

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional

Unidad Oaxaca



## MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES

---

---

### CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS DEL TIRADERO MUNICIPAL DE LA CIUDAD DE OAXACA

---

---

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
PRESENTA:

**Martha Elena Jiménez Castañeda**

Director de tesis: Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

*Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca*

*Enero de 2009*





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 04 del mes de diciembre del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **“Caracterización hidrogeológica de la laguna de lixiviados del tiradero municipal de la ciudad de Oaxaca”**.

Presentada por la alumna:

<b>Jiménez</b> Apellido paterno	<b>Castañeda</b> materno	<b>Martha Elena</b> nombre(s)
Con registro:		
B	0	6 1 4 6 0

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA  
Director de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

Dr. Juan Alejandro Vázquez Feijoo

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Dr. Magdalena Caballero Caballero

Dr. Andrés Pech Pérez

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. Juan Rodríguez Ramírez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
CIIDIR  
UNIDAD OAXACA  
IPN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESION DE DERECHOS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 02 del mes diciembre del año 2008, el (la) que suscribe **Jiménez Castañeda Martha Elena** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B061460**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez cede los derechos del trabajo titulado: **“Caracterización hidrogeológica de la laguna de lixiviados del tiradero municipal de la ciudad de Oaxaca”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradoox@ipn.mx](mailto:posgradoox@ipn.mx) ó [rdx2604@gmail.com](mailto:rdx2604@gmail.com) . Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

JIMENEZ CASTAÑEDA MARTHA ELENA



INSTITUTO POLITÉCNICO  
NACIONAL  
CIDIR-UNIDAD-OAXACA



## RESUMEN

---

---

En el presente estudio se realizó la caracterización hidrogeológica de la Laguna de Lixiviados del Tiradero Municipal de la Ciudad de Oaxaca. Con este objetivo, se realizaron siete perfiles sísmicos, tres perfiles electromagnéticos, dos perfiles dipolares y cinco sondeos eléctricos verticales. La conductividad hidráulica determinó mediante el método de Darcy, mientras que la porosidad del sitio se obtuvo aplicando la ecuación de Kozeny-Carman. También se realizaron análisis fisicoquímicos de lixiviado, suelo y agua y se obtuvo la dirección de flujo subterráneo. Estos datos se denominaron parámetros de control, los cuales fortalecen los métodos geofísicos empleados y ayudaron a determinar los posibles contaminantes existentes en la zona.

A través de la integración de los métodos geofísicos y los parámetros de control se estableció un modelo hidrogeológico constituido por material aluvial, como calizas, limo, arcilla y arena que funcionan como un estrato impermeable y neutralizante para los lixiviados, así como por estratos de lutita y arenisca. También se determinó que la Laguna de Lixiviados se encuentra en una zona afectada por el sistema de la Falla de Oaxaca. Los estudios realizados permitieron identificar un valor menor de 10 Ohm-m como característico del suelo de la Laguna afectado con lixiviados, infiriéndose una dirección preferencial suroeste de la pluma contaminante.

*Palabras clave: Caracterización hidrogeológica, exploración geofísica, contaminación subterránea.*

## ABSTRACT

---

---

The hydrogeological characterization of the leachate lagoon of Oaxaca City's landfill was made in this work. Seven seismic profiles, three electromagnetic profiles, two dipole-dipole surveys and five electrical resistivity soundings were carried out to detect pollution plume.

Leachate sampled in the landfill, water and soil from leachate lagoon were chemically analyzed. Groundwater flow direction map was also determined. Hydraulic conductivity was set by Darcy's method, porosity and hydraulic conductivity were obtained through the Kozeny-Carman's equation. This data set was called constraint parameters.

Results of inversion of geophysical surveys data allowed get a hydrogeological model. Constraint parameters were incorporated in the model for consistency. This model indicates that soil of leachate lagoon is characterized by alluvial sediments including lime-sandstone, silty, clay and sandy acting as non-permeable and neutralizant layer, shale and sandstone strata. Leachate lagoon is located in an area affected by the Oaxaca's Fault system. Flow direction of pollution plume is SW and polluted soil was ranged with resistivity value less than 10  $\Omega$ - m.

*Keywords: Hydrogeological characterization, geophysical survey, groundwater pollution.*



## AGRADECIMIENTOS

---

---

*Expreso mi gratitud hacia el **Instituto Politécnico Nacional** por la oportunidad que me otorgó al aceptarme como una de sus alumnas. Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por haberme brindado las facilidades para la elaboración de esta tesis a través del apoyo de su sistema de becas, así como a la **Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del Instituto Politécnico Nacional** por las becas asignadas a los proyectos de investigación: “Evaluación de la contaminación subterránea generada por el tiradero municipal de la ciudad de Oaxaca” (clave SIP-20060280) y “Estudio hidrogeológico del sistema acuífero del valle de Zaachila, para evaluar la cantidad y calidad del agua subterránea” (claves SIP-20070076 y SIP-20080567).*

*Agradezco al Honorable Comité Tutorial y Jurado de Tesis integrado por el **Dr. Andrés Pech Pérez, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Dr. Juan Alejandro Vázquez Feijoo, Dr. Magdaleno Caballero Caballero, Dra. Luicita Lagunez Rivera** y **M. en C. María Ladrón de Guevara Torres** por las sugerencias y recomendaciones realizadas para el mejoramiento del presente estudio. Especialmente al **Dr. Marco Antonio Pérez Flores** y al **Dr. Oscar Campos Enríquez** por la revisión y comentarios realizados.*

*Por otra parte manifiesto mi agradecimiento al **Dr. Leobardo Peña Salazar** por el apoyo brindado con el método sísmico de refracción, así como a **Alberto Bortolotti, Francisco Reyes, Eberth Sepúlveda** y a **Horacio**, con quienes colaboré en los trabajos de campo.*

*Finalmente y de manera especial, agradezco al **Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez** la dirección de mi tesis de grado, los conocimientos que me transmitió y el apoyo, confianza y amistad que me otorgó durante la realización de este proyecto.*

*Martha Elena Jiménez Castañeda*



*B.C.A.*

*I.J.V.*



**NOMENCLATURA** \_\_\_\_\_ vii

**CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

I.1 INTRODUCCIÓN \_\_\_\_\_ 1

I.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA \_\_\_\_\_ 3

I.3 HIPÓTESIS \_\_\_\_\_ 4

I.4. OBJETIVOS

    I.4.1 General \_\_\_\_\_ 4

    I.4.2 Específicos \_\_\_\_\_ 4

**CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

II.1 MÉTODO SÍSMICO DE REFRACCIÓN \_\_\_\_\_ 8

II.2 MÉTODO ELÉCTRICO DE RESISTIVIDAD \_\_\_\_\_ 15

II.3 MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO \_\_\_\_\_ 22

II.4 INTERACCIONES EN EL SUBSUELO \_\_\_\_\_ 27

**CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

III.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO \_\_\_\_\_ 30

III.2 APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS \_\_\_\_\_ 32

    III.2.1 Método sísmico de refracción \_\_\_\_\_ 32

    III.2.2 Método electromagnético \_\_\_\_\_ 36

    III.2.3 Método eléctrico de resistividad \_\_\_\_\_ 38

III.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS \_\_\_\_\_ 43

    III.3.1 Dirección de flujo subterráneo \_\_\_\_\_ 44

III.3.2 Conductividad hidráulica _____	46
III.3.2.1 Método de Darcy _____	47
III.3.3 Transmisividad _____	50
III.3.4 Porosidad _____	50
III.3.5 Análisis fisicoquímicos _____	52
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	
IV.1 MÉTODO SÍSMICO DE REFRACCIÓN _____	54
IV.2 MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO _____	61
IV.3 MÉTODO ELÉCTRICO DE RESISTIVIDAD _____	65
IV.3.1 Configuración Dipolo-Dipolo _____	65
IV.3.2 Sondeos eléctricos verticales (configuración Schlumberger) _____	68
IV.4 PARÁMETROS DE CONTROL _____	72
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
V.1 CONCLUSIONES _____	82
V.2 RECOMENDACIONES _____	83
<b>ANEXO A. PRODUCTIVIDAD ACADÉMICA _____</b>	<b>85</b>
<b>REFERENCIAS _____</b>	<b>86</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

---

<b>Figura 1.</b> Laguna de Lixiviados. _____	7
<b>Figura 2.</b> Principio de Huygens (Telford, 1990). _____	10
<b>Figura 3.</b> Reflexión y refracción de una onda incidente en el límite de dos medios con diferente velocidad y densidad (Sharma, 1997). _____	11
<b>Figura 4.</b> Principio del método de refracción sísmica (Sharma, 1997). _____	12
<b>Figura 5.</b> Cálculo de la distribución del potencial debido a una corriente en un medio homogéneo. _____	16
<b>Figura 6.</b> Geometría de las líneas de corriente y líneas equipotenciales en una sección vertical del suelo. (Dobrin, 1988). _____	19
<b>Figura 7.</b> Configuración dipolo-dipolo. _____	20
<b>Figura 8.</b> Configuración Schlumberger. _____	21
<b>Figura 9.</b> Propagación de las ondas electromagnéticas. En esta imagen se muestran el campo primario generado por una bobina transmisora y el campo secundario inducido por la presencia de un cuerpo conductor en el subsuelo detectado por una bobina receptora. (Sherif, 1989). _____	23
<b>Figura 10.</b> Vectores eléctricos E y magnéticos H en una onda electromagnética (Sherif, 1989). _____	25
<b>Figura 11.</b> Conformación de la zona no saturada de la laguna de lixiviados. En esta imagen se observa la presencia de arcillas, lutitas y calizas. _____	27
<b>Figura 12.</b> Mapa de ubicación del Tiradero Municipal de la Ciudad de Oaxaca y la Laguna de Lixiviados. _____	31
<b>Figura 13.</b> Mapa de ubicación de los métodos geofísicos empleados en la Laguna de Lixiviados. _____	33
<b>Figura 14.</b> a) Sismógrafo OYO modelo McSeis 170. 14 b) Geófonos utilizados en los tendidos o perfiles sísmicos. 14 c) Generación de ondas sísmicas con un martillo de 12 libras. _____	34
<b>Figura 15.</b> Arreglo de geófonos utilizado para levantamiento sísmico de refracción. _____	34
<b>Figura 16.</b> En la parte superior se muestran los sismogramas obtenidos del tiro, tiro central y contratiro, respectivamente. En la parte inferior se observa el modelo obtenido a partir de los sismogramas de la parte superior. _____	35

## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

---

---

<b>Figura 17.</b> a) Bobinas EM-34 de Geonics Ltd.17 b) Inducción de campos electromagnéticos: Dipolo Horizontal c) Inducción de campos electromagnéticos: Dipolo Vertical. _____	35
<b>Figura 18.</b> Representación esquemática de la malla en 2D para generar las imágenes de conductividad del suelo (Pérez-Flores, et al., 2001). _____	37
<b>Figura 19.</b> Resistivímetro de corriente directa (CD) utilizado para la recolección de datos de resistividad del suelo. _____	39
<b>Figura 20.</b> Mapa de ubicación para la realización de las pruebas hidráulicas, así como la ubicación de los pozos de aprovechamiento en la Laguna de Lixiviados. _____	43
<b>Figura 21.</b> GPS ProMark 2 de Astech utilizado para geo-referenciar sitios de análisis geofísicos y pozos de aprovechamiento. _____	44
<b>Figura 22.</b> Determinación de parámetros fisicoquímicos del agua utilizando un tester Hanna HI 98129. _____	45
<b>Figura 23.</b> Infiltrómetro de carga variable. _____	46
<b>Figura 24.</b> Abatimiento del nivel del agua en D-1 para la obtención de la conductividad hidráulica. _____	49
<b>Figura 25.</b> Abatimiento del nivel del agua en D-2 para la obtención de la conductividad hidráulica. _____	49
<b>Figura 26.</b> a) Toma de muestras simples. 24 b) Suelo de la Laguna de Lixiviados. _____	53
<b>Figura 27.</b> Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-1. _____	54
<b>Figura 28.</b> Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-2. _____	55
<b>Figura 29.</b> Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-3. _____	55
<b>Figura 30.</b> Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-4. _____	56
<b>Figura 31.</b> Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-5. _____	57
<b>Figura 32.</b> Modelo geológico obtenido con datos del perfil SIS-6. _____	57
<b>Figura 33.</b> Modelo geológico obtenido con datos del perfil SIS-7. _____	58
<b>Figura 34.</b> Modelo SIS-A. Se advierte la presencia de material aluvial con un espesor que varía de 5 a 9 m. _____	59
<b>Figura 35.</b> Modelo SIS-B. _____	60
<b>Figura 36.</b> Respuesta resistiva de suelo en el perfil EM-1. _____	61
<b>Figura 37.</b> Respuesta resistiva de suelo en el perfil EM-2. _____	62

## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

---

---

<b>Figura 38.</b> Perfil electromagnético EM-3. _____	63
<b>Figura 39.</b> Conductividad aparente del dipolo vertical en el perfil EM-2 que muestra una señal asimétrica en x= 200 m asociada con una fractura inclinada perteneciente al sistema de la Falla de Oaxaca. _____	64
<b>Figura 40.</b> Conductividad aparente del dipolo vertical en el perfil EM-3. _____	64
<b>Figura 41.</b> Perfil dipolar DIP-1 generado por CICRES35. _____	66
<b>Figura 42.</b> Respuesta del suelo para DIP-1, generada por RES2DINV. _____	66
<b>Figura 43.</b> Perfil dipolar DIP-2 generado por CICRES35. _____	67
<b>Figura 44.</b> Respuesta del suelo para DIP-2, generada por RES2DINV. _____	67
<b>Figuras 45-49.</b> Curvas de resistividad aparente de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's). _____	69
<b>Figura 50.</b> En esta figura se pueden apreciar dos zonas de inhomogeneidad, resaltadas en un cuadro, asociadas con la presencia de fracturas. _____	70
<b>Figura 51.</b> Modelo geoelectrico propuesto para la Laguna de Lixiviados del TMCO. _____	71
<b>Figura 52.</b> Variación del pH en el área de influencia de Laguna de Lixiviados. _____	76
<b>Figura 53.</b> Variación de la conductividad hidráulica en el área de influencia de Laguna de Lixiviados. _____	76
<b>Figura 54.</b> Mapa de flujo subterráneo para noviembre de 2007 (Izq.) y julio de 2008 (Der.). _____	77
<b>Figura 55.</b> Variación del nivel freático. _____	78
<b>Figura 56.</b> Modelo hidrogeológico de la Laguna de Lixiviados. _____	80
<b>Figura 57.</b> Modelo 3D propuesto para la Laguna de Lixiviados. _____	81

## LISTA DE TABLAS

---

---

<b>Tabla 1.</b> Profundidad de exploración para el equipo EM-34. _____	26
<b>Tabla 2.</b> Constante geométrica $k$ para el perfil DIP-1. _____	40
<b>Tabla 3.</b> Constante geométrica $k$ para el perfil DIP-2. _____	40
<b>Tabla 4.</b> Distancias interelectródicas y constante geométrica ( $k$ ) usadas en la realización de los SEV's. _____	42
<b>Tabla 5.</b> Conductividad hidráulica $K$ (m/d) obtenida por el método de Darcy. _____	48
<b>Tabla 6.</b> Porosidad de Kozeny-Carman. _____	52
<b>Tabla 7.</b> Metales pesados en lixiviado, agua y suelo (ppm) julio/2008. _____	72
<b>Tabla 8.</b> Toxicidad de metales encontrados en la Laguna de Lixiviados. _____	72

## NOMENCLATURA

---

---

$A$	Área
$a$	Constante Separación interelectódica (configuración dipolo-dipolo)
$AB$	Frente de onda
$A, B$	Electrodos de corriente
$B$	Inducción magnética
$b$	Espesor saturado del acuífero
$C_K$	Constante de Kozeny-Carman ( $8.3 \times 10^{-3}$ )
$E$	Intensidad del campo eléctrico
$E_p$	Voltaje primario
$E_s$	Voltaje secundario
$\varepsilon$	Permitividad
$F$	Factor de formación
$g$	Gravedad
$\gamma$	Peso específico
$H$	Intensidad del campo magnético
$h$	Profundidad
$I$	Corriente
$i_c$	Ángulo de incidencia
$K$	Conductividad hidráulica
$k$	Factor geométrico
$l$	Longitud de un área de sección transversal uniforme, A
$M, N$	Electrodos de potencial
$\mu$	Permeabilidad magnética Viscosidad
$n$	Nivel de investigación

## NOMENCLATURA (Continuación)

---

---

$\eta$	<i>Porosidad</i>
P	<i>Ondas compresionales, de dilatación u ondas primarias</i> <i>Subíndice para identificar la onda longitudinal</i>
$p$	<i>Parámetro de rayo</i>
R	<i>Resistencia</i> <i>Ángulo de reflexión</i>
$r$	<i>Ángulo de refracción</i>
$\rho$	<i>Resistividad</i> <i>Densidad</i>
$\rho_a$	<i>Resistividad aparente</i>
S	<i>Ondas de cizalla u ondas secundarias</i> <i>Subíndice para identificar la onda transversal</i>
$S_t$	<i>Retención específica</i>
$\sigma_a$	<i>Conductividad aparente</i>
T	<i>Transmisividad</i>
$T_i$	<i>Tiempo de intersección</i>
$t$	<i>Tiempo</i>
Q	<i>Flujo volumétrico.</i>
$q$	<i>Densidad de la carga eléctrica</i>
V	<i>Velocidad</i> <i>Volumen</i> <i>Voltaje</i>
$\Delta V$	<i>Diferencia de potencial</i>
$X_{CO}$	<i>Distancia de cruce dos segmentos con velocidades distintas</i>



### PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

---

---

#### I.1 INTRODUCCIÓN

Es innegable el hecho de que las actividades humanas han alterado el equilibrio ecológico del planeta. Cada vez sorprende menos y afecta más la noticia de una especie extinta, la devastación de zonas boscosas, la desertificación que avanza a pasos agigantados. Actualmente la mayoría de los ríos que dieron origen y sustentaron a la civilización están prácticamente muertos, de manera que la contaminación y la escasa disponibilidad del agua superficial han aumentado el interés por el aprovechamiento del agua subterránea.

Usualmente se ha considerado al agua subterránea como una fuente segura de agua potable, pero puede estar afectada por los lixiviados producidos a partir de la acumulación de basura en sitios inadecuados de disposición. Es importante determinar el comportamiento de los contaminantes provenientes de estos sitios ya que un problema de este tipo, no sólo afecta la salud y el bienestar de una comunidad, sino que también plantea el riesgo de la supervivencia misma del hombre. Expresarlo de esta manera es aparentemente catastrófico, pero la realidad es que la contaminación se encuentra siempre latente y de manera muy sutil o desapercibida en la vida cotidiana.

La detección de la contaminación del agua subterránea puede realizarse a través de métodos directos (por ejemplo, perforaciones y análisis químicos) y métodos indirectos (exploración geofísica). De manera reciente, la exploración geofísica ha surgido como una herramienta importante en el estudio de la contaminación de acuíferos y detección de plumas contaminantes; la ventaja principal que presenta, radica en el carácter no destructivo de la misma y una aplicación más rápida y económica que los métodos tradicionales de exploración. Bajo este contexto, se planteó la utilización e integración

de tres métodos geofísicos (sísmico de refracción, eléctrico de resistividad y electromagnético) para detectar la pluma contaminante producida por el Tiradero Municipal de la Ciudad de Oaxaca en el valle aluvial donde se ubica la Laguna de Lixiviados.

Con el objeto de facilitar la comprensión de esta tesis, se ha dividido en los siguientes capítulos:

**Capítulo I: Diseño de la investigación.** En esta parte se incluye la introducción, el planteamiento del problema de estudio, objetivos y las hipótesis que se manejaron durante el desarrollo de la investigación.

En el **Capítulo II: Marco teórico**, se ofrece la información básica de los conceptos que se manejan en el texto, también una breve introducción a los principios de los métodos geofísicos empleados y los parámetros que rigen el comportamiento del agua en el subsuelo.

El **Capítulo III: Metodología**, comienza con una descripción del sitio de estudio. Después, con base en los principios explorados en el Capítulo II, se enfoca en las técnicas geofísicas empleadas y los parámetros de control que se establecieron para fortalecer los datos geofísicos obtenidos.

En el **Capítulo IV: Análisis y discusión de resultados**, se examinan los resultados obtenidos a partir de los métodos de exploración geofísica, realizando la integración de los mismos y de los datos de control establecidos en la Metodología, proponiendo un modelo hidrogeológico de la Laguna de Lixiviados.

Finalmente en el **Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones**, se presentan las conclusiones derivadas del análisis de resultados y se realizan algunas sugerencias para efectuar trabajos posteriores y complementar los resultados obtenidos en esta investigación.

## I.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Tiradero Municipal de la Ciudad de Oaxaca (TMCO) se localiza en el kilómetro 15 de la carretera Oaxaca-Puerto Ángel en el municipio de Zaachila, Oaxaca, México, en una zona afectada por la falla de Oaxaca (Belmonte *et al.* 2005). Comenzó a funcionar en el año de 1985 y se mantiene activo en la actualidad (2008). En el TMCO se almacenan residuos de composición heterogénea (papel, vidrio, plástico, desechos de rastros, residuos sanitarios, etc.) generados por la ciudad de Oaxaca y sus municipios conurbados, ocupa una superficie aproximada de 15 hectáreas y en él se realizan únicamente labores de pepena.

La falta de infraestructura en el TMCO ha ocasionado problemas ambientales como el flujo de contaminantes a través de un pequeño arroyo denominado “canal de lixiviados”, que converge en una represa designada “laguna de lixiviados” en lo sucesivo. El suelo de la laguna de lixiviados se conforma por material de origen aluvial así como afloramientos de rocas sedimentarias fracturadas (Belmonte *et al.* 2005) que pueden favorecer la infiltración de contaminantes al subsuelo. Contrario a lo esperado, estas sustancias no se han detectado en el agua de los pozos de aprovechamiento existentes en la zona de estudio, por lo que es necesario caracterizar la laguna de lixiviados para determinar la distribución espacial de la pluma contaminante.

### **I.3 HIPÓTESIS**

1. En el área de influencia de la laguna de lixiviados existe un medio fracturado que favorece la infiltración de lixiviados al subsuelo.
2. Las características fisicoquímicas de la zona no saturada propician la neutralización de los lixiviados.

### **I.4. OBJETIVOS**

#### **I.4.1 General**

Caracterizar la laguna de lixiviados del Tiradero Municipal de la Ciudad de Oaxaca mediante la integración de diversos métodos hidrogeológicos para determinar la distribución espacial de la pluma contaminante ocasionada por lixiviados.

#### **I.4.2 Específicos**

1. Proponer un modelo geológico utilizando los métodos geofísicos: Electromagnético, Eléctrico de resistividad y Sísmico de refracción.
2. Determinar la dirección de flujo subterráneo a partir de la piezometría de los pozos de monitoreo.
3. Estimar las propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, transmisividad, y porosidad) de la zona no saturada.
4. Evaluar la presencia de lixiviados en agua y suelo a través de sus parámetros fisicoquímicos.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

---

---

La acumulación de basura en un tiradero a cielo abierto ocasiona la contaminación severa y frecuentemente irreversible en la calidad del suelo y agua con que se encuentra en contacto. Este impacto se produce generalmente a causa de la incorporación de las sustancias lixiviadas de la basura al sistema subterráneo.

El proceso de lixiviación es una extracción química de las partes solubles de una fase sólida utilizando un disolvente. Extendiendo esta definición hacia una terminología medioambiental la fase sólida es la basura y el disolvente, el agua que se encuentra contenida en ella, agua de lluvia, agua corriente o el derrame de líquidos *in situ*. Las sustancias producidas de la forma descrita anteriormente reciben el nombre de lixiviados. Entre los elementos que afectan la composición del lixiviado se encuentran:

- Grado de biodegradabilidad, solubilidad y toxicidad de la basura.
- Clima, temperatura, humedad, grado de descomposición de la basura, recubrimiento y edad del sitio de disposición.
- pH, temperatura y cantidad del agua disponible.
- Composición mineralógica, porosidad, permeabilidad, profundidad y espesor de los estratos que conforman el suelo del sitio de disposición.

Generalmente el agua subterránea se considera una fuente segura y no contaminada de agua potable. No obstante, existen numerosos estudios que muestran lo contrario. Nobes (1996), Fatta *et al.* (1999), Rosqvist (2003), Kumar y Alappat (2005) indican que los lixiviados de un tiradero arrastran elementos altamente contaminantes que afectan el

equilibrio natural del suelo y agua superficial o subterránea con la que se encuentran en contacto.

Los lixiviados son clasificados como residuos peligrosos en la NOM-052-ECOL-2005, mientras que Williams (2000), Sun *et al.* (2001), Porsania *et al.* (2004) y Feng *et al.* (2007) advierten que estas sustancias son un tóxico ambiental. Rodríguez (1993) señala que en Latinoamérica la mayoría de los tiraderos se encuentra en áreas geológicas inadecuadas, lo cual, aunado a los procesos de descomposición que ocurren en su interior y a la falta de infraestructura, genera áreas vulnerables a contaminación ambiental (Bengtsson *et al.*, 1994). Específicamente, el riesgo de contaminación del agua subterránea está determinado por factores como:

- Profundidad del nivel freático.
- Concentración y toxicidad de los contaminantes en el lixiviado.
- Dirección del flujo subterráneo.
- Permeabilidad de los estratos del suelo.
- Composición mineralógica del suelo.

Bajo estas circunstancias, es importante realizar la caracterización hidrogeológica de los sitios que se encuentren afectados por una pluma contaminante. En este estudio la caracterización incluye conocer la geometría de la Laguna de Lixiviados (Figura 1), la determinación del nivel freático, dirección de flujo subterráneo y análisis fisicoquímicos del lixiviado, agua y suelo para establecer parámetros de control que constriñan los modelos geofísicos.



Figura 1. Laguna de Lixiviados. En esta imagen se observan los lixiviados generados por el Tiradero Municipal de la Ciudad de Oaxaca (TMCO).

Algunas propiedades del subsuelo, como las propiedades hidráulicas, pueden determinarse utilizando los métodos clásicos de exploración mecánica (métodos directos) como los sondeos y las calicatas, pero los inconvenientes principales son la puntualidad de la información y los costos de realización. Actualmente los métodos geofísicos son una herramienta importante para evaluar y caracterizar una zona afectada por una pluma contaminante. Sin embargo, para aplicar un método geofísico es necesario que existan contrastes significativos en el medio y que éstos se puedan correlacionar con la geología del sitio y los parámetros de control.

Las ventajas que ofrecen los métodos geofísicos, comparados con los métodos mecánicos de exploración, consisten principalmente en que no perturban la dinámica del suelo y proporcionan un entendimiento general de las condiciones del sitio. El problema más común que presentan estas técnicas, es la interpretación de los datos obtenidos a partir de la aplicación de un solo método geofísico, así como la no unicidad de los modelos generados (Asfahani, 2007), por lo que la aplicación de varios métodos geofísicos y su integración con diversos parámetros fisicoquímicos, disminuye la ambigüedad que pueda presentarse en la interpretación de los datos (Abu-Zeid *et al.*, 2004; Cosenza *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2007).

