.5 Km², es la que aporta la mayor recarga a la zona de interés. Esta cuenca recolecta en promedio 68 millones de m³ de agua meteórica en el año, de la cual 15 millones de m³ (22 %) se infiltra al subsuelo a razón de 0.47 m³ /s. La cordillera Apaneca, la Laguna de las Ninfas, El Hoyo de Caujuste y Laguna Verde son las que mayor aportación tienen a esta recarga.

4.4 EQUIPO NECESARIO PARA EL LEVANTAMIENTO

Para realizar el levantamiento geofísico se necesitan los siguientes instrumentos y equipo:



Figura 4.1a Equipo utilizado



Figura 4.1b forma de conectar el equipo

Figura 4.1 a y b Equipo completo para realizar el levantamiento geofísico y Forma de conectar el Resistivímetro.

EQUIPO	
Cantidad	Descripción
1	Resistivímetro ABEM SAS 1000
1	Batería de 12 Voltios
2	Carretes de corrientes de 600 mts
2	Carretes de corrientes de 250 mts
2	Cintas de 60 mts
6	Conectores
6	Electrodos
3	Radios intercomunicadores
4	Almádanas
3	Brújulas
1	GPS
	Misceláneos: sombrilla, mesa, cinta aislante, destornilladores, plumones, machete

Tabla 4.2 Equipo utilizado para el levantamiento sondeos eléctricos verticales

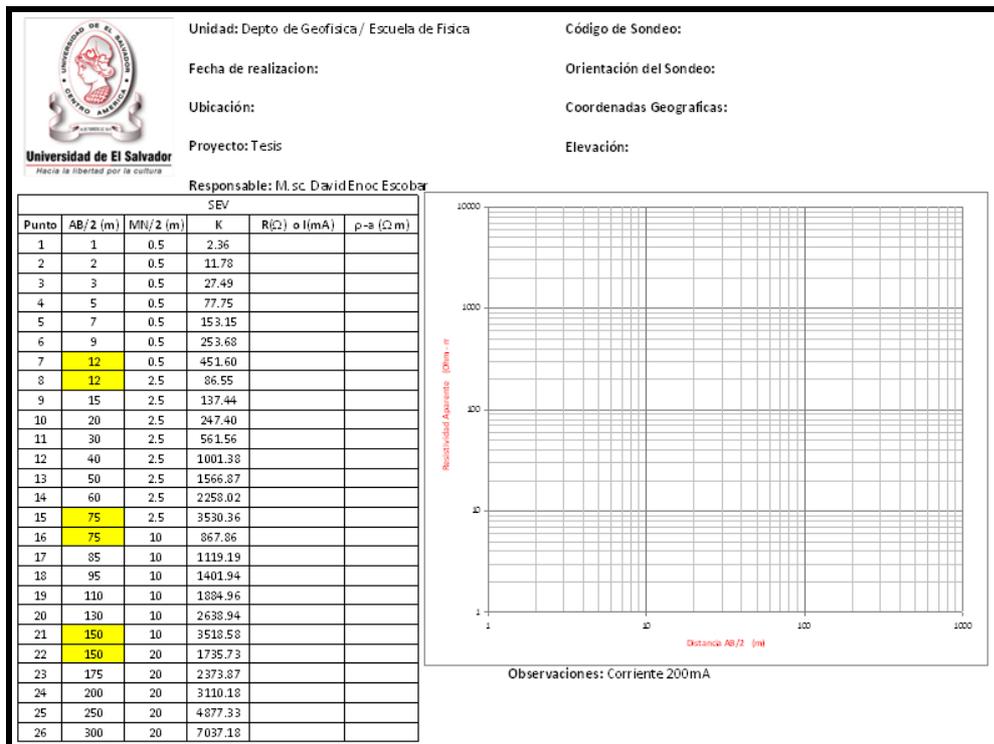


Figura 4.2 Hoja de campo para registro de datos y Grafica log-log donde se esboza grafica preliminar.

La hoja de campo figura 4.2, se utiliza en cada uno de los sondeos para llevar un registro de los datos obtenidos algunas de las ventajas es permite generar la grafica de los mismos, verificar y corregir algún dato que resulte con variaciones que no estén dentro de la lógica de la curva. En la hoja deben registrarse datos específicos de cada sondeo como la orientación, las coordenadas geográficas, elevación, ubicación, el tipo de proyecto y hasta la fecha en que se realizo cada sondeo, las aberturas AB/2 y MN/2, son particulares de cada arreglo y de la profundidad de investigación.

4.5 PROCEDIMIENTO DEL LEVANTAMIENTO

A continuación se detallan una serie de pasos a seguir para desarrollar el levantamiento:

- Se realiza una visita técnica preliminar, donde por medio de planos topográficos hidrológicos, se elige la zona donde se pueda ver mayor recarga hídrica para ubicar la mejor posición de los sondeos.
- Al haber escogido el lugar del sondeo, se procede a realizar una medición preliminar; con cinta métrica para garantizar una distancia de al menos 500 mts de abertura, que permita llevar a cabo las mediciones de los datos geofísicos utilizando el método Schlumberger.
- Al haber determinado los lugares de los sondeos, el siguiente paso sería realizar el levantamiento.
- Se ubica el equipo en el centro de la medición de 500 mts que anteriormente se midió, este será el cero inicial.
- Se procede a instalar el equipo ABEM SAS 1000 con sus respectivos carretes, colocando en el equipo los carretes A y B (Carretes de corrientes) en C1 y C2 respectivamente, y los M N (Carrete de Potencial) en P1 y P2 respectivamente.
- Se colocan los electrodos de cobre en las distancias ubicadas en la tabla de levantamiento a partir del cero inicial.

- Los dos electrodos de Corriente A y B se colocan inicialmente a 1.00 mt y los de potencial M y N a 0.50 mts de distancia desde el "0" inicial que representa la posición del resistímetro. Y estos a la vez se conectan a los carretes por medio de conectores.

4.6 RESULTADO DEL LEVANTAMIENTO

Los datos obtenidos en campo fueron los siguientes:

SONDEO N°1

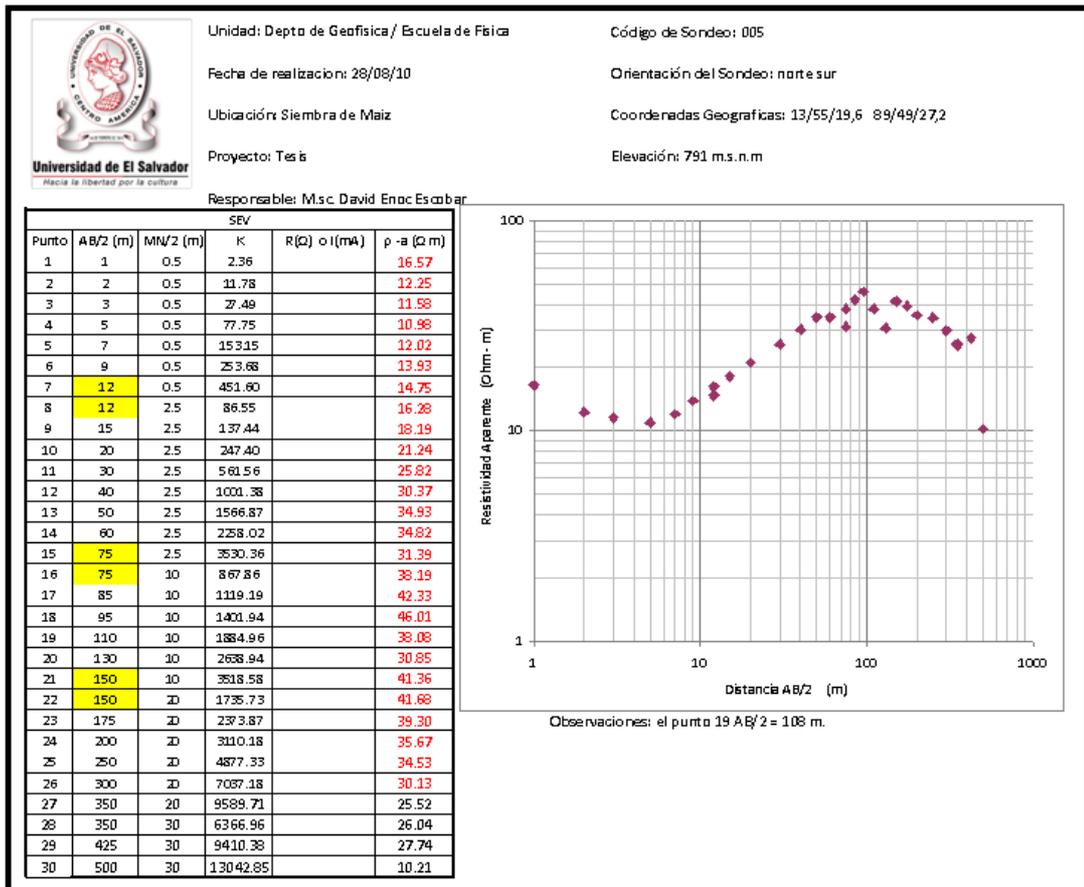


Figura 4.3 Toma de datos del Sondeo N°1 y Grafico preliminar.

