

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE FÍSICA



**Universidad de El Salvador**  
*Hacia la libertad por la cultura*

*Trabajo de Graduación*

**“EVALUACIÓN GEOELÉCTRICA DEL ANTIGUO BOTADERO DE  
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE MARIONA”**

*Presentado Por:*

**Francisco Paul Rivera Acosta**

**Osmany René José Aparicio Monjaras**

*Para Optar al Grado de:*

**Licenciatura en Física**

*Ciudad Universitaria, 23 de marzo de 2009*

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE FÍSICA



**Universidad de El Salvador**

*Hacia la libertad por la cultura*

*Trabajo de Graduación*

**“EVALUACIÓN GEOELÉCTRICA DEL ANTIGUO BOTADERO DE  
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE MARIONA”**

*Presentado Por:*

**Francisco Paul Rivera Acosta**

**Osmany René José Aparicio Monjaras**

*Asesores:*

**M.Sc. Dagoberto Arévalo Herrera**

**M.Sc. David Enoc Escobar**

Ciudad Universitaria, 23 de marzo de 2009

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE FÍSICA



**Universidad de El Salvador**  
*Hacia la libertad por la cultura*

*Trabajo de Graduación*

**“EVALUACIÓN GEOELÉCTRICA DEL ANTIGUO BOTADERO DE  
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE MARIONA”**

*Presentado Por:*

**Francisco Paul Rivera Acosta  
Osmany René José Aparicio Monjaras**

*Asesores:*

---

**M.Sc. Dagoberto Arévalo Herrera**

---

**M.Sc. David Enoc Escobar**

Ciudad Universitaria, 23 de marzo de 2009

## AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

*Rector:* **M.Sc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

*Secretario General:* **Lic. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

*Fiscal General:* **Dr. RENÉ PERLA JIMÉNEZ**

## FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

*Decano:* **Dr. RAFAEL ANTONIO GÓMEZ ESCOTO**

*Secretaria:* **LICDA. MARÍA TRINIDAD TRIGUEROS**

*Dir. Escuela de Física:* **M.Sc. VÍCTOR LAUREANO CORTEZ LARA**

Ciudad Universitaria, 23 de marzo de 2009

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	I
ÍNDICE FIGURAS .....	III
ÍNDICE TABLAS .....	V
AGRADECIMIENTOS .....	VI
DEDICATORIAS .....	VII
RESUMEN.....	IX
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	1
1.1.1. <i>General</i> .....	1
1.1.2. <i>Específicos</i> .....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	2
1.3. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE .....	4
1.3.1. <i>Composición de lixiviados</i> .....	5
1.4. ANTECEDENTES .....	7
1.5. JUSTIFICACIÓN .....	9
1.5.1. <i>Justificación del método</i> .....	10
1.6. GEOLOGÍA Y RELIEVE.....	12
1.6.1. <i>Geología</i> .....	12
1.6.2. <i>Relieve</i> .....	15
1.7. RECURSO HÍDRICO .....	17
<b>2. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS DE RESISTIVIDAD.....</b>	<b>19</b>
2.1. GENERALIDADES.....	19
2.2. PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS.....	19
2.3. TÉCNICA DEL SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL (SEV) .....	21
2.4. PENETRACIÓN .....	22
1.5. ARREGLO SCHLUMBERGER .....	25
1.6. ARREGLO DE DIPOLO - DIPOLO .....	29
<b>3. INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO .....</b>	<b>31</b>
3.1. INFILTRACIÓN .....	31
3.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE INFILTRACIÓN .....	32
3.3. ECUACIÓN DE INFILTRACIÓN .....	33
3.4. MÉTODO DE LOS CILINDROS INFILTRÓMETROS (DOBLE ANILLO). .....	34

<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>35</b>
4.1. FASE PRELIMINAR .....	35
4.1.1. <i>Geología</i> .....	36
4.1.2. <i>Precipitación y evaporación</i> .....	36
4.1.3. <i>Topografía</i> .....	36
4.1.4. <i>Hidrogeología</i> .....	36
4.2. FASE DE CAMPO .....	36
4.2.1. <i>Inventario de fuentes de agua</i> .....	37
4.2.2. <i>Pruebas de infiltración</i> .....	39
4.2.3. <i>Prospección geoelectrica</i> .....	40
<b>5. RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>42</b>
5.1. PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE LOS SEV .....	42
5.2. PERFIL GEOELÉCTRICO NORTE-ESTE SUR-ESTE.....	46
5.3. PRUEBAS DE INFILTRACIÓN .....	50
5.4. GRADIENTE HIDRÁULICO .....	56
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>57</b>
6.1. CONCLUSIONES .....	57
6.2. RECOMENDACIONES .....	58
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE FIGURAS

<b>FIGURA 1-1:</b> UBICACIÓN GEOGRÁFICA DONDE SE ENCUENTRA EL EX BOTADERO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE MARIONA (FOTO TOMADA DE GOOGLE EARTH LATITUD .....	3
<b>FIGURA 1-2:</b> CORTE GEOELÉCTRICO ESQUEMÁTICO OBTENIDO A PARTIR DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES REALIZADOS EN UNA ZONA ALUVIAL DEL RIO LLOBREGAT. BARCELONA ESPAÑA. (ACTA GEOLÓGICA HISPÁNICA, v. 30 (1995), Nº 1-3, p. 73 – 82 [PUB. 1996]) .....	11
<b>FIGURA 1-3:</b> IZQUIERDA: GEOLOGÍA POR FORMACIÓN GEOLÓGICA <i>DERECHA:</i> GEOLOGÍA POR MIEMBRO GEOLÓGICO. TOMADO DE MAPA GEOLÓGICO NACIONAL, 1978.....	15
<b>FIGURA 1-4:</b> MAPA DE ELEVACIONES DE LOS MUNICIPIOS DE APOPA - NEJAPA.....	16
<b>FIGURA 1-5:</b> <i>ARRIBA:</i> MAPA DE LA CUENCA DEL RÍO ACELHUATE <i>ABAJO:</i> MAPA HIDROGEOLÓGICO DE EL SALVADOR. ....	18
<b>FIGURA 2-1:</b> MUESTRA LOS MÁRGENES DE VARIACIÓN MÁS COMUNES EN ALGUNAS ROCAS Y MINERALES. LA FISURACIÓN, IMPREGNACIÓN DE AGUA SALADA, ETC. PUEDEN EXTENDER ESTOS LÍMITES. (ALH GEOFÍSICA, HIDALGO ANDRÉS).....	20
<b>FIGURA 2-2:</b> ESQUEMA DE LA COMPOSICIÓN DE LOS ELECTRODOS DEL SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL, SOBRE UN SUELO HETEROGÉNEO DONDE LOS ELECTRODOS A Y B SON LOS ELECTRODOS DE INYECCIÓN DE CORRIENTE Y LOS ELECTRODOS M Y N SON LOS DE POTENCIAL.....	21
<b>FIGURA 2-3:</b> DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN UN SEMIESPACIO HOMOGÉNEO (TELFORD, APPLIED GEOPHYSICS, 1990).....	24
<b>FIGURA 2-4:</b> GRAFICAQUE DESCRIBE LA CANTIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD (TELFORD, APPLIED GEOPHYSICS, 1990).....	24
<b>FIGURA 2-5:</b> ESQUEMA DE DISPOSITIVO ELECTRÓDICO <i>SCHLUMBERGER</i> .....	25
<b>FIGURA 2-6:</b> FOTO DEL EQUIPO DE SONDEO TERRAMETER SAS 4000; .....	26
<b>FIGURA 2-7:</b> ESQUEMA DE DISPOSITIVO ELECTRÓDICO <i>DIPOLO – DIPOLO</i> , DONDE LOS ELECTRODOS DE INYECCIÓN SON LOS A Y B, Y LOS DE POTENCIAL MY N .....	29
<b>FIGURA 3-1 :</b> CILINDROS INFILTRÓMETROS (DOBLE ANILLOS) .....	34
<b>FIGURA 4-1:</b> ORGANIGRAMA DE LA METODOLOGÍA A SEGUIR PARA REALIZAR LA INVESTIGACIÓN .....	35
<b>FIGURA 4-2:</b> FOTOGRAFÍA MUESTRA EL INVENTARIO DE POZOS ARTESANALES EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	37
<b>FIGURA 4-3:</b> FOTOGRAFÍA MUESTRA EL ANTIGUO NACIMIENTO DE LA PILA DEL SANJON DE SHUCHINANGO LA CUAL MUESTRA PÉRDIDA DE CALIDAD DEBIDO A LA EXISTENCIA DE LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL BOTADERO .....	38

<b>FIGURA 4-4:</b> FOTOGRAFÍA MUESTRA EL NACIMIENTO DE CHACALAPALA A UNA DISTANCIA APROXIMADA DE 1000 M DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	38
<b>FIGURA 4-5:</b> MUESTRA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE INFILTRACIÓN APLICANDO EL MÉTODO DE CILINDROS INFILTROMETROS EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	39
<b>FIGURA 4-6:</b> FOTOGRAFÍA MUESTRA LA REALIZACIÓN DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES UTILIZANDO EL MÉTODO DE SCHLUMBERGER UNA ABERTURA DE $AB/2 = 250$ M EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	40
<b>FIGURA 4-7:</b> FOTOGRAFÍA MUESTRA LA REALIZACIÓN DE LOS PERFILES ELÉCTRICOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE DIPOLO – DIPOLO CON $A = 10$ M Y $N = 8$ EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	41
<b>FIGURA 5-1:</b> MODELO DE INTERPRETACIÓN DEL SEV_01, UBICADO SOBRE EL EX – BOTADERO DE MARIONA .....	43
<b>FIGURA 5-2:</b> MODELO DE INTERPRETACIÓN DEL SEV_02, UBICADO EN EL CASERÍO SUCHINANGO .....	44
<b>FIGURA 5-3:</b> MODELO DE INTERPRETACIÓN DEL SEV_03, UBICADO AL LADO SUR DE LA CARRETERA APOPA - NEJAPA.....	45
<b>FIGURA 5-4:</b> <i>ARRIBA:</i> MUESTRA LA UBICACIÓN DE LA REALIZACIÓN DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES. <i>ABAJO:</i> PERFIL 1 ELABORADO CON LA INFORMACIÓN DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES .....	47
<b>FIGURA 5-5:</b> <i>ARRIBA:</i> MUESTRA LA UBICACIÓN DE LA REALIZACIÓN DEL DIPOLO – DIPOLO. <i>ABAJO:</i> PERFIL 2 ELABORADO CON LA INFORMACIÓN DEL DIPOLO - DIPOLO.....	49
<b>FIGURA 5-6:</b> CURVA DE LA PRUEBA DE INFILTRACIÓN # 01 REALIZADA EN EL CERRO DE NEJAPA. EL AGUA INFILTRADA PRESENTA UNA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DE <b>4.4 mmh</b> DEBIDO A QUE FUE REALIZADA SOBRE MIEMBRO GEOLÓGICO DE LA FORMACIÓN DE BÁLSAMO B3 .....	50
<b>FIGURA 5-7:</b> CURVA DE LA PRUEBA DE INFILTRACIÓN # 02 REALIZADA EN EL CASERÍO SUCHINANGO, LA CUAL PRESENTA UNA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DE <b>1.2 mmh</b> , ESTA PRUEBA FUE REALIZADA SOBRE EL MIEMBRO GEOLÓGICO S4, FORMACIÓN SAN SALVADOR. EL TIPO DE USO DE SUELO ES DE CULTIVO (MAÍZ, FRIJOL) .....	51
<b>FIGURA 5-8:</b> CURVA DE LA PRUEBA DE INFILTRACIÓN # 03 REALIZADA AL COSTADO NORTE DE LA CARRETERA QUE CONDUCE DE APOPA NEJAPA. PRESENTANDO UNA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DE, <b>2.1 mmh</b> DEBIDO A QUE FUE REALIZADA SOBRE MIEMBRO GEOLÓGICO DE LA FORMACIÓN DE SAN SALVADOR S4.....	52
<b>FIGURA 5-9:</b> CURVA PROMEDIO DE LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN # 04, 05 Y 06, REALIZADAS SOBRE EL EX – BOTADERO DE MARIONA. LA CUAL PRESENTA UNA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DE <b>0.6 mmh</b> , ESTE VALOR ESTÁ RELACIONADO A LA PRESENCIA DE UN MATERIA CON BAJA PERMEABILIDAD, LO CUAL CONCUERDA CON LA ARCILLA QUE FUE COLOCADA SOBRE EL MATERIAL DEPOSITADO EN EL BOTADERO, EL	

ESPESOR DE DICHA CAPA ES DE APROXIMADAMENTE 60 CM. DE ESPESOR, LO CUAL SIRVE COMO CAPA SELLO DEBIDO A SU IMPERMEABILIDAD. ....	53
<b>FIGURA 5-10:</b> CURVA DE LA PRUEBA DE INFILTRACIÓN # 07 REALIZADA EN LAS CERCANÍAS DEL NACIMIENTO CHACALAPA EN APOPA. LA CUAL PRESENTA UNA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DE <b>0.2 mmh</b> .....	54
<b>FIGURA 5-11:</b> UBICACIÓN Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN; IZQUIERDA: UBICACIÓN ESPACIAL SOBRE EL MAPA TOPOGRÁFICO DERECHA: UBICACIÓN DE LOS MIEMBROS GEOLÓGICOS SOBRE LOS CUALES SE REALIZARON LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN .....	55
<b>FIGURA 5-12:</b> MAPA DE NIVELES ESTÁTICOS DE LA ZONA, SE PUEDE OBSERVAR QUE LA DIRECCIÓN DE DE FLUJO ES HACIA EL LADO SUR- ESTE DEL BOTADERO .....	56

## ÍNDICE TABLAS

<b>TABLA 1-1:</b> RESUMEN CRONOLÓGICO. ....	9
<b>TABLA 1-2:</b> ESCALA DEL TIEMPO GEOLÓGICO, PROPORCIONADO POR EL CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS (M.O.P.) 2000.....	14
<b>TABLA 4-1:</b> UBICACIÓN DE LAS FUENTES INVENTARIADAS DURANTE LA INVESTIGACIÓN ..	37
<b>TABLA 4-2:</b> UBICACIÓN DE LOS POZOS INVENTARIADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN .....	38
<b>TABLA 4-3:</b> UBICACIÓN DE LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN REALIZADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	39
<b>TABLA 4-4:</b> UBICACIÓN DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	40

## AGRADECIMIENTOS

*A los asesores:*

- M.Sc. Dagoberto Arévalo Herrera y M.Sc. David Enoc Escobar. Que se mantuvieron pendientes en cada paso de esta investigación.

*A los observadores asignados por la Escuela de Física:*

- M.Sc. Tomas Soriano Marinero y Lic. Nelson Ediltrudis Gómez Cadillos. Que con sus aportaciones y sugerencias a las diferentes partes del documento y las defensas. También por ser en la Escuela de Física una fuente importante de consulta y propulsores para el estudiantado que desean continuar en el área de la Ciencia de la Tierra.

*A los colaboradores:*

- Lic. César Alvarado, Lic. Raúl Alvarenga, Ing. Agrónoma. Alma Martínez, Lic. Américo Mejía, Lic. Ludwin Morán y Lic. Guillermo Morán

*En la parte metodológica, se desea agradecer mucho las siguientes instituciones:*

- Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS)
- Alcaldía de Nejapa
- Laboratorio de Sistemas de Información Geográfico de la Universidad de El Salvador.

*A los colaboradores de toda la vida, lo que nos ayudan a cumplir nuestras metas:*

- Familia Rivera Acosta
- Familia Aparicio Monjarás

*En especial a:*

Muy especial agradecimiento a Lic. Nelson E. Gómez Cedillos

## **DEDICATORIAS**

- \* A nuestra querida amiga Leticia Aparicio.
- \* A mi amigo Francisco Paul Rivera Acosta por acompañarme en estos años de estudio.
- \* Y los personajes anónimos que saben que me han inspirado, o dado fuerzas para seguir y que se que prefieren pasar en el anonimato.

Osmany René José Aparicio Monjarás

- \* A mis padres: Francisco del Pilar Rivera Ángel y María Laura Acosta, que gracias a su ayuda y consejos logre culminar con mi carrera.
- \* A mis hermanos Guillermo Antonio y Luis Ernesto.
- \* A mi compañero y amigo Osmany Aparicio por acompañarme durante mi carrera y ser apoyo para la realización de este documento.
- \* A mis amigos y amigas que siempre han estado a mi lado en todos los momentos de mi vida.
- \* A Leti, ya que durante toda mi carrera me aconsejo y brindo la ayuda necesaria en los momentos más difíciles.

Francisco Paul Rivera Acosta

## RESUMEN

El botadero en estudio se encuentra en el límite divisorio de los municipios de Apopa y Nejapa, en el departamento de San Salvador, debido a que este no posee una membrana impermeable en la parte inferior, constituye un grave problema ambiental al ser un foco de contaminación para los recursos hídricos de la zona. El método de evaluación de este ex botadero de Mariona consiste en prospecciones geoeléctricas, pruebas de infiltración, y la obtención de las líneas de flujo del agua subterránea.

Se realizaron 3 sondeos eléctricos verticales con el arreglo Schlumberger 2 con una abertura de  $\frac{AB}{2}$  de 250 m y el otro con una abertura de  $\frac{AB}{2}$  de 200 m, y una sección de 200 m usando el arreglo Dipolo-Dipolo con valores de  $a = 10$  m y  $n = 8$ , con los cuales se logro evidenciar la presencia de lixiviados con valores de resistividades aparentes de  $4 \Omega - m$  a  $8 \Omega - m$ , a profundidades de 10 a 18 metros, lo cual presentan un alto riesgo al acuífero que se encuentra a una profundidad que oscila desde los 5 hasta los 30 metros. El promedio de infiltración en esta zona es de  $1.4 \frac{mm}{h}$ , con rangos que varían desde  $0.2 \frac{mm}{h}$  hasta  $4.4 \frac{mm}{h}$ , los cuales se obtuvieron con las 7 pruebas de infiltración que se realizaron en la zona. Obteniendo los valores de infiltración de  $0.6 \frac{mm}{h}$  sobre el botadero debido a la capa de arcilla que fue colocada durante el cierre técnico llevado a cabo por la empresa MIDES en el año de 2001, mientras que los alrededores del botadero presentan una velocidad de infiltración de  $2.1 \frac{mm}{h}$ , debido a que el botadero está ubicado sobre el miembro geológico s4. Piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas (*Tierra blanca*), lo cual representa un alto riesgo a los recursos hídricos de la zona. Con la ubicación de nivel freático de los pozos cercanos al botadero se determino el gradiente hidráulico el cual tiene un valor de 0.019 con una dirección Sur – Este, lo que representa un alto riesgo para el recurso hídrico que se encuentra en dicha dirección.

Dados los resultados obtenidos, es importante realizar a corto plazo medidas de remediación en la zona para la protección de los recursos hídricos de la zona. Tales como el nacimiento del río Chacalapa, el cual es un abastecedor de agua potable a ciertas poblaciones a sus alrededores.

# 1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la industria y población tiene una consecuencia de proporción directa con los desechos que se generan, los botaderos de residuos sólidos oficiales y/o clandestinos a cielo abierto presentan un alto riesgo de contaminación cuando no hay un debido proceso de monitoreo, acciones correctivas y administración de los desechos que se deposita en esos lugares. La generación del lixiviado que proviene de la descomposición de los desechos contiene además de materia orgánica en descomposición materia inorgánica como lo son metales pesados; por lo que expone a altos niveles de riesgos y vulnerabilidad los recursos hídricos de la zona.