Entre los métodos geofísicos más empleados en el estudio de una pluma contaminante se encuentran el método eléctrico y el electromagnético, mientras que el método sísmico se ha utilizado tradicionalmente en la exploración petrolera. El método eléctrico ha sido aplicado ampliamente en estudios relacionados con la contaminación de agua subterránea (Yoon y Park, 2001; Rosqvist, 2003; Chandra *et al.*, 2004; Owen, 2005) y contaminación del suelo (De la Vega, 2003; Bauer, 2006; Asfahani, 2007). El método electromagnético se basa en la respuesta del suelo a la propagación de los campos magnéticos, siendo aplicado en estudios agrícolas (Corwin y Lesch, 2003 y 2005 a, b), en la detección de anomalías en el subsuelo (Atekwana, 2000; Inman, 2002) y en la determinación de la contaminación del agua subterránea (Buselli y Lu, 2001). Bajo este contexto, el método eléctrico de resistividad, el método electromagnético y el método sísmico de refracción fueron utilizados para caracterizar la pluma contaminante en la Laguna de Lixiviados del TMCO, de manera que es conveniente realizar una breve revisión de cada uno de ellos para comprender los principios físicos que los rigen.

## **II.1 MÉTODO SÍSMICO DE REFRACCIÓN**

El método sísmico se asocia tradicionalmente con la exploración de hidrocarburos y estudios de minería, aunque posee aplicaciones tan diversas como en estudios arqueológicos (Valenta y Dohnal, 2007), tectónicos (Rogenhagen *et al.*, 2004), caracterización de estructuras geológicas (Yan, *et al.*, 2005; Higuera-Díaz y Carpenter, 2007) o detección de formaciones que contienen agua (Sundararajan *et al.*, 2004). El método sísmico consiste de manera general, en producir artificialmente un sismo y detectar los tiempos de llegada de las ondas producidas, una vez reflejadas o refractadas en las distintas formaciones geológicas. De manera que los métodos sísmicos se dividen en dos clases:

1. El método *sísmico de reflexión*. Es el más empleado en la exploración petrolera porque permite obtener información de estratos muy profundos.

2. El método *sísmico de refracción*. Es un método de reconocimiento general usado principalmente en estudios de geotecnia e hidrogeológicos que permite establecer el contraste entre la zona no saturada y el lecho rocoso.

El método sísmico se basa en el hecho de que al aplicar una tensión a un cuerpo elástico o al quitarla de manera repentina, el esfuerzo correspondiente se propaga como una onda elástica. Un medio elástico puede estar sujeto a dos tipos de deformación: compresional y de cizalla, por lo que las ondas elásticas producidas pueden ser compresionales o de cizalla, siendo la diferencia principal que la primera implica un cambio de volumen sin rotación de las partículas del medio; mientras que la segunda rota las partículas del medio, sin cambio de volumen. Gracias a las ondas compresionales, de dilatación u ondas primarias (P), las partículas del medio se mueven en dirección de la propagación de la onda, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. Las ondas de cizalla u ondas secundarias (S), ocasionan movimiento perpendicular a la dirección de la propagación de onda por lo que no se pueden propagar en líquidos (Sharma, 1997).

Además de las ondas de cuerpo (P y S), existen las ondas superficiales, de Rayleigh y de Love, que viajan únicamente en una superficie libre de un cuerpo sólido elástico. Para las ondas de Rayleigh el movimiento de las partículas es aproximadamente la combinación de la vibración longitudinal y transversal; las ondas de Love, se presentan sólo si el material no es uniforme, viajando de manera horizontal y provocando el movimiento horizontal de las partículas y transversal a la dirección de propagación de la onda.

Debido a que la reflexión, refracción y difracción de la luz son estudiadas en Óptica, la reflexión, refracción y difracción de las ondas sísmicas se rigen por los mismos principios físicos a saber, de Huygens y Fermat. Sin embargo, cuando una onda sísmica llega a la frontera de dos medios con diferentes propiedades físicas, parte de la energía es reflejada y otra es transmitida o refractada al segundo medio, de manera que las ondas sísmicas son más complejas ya que una onda P o S genera dos ondas (P y S) reflejadas y dos ondas (P y S) refractadas. El principio de Huygens se basa en una construcción geométrica simple que permite calcular a partir de una posición determinada la posición futura del frente de onda. Este principio establece que todos los puntos de un frente de onda actúan

como puntos de origen para la producción de nuevos frentes de onda que se extienden en todas las direcciones (Figura 2).

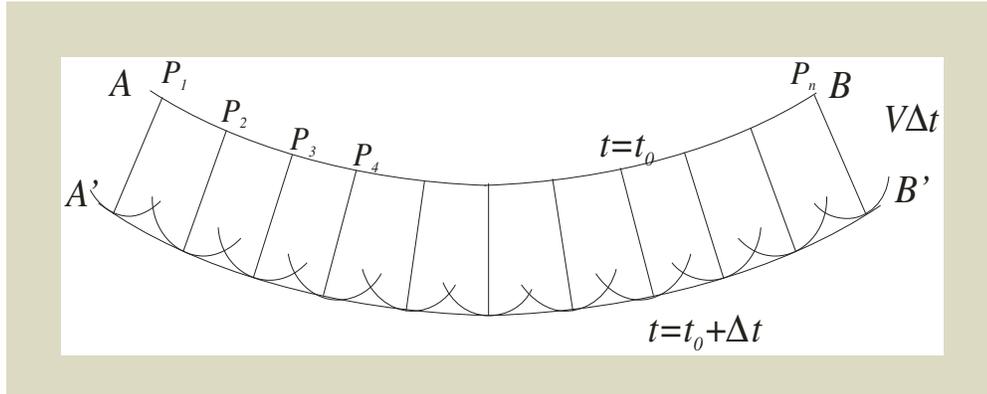


Figura 2. Principio de Huygens (Telford, 1990).

En la Figura 2,  $AB$  es el frente de onda en el tiempo  $t_0$ . En el intervalo  $\Delta t$ , la onda avanza una distancia  $V\Delta t$ , donde  $V$  es la velocidad (que varía de punto a punto). Seleccionando puntos como  $P_1, P_2, P_3, P_4, \dots, P_n$  a partir de los cuales se trazan arcos de radio  $V\Delta t$ , se encuentra  $A'B'$ , que es el frente de onda que se espera detectar en el tiempo  $t = t_0 + \Delta t$ .

El principio de Fermat establece que un rayo luminoso que va de un punto a otro sigue una trayectoria tal que, comparada con otras trayectorias cercanas, el tiempo que requiere para recorrerla es mínimo.

Las leyes de la reflexión y la refracción están dadas por la ley generalizada de Snell, ecuación (1), que se fundamenta en los procesos de transmisión y reflexión de las ondas a través de interfaces que separan medios cuyas propiedades elásticas son distintas (Figura 3).

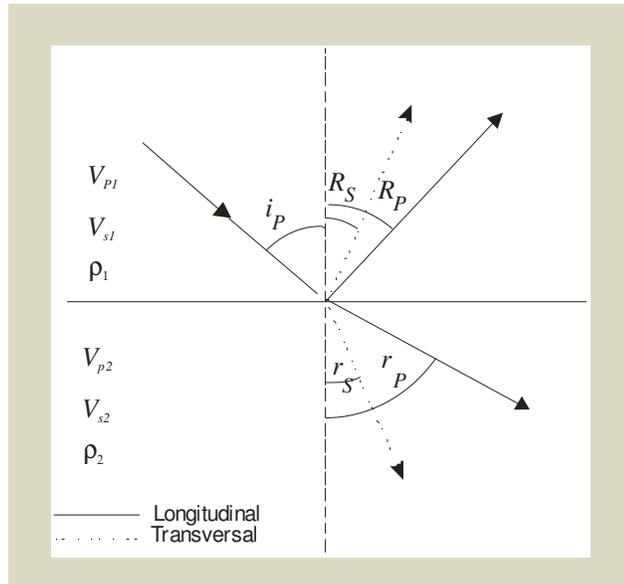


Figura 3. Reflexión y refracción de una onda incidente en el límite de dos medios con diferente velocidad y densidad (Sharma, 1997).

$$\frac{\sin i_p}{V_{P_1}} = \frac{\sin R_p}{V_{P_1}} = \frac{\sin R_s}{V_s} = \frac{\sin r_p}{V_{P_2}} = \frac{\sin r_s}{V_{S_2}} = p \quad (1)$$

Donde:

$P$  es el subíndice para identificar la onda longitudinal.

$S$  es el subíndice para identificar la onda transversal.

$I$  es el ángulo de incidencia.

$R$  es el ángulo de reflexión.

$r$  es el ángulo de refracción.

$V$  es la velocidad sísmica.

$\rho$  es la densidad del medio.

$p$  es el parámetro de rayo.

La igualdad de los ángulos de incidencia y de reflexión se conserva sólo si los rayos incidente y reflejado son del mismo tipo. Considerando el caso simple de dos estratos (Figura 4) con velocidades  $V_1$  y  $V_2$  ( $V_2 > V_1$ ) separados por una interface, a una profundidad  $h_i$ , la energía a partir de una fuente sísmica en  $S$  se propaga en todas direcciones. Una onda incidente que sigue la dirección  $SB$  y golpea la interface en un ángulo crítico  $i_c$  dado por  $\frac{1}{\sin V_1/V_2}$ , es refractada en la interface viajando a través de ella con una velocidad  $V_2$  y transmitiendo parte de la energía al estrato superior; en este estrato, las ondas viajan con un ángulo de emergencia igual al ángulo de incidencia,  $i_c$ .

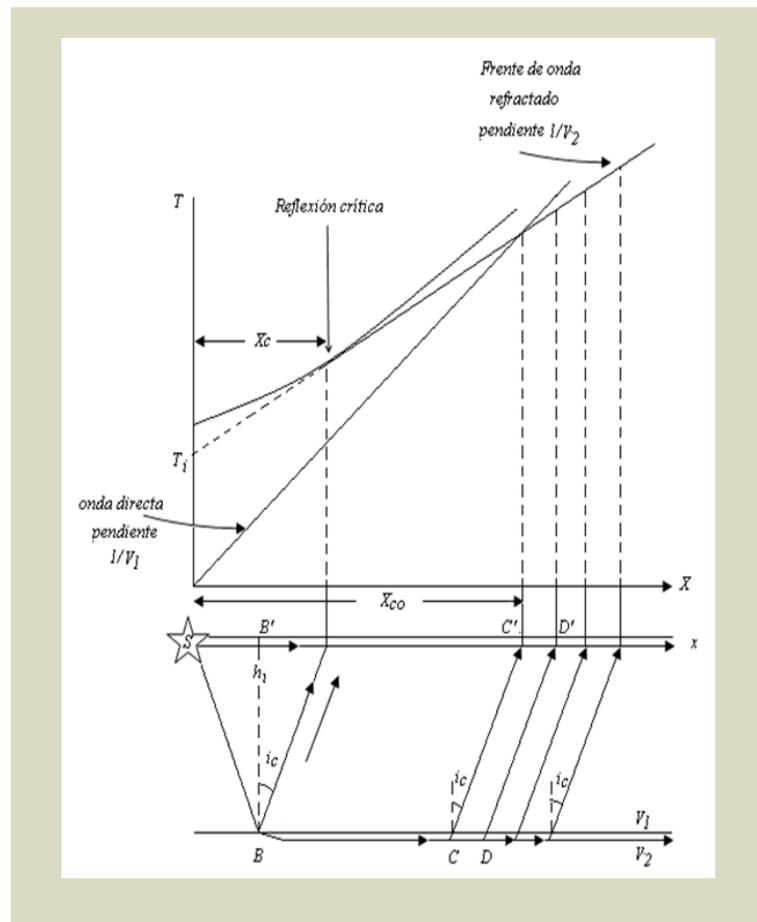


Figura 4. Principio del método de refracción sísmica (Sharma, 1997).