SONDEO N°2

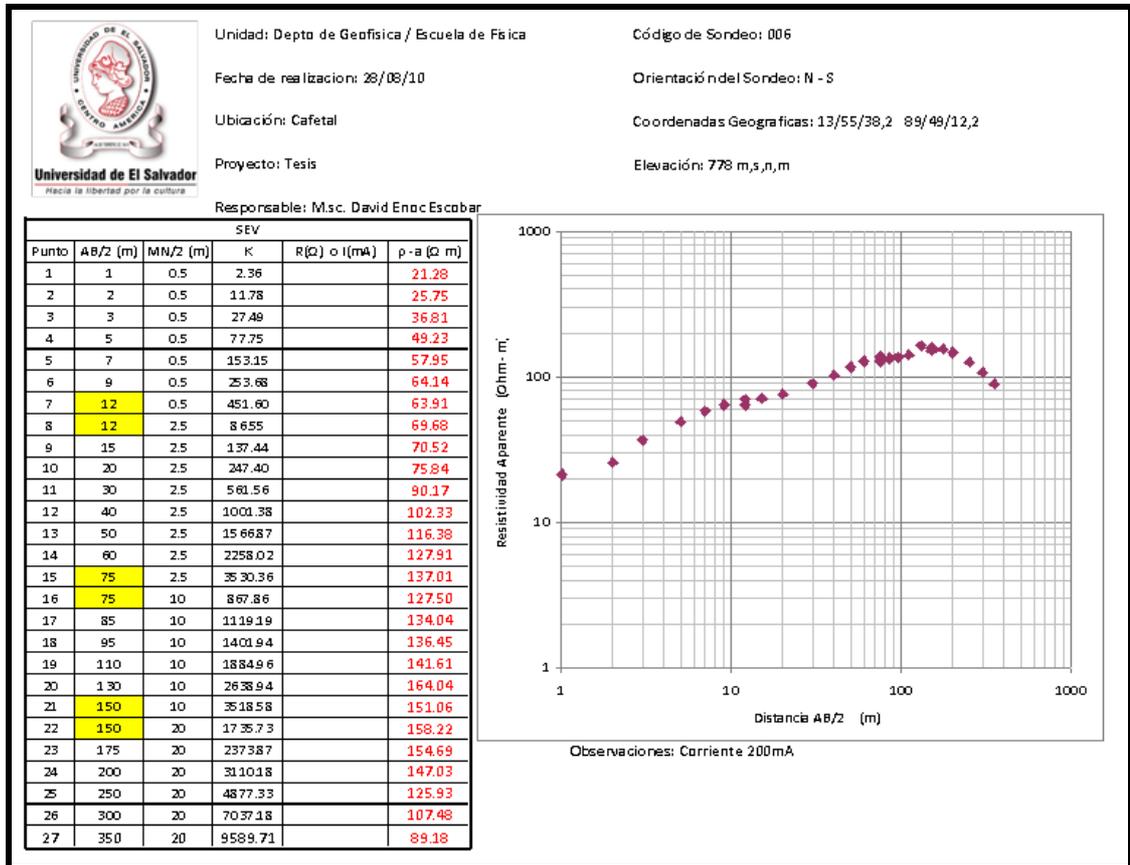


Figura 4.4 Toma de datos sondeo N°2 y Grafico preliminar

SONDEO N° 3

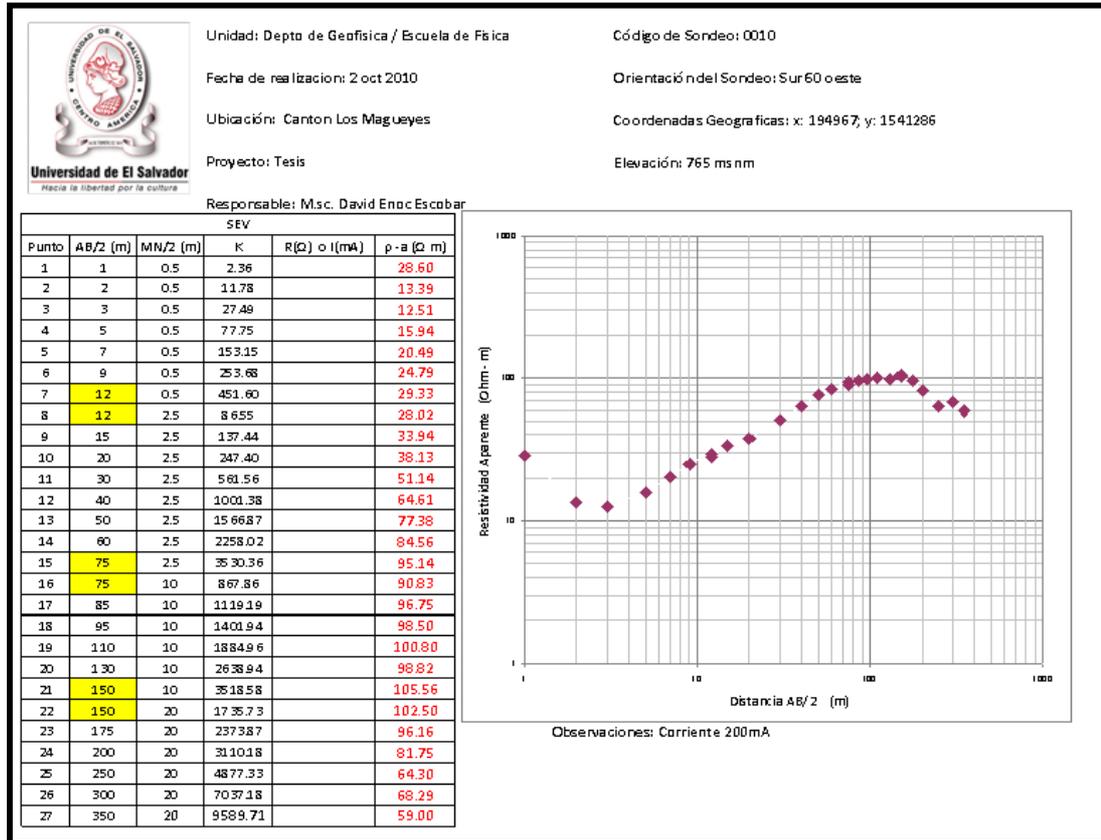


Figura 4.5 Toma de datos sondeo N° 3, y Grafico preliminar

CAPITULO V

ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

5.1 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

5.1.1 DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE COMPUTO

El análisis y procesamiento de los datos obtenidos en campo es de gran importancia para lograr establecer las mejores alternativas de solución a la problemática de escasez de agua potable en el Cantón Los Magueyes de Ahuachapán

Como se ha mencionado anteriormente, se realizaron tres sondeos ubicados alrededor del pozo existente con el objetivo de correlacionar los datos obtenidos en campo con los ya existentes, por lo que al final se podrá determinar el lugar mas adecuado para la ubicación del pozo de extracción de agua potable y así contribuir al desarrollo de la comunidad a través de incrementar la dotación de agua potable en la zona.

Para el modelado en interpretación de los datos, nos hemos auxiliado del programa DCINV (Direct Current Inverse), el cual usa modelos de capas horizontales. Aunque el programa tiene la capacidad para modelar datos de Schlumberger, Wenner y Dipolo – Dipolo, en este trabajo lo utilizaremos para modelar e interpretar las curvas de resistividad obtenidas por el método Schlumberger.

El programa DCINV se puede es compatible con el sistema operativo Windows (98, NT, 2000 y XP) con una resolución mínima de visualización grafica de 1024 x 768. Los requisitos de memoria y velocidad de procesamiento no presentan ningún límite para utilizar el programa.

A continuación se hará una breve explicación acerca del ambiente y uso del DCINV, que será el programa en el que nos estaremos apoyando para la interpretación de los datos; así como

también la forma cómo se ubican los datos y la lectura que se la realizara a los gráficos que nos proporcionara el software.

Lo primero que se tiene que realizar es crear un bloc de notas con todos los datos obtenidos en campo, siendo estos, la separación AB, MN y su respectiva resistividad obtenida de la medición; la forma de colocarlos en el bloc de notas es la siguiente:

1. La primera línea es para insertar un comentario que identifique el sondeo que se realizara
2. La tercera línea se utiliza para definir que tipo de arreglo estamos realizando y que es lo que deseamos encontrar. Por ejemplo para un arreglo Schlumberger que es en nuestro caso, se tendría que colocar el numero 1, mientras que para un arreglo Wenner se utiliza el 2 y para Dipolo - Dipolo el numero 3. Como podemos observar en la figura 5.1 se ha ubicado el numero 1 y a la par de él está el cero, ya que el cero nos indica que son valores de resistividad aparente los que hemos introducido al programa.
3. En la cuarta línea, el primer parámetro nos indica cuantas lecturas se realizaron en el sondeo, el siguiente parámetro corresponde a la columna en donde se ubican los valores de resistividad aparente; como podemos observar en la figura en la parte inferior sobresalen 4 columnas, entonces en la tercera es en donde están los valores de resistividad aparente y por último se tiene que colocar el numero de columnas que se encuentran en el bloc de notas.
4. En la parte inferior se ubican 4 columnas, la primera es para las distancias AB, la segunda para MN, la tercera es para los datos de resistividad aparente obtenidos en campo y al final están los valores de peso de cada medición, que generalmente es constante y se le asigna el valor de 1.