El grado de contaminación dependerá de diversas variables como la cantidad y la composición de los desechos depositados, las cantidades de precipitaciones de la zona, la geología de la zona entre otros. Por lo que es sumamente necesario sistematizar estudios que permitan cuantificar esas variables y por ende ayuden a las diferentes entidades responsables a administrar los botaderos o rellenos sanitarios.

El presente trabajo es una propuesta metodológica para estudiar y caracterizar el riesgo de contaminación que pueden generar los botaderos, utilizando métodos de prospección geoelectrónica. Es una forma en que la Universidad de El Salvador, la entidad responsable de generar e impartir conocimiento y técnicas para la resolución de problemas del país, puede aportar a este tema fundamental como lo es la contaminación ambiental.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. General

- Esclarecer la existencia de contaminación (lixiviados) derivada del botadero de residuos sólidos de Mariona aplicando métodos geofísicos.

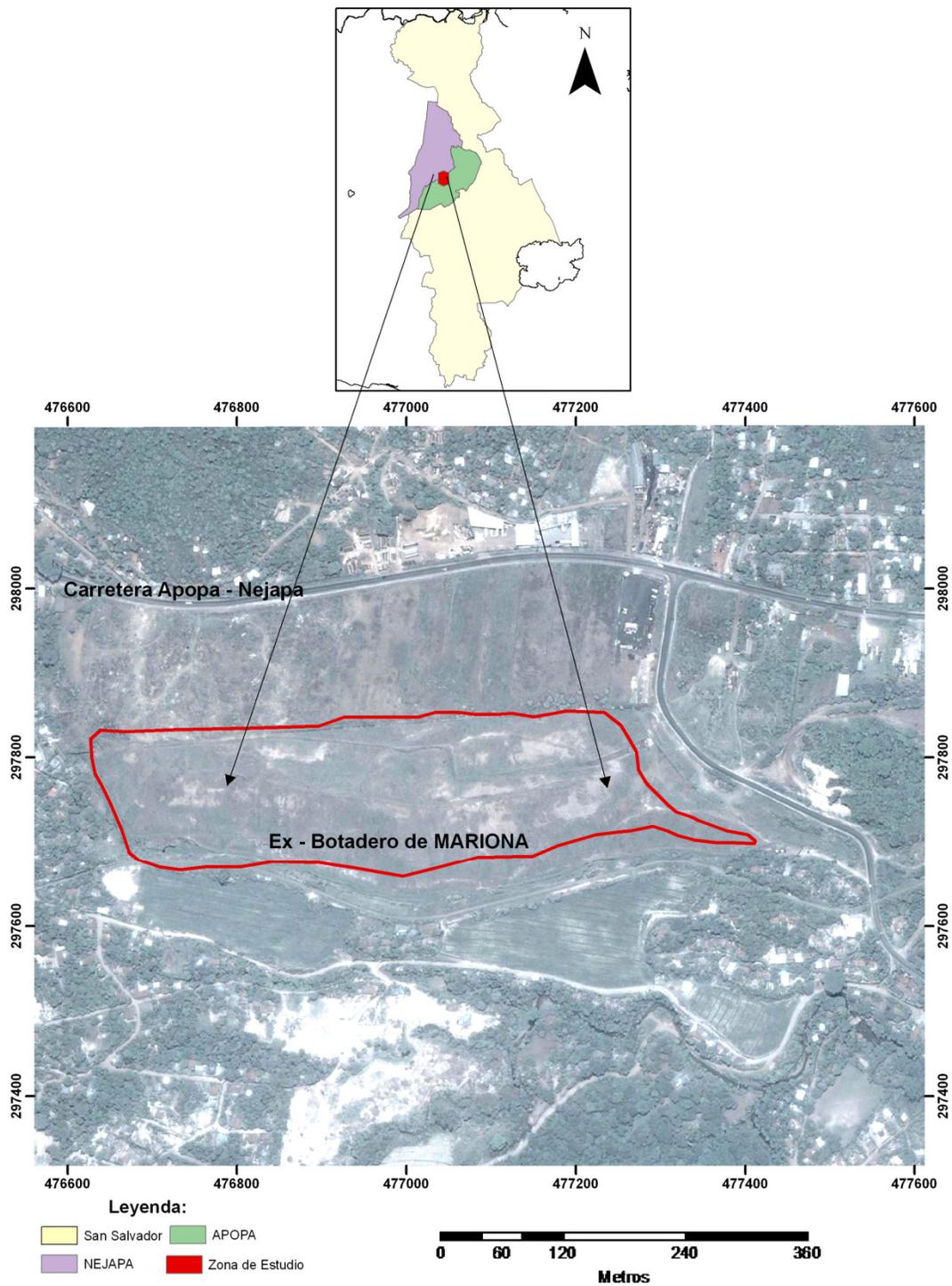
### 1.1.2. Específicos

- Determinar la ubicación y dirección de la pluma de contaminante, mediante las variaciones de Resistividad Aparente en profundidad.
- Determinar la velocidad de infiltración de la zona y poder inferir la cantidad de lixiviados que se han producido.
- Determinar la dirección de las líneas de flujo de agua subterránea, mediante el Gradiente Hidráulico de la zona.

## 1.2. Descripción de la zona de estudio

El ex - botadero de residuos sólidos urbanos estudiado se localiza en el límite divisorio de los municipios de Nejapa y Apopa, a 2 km al Noreste del volcán de San Salvador y 10 km del centro de San Salvador, en el departamento de San Salvador, El Salvador. Se sitúa en la llanura aluvial de la quebrada *El Muerto* en el caserío Suchinango, con un área aproximada de 53, 848 m<sup>2</sup> y presenta una cota media de 480 m. s. n. m. (Figura 1.1). En el año 2001 se realizó la etapa de cierre técnico, en la cual se colocó una capa de material impermeable (arcilla) sobre los desechos sólidos anteriormente depositados y una geomembrana para tratar de detener los lixiviados en la zona Sur - Este del ex botadero donde se encuentran recursos hídricos importantes, como el río el Ángel y manantial Chacalapa que abastece a algunas comunidades de los municipios de Apopa y Nejapa.

En la clasificación climática, la zona de estudio presenta una precipitación promedio anual que varía entre 1400 – 2400 mm, un rango de temperatura que varía desde 10° C hasta 28° C, la vegetación en la zona baja y central es bosque húmedo subtropical y en la zona alta es de bosque muy húmedo Montañoso bajo y algunas de estas áreas pertenecen a los bosques muy húmedos subtropical (A V Consultores S A de C V y Alcaldía Municipal de Nejapa; 2003).



**Figura 1-1:** Ubicación Geográfica donde se encuentra el ex Botadero de Residuos Sólidos Urbanos de Mariona (Foto tomada de Google Earth Latitud

### 1.3. Impactos sobre el medio ambiente

La importancia de los impactos ambientales asociados a los residuos sólidos depende de las condiciones particulares de la localización, geomorfología, y demás características de los medios físico, biótico y antrópico, así como las características de los materiales desechados. No obstante, en términos generales, el manejo de los residuos sólidos pueden producir impactos sobre las aguas, el aire, el suelo, la flora y la fauna y ecosistemas tales como:

- **Contaminación de los recursos hídricos:** La ubicación de residuos sólidos sin tratamiento puede contaminar las aguas superficiales o subterráneas usadas para el abastecimiento público, además de ocasionar inundaciones por obstrucción de los canales de drenaje y del alcantarillado. La contaminación de las aguas superficiales se manifiesta de forma directa con la presencia de residuos sobre los cuerpos de agua, ya que incrementa su carga orgánica y disminuye la cantidad de oxígeno disuelto, la incorporación de nutrientes y la presencia de elementos físicos que imposibilitan usos posteriores del recurso hídrico y comprometen severamente su aspecto estético.

En forma indirecta, la escorrentía y lixiviados provenientes de los sitios de disposición final de residuos sin tratamiento, incorpora tanto a las aguas superficiales, como a los acuíferos, los principales contaminantes caracterizados por altas concentraciones de materia orgánica y sustancias tóxicas. La contaminación del agua puede significar la pérdida del recurso para consumo humano o recreación, ocasionar la muerte de la fauna acuática y el deterioro del paisaje. Estos factores y las respectivas medidas de mitigación deben ser considerados en un plan de manejo eficiente de los residuos sólidos. En zonas de manglares, la contaminación hídrica puede ocasionar su deterioro.

- **Contaminación Atmosférica:** Los principales impactos asociados a la contaminación atmosférica son los olores molestos que dañan los organismos humanos en las proximidades de los sitios de disposición final; la generación de gases (CO<sub>2</sub>, Metano)

asociados a la digestión bacteriana de la materia orgánica. La quema al aire libre de los residuos o su incineración sin equipos de control adecuados, genera gases y material particulado, tales como, furanos, dioxinas y derivados organoclorados.

- **Contaminación del suelo:** La descarga y acumulación de residuos en sitios periurbanos, urbanos o rurales producen impactos estéticos, malos olores y polvos irritantes. El desecho de residuos en sitios frágiles o inestables y en depresiones causadas por erosión puede ocasionar derrumbes en áreas de riesgo o suelos con pendiente. Además, el suelo que subyace los desechos sólidos depositados en un botadero a cielo abierto o en un relleno sanitario se contamina con microorganismos patógenos, metales pesados, sustancias tóxicas e hidrocarburos clorinados que están presentes en el líquido percolado de los desechos.

- **Amenazas a flora y fauna:** Los impactos ambientales directos sobre la flora y fauna se encuentran asociados, en general, a la remoción de espécimen de la flora y a la perturbación de la fauna nativa durante la fase de construcción, y a la operación inadecuada de un sistema de disposición final de residuos.

- **Alteraciones del medio antrópico:** El aspecto sociocultural tiene un papel crítico en el manejo de los residuos. Uno de los principales problemas es la falta de conciencia colectiva y/o conductas sanitarias por parte de la población para disponer sus residuos, dejándolos abandonados en calles, áreas verdes, rivera de los ríos, playas, deteriorando así las condiciones del paisaje existente y comprometiendo a la estética y al medio.

Por otro lado, la degradación ambiental conlleva costos sociales y económicos tales como la devaluación de propiedades, pérdida de turismo, y otros costos asociados, tales como, la salud de los trabajadores y de sus dependientes. Algunos impactos positivos pueden ser la generación de empleos, el desarrollo de técnicas autóctonas, de mercados para la generación de recursos provenientes del reciclable.

### 1.3.1. Composición de lixiviados

Los lixiviados generados por un botadero son producidos por diferentes procesos, dentro de los cuales cabe destacar la descomposición misma de los desechos, la liberación

de humedad inicial contenida en los desechos y la interacción entre el agua superficial (y eventualmente subterránea) infiltrada al botadero y los desechos contenidos dentro de este. Los diferentes enfoques o métodos que comúnmente se usan para estimar la cantidad de lixiviados que se produce en un botadero cuantifican sólo los dos últimos efectos. Dentro de estos métodos se puede mencionar en forma destacada el modelo computacional Visual Help, desarrollado por **la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)**.

La composición de los lixiviados es consecuencia de procesos bastante complejos que dependen de diferentes factores, tales como las características de los desechos que son depositados en un botadero (que varía según la magnitud y las características propias de la población que es atendida); aspectos climáticos e hidrogeológicos; y del grado de estabilización del botadero. A pesar de la gran cantidad de compuestos presentes en los lixiviados provenientes de botaderos de tipo domiciliario, más del 97% de estos compuestos pueden ser clasificados en cuatro categorías: materia orgánica, compuestos orgánicos específicos, macrocomponentes orgánicos y metales pesados. (Guía para la Evaluación de Impacto Ambiental para Proyectos de residuos Sólidos Municipales)

En estudios como los de Rihm (1994) y Kjeldsen (1996), se hace una clasificación de los lixiviados en función de su estado de estabilización, dependiendo de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno, luego de cinco días (DBO5), encontrándose los siguientes tipos:

1. Lixiviados jóvenes con alta carga orgánica, valores de DQO mayores a 20000 mg/l, alto contenido de metales (hasta 2000 mg/l) y degradabilidad media ( $DBO5/DQO > 0.65$ )
2. Lixiviados estabilizados con baja carga orgánica, valores de DQO menores a 2000 mg/l, bajo contenido de metales (menos de 50 mg/l) y biodegradabilidad muy débil ( $DBO5/DQO < 0.1$ )
3. Lixiviados con características intermedias a los dos anteriores.

Las tasas de producción de lixiviados en un botadero son directamente proporcionales a la cantidad de precipitación caída en la zona, teniéndose que para el caso de botaderos sin capas de protección, esta tasa asciende a valores del 60% del agua caída en la zona (Rihm (1994) y Kjeldsen (1996)).

Según diversos autores, los mecanismos de atenuación natural que afectan a un lixiviado en el suelo se pueden clasificar en las siguientes categorías: adsorción, difusión, decaimiento biológico, intercambio iónico, dilución, filtración y precipitación. La revisión bibliográfica realizada para este estudio mostró que la materia orgánica es afectada principalmente por los dos primeros mecanismos, es decir adsorción y decaimiento biológico.

#### 1.4 . Antecedentes

Para resolver el uso de botaderos de desechos sólidos a cielo abierto se han propuesto muchas soluciones, una de ellas consiste en crear rellenos sanitarios, donde se aplican medidas ingenieriles sencillas tales como: separación de los residuos en plantas de transferencias, la compactación de estos en estratos que son cubiertos con tierra, instalación en su base de geomembranas para no permitir la percolación de lixiviados, y el uso de capas de arcillas para controlar la permeabilidad, entre otras medidas para mejorar el tratamiento de los desechos. Este método, denominado relleno sanitario, fue usado por primera vez en California en 1934, mientras que la primera experiencia en El Salvador en este ámbito se remonta al año 2001 con la apertura del relleno sanitario MIDES, ubicado en el municipio de Nejapa, San Salvador.

En nuestro país la disposición de residuos sólidos en botaderos a cielo abiertos ha sido en algunas partes una práctica habitual, pero por decreto presidencial # 42, se ha optado por sustituir los botaderos de desechos sólidos a cielo abierto por rellenos sanitarios.

En El Salvador, después de clausurado el botadero de la finca las Margaritas en el municipio de Soyapango en el año de 1991, con una acumulación de promedio de 1,262,967 Toneladas de residuos (Nottingham, Márquez 1998), la entonces administración de la Alcaldía de San Salvador a cargo del Dr. Armando Calderón Sol, toma la decisión de habilitar un terreno propiedad privada y otra parte del ingenio el Ángel para convertirlo en el botadero del área metropolitana de San Salvador. Teniendo este una vida útil hasta el año 2001-2002, año en que se realizó el cierre técnico.

El antiguo botadero recibía los desechos recolectados de 23 municipios, más el de las empresas privadas, generando aproximadamente 1,700 toneladas de desechos diarias, que representa el 41% de la generación de todo el país. Acumulando al final aproximadamente 2, 300,000 Toneladas métricas. En el año de 1998, cuando el botadero estaba llegando al límite de su capacidad se realizó un estudio en que se encuentran elementos contaminantes en el agua subterránea y superficial del antiguo botadero (Nottingham, Márquez 1998).

En los análisis realizados a las aguas superficiales se encontraron una alta concentración de metales pesados, concentraciones de aluminio 31 veces el criterio de la norma establecida, coliformes (23 veces), boro (420 veces), DQO (282 veces), nitrógeno total (10 veces), fosfatos (720% el límite), etc. Para los análisis de aguas subterráneas se tomaron muestras de cuatro nacimientos de la zona y de siete pozos artesanales y un pozo perforado. Se encontraron concentraciones elevadas de metales pesados como Plomo, Manganeso, Cadmio, Níquel, Aluminio, Boro, Nitritos, entre otros. Estos niveles de contaminación representan un grave riesgo para las comunidades que viven en los alrededores del ex botadero de Mariona. (Nottingham, Márquez 1998).

**Tabla 1-1:** Resumen cronológico.

<b>Evento</b>	<b>Fecha</b>
La administración de la Alcaldía de San Salvador habilita el sitio donde funcionó el ex-botadero de Mariona que fue asignado para el depósito de los desechos producidos por el área metropolitana de San Salvador.	1991
Realización de estudio de la capacidad del Antiguo Botadero de Mariona, realizado por la Universidad Luterana, encontrando contaminantes en el recurso hídrico de la zona.	1998
La administración de la Alcaldía de San Salvador realiza el cierre técnico del Antiguo Botadero de Mariona conjuntamente con la OPAMSS y la empresa MIDES, y comenzar así el uso del Relleno Sanitario administrado por la empresa MIDES en el municipio de Nejapa.	2001

### 1.5. Justificación

La importancia del recurso hídrico de El Salvador en la actualidad es muy reconocida, por lo tanto el manejo y distribución del mismo debe de realizarse fundamentado en pruebas científicas acerca del mismo, aun más importante es el mantenimiento de los recursos hídricos para el país, entendiéndose estos recursos como producto consumibles para el humano de agua superficial (ríos, nacimientos, lagos, etc.) y de agua subterráneas (mantos acuíferos).

El agua subterránea es un recurso natural, vital para suministrar de manera segura el agua potable en el medio urbano y rural, juega un papel fundamental (pero frecuentemente poco apreciado) para el bienestar del ser humano y de muchos ecosistemas. A escala mundial, los acuíferos están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y emprendimientos mineros entre otros.

Algunos de estos procesos que claramente está ocurriendo en los alrededores de la zona del basurero de Mariona son: El establecimiento de compañías industriales tales

como Coca Cola, Jugos Jumex, Ingenio El Ángel y la construcción de proyectos habitacionales que gastan y/o contaminan los recursos hídricos de la zona.

El botadero a pesar de haber sido sometido a un proceso de cierre técnico, esto no asegura que este exento de seguir produciendo contaminación en los alrededores, por lo que es necesario determinar el estado actual en el que se encuentra y monitorearlo, en términos de la posible cantidad de lixiviados que produce y la dirección de este flujo contaminante.

#### 1.5.1. Justificación del método

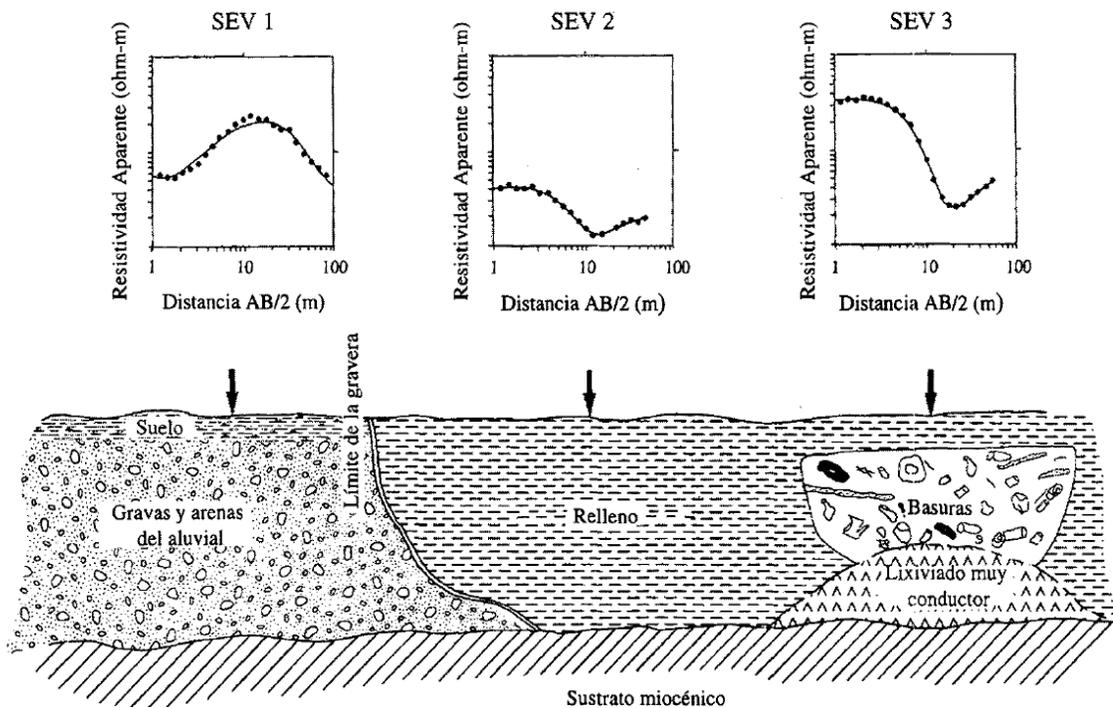
Las características de un botadero dependen, principalmente del tipo de residuos que contiene, cantidad y forma de acumulación de estos residuos y materiales y estructuras geológicas donde se encuentran ubicados. Todo ello determina el grado de peligrosidad que presenta, por el alcance y tipo de contaminación que pueda ocasionar.