La energía que llega primero a los geófonos cercanos, como el  $B$ , es la de la onda directa que viaja a partir de  $S$  con velocidad  $V_1$ , para los geófonos más distantes, como el  $D$ , la onda que llega primero es la onda refractada. Por lo tanto, si se grafica el tiempo de llegada contra las distancias de la fuente a los geófonos se obtendrá una línea recta. Las pendientes de las líneas son  $\frac{1}{V_1}$  y  $\frac{1}{V_2}$ , respectivamente. El tiempo de viaje a través de la ruta de rayo refractado  $SBDD'$  está dado por la ecuación (2):

$$T = T_{SB} + T_{DD'} + T_{BD} \quad (2)$$

que puede expresarse también como la ecuación (3):

$$T = \frac{2h_1}{V_1 \cos i_c} + \frac{x - 2h_1 \tan i_c}{V_2} \quad (3)$$

Donde  $i_c$  es el ángulo crítico y  $x$  es la distancia de la fuente al geófono  $SD'$ . Como  $\sin i_c = \frac{V_2}{V_1}$ , el tiempo de viaje puede expresarse de forma más simple, como se muestra en la ecuación (4):

$$T = \frac{x}{V_2} + \frac{2h_1 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2} \quad (4)$$

Graficando  $T$  contra  $x$ , se obtiene la ecuación de una línea recta con pendiente  $\frac{1}{V_2}$  que interseca al eje del tiempo en  $T_i$ , ecuación (5):

$$T = 2h_1 \sqrt{\frac{V_2^2 - V_1^2}{V_1 V_2}} \quad (5)$$

Analizando los segmentos distancia-tiempo (dromocrona) de las ondas directas y refractadas pueden determinarse las velocidades  $V_1$  y  $V_2$  y el tiempo de intersección  $T_i$ ; la profundidad  $h_1$ , puede calcularse a partir de  $T_i$  utilizando la ecuación (5), aunque también se puede obtener a partir de la distancia de cruce,  $X_{CO}$ , donde los dos segmentos con velocidades  $V_1$  y  $V_2$  intersectan la dromocrona, en este punto, la distancia-tiempo de la onda directa y refractada son iguales de forma que se obtiene la ecuación (6):

$$\frac{xCO}{V_1} = \frac{xCO}{V_2} + \frac{2h_1\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2V_1} \quad (6)$$

De donde la distancia de cruce está dada por la ecuación (7):

$$xCO = 2h_1 \frac{\sqrt{V_2 + V_1}}{\sqrt{V_2 - V_1}} \quad (7)$$

Este método puede utilizarse con cualquier número de estratos con velocidades  $V_1, V_2, V_3 \dots V_n$ . De manera que el tiempo de intersección para el segmento está relacionado con el espesor y velocidad de los estratos que estén sobre él por la ecuación (8).

$$T_{i(n)} = 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{h_j (V_n^2 - V_j^2)^{1/2}}{V_j V_n} \quad (8)$$

## II.2 MÉTODO ELÉCTRICO DE RESISTIVIDAD

Todas las rocas y suelos poseen una propiedad intrínseca que es función de la composición mineralógica, porosidad, contenido en agua y de la concentración en sales disueltas del agua. Esta propiedad es denominada *resistividad*. La resistividad es la resistencia que presenta un cuerpo al paso de la corriente eléctrica. Se expresa mediante la ecuación (9) y su unidad de medición es el Ohm-metro ( $\Omega\cdot m$ ).

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (9)$$

Donde:

$l$  es la longitud de un área de sección transversal uniforme,  $A$ .

$R$  es la resistencia.

$\rho$  es la resistividad.

Usualmente, la resistividad eléctrica del medio,  $\rho$ , se relaciona directamente con la resistividad eléctrica del fluido contenido en sus poros  $\rho_w$  por medio de la ecuación (10):

$$\rho = F\rho_w \quad (10)$$

Donde:

$F$  es el factor de formación.

El factor de formación depende de la geometría de los poros y del grado de saturación de los mismos. Habitualmente se relaciona la resistividad  $\rho$ , la porosidad  $\eta$  y el factor de formación  $F$  a través de la forma general de la ley de Archie, ecuación (11):

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} = a\eta^{-m} \quad (11)$$

Donde:

$a$  es el coeficiente de saturación.

$m$  es el factor de cementación.

$a$  y  $m$  son constantes para un tipo particular de roca.

Para la mayoría de de las rocas sedimentarias  $a$  tiene un valor entre 0.6 y 1, mientras que  $m$  varía de 1.5 a 2 para rocas muy bien cementadas. El caso más simple en el estudio teórico del flujo de corriente en el suelo, está dado por un suelo completamente homogéneo e isotrópico de resistividad uniforme.

Considerando un estrato homogéneo de espesor  $l$  y resistencia  $R$  a través del cual circula una corriente  $I$ , la diferencia de potencial  $\Delta V$ , está dado por la ley de Ohm, ecuación (12):

$$\Delta V = RI \quad (12)$$

Si se considera un estrato conductor semi-infinito (Figura 5) de resistividad uniforme, limitado por la superficie del suelo e intensidad de corriente  $+I$  entrando en un punto  $A$ , esta corriente fluirá de manera radial a partir del punto de entrada y en cualquier distribución instantánea será uniforme sobre una superficie hemisférica de una región del subsuelo con resistividad  $\rho$ .

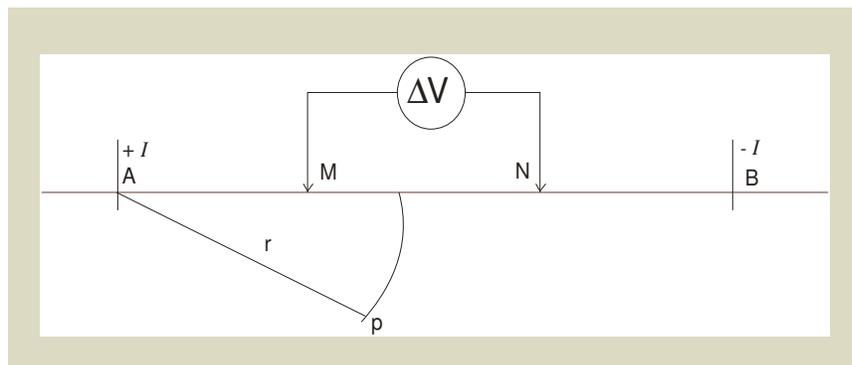


Figura 5. Cálculo de la distribución del potencial debido a una corriente en un medio homogéneo.

A una distancia  $r$ , lejos de la fuente de corriente, la superficie semi-hemisférica tendrá un área de  $2\pi r^2$ , de manera que la densidad de corriente  $i$  sea representada por la ecuación (13):

$$i = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (13)$$

Por lo que la ecuación (12) se puede escribir como ecuación (14):

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \rho i = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (14)$$

El potencial a la distancia  $r$ , ecuación (15) se obtiene al integrar la ecuación (14):

$$V_r = \frac{\rho I}{2\pi r} + C \quad (15)$$

$C=0$  debido a que  $V_r = 0$  cuando  $r=\infty$ , la ecuación (15) es la ecuación básica que permite el cálculo de la distribución de potencial en un conductor homogéneo semi-infinito. A partir de esta ecuación se puede determinar que la diferencia de potencial entre los puntos  $M$  y  $N$  debida a la intensidad de corriente  $+I$  es, ecuación (16):

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) \quad (16)$$

Y la diferencia de potencial entre los puntos  $M$  y  $N$  debida a la intensidad de corriente  $-I$  está dada por la ecuación (17):

$$\Delta V = -\frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right) \quad (17)$$

La diferencia de potencia total está dada por la suma de las ecuaciones anteriores, ecuación (18):

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (18)$$

De donde se obtiene la ecuación (19):

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (19)$$

$k$ , es el factor geométrico que depende de la configuración utilizada. La ecuación (19) calcula la resistividad real para un medio homogéneo. Sin embargo, el suelo no presenta una resistividad homogénea, por lo que la ecuación (19) calcula la *resistividad aparente*,  $\rho_a$ . La resistividad aparente es sólo un concepto, aunque se utiliza frecuentemente para aplicaciones prácticas de la resistividad en el suelo.

La manera más común de realizar un levantamiento de resistividad consiste en la inyección de corriente directa (DC) al subsuelo a través de un par de electrodos, los *electrodos de corriente* (A, B) mientras que con otro par de electrodos, *electrodos de potencial* (M, N) se mide la diferencia de potencial asociada a la corriente inyectada. Si en el suelo se insertan dos electrodos a los que se les aplica un voltaje, existirá una corriente que fluye a través de ellos (Figura 6). La configuración de las líneas de potencial puede detectarse midiendo la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ), entre los electrodos.  $\Delta V$  es el resultado de la interacción entre la corriente inyectada,  $I$  y la parte del subsuelo en donde se aplique esta corriente.

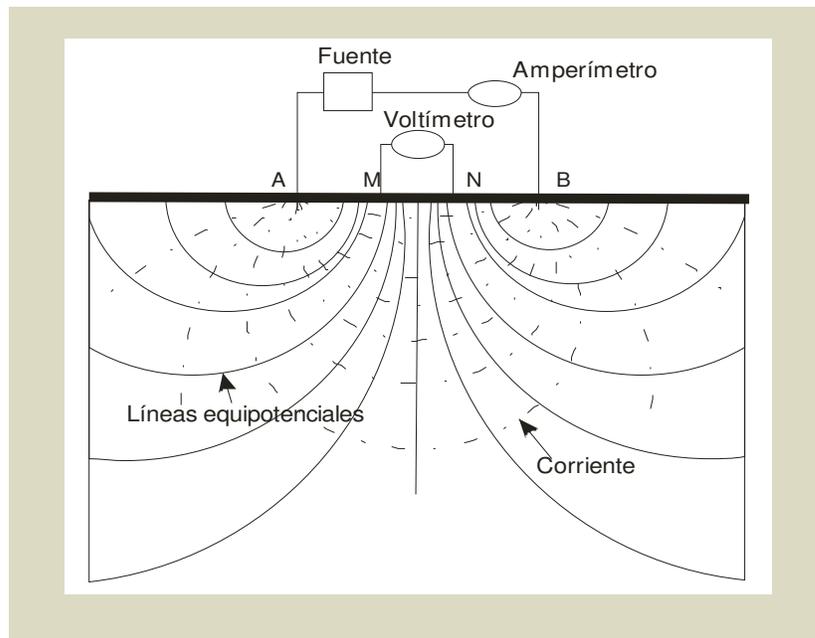


Figura 6. Geometría de las líneas de corriente y líneas equipotenciales en una sección vertical del suelo. (Dobrin, 1988).

Existen dos métodos para realizar los levantamientos de resistividad: los *perfiles*, que consisten en el desplazamiento de un arreglo electródico a través de un área determinada y los *sondeos*, que involucran una serie de mediciones con el centro del arreglo electródico fijo, mientras que la distancia interelectródica aumenta de manera sucesiva.

Durante la realización de esta tesis se utilizaron ambos tipos de levantamientos: los perfiles utilizando la configuración *dipolo-dipolo* y los *sondeos eléctricos verticales* (SEV's) utilizando la configuración *Schlumberger*. La configuración dipolo-dipolo es muy sensible a variaciones laterales de resistividad (Pérez-Flores y Gómez-Treviño, 1997). En ella, cada par de electrodos tiene una separación constante,  $a$ , de manera que mientras se va desplazando penetra un nivel de investigación,  $n$ , cada vez (Figura 7). La resistividad para este dispositivo está dada por la ecuación (20):

$$\rho_a = \pi \cdot a \cdot n \cdot (n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I} \quad (20)$$

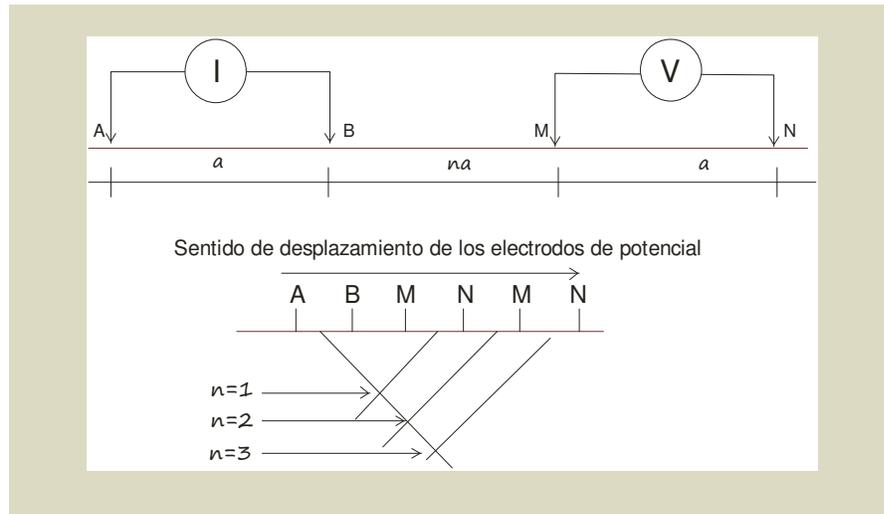


Figura 7. Configuración dipolo-dipolo. Se observa la penetración (niveles de investigación, n) durante el desplazamiento de la configuración.

El segundo método eléctrico mencionado es el *Sondeo Eléctrico Vertical* (SEV). La finalidad de un SEV es la determinación de la profundidad de los estratos del subsuelo y las resistividades eléctricas de los mismos, mediante mediciones efectuadas en la superficie del suelo. Para un SEV, las distancias entre los electrodos aumentan de tal forma que la corriente eléctrica penetra en niveles más profundos cada vez. Los electrodos normalmente son colocados de forma colineal, situando los electrodos de potencial entre los electrodos de corriente, de manera perpendicular a los rasgos estructurales del medio y simétrica respecto al centro de la configuración (Figura 8). Para el dispositivo Schlumberger la resistividad aparente está dada por la ecuación (21):

$$\rho_a = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)^{-1} \quad (21)$$

Si se tiene que  $2L = AB$  y  $2b = MN$ , entonces la ecuación (21) se transforma en la ecuación (22):

$$\rho_a = 2\pi \frac{(L^2 - b^2) \Delta V}{4b I} \quad (22)$$

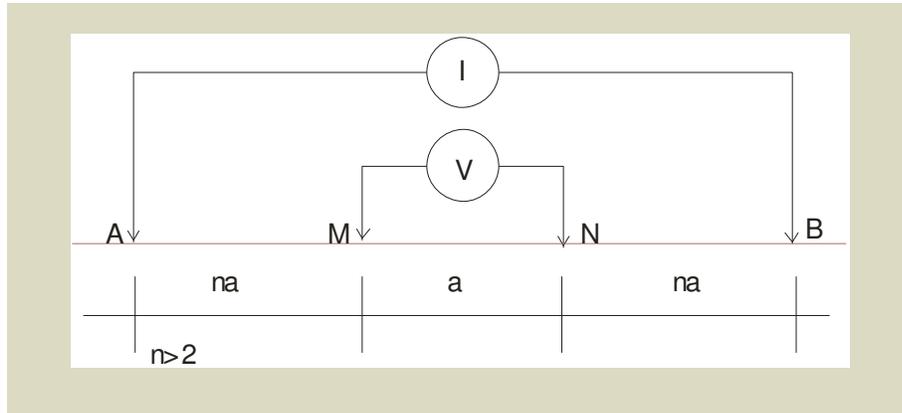


Figura 8. Configuración Schlumberger.