Hay que tener en cuenta que en el bloc de notas hay que introducir los datos como se muestra en la figura 5.1, de no hacerlo el programa no procesara de una manera adecuada todos los datos y se producirá un error en la lectura de ellos.

Es de gran importancia mencionar, que al momento de crear el bloc de notas, al momento de guardarlo hay que realizarlo como archivo.dat, esto para no tener problemas cuando se desee exportar el archivo.

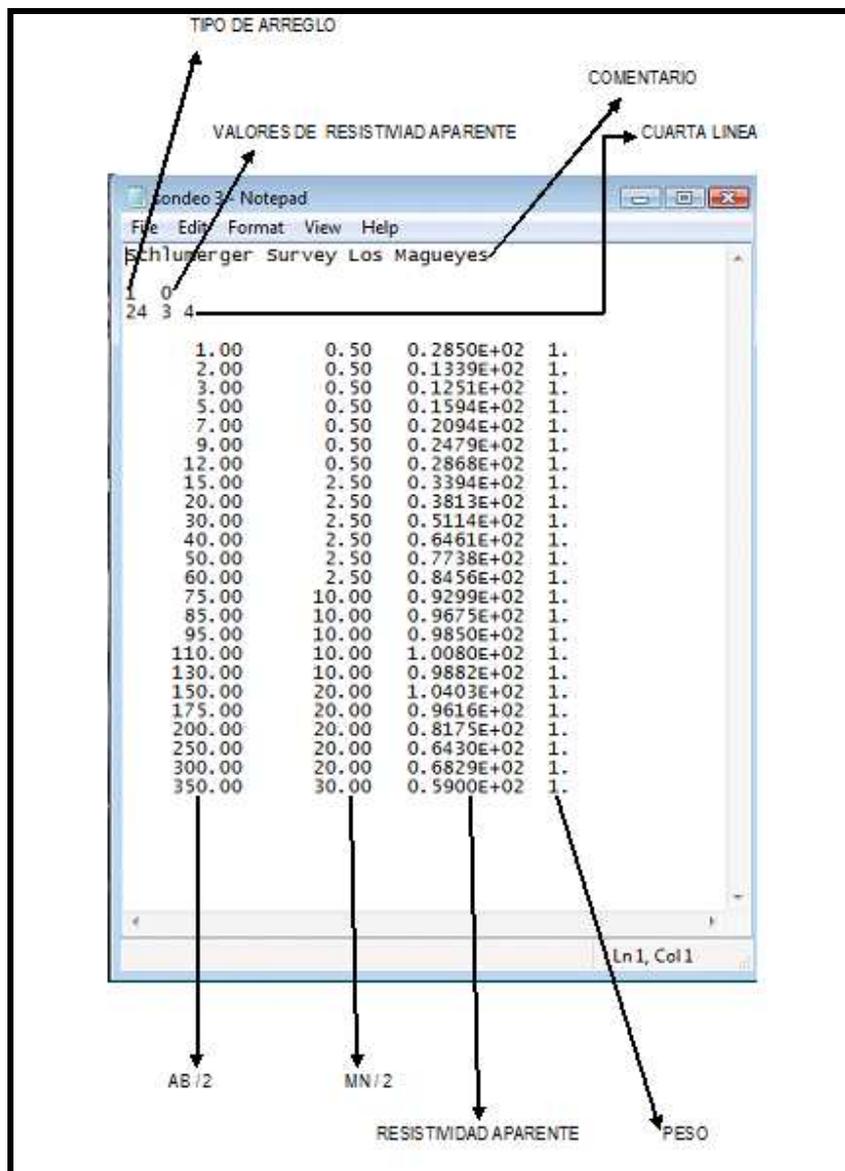


Figura 5.1 Introducción de los datos de campo en un bloc de notas

El siguiente paso a seguir es abrir el programa DCINV, en el que podemos observar que posee una barra de herramientas en las que incluyen los botones de file, edit y exit.

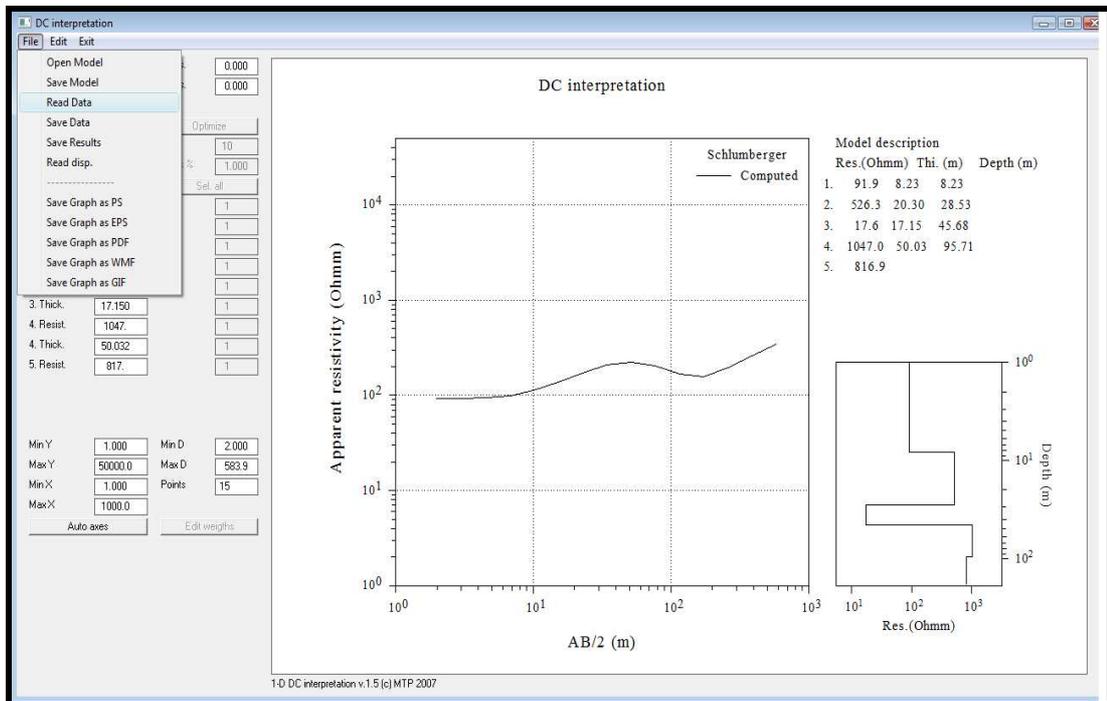


Figura 5.2 Ambiente del programa DCINV

Para exportar los datos del bloc de notas al programa, se tiene que ir a la opción file, y en ese momento se desplegaran múltiples opciones entre ellas Read Data, la cual se tiene que seleccionar y buscar el bloc de notas e inmediatamente los datos se exportan al programa. Hay otras opciones enmarcadas en el botón file y son las variantes para guardar el modelo creado, se puede distinguir entre ellas Save Model, que nos sirve para guardar cualquier modelo del programa y la otra que podemos mencionar es Save Graph as PDF, que es tan solo guardar el grafico en la modalidad de PDF.