Aprovechando los contrastes de las distintas propiedades físicas de los materiales, la caracterización de un botadero puede llevarse a cabo mediante la utilización de métodos geofísicos. La ventaja de su aplicación radica en las propiedades de trabajo y obtención de resultados que presenta dicha metodología. Entre éstas, destacan su carácter no destructivo, la obtención de una visión global del área estudiada y una aplicación que resulta más rápida y económica que el resto de las tecnologías disponibles.

Esto no quiere decir que la prospección geofísica sea suficiente para determinar la problemática ambiental de un botadero, pero si necesaria para obtener una primera evaluación y planificar de forma más segura y eficaz las siguientes fases de estudio y actividades correctivas como la remediación y saneamiento.

Debido a que las propiedades físicas de los materiales de relleno de residuos son, en general, sensiblemente diferentes de las de las formaciones geológicas en que están ubicados, la delimitación de un botadero puede teóricamente abordarse utilizando método de prospección geoelectrónicos, tales como los Sondeos Eléctricos Verticales SEV

Los primeros ejemplos de aplicación de la prospección geofísica en el estudio de botaderos utilizaban como método principal los sondeos eléctricos verticales (SEV) (Cartright y McComas, 1969). Los SEV pueden en algunos casos discriminar la existencia o no de áreas afectadas por rellenos, sobre todo en aquellas zonas donde los botaderos están ubicados en formaciones geológicas de alta permeabilidad.



**Figura 1-2:** Corte geoelectrico esquemático obtenido a partir de sondeos eléctricos verticales realizados en una zona aluvial del Rio Llobregat. Barcelona España. (Acta Geológica Hispánica, v. 30 (1995), nº 1-3, p. 73 – 82 [Pub. 1996])

## 1.6. Geología y relieve

### 1.6.1. Geología

Un 25% del territorio nacional es de edad Pleistocénica y un 70% está cubierto por rocas de edad Terciaria, predominando la época Pliocénica. Por eso, las capas de edad Cretácica, que cubren aproximadamente el 5% del territorio salvadoreño no juegan un papel importante para la constitución geológica total de la república. Solamente estas últimas capas son de origen sedimentario marino, todas las demás rocas, con pocas excepciones, están originadas por fenómenos volcánicos. También se conocen algunas rocas Intrusivas que pertenecen a la época del Mioceno; es decir, también son terciarias. (Según Weisman 1978, Mapa Geológico de El Salvador).

Principalmente en la zona de estudio afloran las formaciones de Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador, siendo la formación San Salvador la que más área cubre, seguida de la de Bálsamo y en menor proporción la Cuscatlán. El área de estudio está constituida en superficie por los siguientes miembros geológicos de las formaciones de Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador (Figura I.3):

#### a) Formación Bálsamo

1. **b1:** En 1975 Wiesemann introdujo el término, y define posteriormente la unidad (Wiesemann et al, 1978) como una sección constituida por epiclastitas volcánicas, piroclastitas e ignimbritas; localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas, "facies claro" (con lapilli de pomez) y limo rojo (Rotiehm); alteración hidrotermal localmente. Es en parte contemporáneo con el miembro b2 y los afloramientos están principalmente al sur del lado oeste del Río Lempa.

2. **b3:** Introducido por Wiesemann (1975), es el miembro superior de la Formación Bálsamo, en parte contemporáneo con el miembro b2, y constituido por rocas efusivas básicas-intermedias. Localmente con alteración hidrotermal, silicificación y limos rojos (Rotlehm).

## **b) Formación Cuscatlán:**

1. **c1:** Es el miembro inferior de la Formación Cuscatlán, y está constituido por unidades, tanto sedimentarias como volcánicas. Las primeras son fluvio – lacustres y se ubican en cuencas intermontañas alineadas rumbo noroeste. Estas son: La Cuenca de Metapan, Cuenca de Lempa, Cuenca del Rio Titihuapa y la Cuenca de Olomega Wiesemann (1975). Otros sedimentos han sido observados en el nororiente del país a lo largo del Rio Torola. las unidades volcánicas han sido descritas previamente y principalmente en la zona central del país, por Weyl (1952) y Williams & Meyer (1953). Constituidas por rocas Piroclastitas acidas, epiclastitas volcánicas (ignimbritas). Estas sobreyacen, tanto en el centro como en el oriente del país a rocas de la formación Bálsamo

## **c) Formación San Salvador:**

1. **s3'a:** Wiesemann (1978) describe este miembro, como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas (Tobas de color café), en parte contemporáneas con los miembros s2 y s3'a.

2. **s4:** Introducido por Wiesemann (1975), lo define posteriormente (1978) como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas, localmente efusivas ácidas. Es en parte contemporáneo con los miembros s2, s3'b, s5'a y s3'c, nombrado informalmente **Tierra Blanca** por Williams & Meyer (1953), Weyl (1955) y no incluye las tobas ácidas subyacentes (miembro c1). Equivale a la serie superior de los estratos de San Salvador (Dürr & Klinge, 1960).

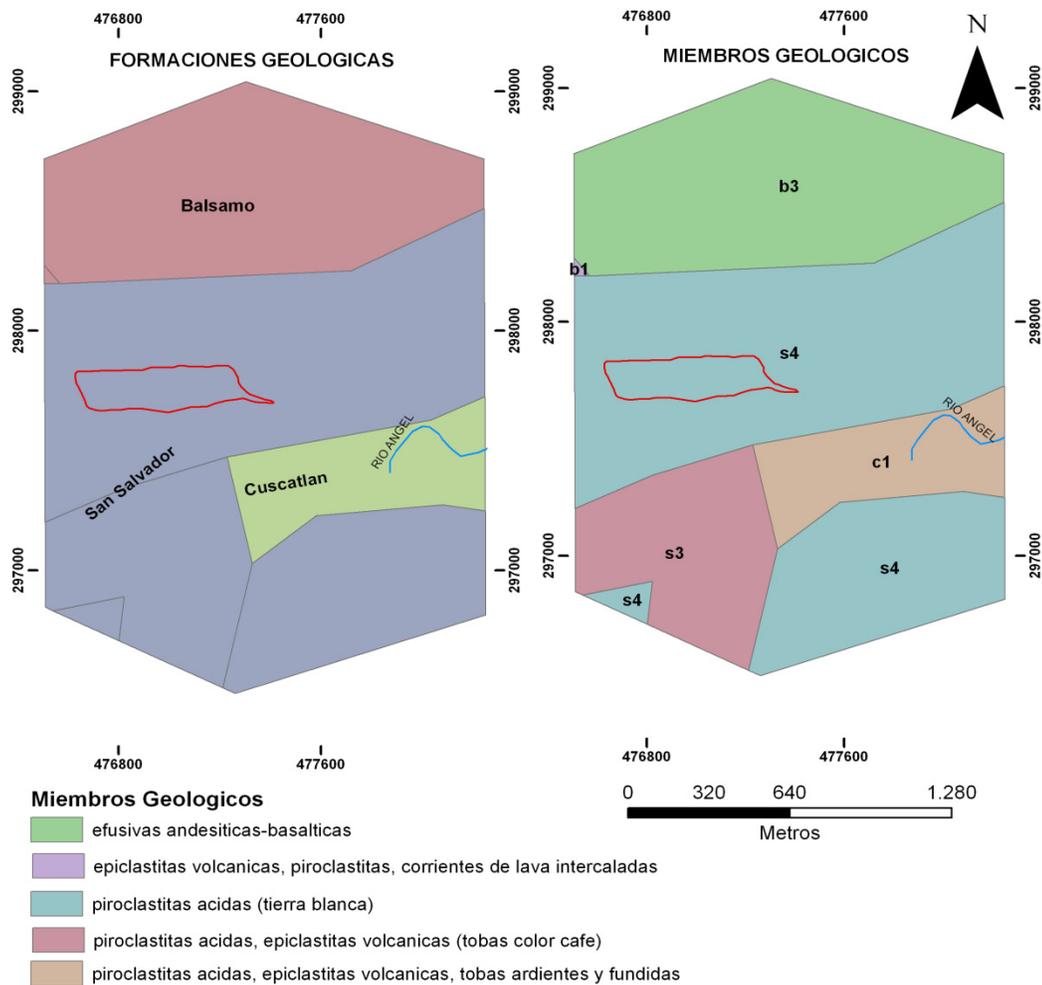
Stirton & Gealey (1949) mencionan la secuencia en las llanuras volcánicas del área del valle central inferior y la sección está constituida por Tobas pomezosas y brechas. Tanto los autores como Williams & Meyer (1953) asumen que este material fue producto de la actividad del volcán de San Salvador, guardando estrecha relación con los eventos volcano – tectónicos del Lago de Ilopango. Posterior mente Meyer –

Abich (1956) reubica el evento en la depresión de Ilopango, durante el tercer y último hundimiento. El espesor es superior a los 50 m. en las cercanías del lago Ilopango (Schmidt – Thomé, 1975) y se reduce a 4 m. en la ciudad de San Salvador; los fragmentos de pómez alcanzan tamaños de 25 a 30 cm. (Baxter, 1979)

Esto hace que donde se encuentra el antiguo botadero de residuos sólidos de Mariona sea una zona geológicamente cubierta principalmente de lavas, materiales piroclásticos y escoriáceos. (Figura I.2)

**Tabla 1-2:** Escala del tiempo geológico, proporcionado por el Centro de Investigaciones Geotécnicas (M.O.P.) 2000.

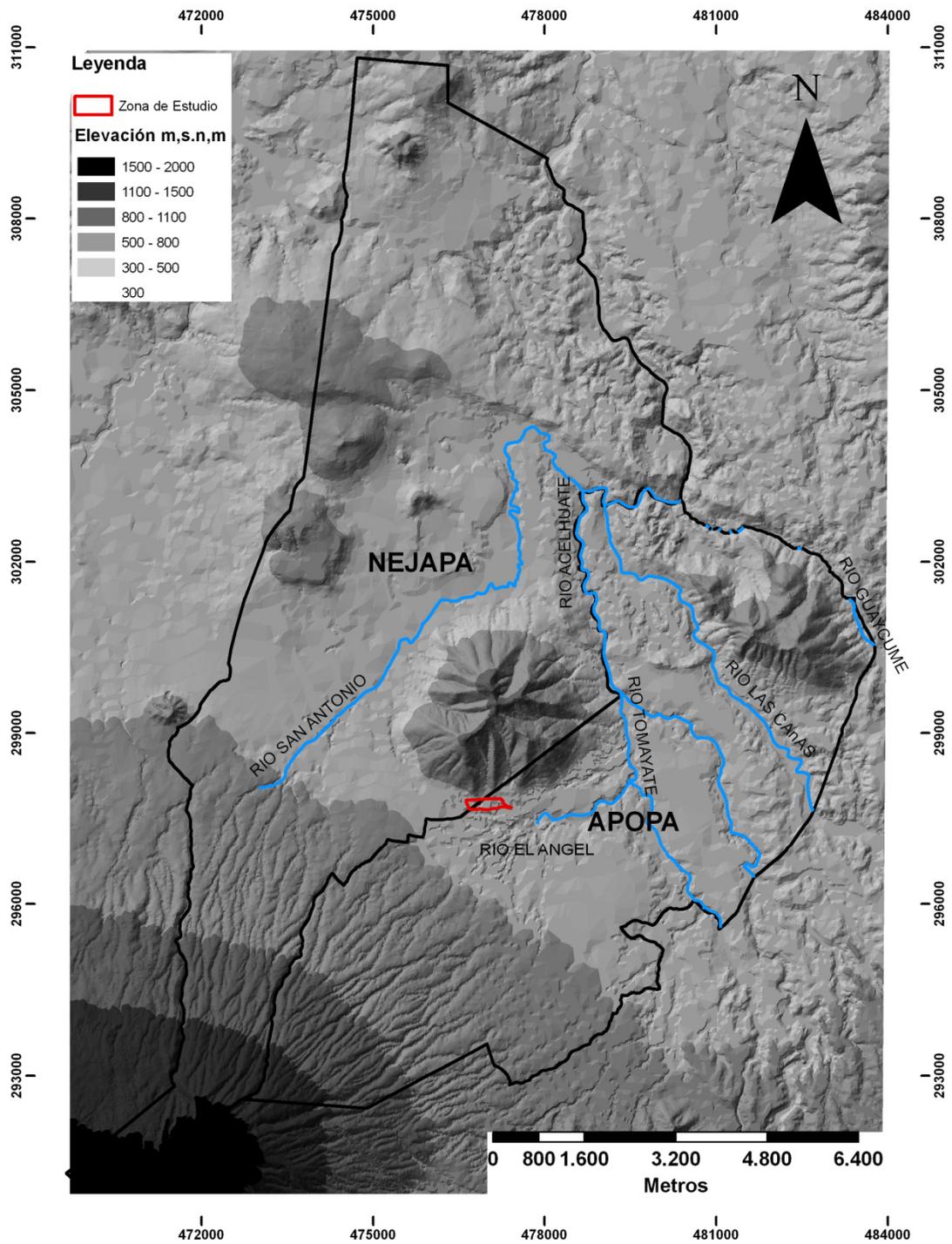
<b>Era</b>	<b>Periodo</b>	<b>Época</b>	<b>Millones de años Antes del presente</b>	<b>Miembro geológico</b>	<b>Formación</b>
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno Pleistoceno	0.011 hasta el presente 1.8 hasta 0.011	s3 hasta el Q1 c2 hasta s2	San Salvador Cuscatlán y San Salvador
	Terciario	Plioceno Mioceno Oligoceno Eoceno Paleoceno	5 hasta 1.8 23 hasta 5 38 hasta 23 54 hasta 38 65 hasta 54	b2 hasta c1 ch2 hasta b1 m1'a hasta I	Bálsamo y Cuscatlán Chalatenango y Bálsamo Morazán
Mesozoico	Cretácico Jurásico Triásico		146 hasta 65 208 hasta 146 245 hasta 208	va ts'm hasta ts	Valle de los Angeles Todos los Santos
Paleozoico	Pérmico Carbonífero Devónico Silúrico Ordovícico Cámbrico		286 hasta 245 360 hasta 286 410 hasta 360 440 hasta 410 505 hasta 440 544 hasta 505		
Precámbrico			4500 (origen de la Tierra ) hasta 544		



**Figura 1-3: Izquierda:** Geología por Formación Geológica **Derecha:** Geología por Miembro Geológico. Tomado de Mapa Geológico Nacional, 1978

### 1.6.2. Relieve

Apopa y Nejapa corresponden a la denominada Fosa Central (Figura 1.4) a una altitud de 200 a 500 msnm, entre la Cadena Costera y la Cordillera Fronteriza caracterizado por una topografía plana comparada con las fuertes pendientes de los sistemas orográficos que la limitan. Se extiende de Este a Oeste a lo largo de la república con una longitud de unos 240 Km y una anchura promedio de 45 a 50 km. Cubre unos 10197 Km<sup>2</sup>. (Centro Nacional de Registro; 2000).



**Figura 1-4:** Mapa de elevaciones de los municipios de Apopa - Nejapa

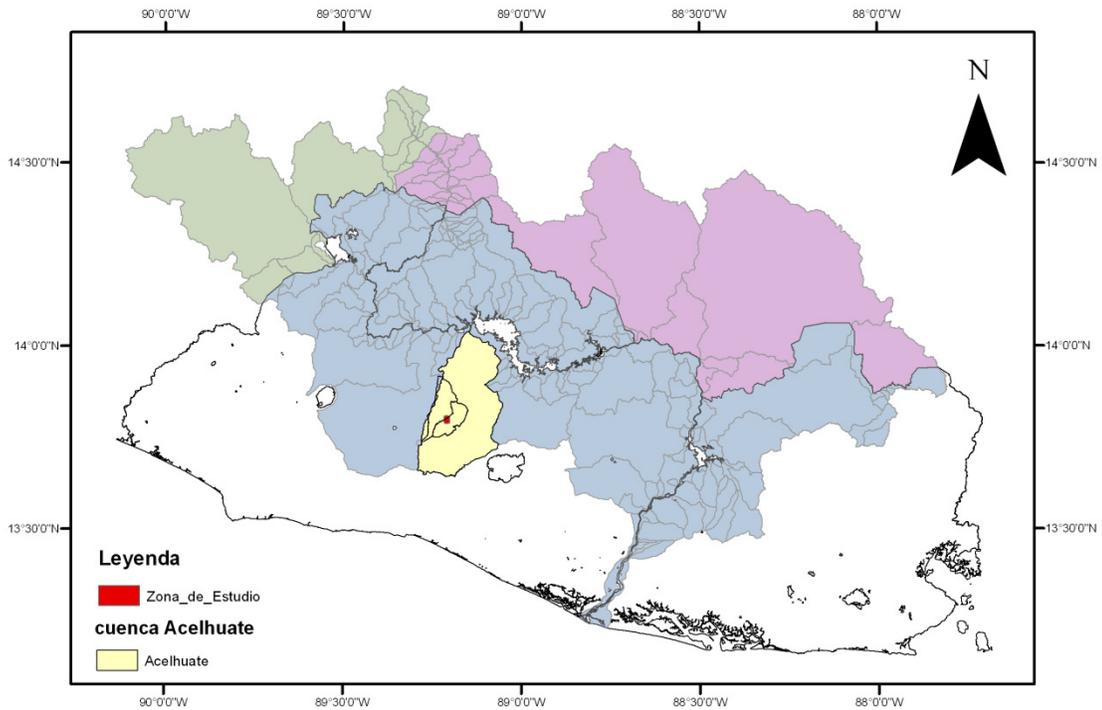
## 1.7. Recurso hídrico

En El Salvador son 26 las cuencas hidrográficas más importantes, siendo la del río Lempa una de ellas (Figura I.5). Rode (1975) emplea el término de cuenca de Lempa y la describe como una depresión intermontaña Plio – Pleistocénica, que se extiende por el este y el oeste del Río Lempa, cuyo curso lleva el mismo rumbo; limita con montañas marginales constituidas por materiales volcánicos más antiguas que los sedimentos de la Cuenca. Están divididas en dos series (Rode, 1975), las capas del Lempa inferior de facies predominantes lacustre y las capas de Lempa superior de sedimentos fluvial. Salvo por las diatomitas los componentes de estos sedimentos proceden de materiales volcánicos, éstos son: detritos y fragmentos procedentes de la demolición de rocas volcánicas más antiguas, cuyos tamaños fluctúan entre  $10^3$  y  $10^{-2}$  mm, pómez, cuyo tamaño es de  $10^2$  a  $10^{-1}$  mm, astillas de vidrio en parte desvitrificadas de 10 a  $10^{-3}$  mm, y materiales aislados como constituyentes mínimos, tales como el cuarzo y magnetita