Respecto a la profundidad de penetración, los métodos eléctricos profundizan del 20 % al 40% de la separación máxima de los electrodos de corriente, de ahí que mientras mayor sea esta separación, mayor será la penetración en el medio. Para los dispositivos Schlumberger y dipolo-dipolo la profundidad de investigación es el 20% de la distancia máxima de los electrodos de corriente.

### II.3 MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO

Los métodos electromagnéticos pueden ser pasivos, si utilizan las señales electromagnéticas que provienen del espacio (como el magnetotelúrico), o bien, pueden ser activos, aquellos en los que se utiliza un transmisor para crear un campo electromagnético. Un campo electromagnético primario puede generarse haciendo pasar una corriente que varía con el tiempo a través de una bobina transmisora, induciendo a su vez un voltaje primario,  $E_p$ , en una bobina receptora. Si en el medio se encuentra presente un cuerpo conductor, el flujo magnético provocará un voltaje eléctrico en él, el cual al fluir ocasionará una corriente *eddy*, que al regresar a la bobina transmisora, producirá un campo magnético secundario que induce a su vez, voltaje secundario,  $E_s$  en la bobina receptora (Figura 9). El método electromagnético mide la variación de la conductividad eléctrica del suelo. La conductividad eléctrica,  $\sigma$ , es el recíproco de la resistividad (23) y la unidad de medición utilizada es el mili-siemens por metro (mS/m).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (23)$$

Las relaciones de las ondas eléctricas con las ondas magnéticas están regidas por las ecuaciones de Maxwell. La primera ecuación de Maxwell (24) es conocida como ley de Faraday e indica que un campo que varía con el tiempo produce voltaje eléctrico:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (24)$$

Donde:

$E$  es la intensidad del campo eléctrico.

$B$  es la inducción magnética.

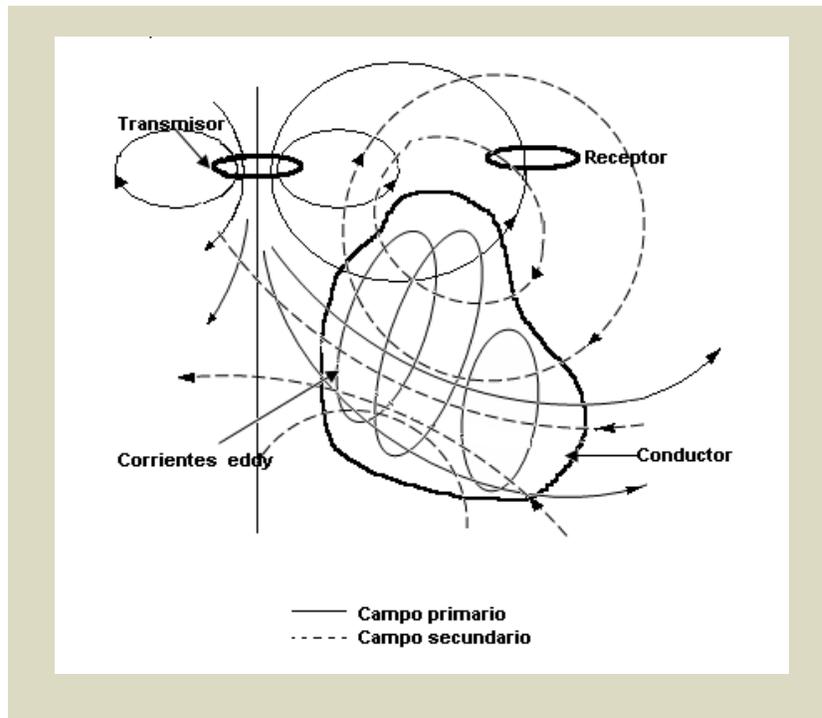


Figura 9. Propagación de las ondas electromagnéticas. En esta imagen se muestran el campo primario generado por una bobina transmisora y el campo secundario inducido por la presencia de un cuerpo conductor en el subsuelo detectado por una bobina receptora. (Sherif, 1989).

La ecuación (25) es el enunciado de la ley de Ampere, la cual indica que la corriente eléctrica genera un campo magnético.

$$\nabla \times H = 4\pi I + \frac{-\partial D}{\partial t} \quad (25)$$

Donde:

$H$  es la intensidad del campo magnético.

$I$  es la intensidad de corriente

La ecuación (26) establece que las líneas de inducción magnética son continuas y que no existen polos magnéticos aislados donde puedan terminar los campos.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (26)$$

La ecuación (27) expresa que los campos eléctricos pueden empezar o terminar en cargas eléctricas.

$$\nabla \cdot D = 4\pi q \quad (27)$$

Donde:

$q$  es la densidad de la carga eléctrica en el espacio.

Finalmente las ecuaciones auxiliares (28) y (29) asocian la inducción a la intensidad del campo:

$$D = \epsilon E \quad (28)$$

$$B = \mu H \quad (29)$$

Donde:

$D$  es el desplazamiento eléctrico.

$\epsilon$  es la permitividad.

$\mu$  es la permeabilidad magnética.

Mientras que la ecuación (30) expresa la ley de Ohm.

$$E = \rho I \quad (30)$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad.

La aplicación directa de las ecuaciones anteriores a la exploración electromagnética se dificulta debido a que, tanto el campo eléctrico como el campo magnético, son vectores tridimensionales con variación de magnitud, como se muestra en la Figura 10.

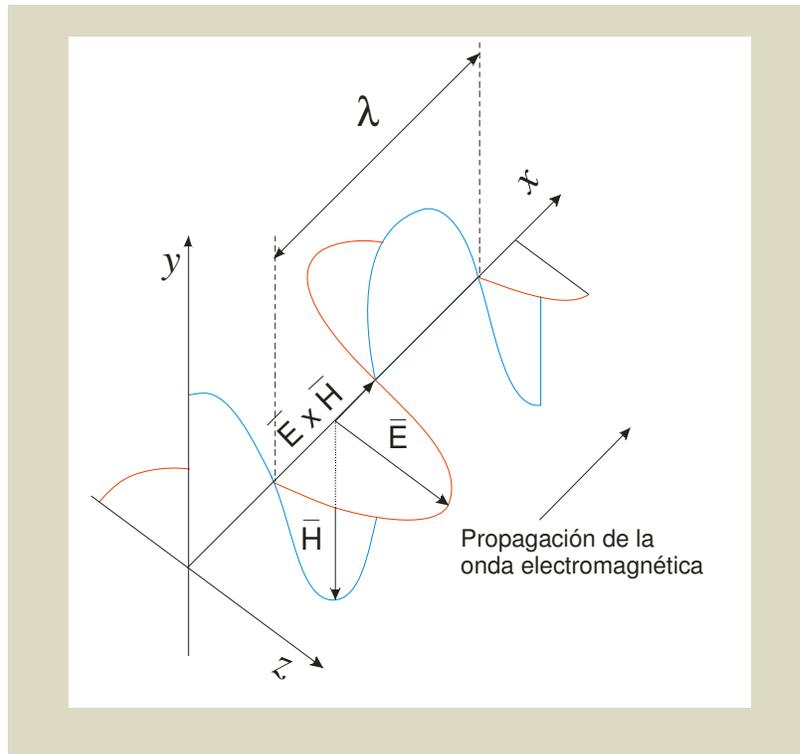


Figura 10. Vectores eléctricos E y magnéticos H en una onda electromagnética (Sherif, 1989).

El campo magnético secundario es una función compleja que depende de la separación de las bobinas transmisora y receptora,  $s$ , la frecuencia,  $f$  y la conductividad del suelo,  $\sigma$ . Para el equipo EM-34 de Geonics Limited, el campo magnético secundario está dado por la ecuación (31):

$$\frac{H_s}{H_p} \cong \frac{i\omega\mu_0\sigma \cdot s^2}{4} \quad (31)$$

Donde:

$H_s$  es el campo magnético secundario.

$H_p$  es el campo magnético primario.

$\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre.

$i = \sqrt{-1}$

La conductividad aparente que mide el equipo EM-34 se define según la ecuación (32):

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) \quad (32)$$

La profundidad de penetración de un campo electromagnético depende de la frecuencia y de la conductividad eléctrica del medio. La profundidad máxima de penetración del equipo EM-34 es de 60 m (Tabla 1), dependiendo de las características del medio en el que sea aplicado.

**Tabla 1. Profundidad de exploración para el equipo EM-34**

Separación entre bobinas	Profundidad de exploración	
	Dipolo horizontal (m)	Dipolo vertical (m)
10 m	7.5	15
20 m	15	30
40 m	30	60

Fuente: Geonics Limited, 1996.

## II.4 INTERACCIONES EN EL SUBSUELO

El suelo es un elemento ambiental afectado de manera directa por contacto e infiltración de lixiviados. La dinámica de movimiento de los elementos contaminantes es compleja ya que éstos pueden desplazarse lateral o verticalmente a través del subsuelo, o bien permanecer inactivados o neutralizados. Una consecuencia poco evidente a simple vista y en ocasiones detectada de manera tardía, es el deterioro de la calidad del agua subterránea. Según el criterio propuesto por Davis y DeWiest en 1966 (citado por Singhal y Gupta, 1999) el subsuelo se divide en dos zonas: la zona no saturada, (Figura 11) donde el contenido de agua es menor que la porosidad e influye en la recarga de agua de un acuífero y en la transferencia de contaminantes (Pellerin, 2002) y la zona saturada, donde se encuentra el agua subterránea propiamente dicha y de donde se extrae para los diversos usos que le da el hombre.



Figura 11. Conformación de la zona no saturada de la laguna de lixiviados. En esta imagen se observa la presencia de arcillas, lutitas y calizas.

La ley que rige el movimiento de agua subterránea es la ley de Darcy, que establece que el flujo a través de un medio poroso homogéneo e isotrópico es proporcional a la pérdida de carga, a la sección considerada y la conductividad hidráulica y está representada por la ecuación (33):

$$Q = AK \frac{dh}{dl} \quad (33)$$

Donde:

$Q$  es el flujo volumétrico.

$A$  es sección considerada.

$K$  es la conductividad hidráulica.

$\frac{dh}{dl}$  es el gradiente hidráulico.

Considerando a un acuífero como un sistema físico, regido por la recarga y descarga del agua alojada en ellos, existen parámetros que gobiernan su funcionamiento y que son fundamentales para predecir el movimiento del agua en el suelo (Singhal y Gupta, 1999; Sumner, 2000) y son descritos a continuación:

La porosidad,  $\eta$ , representada en la ecuación (34), es una medida de los intersticios en una formación geológica. Existen dos tipos de porosidad: la porosidad primaria, que es la propiedad de una roca desarrollada durante su formación y la porosidad secundaria, desarrollada debido a procesos geológicos tales como tectonismo o intemperismo.

$$\eta = \frac{V_v}{V_T} \quad (34)$$

Donde:

$V_v$  es el volumen del espacio vacío.

$V_T$  es el volumen total de la roca.

La porosidad está regida por la forma y el arreglo de los granos que constituyen la roca, compactación y cementación, fracturamientos y soluciones y se expresa en porcentaje o como fracción decimal.

La retención específica (35)  $S_t$ , es una medida del volumen del agua que se encuentra retenida en una matriz debido a las fuerzas cohesivas e intergranulares. Esta propiedad depende de la superficie específica de los granos del mineral que constituye la formación geológica, el tamaño del grano y forma y tipo de minerales arcillosos:

$$S_t = \frac{V_{AR}}{V_T} \quad (35)$$

Donde:

$V_{AR}$  es el volumen del agua retenida.

La conductividad hidráulica,  $K$ , es la capacidad de una formación de transmitir agua; depende tanto de las propiedades del medio y las propiedades del fluido que circule a través de él y posee dimensiones de velocidad. Según la ley de Darcy (33) se puede expresar como (36):

$$K = \frac{\mu Q/A}{\gamma dh/dl} \quad (36)$$

Donde:

$\mu$  es la viscosidad del fluido.

$\gamma$  es el peso específico del fluido.

En la ecuación (36) se observa que el valor de la conductividad hidráulica puede afectarse por la composición química del agua, de manera que los procesos asociados a la presencia de lixiviados influyen en los valores de la conductividad hidráulica de un acuífero. Finalmente, la transmisividad,  $T$ , es la tasa de flujo de agua que puede ser transmitida horizontalmente a través de una sección de acuífero de ancho unitario, que involucra todo el espesor saturado, bajo un gradiente hidráulico unitario. Se expresa en términos de la conductividad hidráulica por medio de la ecuación (37):

$$T = Kb \quad (37)$$

Donde  $b$  es el espesor saturado del acuífero.

#### III.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El Tiradero Municipal de la Ciudad de Oaxaca (TMCO) se localiza en el kilómetro 15 de la carretera Oaxaca-Puerto Ángel, en el municipio de Zaachila, Oaxaca, México (Figura 12).

Desde el punto de vista hidrogeológico, el TMCO se ubica en una zona altamente fracturada debido a la presencia de la falla de Oaxaca (Nieto-Samaniego, *et al.* 1995, Belmonte, *et al.* 2005, Dávalos-Álvarez, *et al.* 2007). En esta zona predominan las formaciones de lutitas-areniscas del Cretácico Inferior, conglomerados del Terciario Superior, gneiss Precámbrico, andesitas y tobas ácidas (INEGI, 2005) que constituyen el acuífero de Zaachila-Zimatlán.

La Laguna de Lixiviados se localiza a 1.8 km del tiradero, en un pequeño valle aluvial en el que afloran rocas sedimentarias fracturadas (Belmonte *et al.* 2005), a través de las cuales es posible que se infiltren los lixiviados al subsuelo.