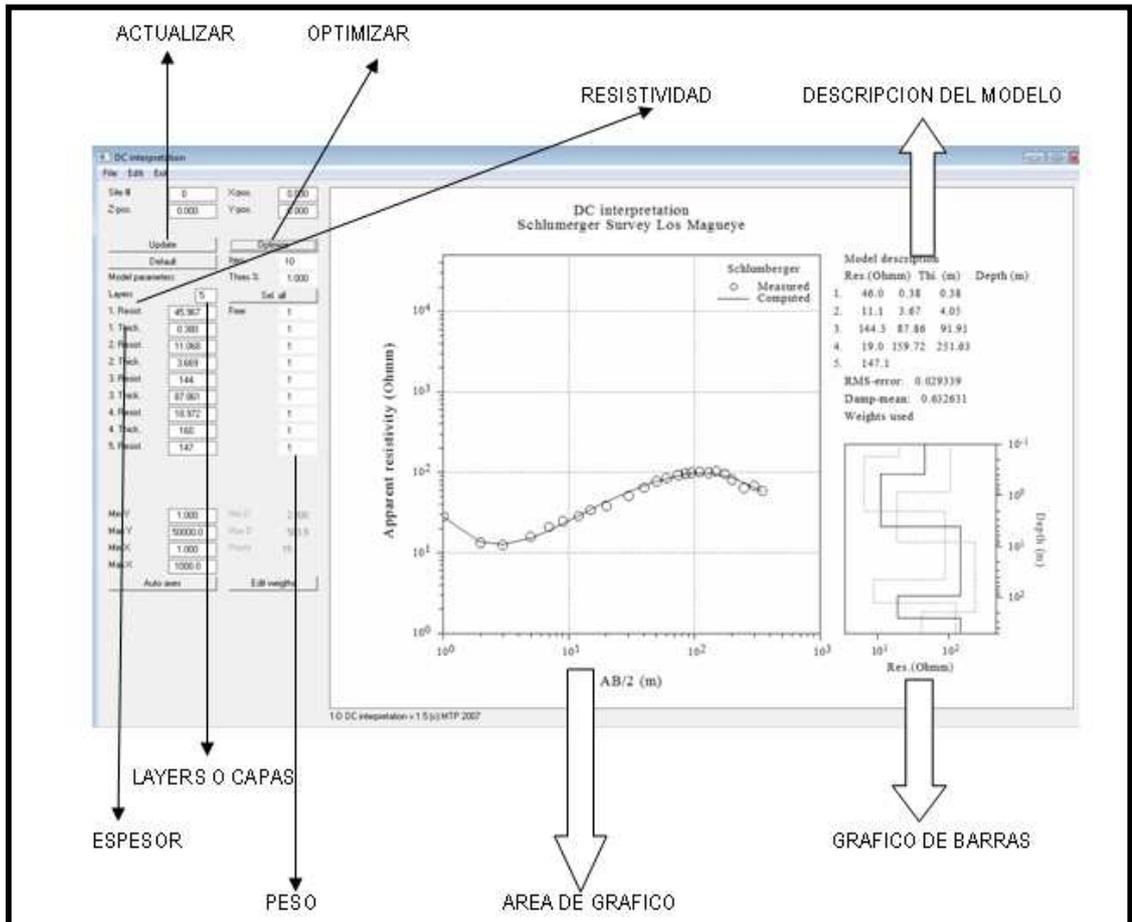


Figura 5.3 Diferentes opciones y propiedades del DCINV

Ya exportados los datos, se procede a ajustar las capas; inicialmente se puede colocar 5 capas para ver el comportamiento de la curva, luego se presiona el botón update con lo que estamos actualizándolos datos y luego se aplica optimizar, esto con el objetivo de tener un grafico con los menos errores posibles.

Si la curva no se ajusta perfectamente a los puntos, entonces habrá que realizar ciertos cambios al mismo tiempo que se observan los datos de resistividad y las capas de cada curva, por lo que hay que buscar datos idóneos para el perfecto ajuste del modelo.

Una vez ajustada perfectamente la curva se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en campo.

5.2 ANALISIS Y RESULTADOS DEL MODELO UTILIZANDO EL PROGRAMA DCINV

Posteriormente de haber introducidos los datos en el programa, y de haber realizado los ajustes necesarios para obtener las posibles capas del terreno, se lograron obtener los siguientes modelos:

MODELO SONDEO N° 1

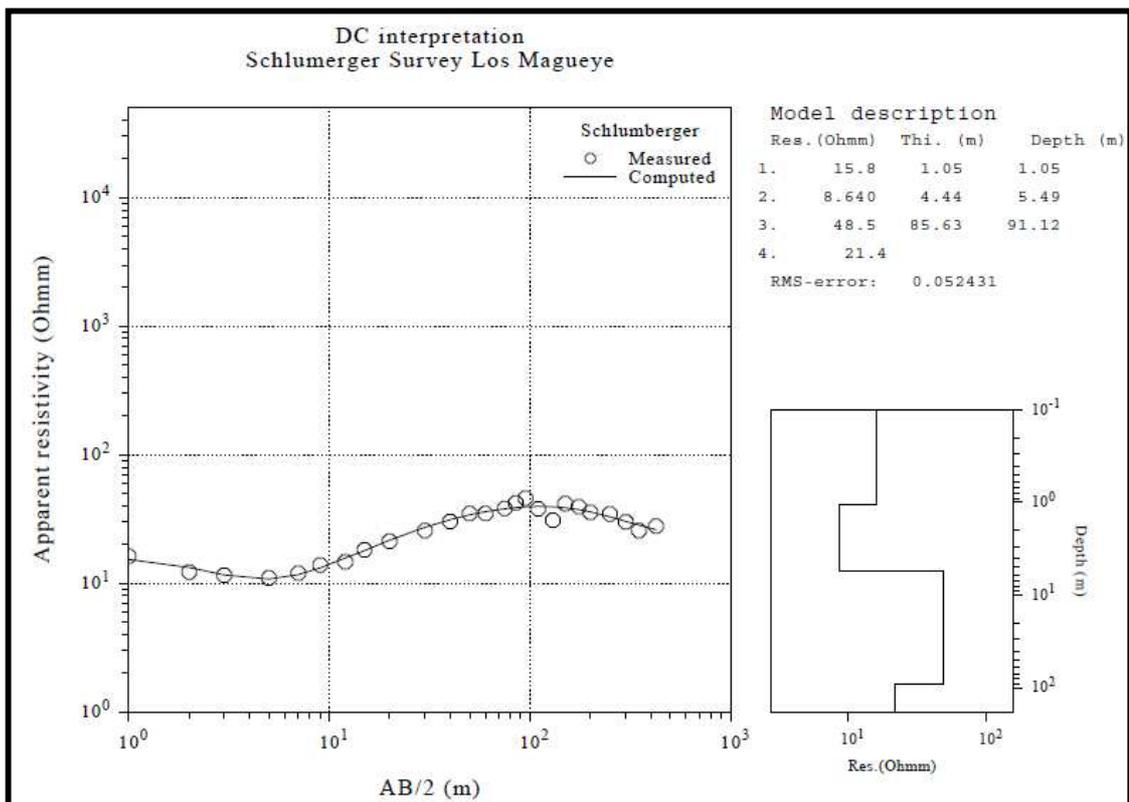


Figura 5.4. Modelo sondeo N° 1

Según la descripción del modelo:

Nº Capa	Espesores capa (m)	Profundidad (m)	Resistividad ($\Omega.m$)
1	1.05	1.05	15.8
2	4.44	5.49	8.64
3	85.63	91.12	48.5
4	infinita	-----	21.4

Tabla 5.1. Resumen de espesores de los estratos del sondeo N°1

En este sondeo se logro alcanzar una abertura máxima $AB/2$ de 500 m y el posible acuífero se logra apreciar que su profundidad se encuentra alrededor de 91.00 m.

MODELO SONDEO N° 2

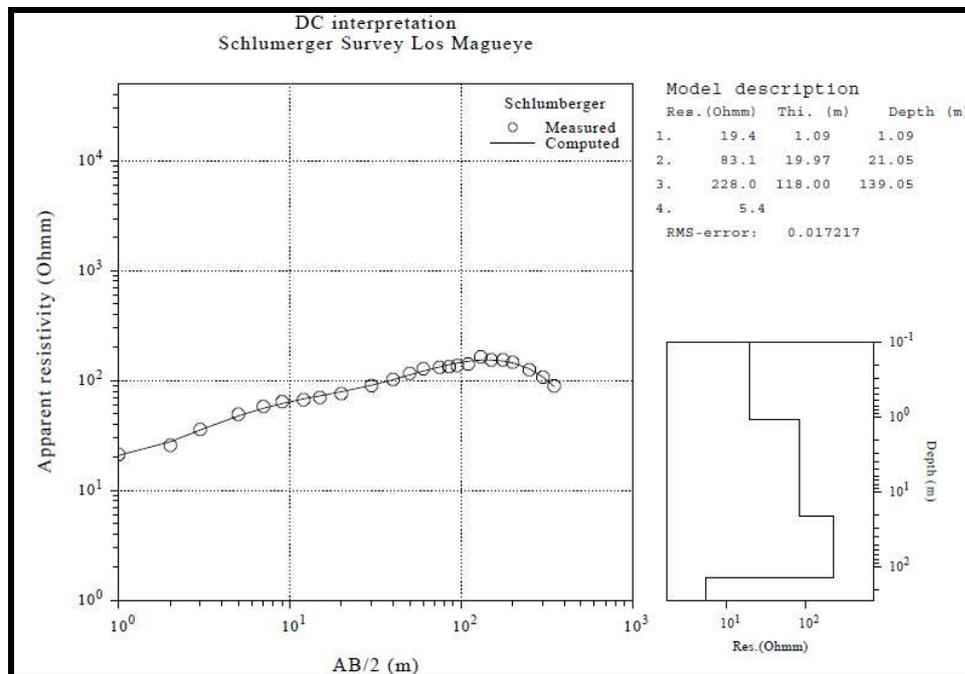


Figura 5.5 Modelo del Sondeo N° 2

Según la descripción del modelo:

Nº Capa	Espesores capa (m)	Profundidad (m)	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
1	1.09	1.09	19.4
2	19.97	21.05	83.1
3	118	139.05	228
4	infinita	-----	5.4

Tabla 5.2. Resumen de espesores de los estratos del sondeo N°2

En este sondeo la abertura máxima $AB/2$ fue de 350 m y el posible acuífero se logra apreciar que su profundidad se encuentra alrededor de 140.00 m.

Esta profundidad resultó ser un poco alto, debido a la topografía del terreno y las condiciones litológicas de la zona.