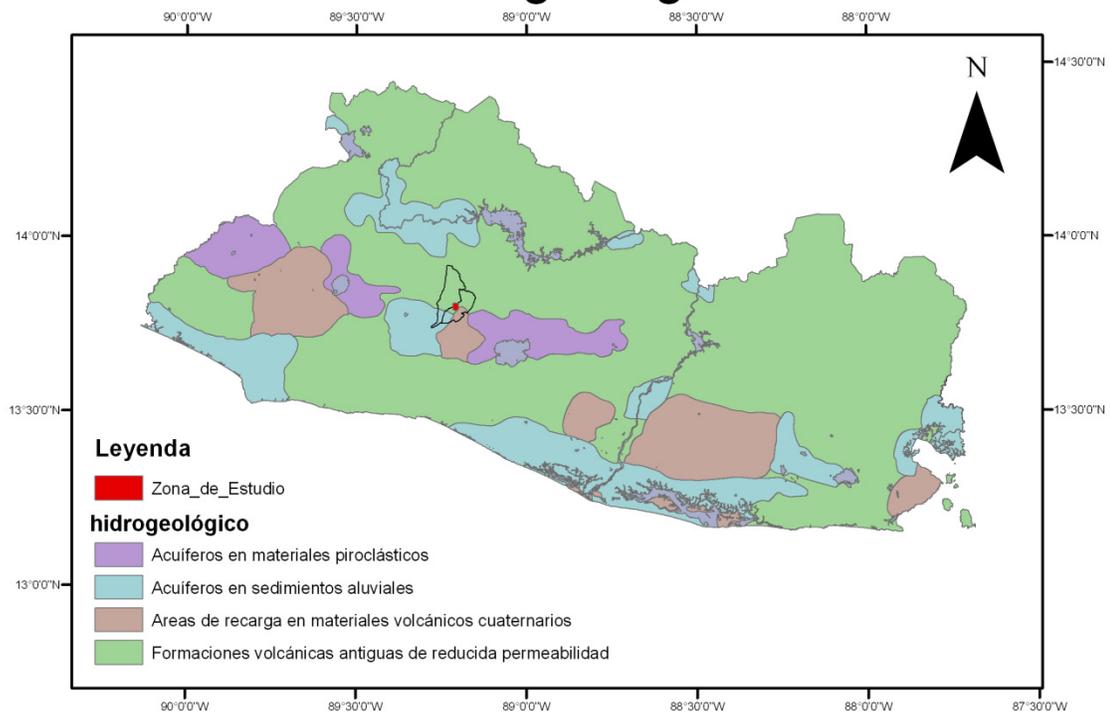
La cuenca del río Lempa tiene un área total de 18,246 Km<sup>2</sup> (Guatemala, Honduras y El Salvador); el área nacional es de 10,122 km<sup>2</sup>. Lo que corresponde a un 48.1 % de cubrimiento sobre el país y un perímetro de 933 km. El área de estudio está asentada sobre la sub-cuenca del río Acelhuate la cual tiene un área total de 1,072.98 Km<sup>2</sup> (San Salvador y La Libertad); y un perímetro de 136.140 km que constituye el 5.1% del área del país, cuenta 1,235,451 habitantes, correspondiendo al 24.1% del total del país. La cuenca del río Acelhuate comprende los siguientes municipios: Antiguo Cuscatlán, San Salvador, Nueva San Salvador, Mejicanos, Soyapango, Ciudad Delgado, Cuscatancingo, Ayutuxtepeque, Tonacatepeque, Guazapa, San Martín, Apopa, Nejapa, Aguilares, San Marcos, Suchitoto, San José Guayabal y Oratorio de Concepción.

El río Acelhuate, forma parte del sistema hidrográfico del río Lempa, y en su trayecto hacia la desembocadura, recibe el aporte de varios efluentes, entre ellos: La quebrada Montserrat, Arenal de Mejicanos, quebrada Tutunichapa -Tomayate, y los ríos El Ángel, Ilohuapa, Las Cañas, Guazapa y Tasajera. El área del río es de 733 km<sup>2</sup>, o sea, 3.5% de la superficie total del país

# Cuenca Rio Acelhuate



# Hidrogeología



**Figura 1-5:** *Arriba:* Mapa de la cuenca del Río Acelhuate *Abajo:* Mapa hidrogeológico de El Salvador.

## 2. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS DE RESISTIVIDAD

### 2.1. Generalidades

Los métodos de prospección geoelectrónica de resistividad eléctrica consisten en una fuente artificial de corriente eléctrica y que es aplicada a través de uno o dos electrodos que son conectados en la superficie, esto se complementa con uno o dos electrodos conectados para obtener la lectura del potencial eléctrico que se está generando. Conociendo las variables de la corriente inyectada y el potencial resultante se obtiene la resistividad aparente del subsuelo.

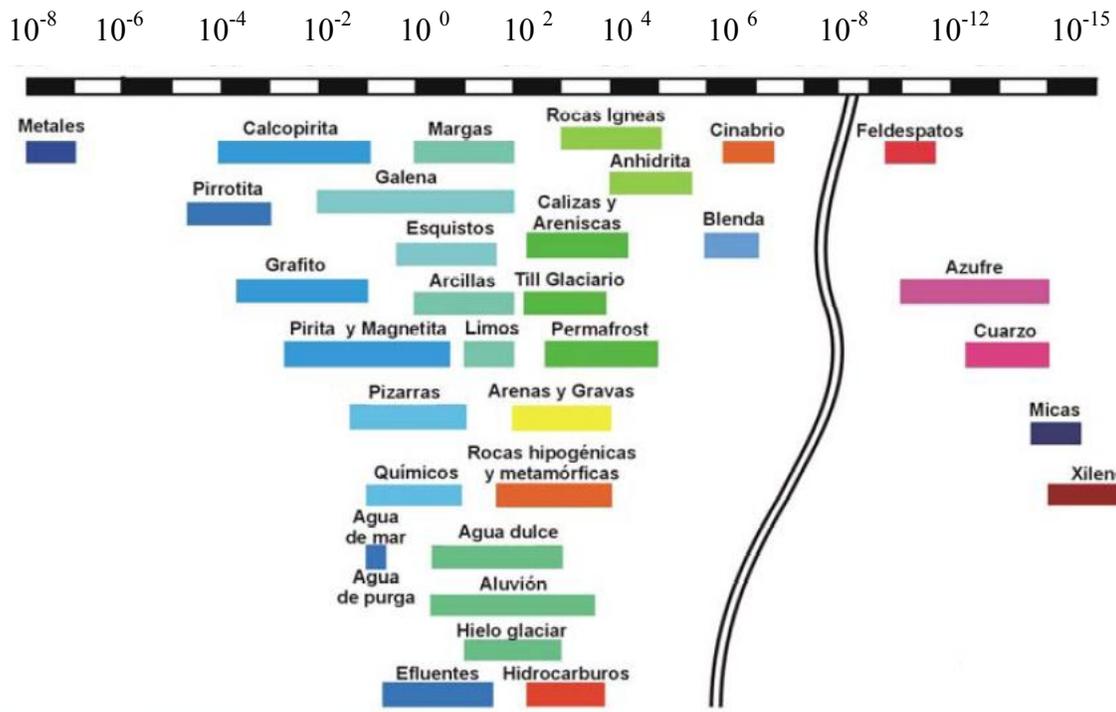
$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

$$R = G \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Donde G, es el factor geométrico. Los arreglos en que se posicionan los electrodos dependen principalmente de la fuente de corriente disponible y la profundidad del subsuelo que se quiere conocer. Estos arreglos son varios pero los más conocidos son los arreglos de Schlumberger y Wenner.

### 2.2. Propiedades eléctricas de las rocas

La aplicación de los métodos geoelectrónicos exige el conocimiento de las propiedades eléctricas de las rocas y de los minerales que las constituyen. Una de las principales propiedades que se mide es la resistividad eléctrica de las diferentes capas del subsuelo (figura 2.2). Dicha resistividad depende de la composición química de los minerales que constituyen la roca o los estratos, el contenido de agua o humedad, del grado de fracturación y compactación, principalmente. Aquellas rocas o material que están compuestos de minerales, con alta concentración de metales o electrolitos, serán menos resistivos, es decir que dejarán pasar la corriente eléctrica con mayor facilidad.



**Figura 2-1:** Muestra los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales. La fisuración, impregnación de agua salada, etc. pueden extender estos límites. (ALH Geofísica, Hidalgo Andrés)

El comportamiento físico de las rocas depende de las propiedades de la forma y modo de adhesión o compactación de sus minerales, su volumen y el relleno (generalmente de agua o aire) de los poros. Además de estas relaciones conviene estudiar el efecto que sobre dichas propiedades ejercen la presión y la temperatura, efecto que puede ser muy importante a grandes profundidades

Las propiedades que interesan al geofísico son las de las rocas y minerales reales, tal como se encuentran en la naturaleza, con sus impurezas, fisuras, diaclasas, humedad, etc. Los datos que aparecen en algunas tablas de constantes, obtenidos de muestras cuidadosamente escogidas y desecadas, carecen de interés para la prospección.

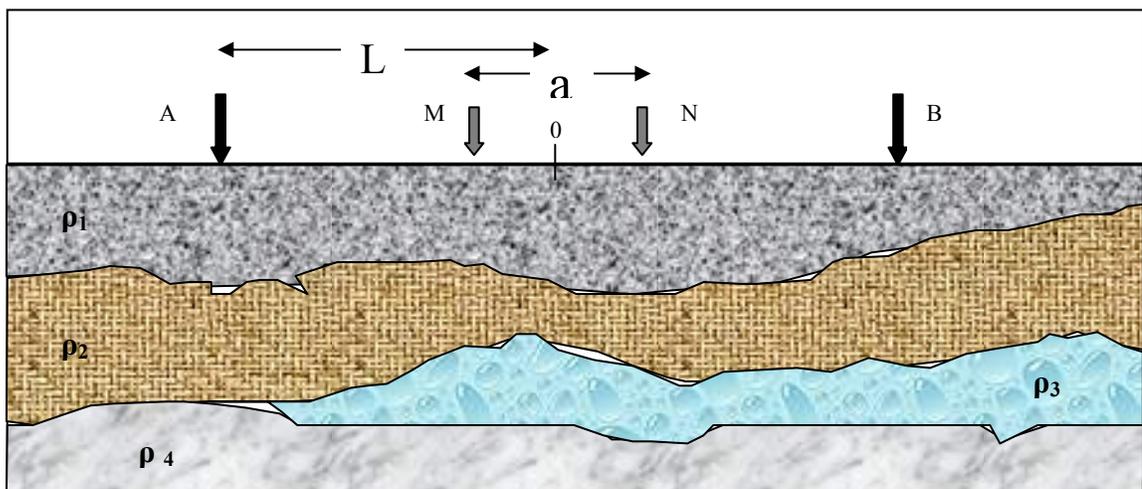
Todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos. Por consiguiente, será necesario estudiar la resistividad de medios heterogéneos, los

cuales en su caso más sencillos se compondrán de dos materiales, uno de los cuales, de resistividad  $\rho_2$ , sirve de matriz a otro de resistividad  $\rho_1$  que está disperso en el interior del primero.

Como puede deducirse, la resistividad de las rocas depende de demasiados factores para que pueda atribuirse un solo valor, ni siquiera un margen moderadamente estrecho de variabilidad, a la de cada tipo de roca. Por el contrario, a cada uno de ellos suele corresponder un campo de variación de unos tres órdenes de magnitud, ya que, aunque la naturaleza de la roca sea la misma, influyen las condiciones locales de contenido en agua, conductividad de ésta, tamaño de grano, porosidad, metamorfismo, efectos tectónicos, etc. Por otra parte, dado un valor de resistividad, tampoco puede identificarse como correspondiente a un solo tipo determinado de roca.

### 2.3. Técnica del sondeo eléctrico vertical (SEV)

Las técnicas del sondeo eléctrico vertical (SEV) consisten básicamente en el análisis e interpretación de un parámetro físico: la resistividad eléctrica, obtenido a partir de medidas efectuadas en la superficie del terreno, investigando de manera puntual sus variaciones en la profundidad



**Figura 2-2:** Esquema de la composición de los electrodos del sondeo eléctrico vertical, sobre un suelo heterogéneo donde los electrodos A y B son los electrodos de inyección de corriente y los electrodos M y N son los de Potencial

Donde

- A y B son los electrodos de inyección de corriente.
- M y N son los electrodos de medición de potencial eléctrico.
- $a$  es la distancia entre los electrodos M y N.
- $L$  es la distancia del electrodo A hacia el origen.

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada SEV se representan por medio de una curva, en función de la distancia entre los electrodos. Cuando se utiliza el arreglo de Schlumberger, la resistividad aparente  $\rho_a$  se lleva en la ordenada y en la abscisa las distancias  $\overline{OA} = \frac{\overline{AB}}{2}$ . Las escalas sobre ambos ejes han de ser logarítmicas, por razones teóricas y prácticas, la curva así obtenida, se denomina ***curva de resistividad aparente***.

La finalidad del SEV es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto central del arreglo. La mayor eficacia del método corresponde al caso en que los SEV se efectúan sobre un terreno compuesto lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad, y limitado por planos paralelos a la superficie del terreno (medio estratificado). La experiencia que los resultados teóricos obtenidos para medios de esta clase, son tolerablemente validos para estratos inclinados hasta unos 30° (ORELLANA; 1982).

#### 2.4. Penetración

Al considerar lo dicho anteriormente, se presenta de inmediato la cuestión de cómo se delimita la zona explorada por cada SEV considerado individualmente, o dicho de otro modo, cuál será la parte de terreno que influye en la información suministrada por cada SEV

Si los electrodos A y B están situados en la superficie plana de un subsuelo homogéneo de resistividad  $\rho$ . Se calcula cómo varía la densidad de corriente  $z$ , en función de la

profundidad, a lo largo de la línea recta, perpendicular a la superficie, que pasa por el centro O del segmento  $\overline{AB}$

Entonces consideramos un flujo de corriente horizontal en un medio homogéneo entre dos electrodos que inyectan corriente, tal como muestra la figura 2.4.

$$J_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2.3)$$

y retomando la ecuación

$$J_x = \frac{I}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.4)$$

Ahora obtenemos la siguiente relación tal donde:

$r_1 = \sqrt{x^2 + z^2}$  y  $r_2 = \sqrt{(L-x)^2 + z^2}$  al sustituir y luego derivar con respecto a la variable horizontal x, obtendremos

$$J_x = \frac{I}{2\pi} \left[ \frac{x}{r_1^3} - \frac{(x-L)}{r_2^3} \right] \quad (2.5)$$

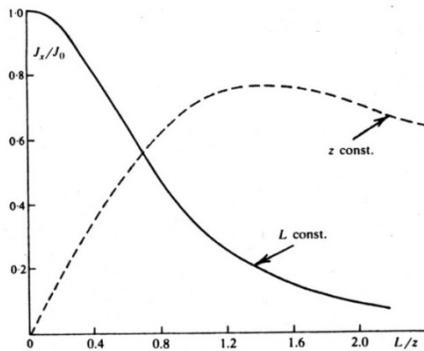
Si el punto que se analiza queda exactamente en el punto medio del espaciamiento de los electrodos de corriente las distancias  $r_1 = r_2 = r$  por lo que la definición de este

seria entonces:  $r_1 = r_2 = r = z^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2$ , al sustituirlo en la ecuación anterior

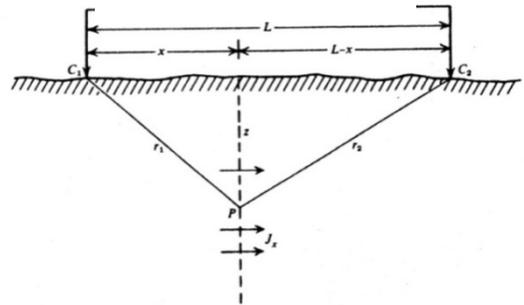
obtendremos:  $J_x = \frac{I}{2\pi} \left[ \frac{x-x+L}{r^3} \right]$  por lo que termina su expresión así

$$J_x = \frac{I}{2\pi} \left[ \frac{L}{\left(z^2 + \frac{L^2}{4}\right)^{3/2}} \right] \quad (2.6)$$

La variación de la densidad de corriente cuando  $z=0$  entonces la ecuación anterior se convierte en:  $J_{x0} = \frac{4I}{L^2}$ , que es considerada como la densidad de corriente inicial, en el grafico de densidad de corriente versus profundidad. Por lo cual el valor máximo de densidad de corriente se obtiene cuando la longitud  $L=2z$ , el resultado obtenido de la sustitución a la ecuación.



**Figura 2-4:** Graficaque describe la cantidad de corriente en función de la profundidad (Telford, Applied Geophysics, 1990)



**Figura 2-3:** Determinación de la densidad de corriente en un semiespacio homogéneo (Telford, Applied Geophysics, 1990)

Ahora tomando el comportamiento de un flujo de corriente en una franja vertical en el orden de profundidad desde un  $z_1$  a  $z_2$ , obtenemos un radio  $r^2 = \left\{ \left( \frac{L}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right\}$

lo cual implica que  $\delta I_z = J_x dy dz = \frac{I}{2\pi} \frac{L}{\left\{ \left( \frac{L}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}$  por lo que permite

integrar de la siguiente manera, considerando una diferencia de  $z_2 - z_1$ :

$$\frac{I_x}{I} = \frac{L}{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy}{\left\{ \left( \frac{L}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (2.7)$$

Y por métodos de integración obtenemos el siguiente resultado:

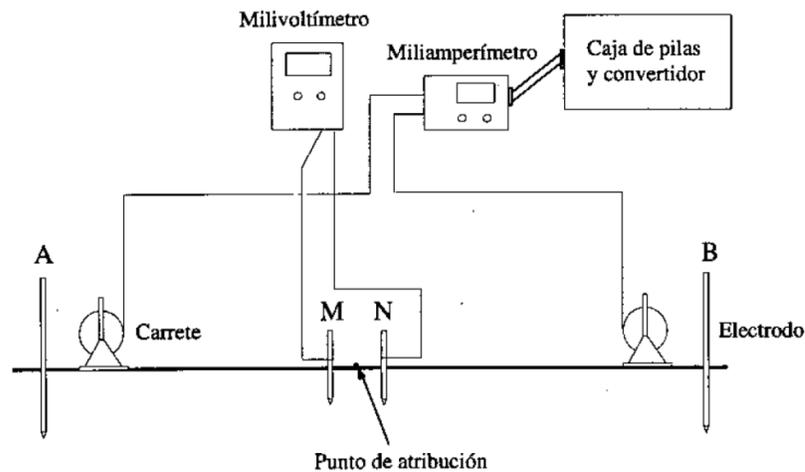
$$\frac{I_x}{I} = \frac{2}{\pi} \left( \tan^{-1} \frac{2z_2}{L} - \tan^{-1} \frac{2z_1}{L} \right) \quad (2.8)$$

La ecuación nos indica un máximo de apertura cuando el factor  $L = 2(z_1 z_2)^{\frac{1}{2}}$ , un ejemplo práctico es que al tener una profundidad de  $z_1 = 180\text{ m}$  y  $z_2 = 300\text{ m}$ , la distancia de distanciamiento entre los electrodos debe de ser  $L = 420\text{ m}$  para obtener la máxima cantidad de corriente en la franja tomada, aunque no sea tan significativa la concertación de este. Y si  $z_2 \rightarrow \infty$ , la ecuación se transforma en:

$$\frac{I_x}{I} = \left( 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{2z_1}{L} \right) \quad (2.9)$$

### 1.5. Arreglo Schlumberger

Para el arreglo de Schlumberger, los electrodos que inyectan corriente son arreglados de manera lejana a los electrodos de potencial. La siguiente figura describe de manera más precisa el arreglo.