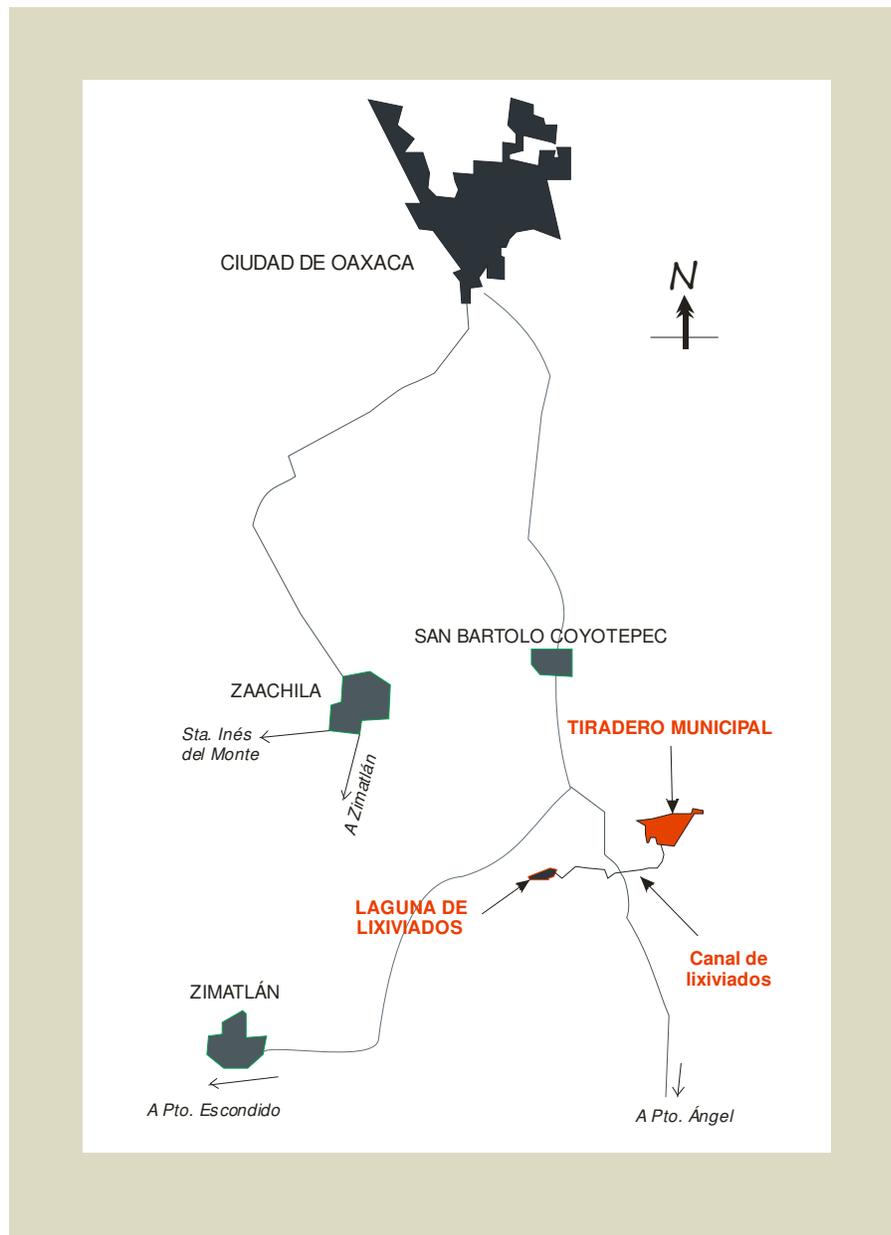


Figura 12. Mapa de ubicación del Tiradero Municipal de la Ciudad de Oaxaca y la Laguna de Lixiviados.

## **III.2 APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

Con el objeto de generar un modelo geológico de la Laguna de Lixiviados del TMCO y determinar el comportamiento de la posible pluma contaminante, se aplicaron los métodos sísmico de refracción, electromagnético y eléctrico de resistividad. En la Figura 13 se muestran los perfiles dipolares bajo la clave DIP, los tendidos sísmicos como SIS, los perfiles electromagnéticos como EM y finalmente se pueden apreciar los 5 sondeos eléctricos realizados, SEV. Nótese que DIP-1, SIS-1 y EM-2 se aplicaron en la zona noroeste de la Laguna, mientras que SIS-4, SIS-5, DIP-2 y EM-3 evalúan la respuesta de la zona sureste ya que como se explicó en el Capítulo II, la integración de varios métodos geofísicos disminuye las ambigüedades que pueda tener cada método por separado.

### **III.2.1 Método sísmico de refracción**

Para determinar el espesor de la zona no saturada se realizaron, en colaboración con la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA-IPN), siete perfiles sísmicos (ver Figura 13). Se midió la variación espacial de los parámetros elásticos del medio, a través de la estimulación del terreno con señales sísmicas creadas artificialmente. El equipo utilizado fue un sismógrafo marca OYO modelo McSeis 170 (Figura 14 a). Esta unidad posee 24 canales de entrada a través de las cuales se recibieron las señales enviadas por los geófonos (Figura 14 b), correspondiéndole a cada uno un canal mediante el cual se filtraron y digitalizaron sus señales. La fuente sísmica utilizada fue un martillo de 12 lb (Figura 14 c) sincronizado con el sismógrafo.

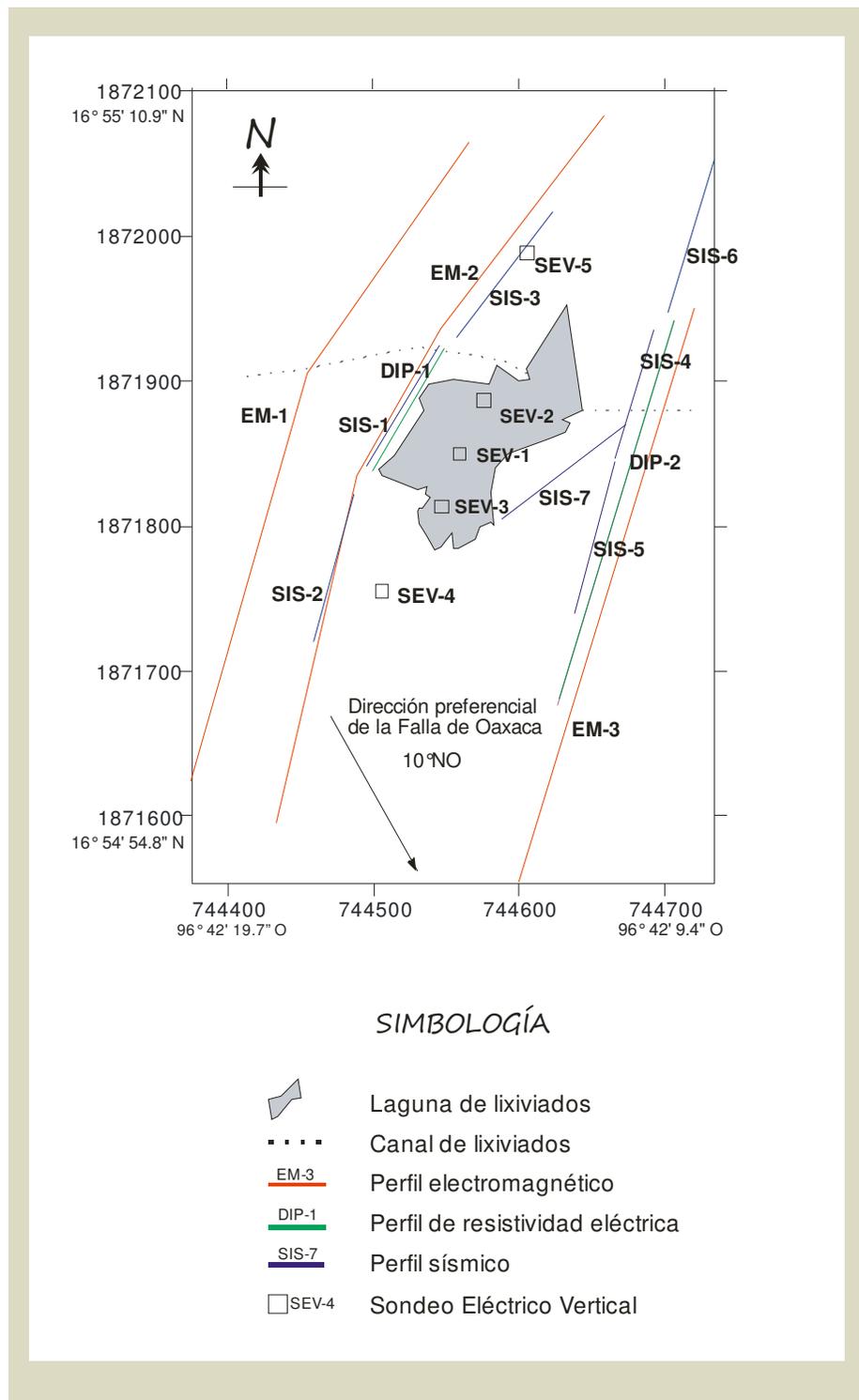


Figura 13. Mapa de ubicación de los métodos geofísicos empleados en la Laguna de Lixiviados.



Figura 14 a) Sismógrafo OYO modelo McSeis 170. 14 b) Geófonos utilizados en los tendidos o perfiles sísmicos. 14 c) Generación de ondas sísmicas con un martillo de 12 libras.

Para la obtención de datos se utilizó el arreglo mostrado en la Figura 15: una línea o tendido sísmico de 108 m, con 18 geófonos separados 6 m entre sí y conectados por medio de un cable. La fuente sísmica, se ubicó en las posiciones marcadas con una estrella: al principio del arreglo (tiro), a la mitad del arreglo y al final del arreglo (contratiro). Para cada señal se obtuvieron tiempos de llegada de las ondas refractadas de cada una de las trazas del registro sísmico del conjunto de geófonos. Variando la posición del tiro para un mismo arreglo, se adquirieron datos que proporcionaron mayor detalle del horizonte refractor.



Figura 15. Arreglo de geófonos utilizado para levantamiento sísmico de refracción.

La interpretación de los sismogramas se realizó a través de la representación del tiempo de la llegada del primer frente de ondas en una dromocrona. Los resultados de la interpretación proporcionaron 7 perfiles del terreno en los que se aprecia la profundidad de los distintos refractores y la velocidad de propagación asociada a cada uno de ellos. Como ejemplo se presenta la Figura 16, en la que se muestra el contraste de la capa aluvial y la roca consolidada del perfil SIS-1.

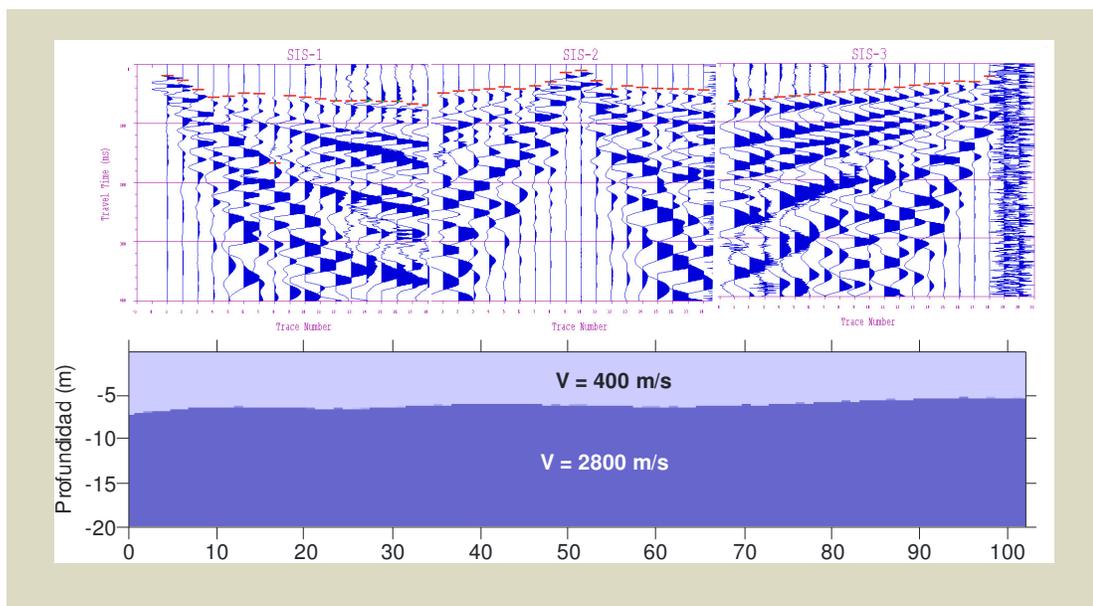


Figura 16. En la parte superior se muestran los sismogramas obtenidos del tiro, tiro central y contratiro, respectivamente. En la parte inferior se observa el modelo obtenido a partir de los sismogramas de la parte superior.

### III.2.2 Método electromagnético

El método electromagnético (EM) es una de las técnicas geofísicas más utilizadas en estudios de contaminación ambiental. Para reconocer la zona afectada en la Laguna de Lixiviados se realizaron tres perfiles electromagnéticos de 500 m de longitud (ver Figura 13). El equipo utilizado fue el EM-34 de Geonics Limited (Figura 17 a), el cual consiste en consola y bobina transmisora, consola y bobina receptora y cables con longitud de 10 m, 20 m y 40 m. Este equipo mide la conductividad eléctrica aparente del suelo en mili-Siemens por metro (mS/m).