MODELO SONDEO N° 3

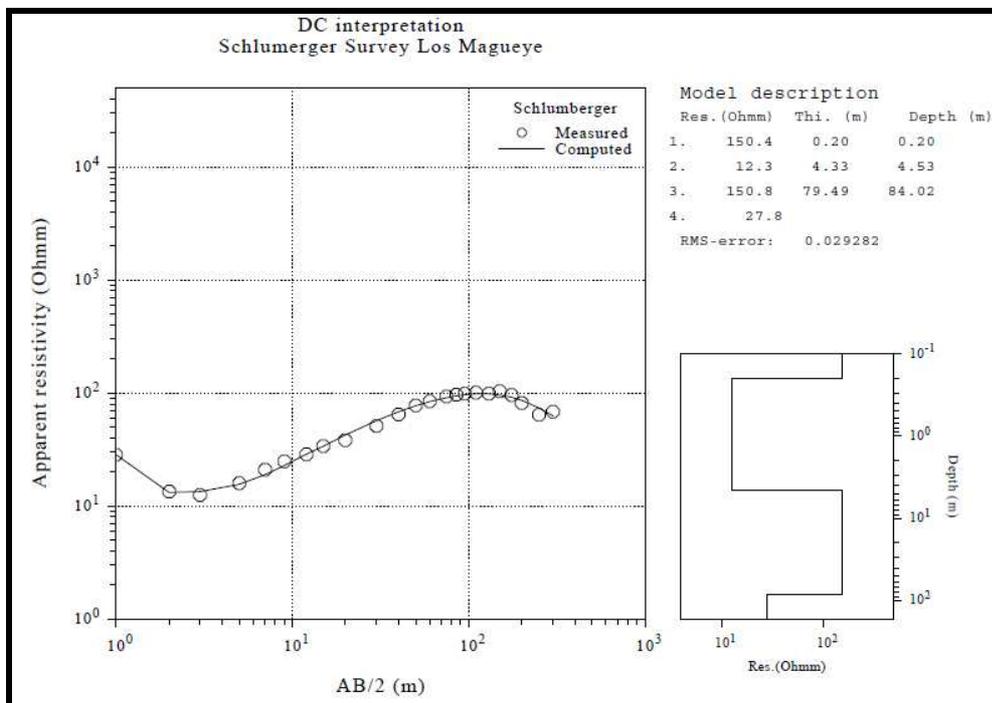


Figura 5.6. Modelo del Sondeo 3

Según la descripción del modelo:

N° Capa	Espesores capa (m)	Profundidad (m)	Resistividad (Ω .m)
1	0.2	0.2	150.4
2	4.33	4.53	12.3
3	79.49	84.02	150.8
4	infinita	-----	27.8

Tabla 5.3. Resumen de espesores de los estratos del sondeo 3

En este sondeo la abertura máxima $AB/2$ fue de 350 m y el posible acuífero se logra apreciar que su profundidad se encuentra alrededor de 84.00 m.

Todas las profundidades del nivel freático se consideran aceptables, esto debido a que el nivel estático del pozo existente es de 90.00 m.

CAPITULO VI

INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

6.1 RESULTADOS PRELIMINARES LITOLOGICOS DE LA ZONA

La geología de El Salvador está directamente relacionada con los eventos volcánicos sucedidos hace miles de años y el caso de Ahuachapán no es la excepción, por lo que el Cantón Los Magueyes se ha visto influenciado por los acontecimientos de origen volcánico como son , el volcán de Santa Ana, La Laguna verde y el de San Salvador.

La litología en estudio está estrechamente relacionada con la geología de una zona determinada, ya que con el paso del tiempo y debido a los eventos antes mencionados se van depositando una serie de materiales sobre la superficie del terreno.

Al efectuar los tres levantamientos geoelectricos utilizando el método Schlumberger y a los modelos obtenidos del programa DCINV se lograron identificar las resistividades de las diferentes capas correspondientes al subsuelo en estudio.

En este contexto y en base a los datos obtenidos en campo, se realizaron una serie de consultas a personas especializadas en geología y auxiliándonos en el mapa geológico de El Salvador, se logró esquematizar la posible litología en la zona de estudio.

Además se encuentran ciertos parámetros de resistividad de materiales y rocas que hemos correlacionado con los aspectos mencionados anteriormente, por lo que en la siguiente tabla se muestra materiales con sus respectivas resistividades.

MATERIAL	RESISTIVIDAD ($\Omega.m$)
Toba	90-200
Arcilla	1-100
Limo	20-100
Turba húmeda	5-100
Margas y arcillas compactadas	100-200
Flujos piroclásticos	44-110

Tabla 6.1. Algunos Materiales con sus resistividades respectivas

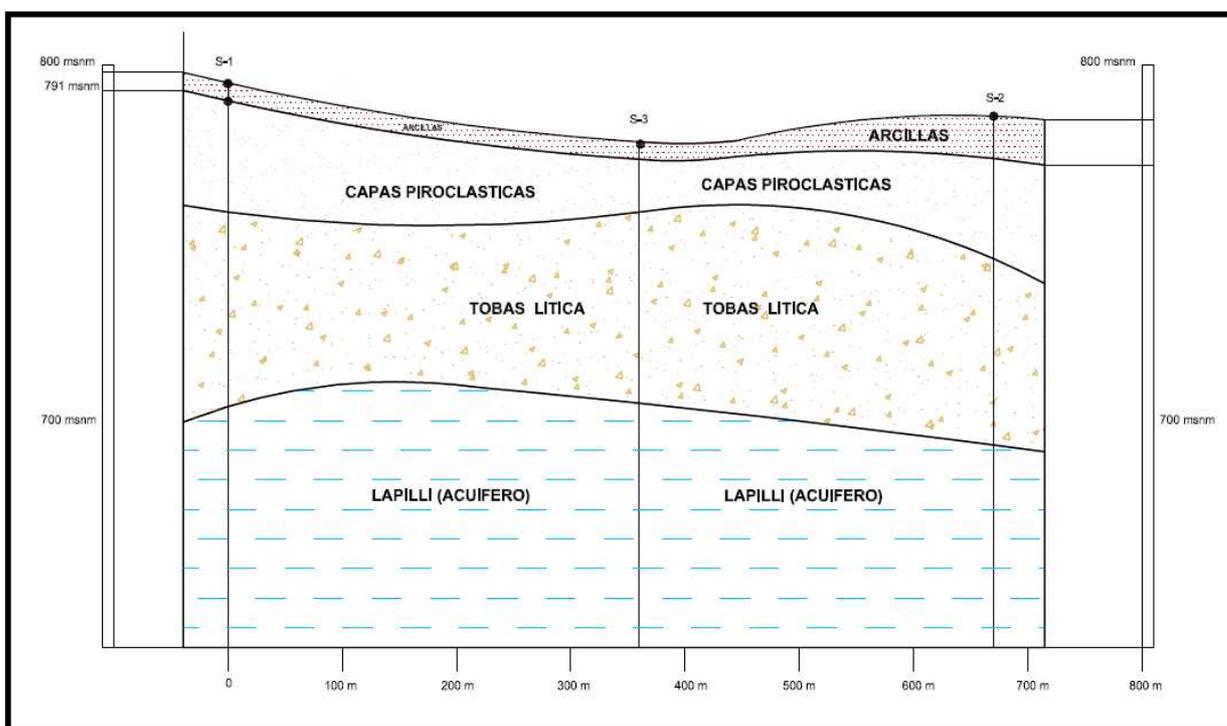


Figura 6.1 Diagrama de la Posible Litología del lugar de Estudio

El nivel freático del Sondeo N° 1 es 91 m, el Sondeo N° 2 139 m y el Sondeo N° 3 nos arroja 84 m por lo que comparado con el de el pozo existente que es de 91 m, podemos deducir que los

datos obtenidos de los levantamientos son bastante representativos en cuanto a la litología que se logro determinar en el apartado anterior.

En el caso del nivel freático del Sondeo 2 de 139m al compararlo con el Sondeo 1 y Sondeo 2, se puede observar una diferencia, esto debido a las condiciones litológicas que posee el subsuelo puede variar de un punto a otro por la heterogeneidad que se puede encontrar en un estrato determinado.

CUADRO RESUMEN DE LA LITOLOGIA PROBLABLE			
ESTRATO	RESISTIVIDAD (Ω .m)	ESPESOR (m)	CORRELACION LITOLOGICA PROBABLE
1	19-40	0.50-1.10	Se asocia con la presencia de arcilla
2	10-80	4-18	Se asocia con Capas piroclásticas
3	80-200	80-110	Se asocia con Toba Lítica
4	5-15	indefinido	Se asocia con Lapilli (Posible acuífero)

Tabla 6.2. Resumen de la litología probable

6.2 UBICACION DEL POZO A PERFORAR

En base a los datos obtenidos de los levantamientos realizados utilizando el método Schlumberger, se ha logrado determinar dos posibles alternativas para la ubicación del pozo en el Cantón Los Magueyes y que se pueden visualizar en la siguiente imagen.