**Figura 2-5:** Esquema de dispositivo electrónico *Schlumberger*



**Figura 2-6:** Foto del equipo de sondeo TERRAMETER SAS 4000;

El método Schlumberger mide como los otros métodos la resistividad aparente desde el control de la corriente inyectada como el potencial que se obtiene, en lo que lo diferencia es su arreglo geométrico por lo que para calcularlo retomamos las siguientes ecuaciones:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \quad (2.10)$$

Reordenando las variables en términos de la resistividad aparente obtenemos:

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I} \frac{1}{\left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}} \quad (2.11)$$

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I} P \quad (2.12)$$

Donde P representa el parámetro geométrico que depende del arreglo que se está usando, por lo que en el arreglo Schlumberger, encontramos los diferentes distanciamientos.

$$r_1 = (L - x) - l, \quad r_2 = (L + x) + l, \quad r_3 = (L - x) + l, \quad r_4 = (L + x) - l$$

Sustituyendo los distanciamientos anteriores en la ecuación de la resistividad aparente obtenemos lo siguiente:

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I} \frac{1}{\left\{ \left( \frac{1}{(L-x)-l} - \frac{1}{(L+x)+l} \right) - \left( \frac{1}{(L-x)+l} - \frac{1}{(L+x)-l} \right) \right\}} \quad (2.13)$$

Asumiendo que la distancia más pequeña entre los electrodos de inyección de corriente con los de potencial tiene una proporción 10 veces mayor que la distancia entre los electrodos de potencial, podemos tomar la siguiente aproximación  $(L - x) \gg 3l$  y la ecuación toma la forma de.

$$\rho_a = \frac{\pi}{2l} \frac{(L^2 - x^2)^2}{(L^2 + x^2)} \left( \frac{\Delta V}{I} \right) \quad (2.14)$$

Usualmente el arreglo se utiliza de manera simétrica, es decir que las distancias entre los electrodos de potencial a corriente son equivalentes, lo que hace el factor  $x = 0$ ,

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \left( \frac{\Delta V}{I} \right) \quad (2.15)$$

Muy frecuente se asume que las distancias entre los electrodos inyectoros de corriente se denominan como  $L = \frac{1}{2}AB$  y las distancias entre los electrodos de potencial o voltaje como  $l = \frac{1}{2}MN$ . Lo que convierte la ecuación anterior en esta expresión:

$$\rho_a = \frac{\pi(AB)^2}{4MN} \left( \frac{\Delta V}{I} \right) \quad (2.16)$$

Con esto se demuestra que en los sondeos eléctricos verticales, solamente es necesario mover simétricamente los electrodos de inyección de corriente de los electrodos de potencial. Con excepciones donde la distancia de los primeros sea demasiado distante para mantener la proporción de potenciales medibles.

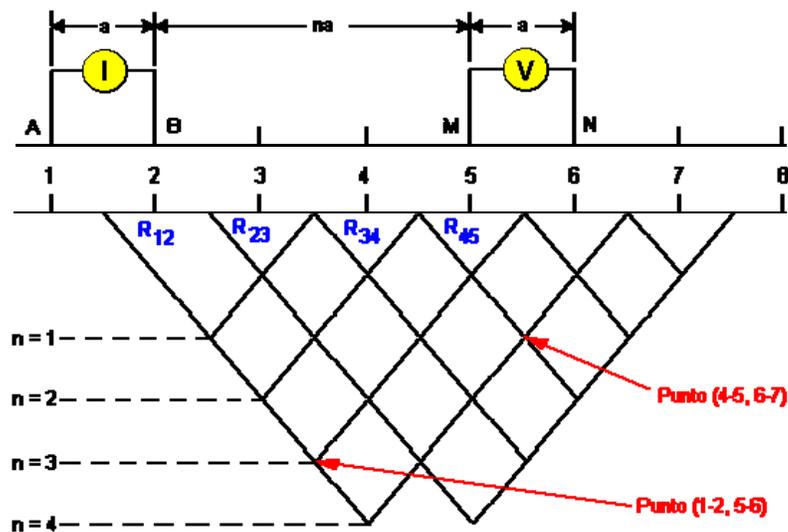
La idea Schlumberger consiste, en utilizar una distancia  $2l = MN$  muy corta, de tal modo que pueda tomarse como válida la ecuación del límite. Los desarrollos teóricos se establecen suponiendo que lo que se mide es realmente el campo Eléctrico, el cual en la práctica, se toma igual a  $\frac{\Delta V}{MN}$ . Es decir que, si bien en la teoría matemática se emplea la fórmula del límite en las observaciones de campo la que se utiliza realmente es la de  $\rho(MN)$ , por lo cual el error que se comete al emplear esta expresión es sólo el que proviene de despreciar el término  $MN\left(\frac{2}{4}\right)$ . Este error es muy pequeño. En las mediciones de campo suele tomarse la norma de que MN es menor o igual que  $\frac{AB}{5}$ . Como  $2L$  es igual a AB, el error relativo será igual al 4%. para MN igual a  $\frac{AB}{5}$

Los perfiles laterales pueden ser ejecutados de dos maneras en este arreglo, Con una gran separación de distancia de los electrodos de inyección de corriente (aproximadamente 300 m o más). Para mover los electrodos de potenciales en medio de las anteriores con un distanciamiento que cumpla el límite de  $(L - x) \gg 3l$ , la grafica describe la resistividad aparente versus el punto medio de los electrodos de potenciales. La segunda forma consiste en mantener un distanciamiento donde  $L \gg l$  y mover este arreglo conjuntamente en cada medida que se tome; esta forma también es conocido como calicatas.

Las grandes ventajas sobre el uso de este arreglo consiste en, que no implica mucho movimiento de los electrodos de potencial, lo que permite tener una variación de potenciales bastante fija. También se permite una desviación prudente entre la línea de colocación de los electrodos de potencial con respecto a los electrodos de corriente, debido a que la densidad de corriente a grandes distancias es difícilmente uniforme.

### 1.6. Arreglo de Dipolo - Dipolo

El arreglo Dipolo-Dipolo, requiere dos electrodos de potenciales y dos electrodos de inyección de corriente, las distancias entre cada electrodo deben de iguales, con la singularidad de mover en espacios equidistantes a los electrodos de potencial alejándolos de los electrodos de corriente inyectada. Tal como muestra la figura 2.7.



**Figura 2-7:** Esquema de dispositivo electrónico *Dipolo - Dipolo*, donde los electrodos de inyección son los A y B, y los de potencial M y N

Retomando la ecuación general de la resistividad aparente, recordamos lo determinante del factor geométrico según el arreglo a usar. En el caso del dipolo-dipolo mantenemos distancias constantes como en el arreglo Wenner, y constantes cambios en sus distancias de alejamiento de los electrodos de potenciales de los electrodos de inyección de corriente. Por lo que podemos definir las distancias:

$$r_1 = r_4 = 2nl \quad r_2 = 2l(n-1) \quad r_3 = 2l(n+1)$$

Y sustituyendo en la ecuación general de la resistividad aparente obtenemos:

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I} n(n-1)(n+1)l \quad (2.17)$$

Sucede que los diferentes valores de  $n$  que toma la ecuación representan los distanciamientos de los potenciales a los de corriente, y cuando  $n$  toma valores muy pequeños, un aproximado de cuando  $n \leq 5$ , es usualmente un arreglo utilizado para los métodos eléctricos de Potencial Instantáneo, debido a que la inducción eléctrica es reducida entre los potenciales con los de corrientes.

Cuando toma valores mayores, es decir  $n > 5$ , la ecuación toma la siguiente forma debido a la aproximación de los valores  $n$ :

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I} n^3l \quad (2.18)$$

A la cual se le observa las propiedades de medir en los sondeos de resistividades, tiene la certera ventaja de poder crear arreglos que sigan un alineamiento transversa, bisecada y costados. En estos casos particulares el arreglo toma esta forma en sus distancias.

$$r_1 = r_4 = 2nl \quad (2.19)$$

$$r_2 = r_3 = 2\left\{(nl)^2 + l^2\right\}^{\frac{1}{2}} \approx 2nl\left(1 + \frac{1}{2n^2}\right) \quad (2.20)$$

La sustitución es lo que permite modificar la ecuación general de la resistividad aparente de la siguiente manera:

$$\rho_a = \frac{4\pi\Delta V}{I} n^3l \quad (2.21)$$

### 3. INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO

#### 3.1. Infiltración

El término de infiltración se refiere a la entrada del agua hacia el interior del suelo, siendo la única fuente de humedad para mantener el crecimiento de la vegetación y el suministro de agua subterránea a los pozos y arroyos, teniendo generalmente una dirección vertical. Se entiende por capacidad de infiltración, velocidad de infiltración o tasa de infiltración, al volumen de agua que pasa por el suelo por unidad de área por unidad de tiempo:

$$i = \frac{V}{At} \quad (3.1)$$

Donde:

- $i$ : es la infiltración del agua.
- $V$ : es el volumen de agua que pasa por el suelo.
- $A$ : es el área del suelo donde se infiltra el agua.
- $t$ : es el tiempo que tarda en infiltrarse.

Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica y el contenido de humedad presente en el suelo. Estratos del suelo con propiedades físicas diferentes pueden suponerse unos sobre otros formando *horizontes* o zonas de humedad.

La infiltración puede describirse mediante ecuaciones matemáticas solamente en forma aproximada y lleva un proceso muy complejo en el interior de la superficie de la tierra, ya que pasa por cuatro zonas de humedad las cuales son:

1. **Zona saturada:** es la que está cerca de la superficie.
2. **Zona de transmisión:** es la zona de flujo no saturado y contenido de humedad aproximadamente uniforme.

3. **Zona de mojado:** en la cual la humedad decrece con la profundidad.
4. **Frente mojado:** en el cual el cambio de contenido de la humedad con la profundidad es tan grande que da la apariencia de una discontinuidad aguda entre el suelo mojado arriba y el suelo seco debajo

Dependiendo de la cantidad de infiltración y de las propiedades físicas del suelo, al frente mojado puede penetrar en el suelo desde unos pocos centímetros hasta varios metros.

En general la infiltración del suelo es alta en los primeros estados, especialmente cuando el suelo está seco, tiende a decrecer en forma monótona y eventualmente a acercarse asintóticamente a una velocidad constante, denominada capacidad de infiltración final, es decir que el proceso ha alcanzado una velocidad constante, se conoce también como infiltración estable de equilibrio o infiltración básica (MONSALVE; 1999).

### 3.2. Factores que influyen en el proceso de infiltración

Existen varios factores que influyen en la infiltración del agua, los cuales tiene que ser tomados en cuenta para las pruebas que se necesiten realizar.

1. **Suelo:** actúa como un medio poroso que proporciona gran número de canales para que el agua penetre a través de la superficie, así, la infiltración varía según el tamaño de los poros y su permanencia, los que a su vez dependen del tamaño de las partículas, “textura”, el grado de cohesión entre las partículas y agregados, “estructura”. Mientras más grande se mantenga el tamaño de los poros, será mayor el grado de infiltración.
2. **Vegetación:** la formación de la capa selladora de la superficie se puede reducir considerablemente con vegetación. En general la cubierta vegetal y las condiciones en que se encuentra la superficie del suelo tiene mayor importancia sobre la infiltración que el tipo y la textura del suelo.
3. **Humedad previa:** un suelo seco tiene mayor capacidad de infiltración inicial por el hecho de que se suman fuerzas gravitacionales y de capilaridad.

4. **Otros factores:** pendiente del terreno, la temperatura del agua, la salinidad, también son muy importantes.

### 3.3. Ecuación de infiltración

Kostiakov, en 1932, fue el primero que propuso el uso de una ecuación empírica que hasta hoy es de amplio uso para analizar los resultados experimentales que se obtiene de las pruebas de campo. La ecuación es:

$$i = kt^n \quad (3.2)$$

Donde

- $i$  = velocidad de infiltración.
- $t$  = Tiempo (min.)
- $k$  = Constante que representa la velocidad de infiltración.
- $n$  = pendiente de la curva de velocidad de infiltración con respecto al tiempo.

La infiltración acumulada se obtiene integrando la ecuación de infiltración respecto al tiempo.

$$D = \sum_{t=0}^t idt \quad (3.3)$$

Integrando se obtiene:

$$D = ct^m \quad (3.4)$$

Donde

- $D$  = Infiltración acumulada
- $c$  = Infiltración en el perfil cuando  $t = 1$
- $m$  = pendiente de la curva de infiltración versus tiempo

### 3.4. Método de los cilindros infiltrómetros (doble anillo).

El método del cilindro, ideado por Musgrave en 1935, es el método más extendido para el estudio de la infiltración de agua en el suelo, con el se determina la velocidad de infiltración, así como la lamina que se acumula durante el proceso de infiltración.

De acuerdo a Gurovich en 1999, los primeros estudios emplearon cilindros simples; pero los resultados obtenidos presentaron una gran variabilidad, posiblemente debido al movimiento lateral del agua no controlado. Posteriormente se empleó cilindros dobles o multicilindros, con el objeto de minimizar el flujo por medio de un área tampón alrededor del cilindro central.

Es un método de campo que busca simular las condiciones que se dan cuando un terreno es inundado por lluvia y mediante la toma de lecturas de láminas infiltradas explicar el fenómeno.

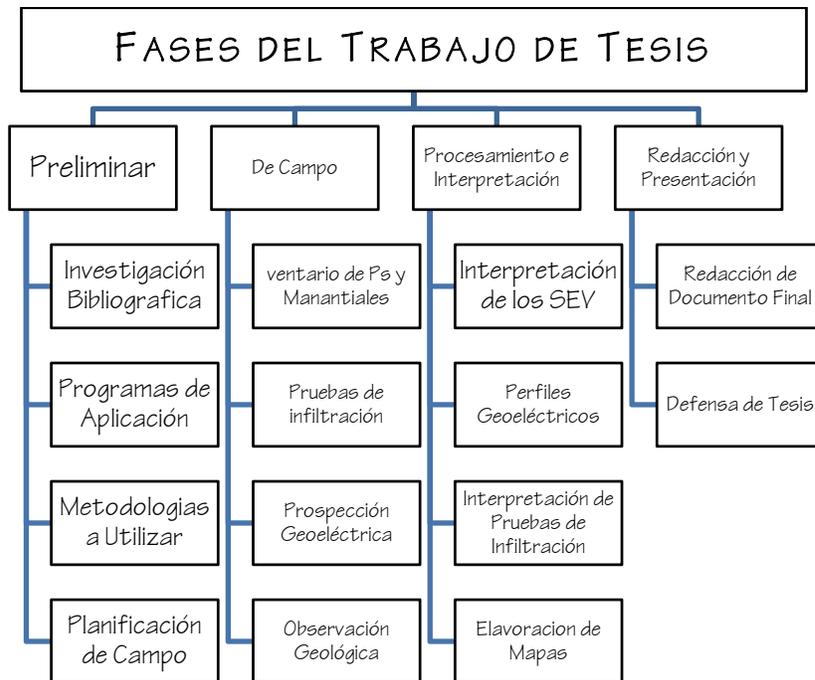


**Figura 3-1 : Cilindros Infiltrómetros (Doble Anillos)**

La limitación más seria es su ubicación en el suelo que produce un cierto grado de alteración de las condiciones naturales, destrucción de la estructura o compactación, lo que provoca a su vez gran variación en las velocidades de infiltración (GUROVICH R., L.A. 1999).

## 4. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación comprende en 4 fases, las cuales se presentan en el siguiente organigrama:



**Figura 4-1:** Organigrama de la metodología a seguir para realizar la investigación

### 4.1. Fase preliminar

Comprende en la recopilación y análisis de la bibliografía existente sobre el tema, se hace también una revisión de los fundamentos físicos de las técnicas geofísicas aplicables a la evaluación de este tipo de botadero, en especial los métodos eléctricos de prospección haciéndose énfasis en los sondeos eléctricos verticales y las técnicas de perfilaje; entre ellos, los arreglos Schlumberger y Dipolo-Dipolo. También los fundamentos de la técnica de infiltración, conocer la geología e hidrogeología de la zona de estudio. Esta parte también consistió en la búsqueda de información que ha sido recolectada por diferentes instituciones o en diferentes investigaciones que obtienen

mediciones de parámetros físicos que se pueden utilizar para este proyecto de graduación como por ejemplo: niveles estáticos en pozos, precipitación, geología, etc.

#### 4.1.1. Geología

El mapas geológicos de la zona de estudio en escala 1: 100 000 año 1978 han sido proporcionada por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Universidad de El Salvador. Esta información es utilizada en el programa de Arc GIS, que permite visualizar las características geológicas de la zona de estudio

#### 4.1.2. Precipitación y evaporación

Los valores de precipitación y evaporación de la zona de Nejapa han sido obtenidos con la ayuda del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). Ya que dicha institución cuenta con estaciones meteorológicas ubicadas en las proximidades de la zona de interés.

#### 4.1.3. Topografía

La topología se ha logrado obtener por medio de dos fuentes: una de ellas es el Laboratorio de Información Geográfica de la Universidad de El Salvador, y la otra es el Centro Nacional de Registro (CNR).

#### 4.1.4. Hidrogeología

Para esta parte se ha consultado varios libros entre ellos: “Manejo de Aguas Subterráneas”, “Los Acuíferos Volcánicos y el Desarrollo Sostenible en América Central”, “Atlas de El Salvador”.

### 4.2. Fase de campo

La realización del trabajo de campo, consiste en la medición de los diferentes parámetros físicos in situ, y esta etapa del proyecto de graduación se divide en las siguientes partes:

#### 4.2.1. Inventario de fuentes de agua.

Esta etapa consiste en la ubicación en coordenadas espaciales y la medición de los niveles estáticos en los pozos, como se observa en la figura 4.2.1, en esta parte se logro ubicar 10 pozos entre estos y 5 manantiales. En esta etapa del trabajo se obtuvo la colaboración logística de parte del área de medio ambiente de la alcaldía de Nejapa. Los niveles se midieron con una sonda eléctrica de 300 m perteneciente al Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad de El Salvador.