Figura 17 a) Bobinas EM-34 de Geonics Ltd. 17 b) Inducción de campos electromagnéticos: Dipolo Horizontal 17 c) Inducción de campos electromagnéticos: Dipolo Vertical.

Para medir la conductividad del medio, la bobina transmisora y la bobina receptora se alinean tanto en posición vertical (dipolo horizontal) como en posición horizontal (dipolo vertical) manteniéndolas siempre en forma coplanar. La bobina transmisora permanece fija, mientras que la bobina receptora se mueve hacia atrás o hacia adelante, hasta que el equipo indique la distancia correcta entre ambas bobinas y sea posible realizar la lectura.

La toma de datos realizó en cada punto de muestreo, en este caso cada 5 m, primero con un espacio entre bobinas de 10 m y una frecuencia de 6.4 KHz, luego con un espacio entre bobinas de 20 m y una frecuencia de 1.6 kHz y finalmente con un espacio de 40 m y una frecuencia de 0.4 kHz.

Una vez obtenidos los valores de la conductividad aparente se aplicó el software CICEM35 (CICESE, 2006). Este programa se basa en la teoría desarrollada por Gómez-Treviño (1987) para realizar la inversión de datos para campos electromagnéticos en general. Posteriormente se modificó para el método eléctrico (DC) y electromagnéticos someros (EM-34) por Pérez-Flores *et al.* (2001) y muestra que la conductividad aparente es un promedio ponderado de la distribución de la conductividad en el suelo (Figura 18).

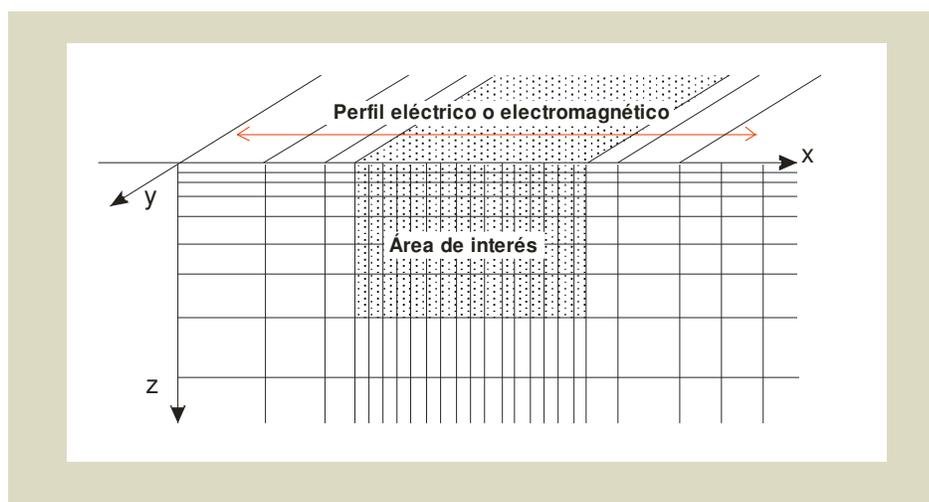


Figura 18. Representación esquemática de la malla en 2D para generar las imágenes de conductividad del suelo (Pérez-Flores *et al.*, 2001).

La ecuación que utiliza tiene la forma (38):

$$\sigma_a = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_1}^{z_2} K_m(x_s, x_r, x, z) \sigma(x, z) dx dz \quad (38)$$

Donde:

$\sigma_a$  representa la conductividad aparente y depende de la localización de la bobina transmisora y receptora.

$K_m$  es una función que depende de los campos magnéticos de la bobina transmisora ( $x_s$ ) y receptora ( $x_r$ ) y la malla generada ( $x, z$ ) para correr el programa.

$\sigma(x, z)$  es la conductividad de cada prisma que conforma la malla generada.

En la ecuación (38), se puede observar que si se considera un semi-espacio homogéneo,  $\sigma_a$  debe ser igual a  $\sigma$ , por lo tanto la integral del kernel debe ser uno, para que se logre esta igualdad. Los resultados que arroja este programa son presentados como el valor de la conductividad para el centro de cada prisma y en secciones de distancia contra profundidad.

### III.2.3 Método eléctrico de resistividad

Las técnicas de resistividad eléctrica se basan en que la distribución del potencial eléctrico alrededor de un electrodo de corriente alojado en el suelo depende de la resistividad eléctrica del terreno que se encuentre a su alrededor. Para el levantamiento de datos de resistividad se contó con un resistímetro de corriente directa, que utiliza como fuente un generador y rectifica la corriente alterna a corriente directa (Figura 19).



Figura 19. Resistímetro de corriente directa (CD) utilizado para la recolección de datos de resistividad del suelo.

El primer método eléctrico empleado fue el arreglo dipolo-dipolo. En base a los resultados del método electromagnético se realizaron 2 perfiles dipolares (ver Figura 13). El perfil DIP-1 se implementó en el borde noroeste de la Laguna, con una distancia interelectródica  $a = 2$  m, una longitud de 100 m y 7 niveles de investigación,  $n$ . El perfil DIP-2 se efectuó en el borde sureste con una distancia interelectródica  $a = 5$  m, una longitud de 200 m y 7 niveles de investigación. En las tablas 2 y 3 se indican las constantes geométricas utilizadas en los perfiles dipolares para las distancias interelectródicas,  $a$ , de 2 m y 5 m respectivamente.

**Tabla 2. Constante geométrica  $k$  para el perfil DIP-1**

$n$	$k (a=2m)$
1	37.70
2	150.79
3	376.98
4	753.96
5	1319.44
6	2111.10
7	3166.65

**Tabla 3. Constante geométrica  $k$  para el perfil DIP-2**

$n$	$k (a=5m)$
1	94.25
2	376.98
3	942.45
4	1884.91
5	3298.59
6	5277.75
7	7916.62

Utilizando los valores de la resistividad aparente recolectados, se procedió a la inversión de datos a través del programa CIGRES35 (CICESE, 2006), basado, al igual que CICHEM35, en la teoría de Pérez-Flores *et al.* (2001). La ecuación que utiliza el programa tiene la forma (39):

$$\log \rho_a(x_A, x_B, x_M, x_N) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_1}^{z_2} K_e(x_A, x_B, x_M, x_N) \log \rho(x, z) dx dz \quad (39)$$

Donde:

$\rho_a$  representa la resistividad aparente y depende de la localización de la fuente ( $A, B$ ) y receptor ( $M, N$ ).

$K_e$  es el kernel y depende de la localización y características de la fuente receptora y transmisora y de la superficie de la malla que representa el conjunto de prismas en dos dimensiones (ver Figura 16). La integral del kernel de la ecuación (39) debe ser igual a la unidad.

Otro método de inversión utilizado para el arreglo dipolo-dipolo fue el algoritmo del programa RES2DINV (Geotomo Software, 2006), el cual está basado en un artículo de Loke y Barker (1996) y que determina de forma automática un modelo bidimensional de resistividades reales del subsuelo a partir de un conjunto de datos que constituyen una pseudosección de resistividades aparentes (Griffiths y Barker, 1993). El modelo en 2D divide al subsuelo en un número de bloques rectangulares con el propósito de determinar su resistividad a partir de la pseudosección de resistividades aparentes. Para realizar el cálculo de los valores de resistividad RES2DINV utiliza una subrutina de modelización directa y una técnica de linealización de mínimos cuadrados. Para la rutina de inversión adopta como criterio de convergencia el valor del error cuadrático medio entre los datos experimentales y la respuesta del modelo actualizado en cada iteración (deGroot-Hedlin y Constable 1990; Loke y Barker, 1996). La rutina de inversión del programa está basada en la ecuación (40):

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad (40)$$

Donde:

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$$

$f_x$  es un filtro de suavizamiento horizontal.

$f_z$  es un filtro de suavizamiento vertical.

$J$  es una matriz de derivadas parciales.

$u$  es el factor de suavizamiento.

$d$  es el vector de módulo de perturbación.

$g$  es el vector de discrepancia.

Un segundo método eléctrico aplicado fueron los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's). Las mediciones se realizaron en época de estiaje, presentando problemas en la inyección de corriente si se utilizaban electrodos de 30 cm de largo ya que no tenían una buena superficie de contacto y el medio agrietado impedía la continuidad de la corriente. Este inconveniente se resolvió utilizando electrodos especiales de 60 cm de largo con los cuales se aseguró que la corriente viajara a través del subsuelo. Se realizaron 5 SEV's,

tres de ellos (SEV-1, SEV-2, SEV-3) dentro de la Laguna de Lixiviados y dos más en sus extremos oeste (SEV-4) y este (SEV-5) (ver Figura 13). La distancia entre electrodos de corriente y potencial está establecida en la Tabla 4. Los datos obtenidos a partir de los SEV's se modelaron e interpretaron utilizando el programa DCINV (Pirttijärvi, 2005) a partir de un modelo de estratos horizontales del subsuelo. El programa procesa la respuesta de los sondeos a partir de un modelo inicial propuesto por el intérprete y optimiza la respuesta en base a las restricciones que se establezcan a partir de la información geológica recolectada *in situ* (espesor y/o resistividades reales del suelo).

**Tabla 4. Distancias interelectrónicas y constante geométrica ( $k$ ) usadas en la realización de los SEV's.**

$AB/2$	$MN$	$k$	$AB/2$	$MN$	$k$
1.5	0.4	17.36	20	1	1255.85
2	0.4	31.10	25	1	1962.71
2.5	0.4	48.77	25	2	980.18
3.5	0.4	95.90	35	2	1922.65
4.5	0.4	158.73	45	2	3179.29
6	0.4	282.43	45	4	1587.29
8	0.4	502.34	60	4	2824.29
10	0.4	785.08	60	10	1123.12
10	1	313.37	80	10	2002.77
15	1	706.07	100	10	3133.74

### III.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS

A continuación se muestra el mapa de ubicación para la realización de las pruebas hidráulicas, así como la ubicación de los pozos de aprovechamiento en la Laguna de Lixiviados.

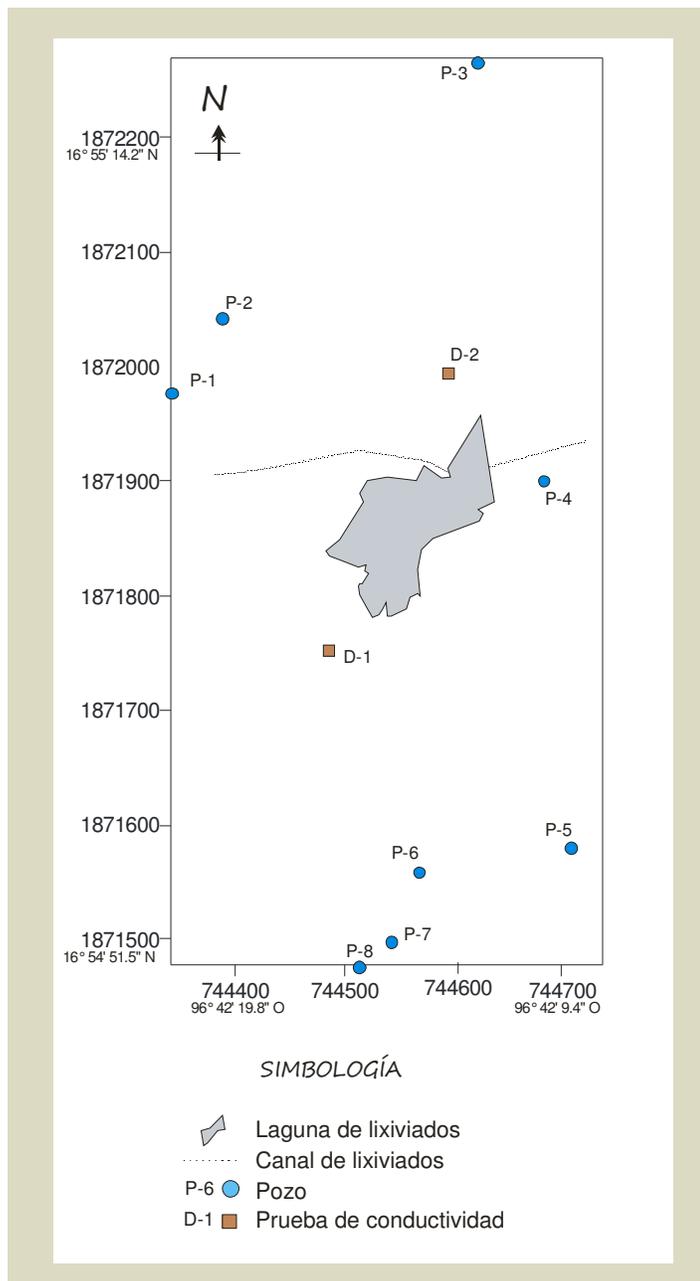


Figura 20. Mapa de ubicación para la realización de las pruebas hidráulicas, así como la ubicación de los pozos de aprovechamiento en la Laguna de Lixiviados.

### III.3.1 Dirección de flujo subterráneo

Para determinar la dirección del flujo subterráneo se localizaron 8 pozos de aprovechamiento en el área de influencia de la Laguna de Lixiviados (ver Figura 20). Estos pozos se geo-referenciaron con un GPS post proceso Astech modelo ProMark 2 (Figura 21), utilizando la modalidad estática para la toma de datos. Esta modalidad proporciona resultados con una precisión horizontal de  $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ , precisión vertical de  $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$  y azimut  $< 1 \text{ m}$  arcosegundos. Los datos con GPS se recolectaron cada 15 segundos durante un periodo de 10 minutos si el pozo se encontraba en un lugar despejado y 15 minutos si el pozo exhibía alguna interferencia, como árboles o casas muy cercanas. Una vez recolectados los datos, se procesaron utilizando Astech Solutions (Thales Navigation, 2000), el cual consiste en una rutina de mínimos cuadrados para mejorar la exactitud y fiabilidad de las posiciones determinadas.