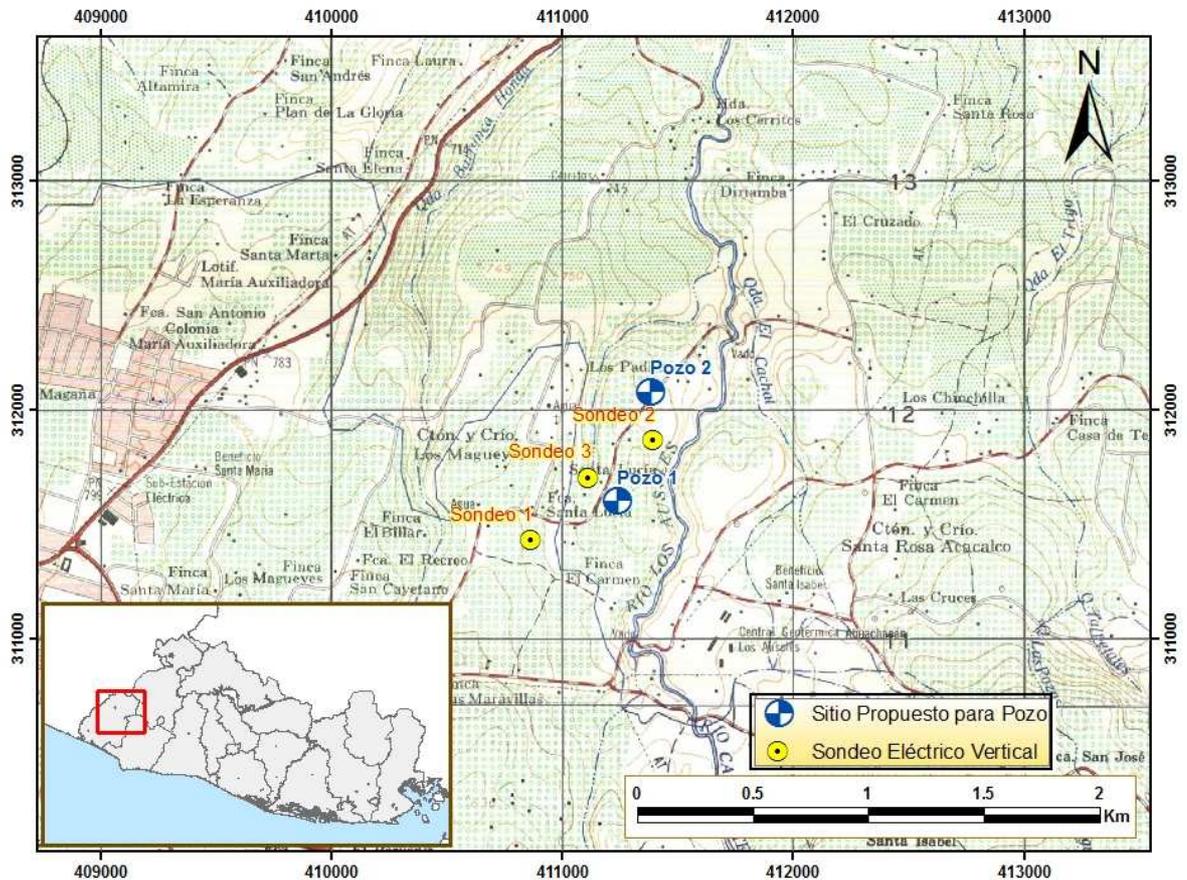


Figura 6.2. Ubicación de los sondeos y las alternativas posibles para la perforación del pozo.

Se pueden observar los sondeos realizados en la zona, estos sondeos fueron ubicados relativamente alrededor del pozo existente, con el objetivo de poder correlacionar el nivel freático del pozo existente.

La investigación tiene como objetivo determinar zonas donde es factible la perforación de pozos, y que económicamente permitan la explotación del recurso hídrico para suministrarlo a los diferentes Cantones los cuales son: El Barro, Ashapuco y El Cantón Los Magueyes, por lo que tomando en cuenta la ubicación, dirección de los sondeos realizados y la ubicación del pozo existente presentamos dos alternativas las cuales consideramos las más apropiadas para la perforación de pozos designadas alternativa P-1 y alternativa P-2.

La alternativa P-1 está ubicada a 200 m aproximadamente en dirección sureste respecto del pozo existente y con coordenadas geográficas Latitud 13°55'29.11"N, Longitud 89°49'17.00"W.

La alternativa P-2 se encuentra en un sitio denominado la cooperativa del Cantón los Magueyes a 300 m en dirección Noreste respecto del pozo existente con coordenadas geográficas Latitud 13°55'44.62"N Longitud 89°49'12.33W, las dos alternativas presentan una topografía plana con pendiente no mayor del 5%, además son puntos accesibles a la población y que representan económicamente mayor rentabilidad para aumentar la dotación en la red de distribución, además son áreas que poseen muy buena recarga hídrica aportada por la Cuenca del Río Escalante la cual posee una área superficial de 45.5 km².

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al desarrollar el trabajo de graduación se obtuvieron una serie de conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos del mismo y las cuales se detallan a continuación:

7.1 CONCLUSIONES

- El Programa que se utilizó para el procesamiento de datos fue el DCINV (Direct Current inverse), el cual nos resultó de gran ayuda para el análisis e interpretación de datos, que permitió a través de modelos estimar la resistividad y espesor de las capas así como la profundidad del nivel freático.
- Al realizar el levantamiento geofísico en la zona de estudio, se determinó por medio de los modelos obtenidos del software DCINV, que la profundidad en los tres sondeos realizados estuvieron entre 84.00 m y 140.00 m, comparado con los del pozo existente de 91.00 m, se puede confirmar que los resultados están dentro del rango esperado.
- Se logró determinar las posible litología de la zona dando como resultado lo siguiente: la primera capa se asocia con presencia de arcilla, la segunda con capas piroclásticas, la tercera se asocia con toba lítica y la ultima estudiada con Lapilli, que es donde se ubica el posible acuífero.
- Según los modelos realizados se pudieron encontrar cuatro estratos con diferentes espesores, y las resistividades promedios, Tabla 7.1.

Nº Capa	Profundidad hasta (m)	Resistividad promedio ($\Omega.m$)
1	1.00	20.00
2	21.00	80.00
3	140.00	200.00
4	-----	10.00

Tabla 7.1 Resumen de capas y sus resistividades

- Se adoptó el método Schlumberger para hacer el levantamiento geofísico, pues este es más económico respecto a otros métodos eléctricos, se necesita menos personal de campo, también es más eficiente porque requiere menor tiempo de ejecución, debido a que el arreglo de este método es más fácil de desplazar que los otros.
- Se logró establecer en este trabajo de graduación el procedimiento a seguir para la identificación de posibles mantos de aguas subterráneas utilizando métodos geolétricos específicamente el Schlumberger y que estos a su vez pueden ser utilizados por ingenieros civiles en el estudio de acuíferos subterráneos en una zona determinada. Los pasos a seguir se pueden encontrar en el capítulo IV

7.2 RECOMENDACIONES

- En investigaciones de agua subterránea con técnicas geofísicas es indispensable realizar un estudio previo de la zona de interés antes de la realización de los sondeos, realizando el adecuado número de visitas de campo al lugar de estudio y apoyándose de los mapas geológico, hidrogeológico y topográfico para seleccionar aquellas áreas de mayor recarga y que permitan llevar a cabo los sondeos con el menor número de limitantes.
- Cuando se desee realizar la perforación de pozos para agua subterránea es recomendable realizar un estudio mediante prospección geofísica, particularmente usando métodos geoléctricos, ya que permiten determinar con mayor aproximación la profundidad del nivel freático, proporcionando una mejor información del área a perforar, reduciendo el riesgo de realizar perforaciones con un elevado costo económico.
- Para futuras investigaciones de agua subterránea, es conveniente realizar un adecuado número de sondeos geofísicos para lograr determinar con mayor precisión las características litológicas de la zona de estudio, esto dependiendo del objeto de estudio y del área a investigar.
- Para la realización de los levantamientos geofísicos, es necesario tener en cuenta las condiciones climáticas desfavorables como la precipitación, ya que estas podrían poner en riesgo no solamente el equipo sino que también la vida del personal de campo, por lo que no deben llevarse a cabo cuando se tengan fuertes precipitaciones, pues podrían producirse descargas eléctricas, porque el equipo utilizado trabaja con corriente directa.
- Cuando se tengan redes de distribución eléctrica en el área a realizar los sondeos deberán tomarse todas las medidas de seguridad pertinentes,
 - (a) Retirarse al menos 50m de la red si el sondeo se realiza en dirección paralela a la red.

(b) Realizar el sondeo en dirección perpendicular a cualquier red distribución eléctrica.