**Tabla 4-1:** Ubicación de las fuentes inventariadas durante la investigación

N°	Lugar	Altura (m)	Longitud Lambert	Latitud Lambert	Precisión (m)	Municipio	Observaciones
1	Chacalapa	424	477749,94	297171,88	10	Apopa	Pozo de ANDA para consumo
2	La Periquera	451	477949,62	297109,22	8	Apopa	
3	La Pila del Sanjon	455	477341,55	297269,54	9	Apopa	Se observa Lixiviado
4	Quebrada del muerto	448	477096,35	297373,73	9	Apopa	proveniente del Botadero
5	Quebrada Las Lajas	469	477679,88	297202,67	5	Apopa	



**Figura 4-2:** Fotografía muestra el inventario de pozos artesanales en la zona de estudio

**Tabla 4-2:** Ubicación de los pozos inventariados durante la investigación

Nº	Lugar	Altura (m)	Nivel Freático (m)	Longitud Lambert	Latitud Lambert	Municipio
1	Botadero	455,00	450,60	477505,08	297665,30	Apopa
2	la puerta	470,00	455,00	477368,24	298032,64	Apopa
3	Col Obrera	447,00	430,00	477621,17	297616,03	Apopa
4	Col Obrera	442,00	424,00	478010,36	297894,83	Apopa
5	Finca Tesorito	482,00	457,00	477256,78	298218,66	Apopa
6	Caserío Suchinango	478,00	451,00	476616,00	297608,21	Apopa
7	Caserío Suchinango	479,00	451,00	476595,98	297611,30	Apopa
8	Periquera	466,00	437,00	477880,08	297161,01	Apopa
9	Caserío Suchinango	482,00	451,00	476444,20	297486,98	Apopa
10	Caserío Suchinango	478,00	446,00	476620,99	297585,16	Apopa



**Figura 4-4:** Fotografía muestra el nacimiento de Chacalapala a una distancia aproximada de 1000 m de la zona de estudio.



**Figura 4-3:** Fotografía muestra el antiguo nacimiento de La Pila del Sanjon de Shuchinango la cual muestra pérdida de calidad debido a la existencia de lixiviados provenientes del Botadero

#### 4.2.2. Pruebas de infiltración.

Se realizaron siete pruebas de infiltración, cuatro de las cuales se realizaron en las afuera del botadero, con el fin de determinar el índice de infiltración de la zona. Mientras que las otras tres pruebas fueron realizadas sobre la capa de arcilla que fue colocada sobre el botadero durante el cierre técnico en el año 2002 por la empresa MIDES. El equipo utilizado consiste en los anillos infiltrómetros, como se observa en la figura 4.5, un mazo de goma, una regla de 30 centímetros graduada en mm, un cronometro y agua. En la tabla 4.3, muestra la información recolectada en las pruebas de infiltración.

**Tabla 4-3:** Ubicación de las pruebas de infiltración realizadas en la zona de estudio

Prueba	Altura (m)	Longitud Lambert	Latitud Lambert	Tipo de uso de Suelo	Miembro Geológico	Infiltración mm/h
1	461	477713,44	297219,54	Granos básicos	b3	4.4
2	625	477811,73	298598,71	Tejido urbano	S4	1.2
3	486	476864,62	297974,70	Tejido Urbano	S4	2.1
4	477	476801,87	297773,99	Botadero (Arcilla)	S4	0.6
5	469	477137,77	297792,13	Botadero (Arcilla)	S4	0.6
6	469	476992,09	297776,89	Botadero (Arcilla)	S4	0.6
7	461	477188,17	297609,75	Cultivo (Maíz, Frijol)	S4	0.2



**Figura 4-5:** Muestra la realización de pruebas de infiltración aplicando el método de cilindros infiltrómetros en la zona de estudio

#### 4.2.3. Prospección geoeléctrica

##### Sondeos Eléctricos Verticales

Se realizaron 3 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) utilizando el método de Schlumberger, estos sondeos fueron realizados con el equipo de la UES, específicamente un ABEM de marca Terrameter SAS 1000/SAS4000 con una abertura de  $AB/2 = 250$  m. Lo que significa que el poder de penetración teórica de 60 m de profundidad.



**Figura 4-6:** Fotografía muestra la realización de los Sondeos Eléctricos Verticales utilizando el método de Schlumberger una abertura de  $AB/2 = 250$  m en la zona de estudio

**Tabla 4-4:** Ubicación de los sondeos eléctricos verticales realizados en la zona de estudio

N°	Lugar	Altura (m)	Longitud Lambert	Latitud Lambert	Municipio	Observaciones
1	Botadero de Mariona	472	89° 12' 45.70	13° 48' 04.10	Apopa	5 Capas
2	Carretera	483	89° 12' 47.85	13° 48' 08.59	Apopa	5 Capas
3	Caserío Suchinango	461	89° 12' 39.82	13° 47' 58.13	Apopa	5 Capas

## Perfiles Eléctricos 2 D

La realización de los perfiles eléctricos 2D utilizando el método de Dipolo - Dipolo fue realizada con el equipo de la UES, específicamente este es ABEM de marca Terrameter SAS 1000/SAS4000 con un valor de  $a = 10$  m. Lo que significa que el poder de penetración aproximada es de 45 m de profundidad. Al final se realizaron 2 perfiles eléctricos



**Figura 4-7:** Fotografía muestra la realización de los perfiles eléctricos utilizando el método de Dipolo – Dipolo con  $a = 10$  m y  $n = 8$  en la zona de estudio

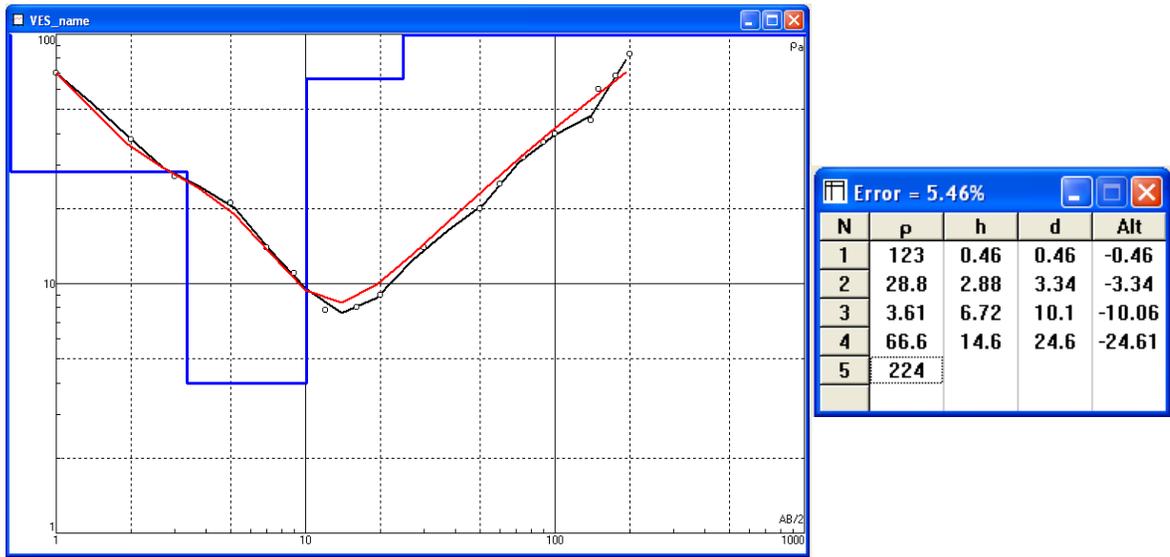
## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

### 5.1. Procesamiento e Interpretación de los SEV

El principio general de la prospección eléctrica por sondeos eléctricos verticales SEV se basa en la inyección de una corriente eléctrica  $I$  entre dos electrodos A y B, y la medida de una diferencia de potencial  $\Delta V$  entre otros dos electrodos M y N. Se deduce la resistividad eléctrica aparente  $\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$  ohmio - metro [ $\Omega \cdot m$ ]; donde  $K$  es el coeficiente geométrico del dispositivo, función solamente de las distancias entre electrodos. El sondeo eléctrico vertical SEV de geometría Schlumberger utilizado en este trabajo, requiere que los electrodos estén alineados y simétricos con  $\overline{MN} \ll \overline{AB}$ . Para caracterizar la existencia de la pluma de contaminación proveniente de la descomposición de los residuos depositados en el antiguo botadero de Mariona se realizaron 3 SEV utilizando este arreglo.

Después de la introducción y el tratamiento de los datos, los resultados de los sondeos se grafican sobre un diagrama doble - logarítmico de la resistividad, en función de la distancia  $AB/2$ . El tratamiento de los datos y la modelización, se realizaron con el software "IPI2WIN" (programa gratuito elaborado por la universidad estatal de Moscú) y "QWSLN" (de fabricación Francesa). La interpretación de los sondeos y la modelización se realizaron utilizando datos estratigráficos de la zona de estudio

A continuación se describen de forma general los Sondeos Eléctricos Verticales que se realizaron en la zona de Estudio:



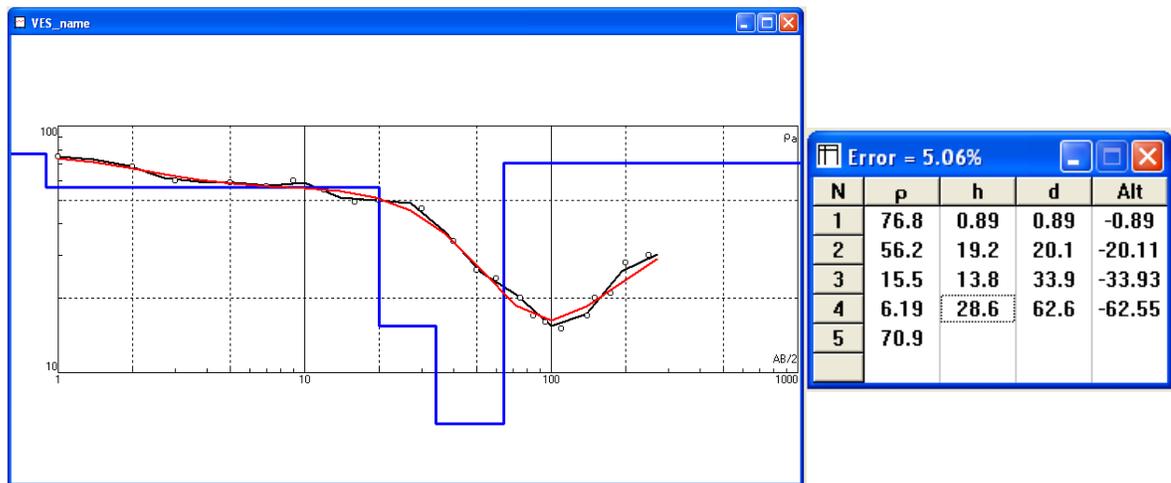
**Figura 5-1: Modelo** de interpretación del SEV\_01, ubicado sobre el Ex – Botadero de Mariona

Para este sondeo (Figura 5.1) los valores obtenidos dibujan una curva que muestra un modelo de las capas resistivas a las capas conductores, luego a los capas resistivas. El análisis y la interpretación de esta curva, indica la existencia de cinco capas caracterizadas por sus resistividades. Entre 0 y 0.50 m de profundidad, la primera resistividad aparente caracteriza la existencia de arcilla seca con una valor de resistividad de 125  $\Omega$  - m. A partir de 0.50 m hasta los 3.5 m de profundidad, se hacen presenten resistividades bajas 30  $\Omega$  - m asociadas a los materiales de relleno. Entre 3.5 m y 10 m de profundidad, se observa una capa con valores de resistividad de 4  $\Omega$  - m. que está relacionada con la presencia de lixiviados provenientes de la descomposición de los desechos de la capa superior, esta aseveración fue comprobada mediante la observación en la parte Sur – Este, donde el lixiviado está aflorando. Finalmente a los 24.0 m de profundidad se observa una capa de alta resistividad, la cual está asociada a lavas. Como puede notarse, este sondeo permitió la identificación en la base del botadero la presencia de lixiviados, a una profundidad aproximada de 24m.



**Figura 5-2: Modelo** de interpretación del SEV\_02, ubicado en el caserío Suchinango

Los valores obtenidos en el sondeo eléctrico vertical 02 indicado en la Figura 5.2, dibujan una curva que muestra un modelo de las capas resistivas a las capas conductoras, luego a las capas resistivas. El análisis y la interpretación de esta curva, indica la existencia de cinco capas caracterizadas por sus resistividades. Entre 0 y 1.60 m de profundidad, existen valores de resistividad de 292  $\Omega$  - m, asociados a terreno preparado para cultivo, a partir de 1.60 m hasta los 4.0 m de profundidad, se hacen presentes resistividades bajas 92.5  $\Omega$  - m asociadas a los materiales del miembro geológico s4. Piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas (*Tierra blanca*), Entre 4 m y 14.0 m de profundidad, se identifican valores resistivos en el rango de 8  $\Omega$  - m, que está relacionada con la presencia de lixiviados, Entre 14 m y 25 m de profundidad se encuentran valores de resistividad aparente de 80  $\Omega$  - m, asociado a la presencia del acuífero de la zona. Finalmente la última capa de profundidad mayor a los 25 m se observa una capa de 437  $\Omega$  - m, la cual constituye el basamento.



**Figura 5-3:** Modelo de interpretación del SEV\_03, ubicado al lado sur de la carretera Apopa - Nejapa

El sondeo eléctrico vertical 03 (Figura 5.3) muestra un modelo de cinco capas distribuidas así: en el rango de 0 m a 1 m se observa una capa de resistividad de  $77 \Omega - m$  la cual está asociada a materiales removido, desde ahí hasta la profundidad de 20 m se identifica material de  $56 \Omega - m$ , asociado a la presencia del acuífero de la zona, a los 34 m se encuentra valores de  $16 \Omega - m$ , lo cual es asociado según el sondeo eléctrico vertical 01 como material desechos, a una profundidad de 55 m con una capa de espesor de 30 m se identifica material de  $6 \Omega - m$  el cual se identifica como lixiviado y finalmente abajo de los 55 m de profundidad se encuentra el basamento con un valor de resistividad de  $71 \Omega - m$ .

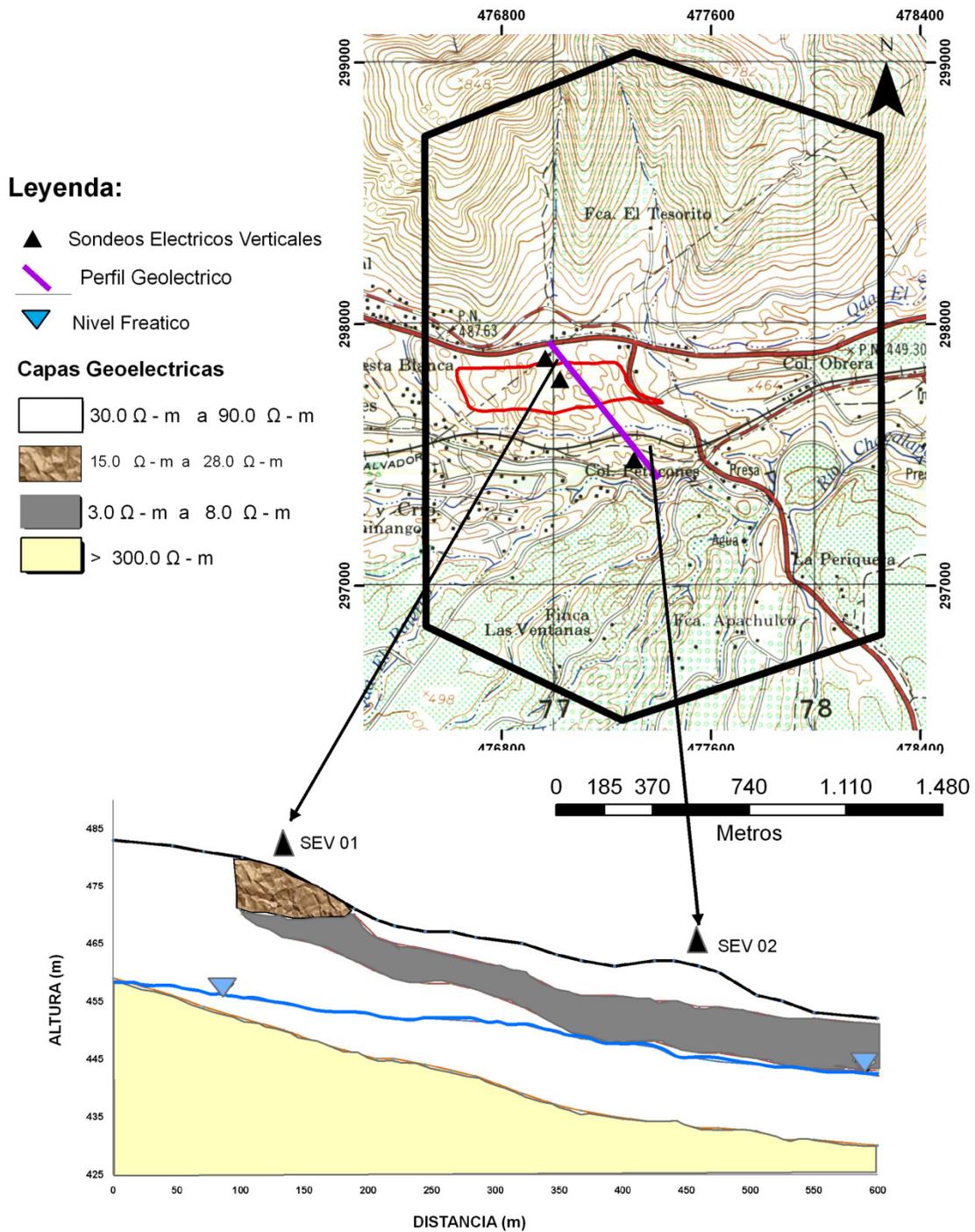
El poder de penetración bajo para los dos primeros Sondeos Eléctricos Verticales, aproximadamente 25 m se debe a las características de baja resistividad del terreno, lo cual disminuye la intensidad de corriente.

## 5.2. Perfil geoelectrico Norte-Este Sur-Este.

Se realizaron dos perfiles geoelectricos; el primero perfil 1 con la informacion de los tres sondeos electricos verticales previamente interpretados y el perfil 2 con la informacion del Dipolo – Dipolo, ambos perfiles fueron realizados de tal forma que pudieran cubrir en superficie los 53, 848 m<sup>2</sup> que ocupa el antiguo botadero con el fin de identificar la pluma de contaminacion.

El perfil 1 se trazo en base de tres sondeos electricos verticales (Figura 5.4), con un rumbo Sureste – Noroeste atravesando el botadero de Mariona. Este perfil se observan cuatro capas geoelectric-as, las cuales se describen de la superficial a la mas profunda.