- En este estudio el propósito no es la de realizar el diseño del pozo sino que ubicarlo adecuadamente tomando en cuenta los cuidados explicados arriba. Sin embargo se recomienda que en futuros temas de investigación se haga un estudio del diseño e instalación del pozo incluyendo las características de la bomba a utilizar para la extracción del recurso agua.
- Que este trabajo de tesis sirva de guía para futuras investigaciones en otras áreas de la ingeniería civil, para análisis de estabilización de taludes por ejemplo o el reconocimiento de las propiedades dinámicas del suelo mediante las técnicas descritas en todo el desarrollo de este documento.
- Que esta investigación sea utilizable a los habitantes de los Cantones Ashapuco, El Barro y los Magueyes y que en coordinación con otras instituciones, se logre la perforación de un pozo que les permita aumentar la dotación de agua en sus hogares.
- Se recomienda realizar futuros estudios sobre la calidad del agua, en la zona donde se efectuó el levantamiento geofísico.
- Se recomienda realizar futuros estudios en cuanto a la cantidad del recurso hídrico, para así determinar si el caudal es suficiente para abastecer a los Cantones de Ashapuco, El Barro, y Los Magueyes.
- Se recomienda ubicar el pozo a perforar según las alternativas descritas en la figura 6.2. del presente trabajo de graduación.

BIBLIOGRAFIA

- Oscar Mauricio Jaime, (1970); Tesis "Aplicación de la Geofísica en la Investigación de Aguas Subterráneas". Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- González García, José Alberto. (1996); Tesis "Principios de Geofísica Exploratoria, Su Aplicación en los Estudios del Campo Geotérmico de Ahuachapán". Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- José tomas Soriano, (1988); Tesis "Implementación del Método de Resistividad Eléctrica para la Prospección Geofísica". Universidad de El Salvador San Salvador, El Salvador.
- López José Manuel, Julio, Néstor. (2008); Tesis "Aplicación del Método de Refracción Sísmica Para la Determinación de Velocidades de Ondas P". Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Linares Elizondo, Roberto, (1985); Tesis "Microzonificación Sísmica del A.M.S.S. Basada en Observaciones de Micro Temblores, Espectros de Respuesta y Registros de Sismocópios". UCA, San Salvador, El Salvador.
- "Prospección Geoeléctrica en Corriente Continúa". Segunda Edición corregida y ampliada, Ernesto Orellana. Madrid España 1982.
- "Geofísica Aplicada a la Hidrogeología". Jean Louis Atier, Ingeniero consultor en Prospección Geofísica.
- Monografía de Ahuachapán, 2003.
- Manual Terrameter ABEM SAS 1000.

APUNTES:

- Escobar David Enoc (2008); Apuntes del curso “Geofísica General” Ciclo I 2008, Escuela de física, facultad de CCNN y matemáticas Universidad de El Salvador (UES), San Salvador, El Salvador.

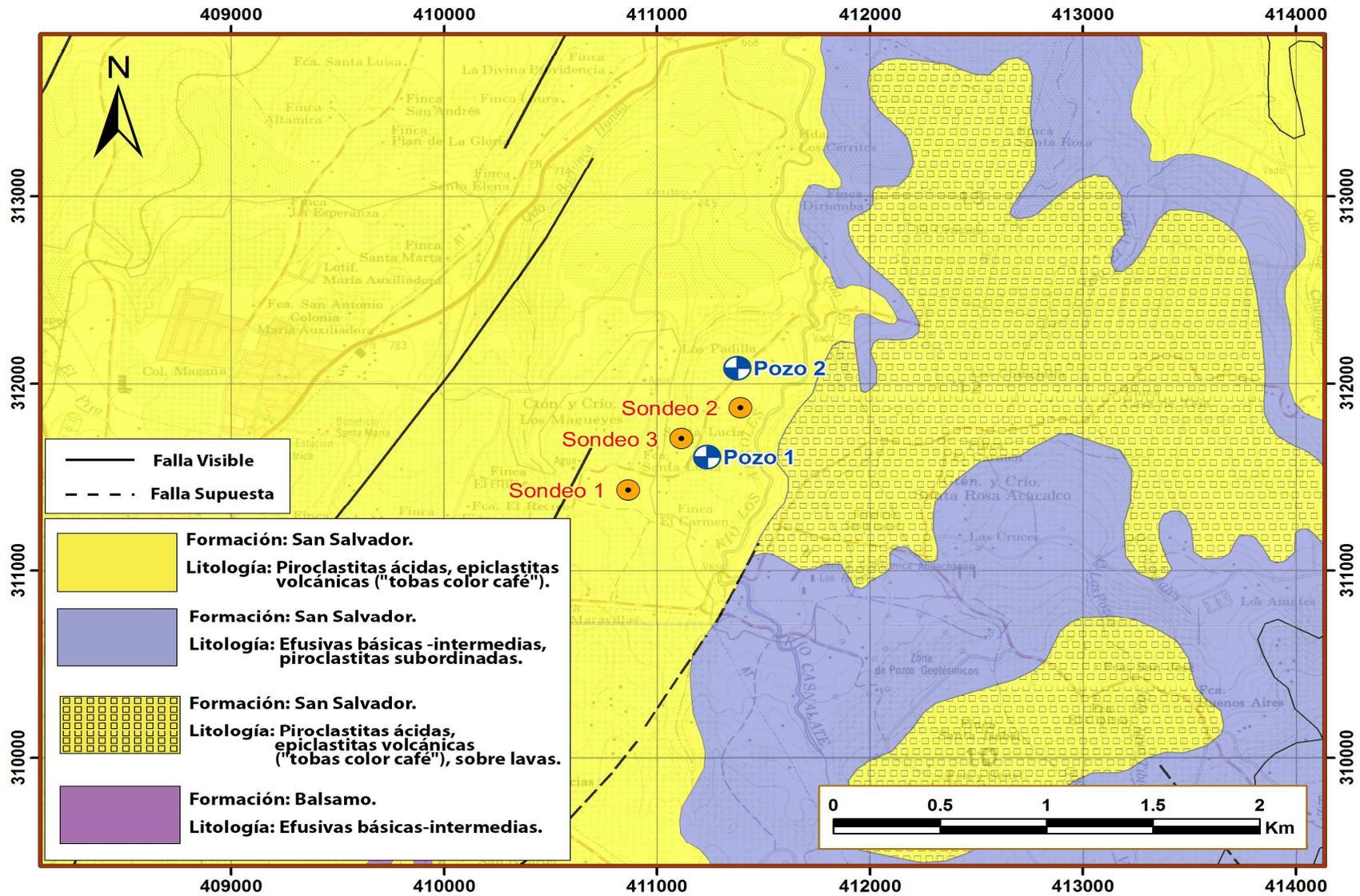
DOCUMENTOS EN INTERNET:

- PROPIEDADES FISICAS DEL AGUA SUBTERRANEA Y ACUIFEROS II
CI51J Hidráulica de Aguas Subterráneas y Su Aprovechamiento
Profesor C. Espinoza.
<http://www.cec.uchile.cl/~ci51j/txt/Apuntes/Tema04.pdf>
- MUCHO MAS QUE SIMPLE AGUA, AGUA SUBTERRANEA, ACUIFEROS. Publicado por Eva Sánchez Ramírez
<http://muchomasquesimpleagua.blogspot.com/>
- UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID FACULTAD DE EDUCACION, DPTO. DIDACTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, Escorrentía Subterránea, Acuíferos.
http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc_sub_acuifero.html
- GEOFISICA APLICADA EN LOS PROYECTOS BASICOS DE INGENIERIA CIVIL, ALFONSO ALVAREZ MANILLA ACEVES, PUBLICACION TECNICA N° 229. SANFANDILA, Qro, 2003.
http://grupos.emagister.com/documento/metodos_geofisicos_aplicados_a_la_ingenieria_civil/

- UNIVERSIDAD SIMON BOLIVAR. Ingeniería Geofísica, Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Urumaco, Estado Falcón. Br. Alfredo Peralta Segnini.
<http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Tesis/Pre/Alfredo%20Peralta.pdf>

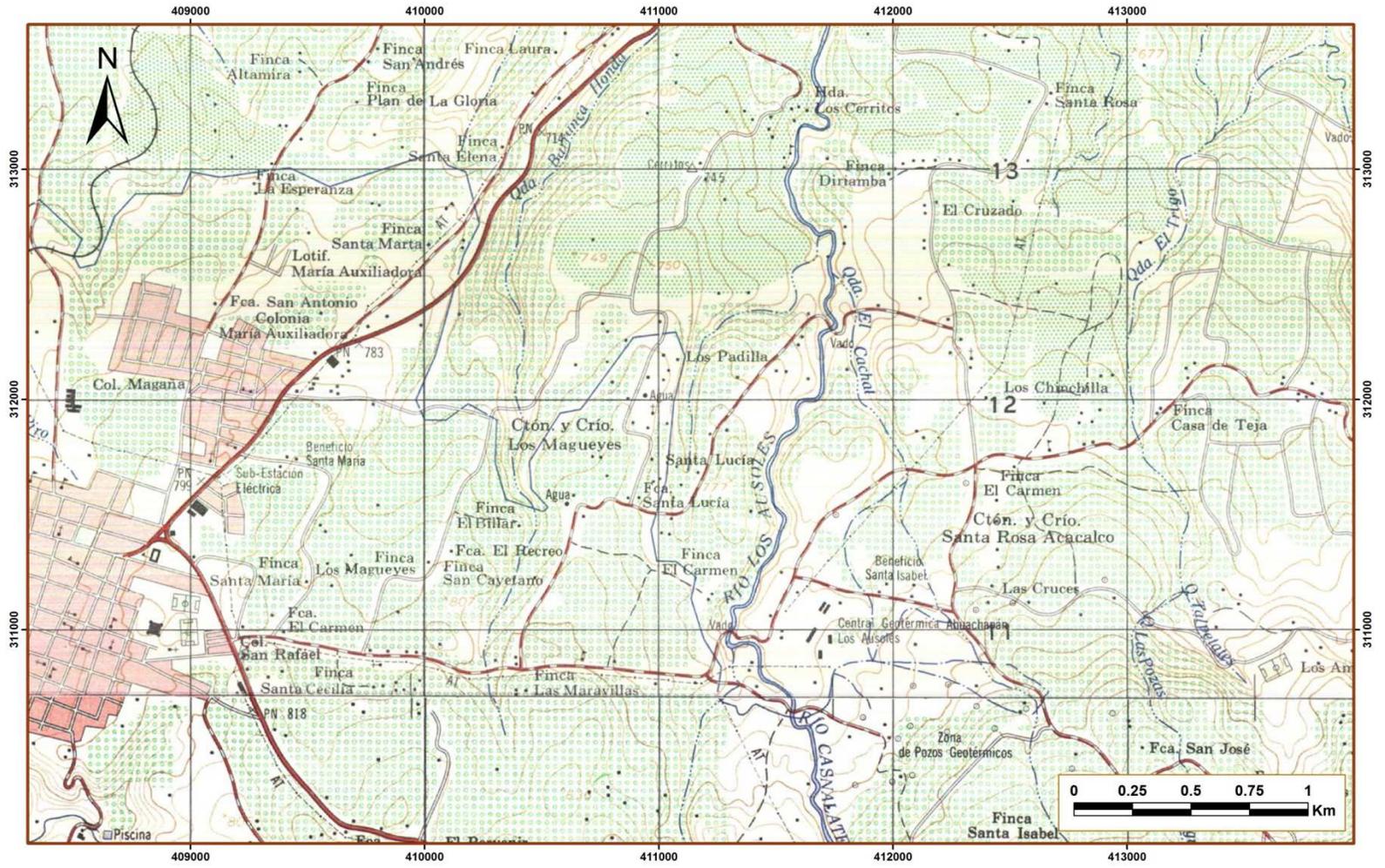
ANEXOS

MAPA GEOLOGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO



Esquema volcano-estratigráfico / Vulkanostratigraphisches Schema		Extensión vertical de las unidades mapeadas Vertikalverbreitung der Kartiereinheiten			
		Efusivas Eftusiva ácido → básico sauer → basisch	Piroclásticas Pyroklastite ácido → básico sauer → basisch	Epiciaslas epiclastische volcánicas Vulkanische Epiklastite	Facies de cuencas Beckenfazies
Holoceno	Formación de SAN SALVADOR Folge	1: Aluviones, localmente con intercalaciones de piroclásticas; 's': barras costeras; 'm': manglares			
		1: Aluviones, örtlich mit Einschaltungen von Pyroklastiten; 's': Strandwälle, 'm': Mangroven	s5	s5c	
		Efusivas basálticas; 'c': cenizas y tobas de lapilli Basaltische Eftusiva; 'c': Aschen und Lapillituffe	s4a	s4	s4
Plio-Pleistoceno	Formación de CUSCATLÁN Folge	Piroclásticas ácidas ("tierra blanca"); 'a': efusivas ácidas Saure Pyroklastite ("Tierra blanca"); 'a': Saure Eftusiva	s3a	s3	s3
		Piroclásticas ácidas, epiciaslas volcánicas ("tobas color café"); 'a': efusivas ácidas Saure Pyroklastite, vulkanische Epiklastite ("Tobas color café"); 'a': Saure Eftusiva	s2	s2	s2
		Efusivas andesíticas y basálticas; piroclásticas Andesitische und basaltische Eftusiva; Pyroklastite	s1	s1	s1
Plio-Pleistoceno	Formación de BÁLSAMO Folge	Piroclásticas ácidas, epiciaslas volcánicas, tobas ardientes y fundidas; efusivas andesíticas Saure Pyroklastite, vulkanische Epiklastite, mit Glut- und Schmelztuffen; andesitische Eftusiva	c3	c3	c3
		Efusivas andesíticas y basálticas Andesitische und basaltische Eftusiva	c2	c1	c1
		Efusivas ácidas e intermedias-ácidas (ocurrencias aisladas eventualmente = ch2) Saure und intermediär-saure Eftusiva (isolierte Vorkommen evtl. = ch2)	b3	b3	b2
?Oligoceno - ?Mioceno	Formación de CHALATENANGO Folge	Piroclásticas ácidas, epiciaslas volcánicas con tobas ardientes y fundidas; efusivas ácidas intercaladas. Edad de c localmente posible. / Saure Pyroklastite, vulk. Epiklastite, mit Glut- und Schmelztuffen;	b1	b1	b1
		Efusivas ácidas (ocurrencias aisladas eventualmente = c2); riolitas Saure Eftusiva (isolierte Vorkommen evtl. = c2); Rhyolithe	ch2	ch1	ch1
		Granito, granodiorita saure Eftusiva eingeschaltet; Lokal c-Alter möglich.	m2	m2	m2
?Oligoceno - ?Mioceno	Formación de MORAZÁN Folge	Piroclásticas ácidas, epiciaslas volcánicas, tobas ardientes y fundidas; piroclásticas, epiciaslas Pyroklastite, vulk. Epiklastite, Regional hydrothermal zersezt.	m1	m1	m1
		Efusivas intermedias-ácidas, piroclásticas, tobas ardientes, riolitas; epiciaslas volcánicas. Ocurrencias aisladas eventualmente más jóvenes. / Intermediär-saure Eftusiva, Pyroklastite, Glutuffe, Rhyolithe, vulk. Epiklastite. Isolierte Vorkommen evtl. jünger.	m3	m3	m3
		Conglomerados de cuarzo y caliza rojas, areniscas; intercalaciones de vulcanitas Rote Quarz- und Kalkkonglomerate, Sandsteine; Vulkanite eingeschaltet	me3	me3	me3
?Jurásico - Cretácico	Fm. de METAPÁN Folge	Calizas y calizas margosas Kalksteine u. Mergelkalksteine	me1a	me1a	me1a
		Conglomerados de cuarzo, areniscas, siltitas y lutitas; vulcanitas básicas -intermedias subordinadas. 'a': metasedimentos, metavulcanitas Quarzkonglomerate, Sandsteine, Schluffe und Tonsteine; untergeordnet basisch-intermediäre Vulkanite.	me1a	me1a	me1a
		'a': Metasedimente, Metavulkanite	me1a	me1a	me1a

MAPA TOPOGRAFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO



GLOSARIO DE TERMINOS

ABEM SAS 1000. Resistivímetro utilizado para medir resistividades eléctricas provenientes del subsuelo, manufacturado por la empresa ABEM INSTRUMENT AB con sede en Suecia.

Acuífero. Formación geológica subterránea compuesta de grava, arena o piedra porosa, capaz de almacenar y rendir agua.

ANDA. Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.

Conductividad eléctrica. Es la capacidad de un cuerpo o medio para conducir la corriente eléctrica, es decir, para permitir el paso a través de él de partículas cargadas (electrones).

Cuenca. Territorio en que las aguas fluyen al mar a través de una red de cauces secundarios que convergen en un cauce principal único.

DCINV. Iniciales correspondientes a Direct Current Inverse. Programa de computadora para modelar e interpretar datos de sondeos eléctricos verticales usando modelo de capas horizontales.

Freatófitas. Plantas de raíces profundas que obtienen el agua del nivel freático.

Fuente Sísmica. Energía generada naturalmente y artificialmente, en cuanto a los artificiales podemos mencionar el Martillo, carga explosiva, disparos.

GPS. Iniciales correspondientes a Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)

Ley de Faraday. Se basa en los experimentos que Michael Faraday realizó en 1831 y establece que el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera.

Línea de impelencia. Es el tramo de tubería que une la presa con el tanque de almacenamiento, donde el tanque está a una altura mayor que la presa.

Litología. Rama de la geología que estudia las propiedades físicas y el respectivo espesor de las capas del subsuelo.

Método Electromagnético. Método de prospección geofísica, que consiste en el estudio de la estructura geológica utilizando el comportamiento de las ondas EM que atraviesa el subsuelo..

Método Schlumberger. Método Geoeléctrico utilizado para la estimación de las resistividades del subsuelo con el objeto de identificar minerales, acuíferos subterráneos, etc.

Método sísmico. Método de prospección geofísica que consiste en emplear las ondas elásticas que se propagan a través del terreno y que son generadas artificialmente. Su objetivo es el estudio del subsuelo y nos permite obtener información geológica de los materiales que lo conforman.

Nivel freático. Superficie más alta de la zona de saturación del agua subterránea.

PLANSABAR. Plan Nacional de Saneamiento Básico Rural.

Prospección Geofísica. Es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, aplicadas a la exploración de subsuelos.