- La primera capa, se encuentra en un rango de 30  $\Omega$  - m a 90  $\Omega$  - m, la cual se extiende a lo largo de todo el perfil con un espesor de aproximadamente de 25 m. de tierra blanca.
- La segunda capa, con resistividades 15  $\Omega$  - m a 28  $\Omega$  - m, la cual solo se observa por debajo de donde esta ubicado el botadero. Lo que permita inferir que esta capa esta asociada probablemente a material de desechos urbanos, que han producido lixiviados de elevada concentracion (4  $\Omega$  - m) en la base del botadero. El espesor de dicha capa es de aproximadamente 10 m.
- La tercera capa, se encuentra en un rango de 4  $\Omega$  - m a 8  $\Omega$  - m, y no se refleja en todo el perfil debido a que esta asociada a la pluma de contaminante (lixiviado) proveniente del botadero de basura la cual se observa a partir de donde estan depositados los desechos hacia una direccion Sur – Este, en la direccion de las lineas de flujo de las aguas subterranas. El espesor de dicha capa es de aproximadamente 5 m.
- Con la ayuda del inventario de pozos que se realizo en la zona se logro determinar el nivel freatico del acifero a una elevacion promedio de 460 msnm
- La cuarta capa, la resistividad es  $> 300.0 \Omega$  - m se observa en todo el perfil y esta asociada a lavas volcanicas, constituye el basamento geoelectrico. Su espesor no se pudo determinar con la exploracion de los sondeos electricos verticales

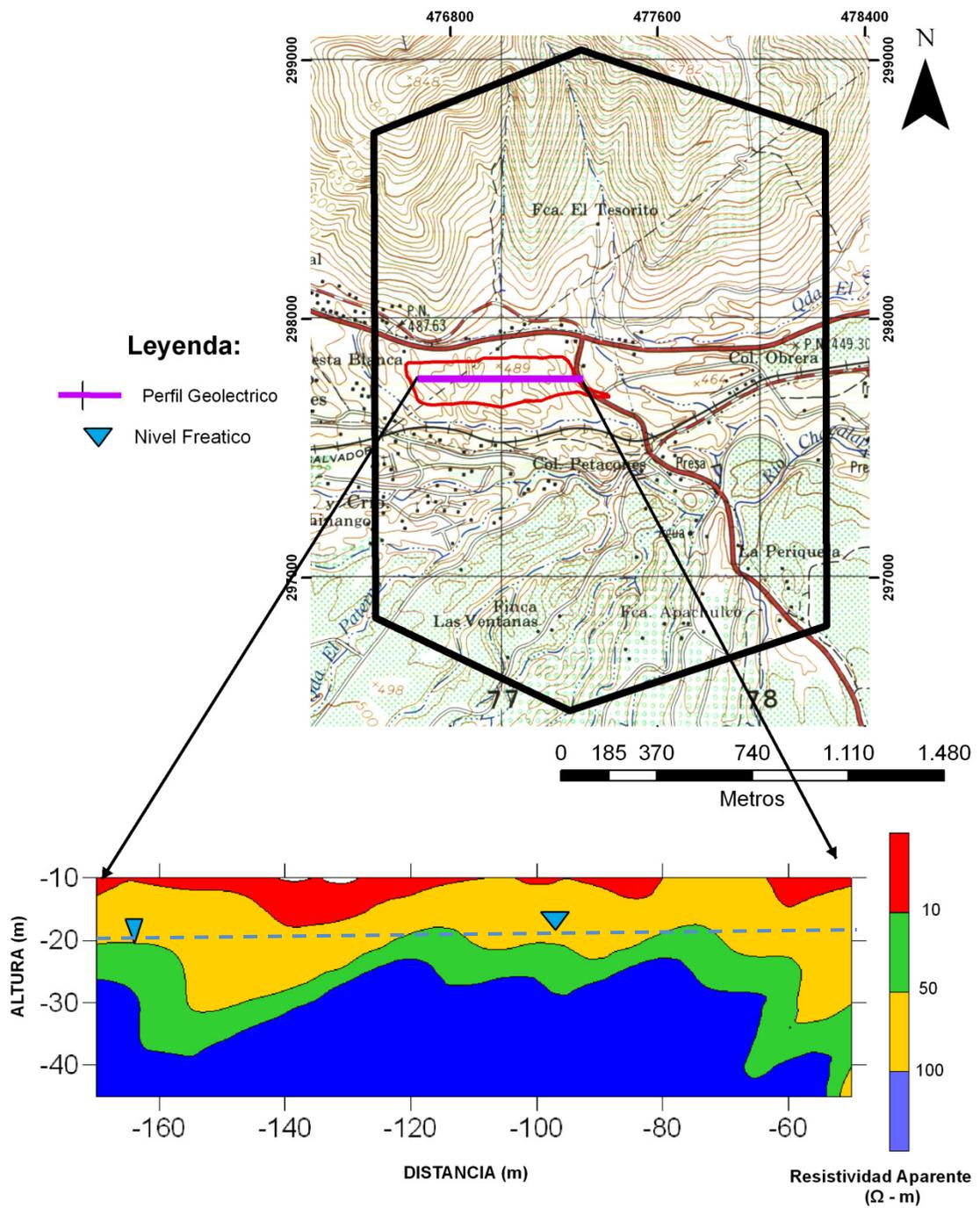


El perfil 2 esta trazado con una línea de 200 m (Figura 5.5) aplicando el método de Dipolo – Dipolo con valores de  $a = 10$  m y  $n = 8$ , con una ubicación Este – Oeste atravesando longitudinal mente el botadero de Mariona. El tratamiento de los datos y la modelización, se realizaron con el software “Golden Software Surfer”.

En la escala vertical de este perfil, aparece la pseudoprofundidad que significa que no es una profundidad real, y en la escala horizontal la distancia, lo cual proporciona una idea cualitativa del comportamiento de la resistividad con la profundidad.

En este perfil 2 se observan cuatro capas geoelectricas, las cuales se describen a continuación

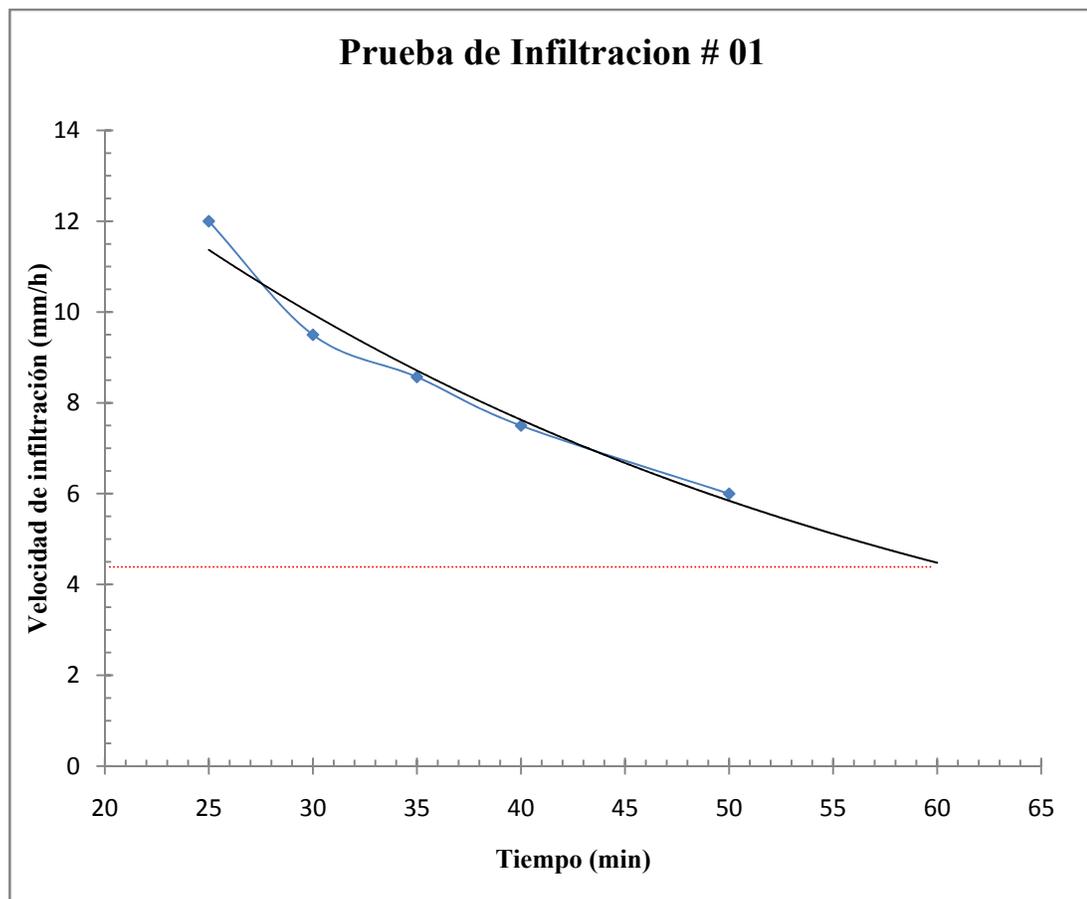
- El método de resistividad eléctrica mediante perfil 2D, con el arreglo electrónico Dipolo – Dipolo permitió inferir la presencia de lixiviado asociados con valores de baja resistividad  $1 \Omega - m$  a  $10.0 \Omega - m$ , dicha anomalía se observa en la parte superficial aproximadamente a 10 m. por debajo de la superficie del terreno, lo cual concuerda con los datos del perfil 1 realizado con los sondeos eléctricos verticales.
- La segunda capa, con resistividades  $10 \Omega - m$  a  $50 \Omega - m$ , la tercera capa, con resistividades  $50 \Omega - m$  a  $100.0 \Omega - m$ , y la cuarta capa, la resistividad es  $> 100 \Omega - m$ . este modelo de capa se realizo tomando en cuenta el perfil realizado con los datos de los sondeos eléctricos.
- Con la ayuda del inventario de pozos que se realizo en la zona se logró determinar el nivel freático del acuífero promedio de 460 msnm.
- En este perfil, entre los 140 m. y los 160 m. se observa un desplazamiento vertical de las capas geoelectricas. Esto hace inferir la existencia de una falla de origen tectónica lo cual permite el movimiento del lixiviado a través de la fractura.



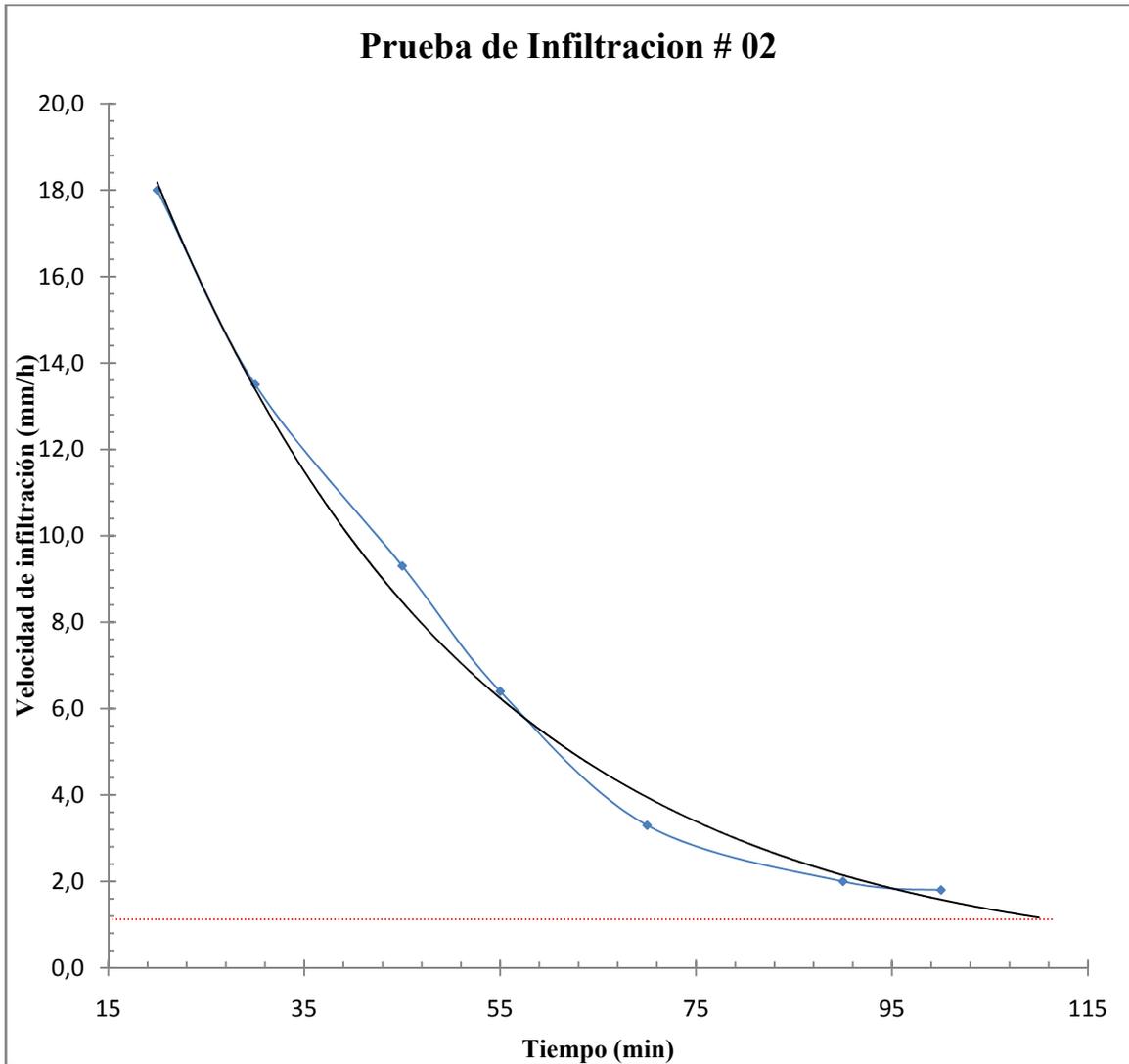
**Figura 5-5:** *Arriba:* Muestra la ubicación de la realización del Dipolo – Dipolo. *Abajo:* Perfil 2 elaborado con la información del Dipolo - Dipolo

### 5.3. Pruebas de infiltración

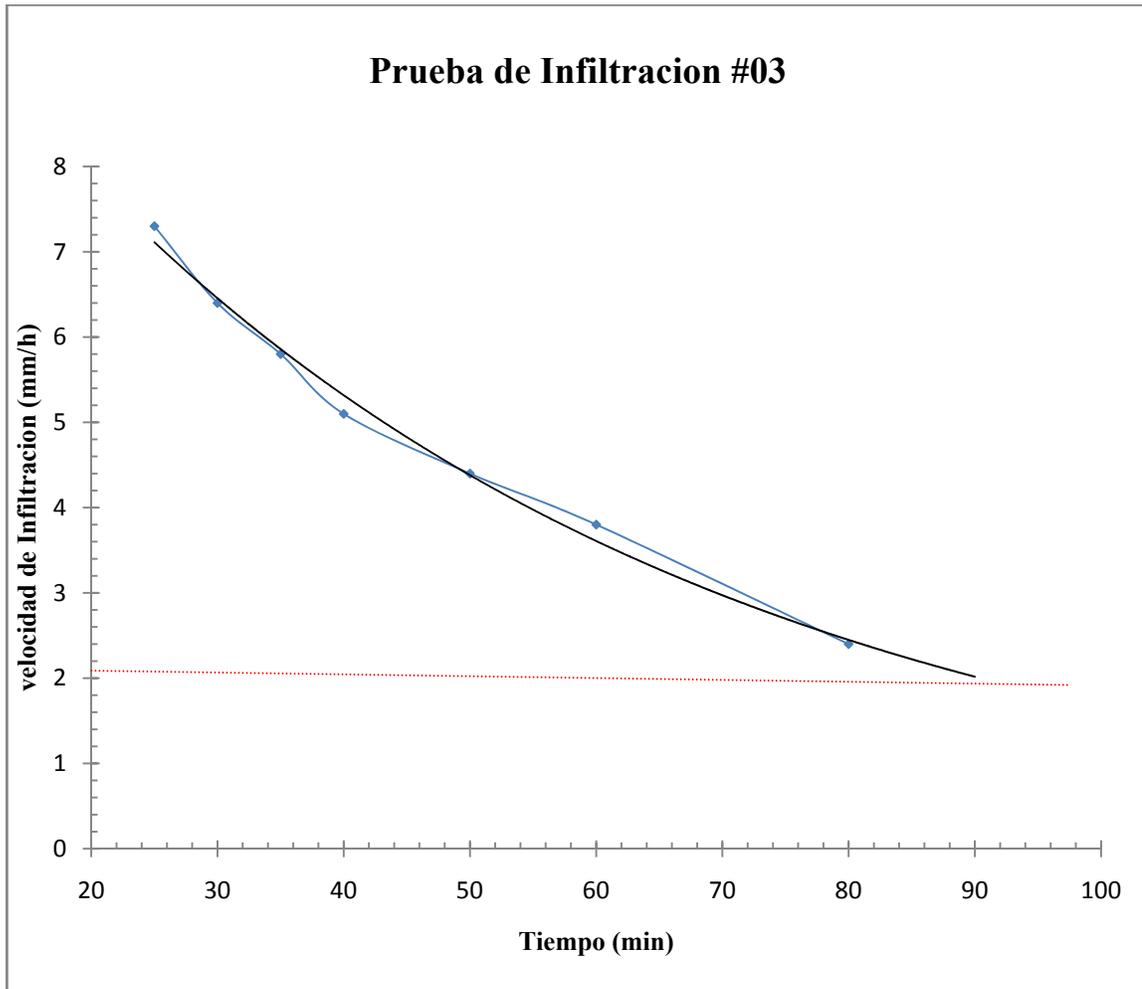
Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) el agua infiltrada en un botadero de residuos sólidos a cielo abierto, un % 70 de esta se convierte en lixiviado. Los datos de las pruebas de infiltración fueron procesados utilizando el software Office Excel, con el cual se realizaron las curvas de velocidad de infiltración en función del tiempo, se identificaron el valor en el cual la curva se acerca a una asíntota en el eje “y” dicho valor representa el valor de infiltración medido en  $\frac{mm}{h}$ . A continuación se presentan las curvas de las pruebas de infiltración realizadas en la zona de estudio.



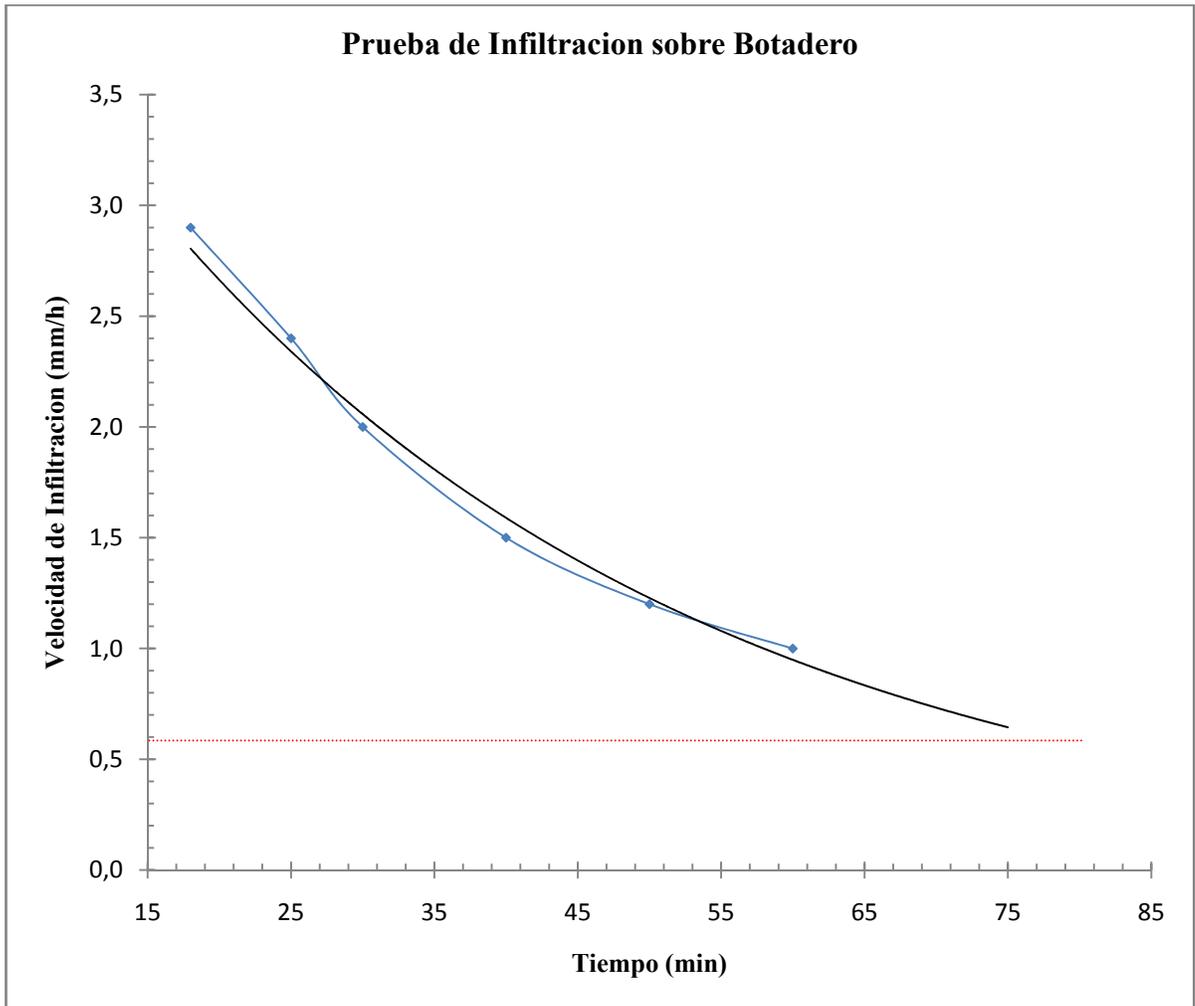
**Figura 5-6:** Curva de la prueba de infiltración # 01 realizada en el cerro de Nejapa. El agua infiltrada presenta una velocidad de Infiltración de  $4.4 \frac{mm}{h}$  debido a que fue realizada sobre miembro geológico de la formación de Bálamo b3.



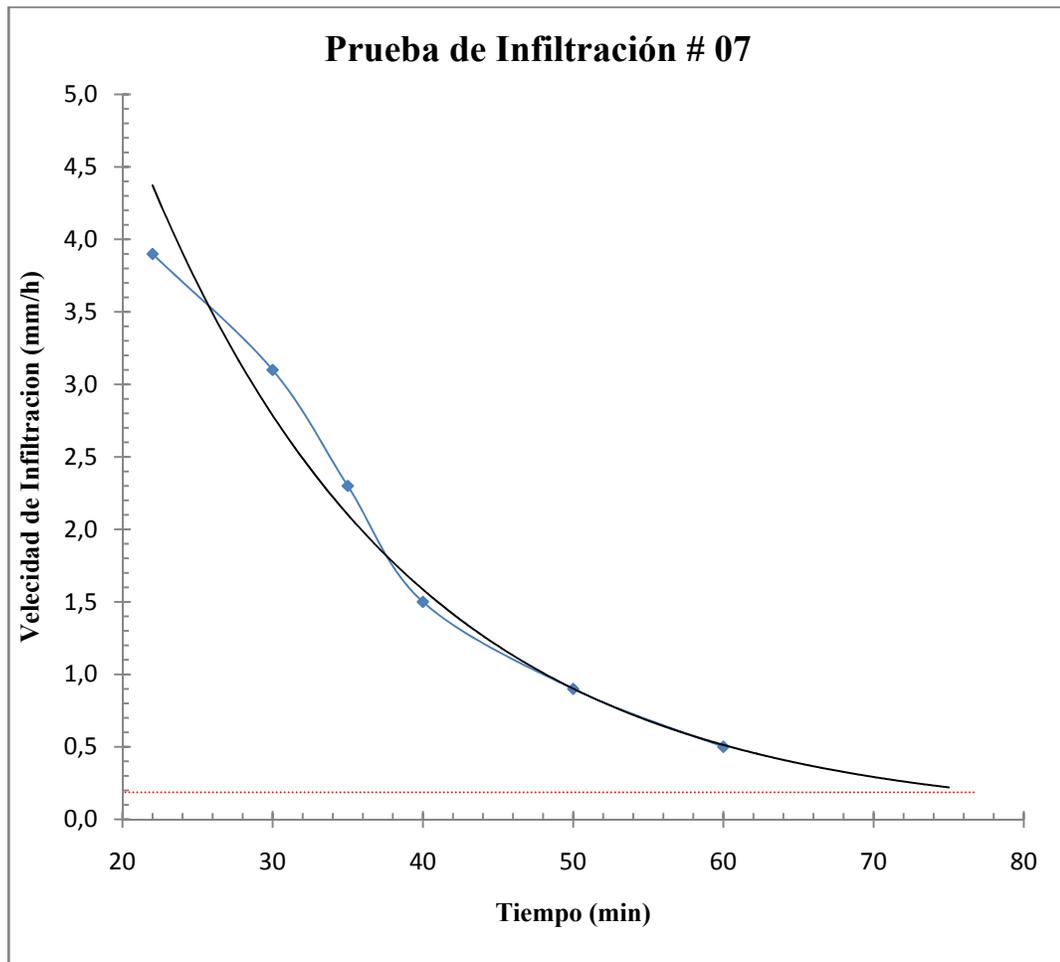
**Figura 5-7:** Curva de la prueba de infiltración # 02 realizada en el caserío Suchinango, la cual presenta una velocidad de Infiltración de  $1.2 \frac{mm}{h}$ , esta prueba fue realizada sobre el miembro geológico S4, formación San Salvador. El tipo de uso de suelo es de cultivo (Maíz, frijol)



**Figura 5-8:** Curva de la prueba de infiltración # 03 realizada al costado norte de la carretera que conduce de Apopa Nejapa. Presentando una velocidad de Infiltración de,  $2.1 \frac{mm}{h}$  debido a que fue realizada sobre miembro geológico de la formación de San Salvador s4.



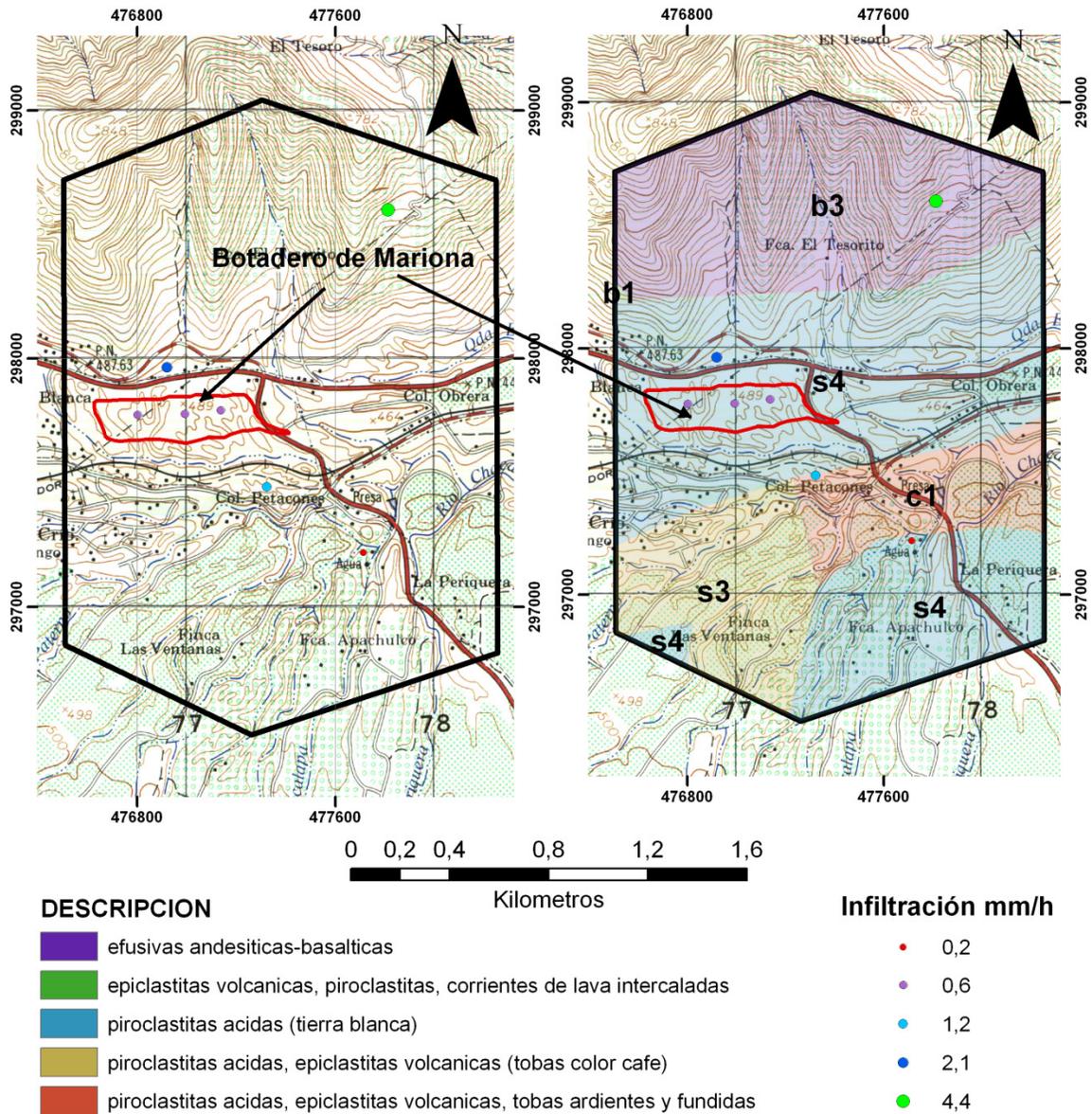
**Figura 5-9:** Curva promedio de las pruebas de infiltración # 04, 05 y 06, realizadas sobre el ex – Botadero de Mariona. La cual presenta una velocidad de Infiltración de  $0.6 \frac{mm}{h}$ , este valor está relacionado a la presencia de un materia con baja permeabilidad, lo cual concuerda con la arcilla que fue colocada sobre el material depositado en el botadero, el espesor de dicha capa es de aproximadamente 60 cm. de espesor, lo cual sirve como capa sello debido a su impermeabilidad.



**Figura 5-10:** Curva de la prueba de infiltración # 07 realizada en las cercanías del nacimiento Chacalapa en Apopa. La cual presenta una velocidad de Infiltración de  $0.2 \frac{mm}{h}$

El promedio de infiltración en esta zona es de  $1.4 \frac{mm}{h}$ , con rangos que varían desde  $0.2 \frac{mm}{h}$  y  $4.4 \frac{mm}{h}$ , ubicándose los valores de infiltración de  $0.6 \frac{mm}{h}$  sobre el botadero debido a la capa de arcilla que fue colocada durante el cierre técnico llevado a cabo por la empresa MIDES en el año de 2001, mientras que los valores de infiltración alta al lado oeste del cerro de Nejapa comprobando así que dicho cerro es un área de recarga de la zona.

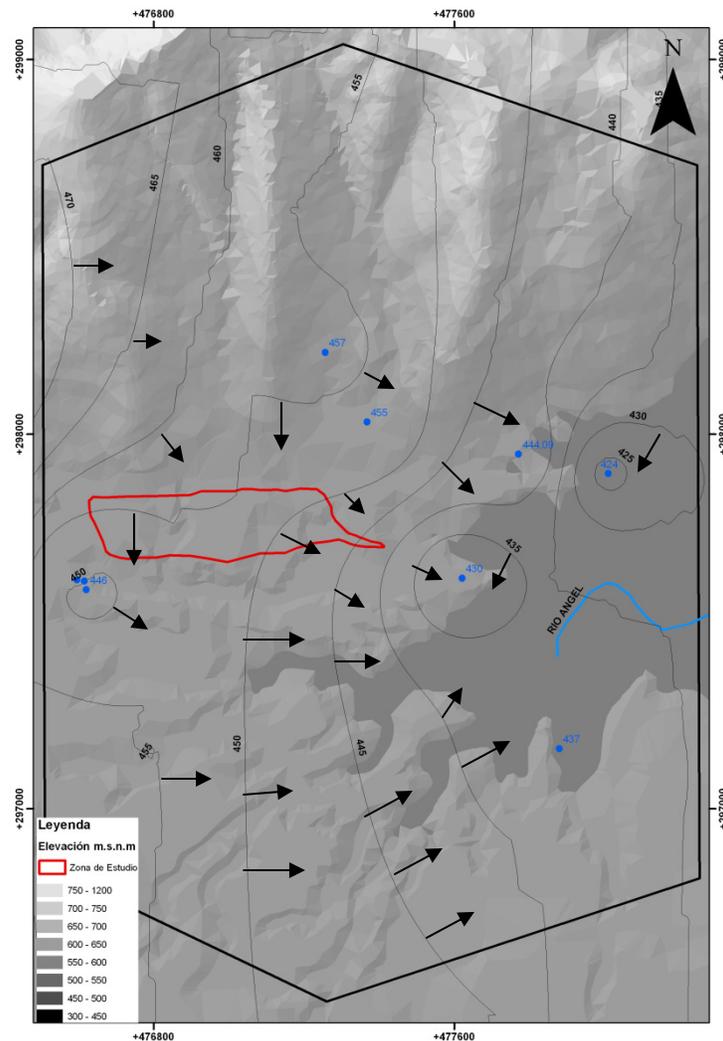
A continuación se procedió a ubicarlos espacialmente en el mapa topográfico así como también en el mapa geológico de la zona de estudio



**Figura 5-11:** Ubicación y resultados de las pruebas de infiltración; **Izquierda:** Ubicación espacial sobre el mapa topográfico **Derecha:** Ubicación de los miembros geológicos sobre los cuales se realizaron las pruebas de infiltración

## 5.4. Gradiente Hidráulico

Con los datos obtenidos de la medición de los niveles freáticos de la zona se determinó el valor del gradiente hidráulico de la zona el cual tiene un valor de: 0.019, también se determinó la dirección del flujo del agua subterránea, la cual tiene la siguiente dirección: De la parte noreste del volcán de San Salvador hacia la parte sur del cerro de Nejapa, donde se encuentra el nivel de agua a una elevación promedio de 460 msnm. De la parte sureste del cerro de Nejapa hacia la finca El Ángel. Se puede observar en base al mapa de curvas isofreáticas, que el río El Ángel y nacimiento Chacalapa se encuentran en dirección del flujo de agua subterránea de la zona.



**Figura 5-12:** Mapa de niveles estáticos de la zona, se puede observar que la dirección de de flujo es hacia el lado Sur- Este del botadero

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

1. Los métodos geoelectricos (sondeo eléctrico vertical y Dipolo - Dipolo) aplicados para la evaluación del ex-botadero de Mariona, demostró la existencia de contaminantes (lixiviados) generados por este, a una profundidad aproximada de 10 m.
2. Debido a la existencia de lixiviados próximo a 10 m. del nivel freático, los acuíferos de la zona, presentan un alto riesgo de contaminación.
3. Las concentraciones de los lixiviados en la parte baja del Ex Botadero presentan resistividades de  $4 \Omega - m$ , mientras que a 300 m al Sur – Este las concentraciones presentan valores de  $8 \Omega - m$ . Lo que implica que existe una interacción de difusión, absorción, e intercambio catiónico de las elementos compuestos por el lixiviado y el material geológico.
4. El Ex botadero de Mariona fue colocado sobre el miembro geológico S4 (Tierra Blanca) el cual presenta un coeficiente de infiltración de 2.1 mm/h lo que representa un alto riesgo hacia los recursos hídricos o acuíferos.
5. Los coeficientes de infiltración encontrados en la zona de estudio varían desde 0.2 mm/h hasta 4.2 mm/h los cuales se identifican con materiales tales como: ceniza volcánica, lavas y materiales arcillosos.
6. Los materiales arcillosos que cubre el Ex botadero de Mariona tiene un coeficiente de infiltración de 0.6 mm/h, que es considerado bajo con respecto al 2.1 mm/h del material S4, pero siempre representa un alto riesgo debido a la generación de lixiviados.
7. Los lixiviados generados en el Ex botadero de Mariona representan una fuente potencial de contaminación para el acuífero somero de la zona cuya profundidad oscila entre los 5 m hasta los 30 m, el cual ha sido evidenciada en el manantial de San Juan, ubicado en la dirección Sud-Este del Ex botadero.
8. A través del trazo de las líneas isofreáticas de la zona, se determinó que la línea de flujo posee una dirección Sur-Este con un gradiente hidráulico de 0.019.

9. El río El Ángel y el manantial Chacalapa se encuentran en la dirección de la línea de flujo de los lixiviados generados en el Ex botadero de Mariona lo cual representa un alto riesgo de contaminación.

## 6.2. Recomendaciones

1. Caracterizar emisiones de Gases como Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y Metano (CH<sub>4</sub>), para la generación de información sobre la contaminación atmosférica producida por el Ex Botadero de Mariona.
2. Evaluar la geoquímica de los lixiviados provenientes del Ex Botadero de Mariona, (los iones mayoritarios, metales pesados, materiales radioactivos, entre otros).
3. Instalar una red piezométrica sobre el área de estudio para monitorear el desplazamiento del contaminante lixiviado.
4. Diseñar una propuesta para remediar la contaminación generada por el Ex Botadero de Mariona en el suelo, aire y recurso hídrico.
5. Para la ubicación de nuevos botaderos se deben realizar estudios específicos para minimizar el riesgo de contaminación de los recursos naturales y la biodiversidad de la zona.
6. Implementar un programa integral de evaluación y monitoreo de botaderos de basura en funcionamiento y clausurados; a través de la coordinación de la Universidad de El Salvador y diferentes instituciones interesadas en la protección de los recursos naturales.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Orellana, Ernesto; 1982; **Prospección Geoelectrica en Corriente Continua**; segunda edición, editorial paraninfo; Madrid.
- **Espinoza, Carlos** Atenuación Natural de Contaminantes Presentes en el Líquido Percolado Producido Por Un Relleno Sanitario **Groundwater and Human development** Bocanegra, E - Martínez, D - Massone, H (Eds.) 2002 - ISBN 987-544-063-9
- **M. J. Moreno-López, J. C. Cerón, I. Brito-Cabeza** Estudio y Seguimiento Analítico de Lixiviados Generados en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos de Huelva (España) **Groundwater and Human development** Bocanegra, E - Martínez, D - Massone, H (Eds.) 2002 - ISBN 987-544-063-9
- Pogliano, G., Miletto, M., Maspla, J., Lanza, R., Zuppi, G. M. **Identificación de la contaminación de las aguas subterráneas derivada de un vertedero de residuos sólidos urbanos por métodos geoelectricos** Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, Via Valperga Caluso, 35, 10125 Torino, Italia.
- *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente (1998, Valencia, España).* **Contaminación por Lixiviados de Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos en Acuíferos Carbonatados: Vertedero de la Mina (Provincia de Malaga)** Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga
- *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente (1998, Valencia, España).* **La Contaminación de las Aguas Subterráneas por Vertederos y depósitos Enterrados en España.** Facultad Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.
- Procedimientos Básicos **Guía para Evaluación de Impacto Ambiental Para Proyectos de Residuos Sólidos Municipales** Banco Interamericano de Desarrollo Diciembre, 1997

- Programa Internacional para la Erradicación del Trabajo Infantil **El Salvador Trabajo Infantil en los Basureros: Una Evaluación Rápida** Organización Internacional del Trabajo, Marzo de 2002, Ginebra
- Alvarado Batres, Cesar Armando; **Modelo Conceptual y Evaluación de la Vulnerabilidad intrínseca del Acuífero Quezaltepeque - Nejapa**; Tesis (Lic. en Física). San Salvador, El Salvador. Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. 2007
- Nottingham, Gregory. **Investigación de las Condiciones Ambientales del Basurero de Nejapa: Estudio de Contaminación de Agua, Aire y Suelo**, Universidad Luterana Salvadoreña, San Salvador diciembre de 1998
- Ingeniería Ambiental & Medio Ambiente **Residuos Sólidos** [en línea] < <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>> [Consulta: 10 de Agosto de 2007]