Figura 21. GPS ProMark 2 de Astech utilizado para geo-referenciar sitios de análisis geofísicos y pozos de aprovechamiento.

La profundidad del agua en los 8 pozos se midió el mismo día, utilizando una sonda eléctrica que cierra un circuito y emite una señal al ponerse en contacto con el agua. Esta lectura se ajustó al nivel del piso debido a que la sonda midió la profundidad del agua a partir del brocal de los pozos. Utilizando estos datos y la altitud a nivel del mar arrojada por el programa Astech Solutions se interpoló el nivel piezométrico de la Laguna de Lixiviados.

Las mediciones se realizaron en dos periodos: en noviembre del año 2007 y en julio del año 2008. En julio del 2008, se obtuvieron datos de conductividad eléctrica, sólidos disueltos (TDS) y pH del agua (Figura 22) utilizando un tester Hanna modelo HI 98129, el cual mide la conductividad eléctrica del agua en un rango de 0 a 3999  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ( $\pm 2\%$ ), TDS de 0 a 2000 ppm ( $\pm 2\%$ ), pH de 0.00 a 14.00 ( $\pm 0.05$ ) y temperaturas desde 0.0 a 60.0  $^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1$ ).



Figura 22. Determinación de parámetros fisicoquímicos del agua utilizando un tester Hanna HI 98129.

### III.3.2 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es un parámetro físico del suelo que interviene en todos aquellos procesos relacionados con el movimiento de agua y solutos a través del mismo, por lo que constituye uno de los descriptores fundamentales de la naturaleza de un suelo, utilizándose a menudo para estimar otros parámetros más complejos. Para determinar la conductividad hidráulica se empleó un infiltrómetro de carga variable. Este dispositivo consiste en un cilindro metálico colocado en una excavación del suelo y que es llenado con agua para medir el nivel de abatimiento en tiempos distintos. El infiltrómetro tiene una longitud de 1.015 m, un diámetro externo de 0.17 m, y un diámetro interno de 0.156 m (Figura 23).

Se realizaron dos pruebas de conductividad hidráulica (ver Figura 20), D-1 (a una profundidad de 0.43 m) y D-2 (a una profundidad de 0.55 m), obteniendo datos en los tiempos 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240, 300, 600 segundos y después cada 5 minutos hasta llegar a 90 minutos. Una vez recolectados los datos se procedió a su análisis con el método de Darcy (Sumner, 2000).



Figura 23. Infiltrómetro de carga variable. En la figura se pueden apreciar algunos parámetros requeridos por el método de Darcy:  $h_1+L$  es la carga hidráulica en la parte superior del infiltrómetro.  $h_2+L$  es la carga hidráulica en la parte inferior del mismo.

### III.3.2.1 Método de Darcy

El método de Darcy consiste en la simplificación de la ecuación de Darcy (33) a partir de la cual se obtiene (41):

$$J = \frac{Q}{A} = -K_s \frac{\Delta H}{L} \quad (41)$$

Donde:

$Q$  es el flujo volumétrico.

$J$  es el flujo del fluido.

$A$  es el área de sección transversal.

$\frac{\Delta H}{L}$  es el gradiente a través del infiltrómetro.

Ordenando la ecuación (41) se obtiene (42):

$$K_s = \frac{JL}{H_2 - H_1} \quad (42)$$

Donde:

$L$  es la profundidad del infiltrómetro.

$H_1$  y  $H_2$  es el potencial total en la parte superior e inferior del infiltrómetro, respectivamente.

El flujo,  $J$ , es negativo hacia abajo de manera que la conductividad hidráulica es siempre positiva y se determina mediante la ecuación (43):

$$K_s = \frac{L}{t} \ln \frac{h_1 + L}{h_2 + L} \quad (43)$$

Donde:

$h_1 + L$  es la carga hidráulica en la parte superior del infiltrómetro.

$h_2 + L$  es la carga hidráulica en la parte inferior del infiltrómetro.

Los datos obtenidos a través del método de Darcy se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5. Conductividad hidráulica  $K$  (m/d) obtenida por el método de Darcy.**

Tiempo (s)	D-1 (m/d)	D-2 (m/d)	Tiempo (s)	D-1 (m/d)	D-2 (m/d)
5	344.62	689.91	900	27.21	36.43
10	187.68	555.66	1200	23.57	29.06
20	128.81	530.13	1500	21.33	24.53
30	112.31	451.33	1800	19.17	21.22
40	106.54	354.44	2100	17.81	18.79
50	93.49	310.86	2400	16.66	16.98
60	87.67	273.11	2700	15.71	15.46
120	67.18	165.35	3000	14.89	14.14
180	57.02	123.86	3300	14.26	13.10
240	51.02	101.46	3600	13.48	12.24
300	46.19	86.21	4200	12.50	10.93
600	32.97	49.68	4800	11.59	9.83

Puede observarse que la gráfica de la Figura 24, correspondiente a D-1 que el nivel del agua se estabiliza más rápidamente (10 s) debido a una conductividad hidráulica baja (34 m/d), mientras que D-2 (Figura 25) se estabiliza a los 40 s, es decir cuenta con una conductividad hidráulica mayor (157 m/d).

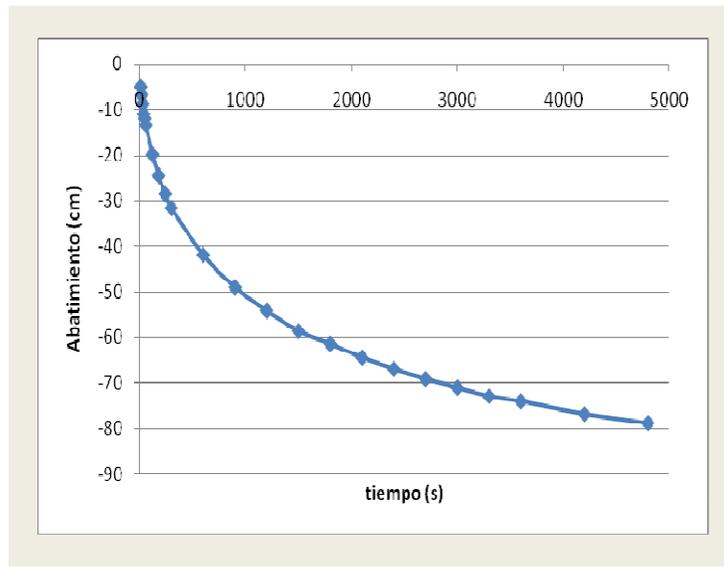


Figura 24. Abatimiento del nivel del agua en D-1 para la obtención de la conductividad hidráulica.

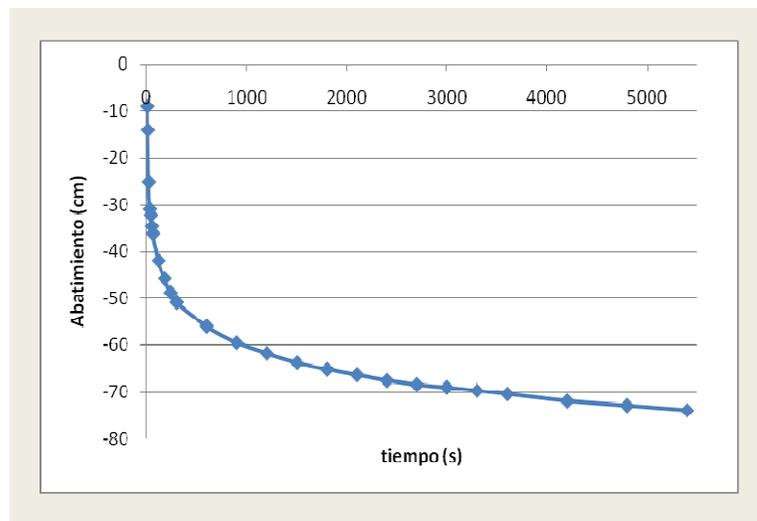


Figura 25. Abatimiento del nivel del agua en D-2 para la obtención de la conductividad hidráulica.

### III.3.3 Transmisividad

De acuerdo a la ecuación (33) la transmisividad se expresa en función de la conductividad hidráulica. Para el suelo de la laguna de lixiviados, la transmisividad se determinó considerando el espesor mínimo (0.5 m) y el espesor máximo (9 m) de la zona saturada. Estos datos se obtuvieron a partir del método sísmico de refracción. Asimismo se utilizaron los valores de conductividad hidráulica calculados por el método de Darcy. De manera que a D-1 le corresponde una transmisividad de 282 m<sup>2</sup>/d y a D-2, un valor de 1413 m<sup>2</sup>/d.

### III.3.4 Porosidad

Una de las ecuaciones (44) más utilizadas para correlacionar la conductividad hidráulica con la porosidad del medio es la ecuación de Kozeny-Carman (Batu, 1998).

$$K = \frac{\rho \cdot g}{\mu} C_k \cdot f_k(n) \cdot d_{10}^2 \quad (44)$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del líquido que contenga el medio

$g$  es la aceleración de la gravedad

$\mu$  es la viscosidad dinámica del líquido que contenga el medio

$C_k = 8.3 \times 10^{-3}$

$$f_k(\eta) = \frac{\eta^3}{(1-\eta)^2}$$

$\eta$  es la porosidad

$d_{10}$  = tamaño de partículas correspondientes al 10%

La densidad y la viscosidad requeridas son las del líquido que contenga el medio, en este caso se tomaron los datos del agua a 25°C, de manera que  $\rho = 0.997 \text{ g/cm}^3$ ,  $\mu = 0.890 \text{ cp}$ ,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  y  $d_{10} = 0.023 \text{ cm}$ , el cual se determinó a través de un análisis granulométrico (M-MMP-1-06/03, SCT). Sustituyendo estos valores en (44) se obtiene la ecuación de Kozeny-Carman en términos de la porosidad (45), la cual se resolvió empleando una rutina de iteración en MatLab a través del método de Newton-Raphson.

$$\frac{K}{0.4825} (1 - \eta)^2 = \eta^3 \quad (45)$$

El código utilizado se muestra a continuación:

```
function y=newr(fun,x0)
clc
x0=0;
iteraciones=[];
x(1)=x0;
nmax_iter=100;
tol=1e-10;
h=1e-4;
for i=1:nmax_iter
    funcion_x=feval('fun',x(i));
    derivada_x=(feval('fun',x(i)+h)-feval('fun',x(i)))/h;
    x(i+1)=x(i)-(funcion_x/derivada_x);
    iteraciones=[iteraciones; i x(i) x(i+1) abs(x(i+1)-x(i))];
end
y=x(i+1);
```

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6. Porosidad de Kozeny-Carman**

Tiempo (s)	D-1 %	D-2 %	Tiempo (s)	D-1 %	D-2 %
5	55.06	62.03	900	31.34	33.73
10	48.95	59.87	1200	30.2	31.87
20	45.25	59.4	1500	29.43	30.51
30	43.92	57.78	1800	28.62	29.39
40	43.41	55.35	2100	28.06	28.46
50	42.17	54.02	2400	27.57	27.71
60	41.57	52.71	2700	27.15	27.03
120	39.1	47.7	3000	26.76	26.39
180	37.62	44.87	3300	26.45	25.85
240	36.63	42.95	3600	26.05	25.38
300	35.76	41.41	4200	25.53	24.61
600	32.9	36.4	4800	25.01	23.9

### III.3.5 Análisis fisicoquímicos

Para determinar correctamente una pluma contaminante se requiere de una interpretación de datos obtenidos a través de varios métodos geofísicos, los cuales pueden combinarse con datos de control. En esta investigación los datos de control utilizados fueron análisis fisicoquímicos y de metales contenidos en lixiviado, suelo y agua, con objeto de determinar la información que pudiera correlacionarse con una pluma contaminante. El primer análisis de control fue un análisis fisicoquímico de lixiviado obtenido directamente en el TMCO.

Otro estudio realizado fue el análisis del agua del pozo P04 (744683.149, 1871900.018 UTM), el cual fue seleccionado por su cercanía con la Laguna de Lixiviados y se consideró que estaba afectado directamente por lixiviados. Como puede observarse, este pozo no excede los límites permisibles (PROY-NOM-SSA1-250-2007), excepto en dureza.

Sin embargo, el pozo P01 (744340.606, 1871975.598 UTM), contiene agua con una elevada conductividad eléctrica (2148  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Finalmente para establecer la existencia de metales pesados en el suelo de la Laguna de Lixiviados, se tomó una muestra compuesta constituida con cinco muestras simples (NMX-AA-132-SCFI-2006) ver Figura 26. Esta muestra se secó a una temperatura ambiente no mayor a  $35^{\circ}\text{C}$  para facilitar su manejo. Una vez seca, se disgregó manualmente con un mazo de madera de 1 kg y se cribó con una malla de 4.75 mm. Posteriormente se homogeneizó y cuarteó con el fin de obtener una muestra representativa para el análisis en el Servicio Geológico Mexicano. El análisis de metales pesados en suelo indica la presencia de aluminio (Al), arsénico (As), bario, (Ba), calcio (Ca), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), escandio (Sc), estroncio (Sr), fierro (Fe), fósforo (P), magnesio (Mg), manganeso (Mn), níquel (Ni), potasio (K), sodio (Na), zinc (Zn) y titanio (Ti), aunque se debe considerar que la composición mineralógica establece la presencia de silicoaluminatos, óxidos de fierro, carbonatos de calcio y magnesio, sílice entre otros. Por lo que algunos elementos presentes en los resultados no pueden considerarse como contaminantes, si bien otra fracción puede deberse a la lixiviación del TMCO.

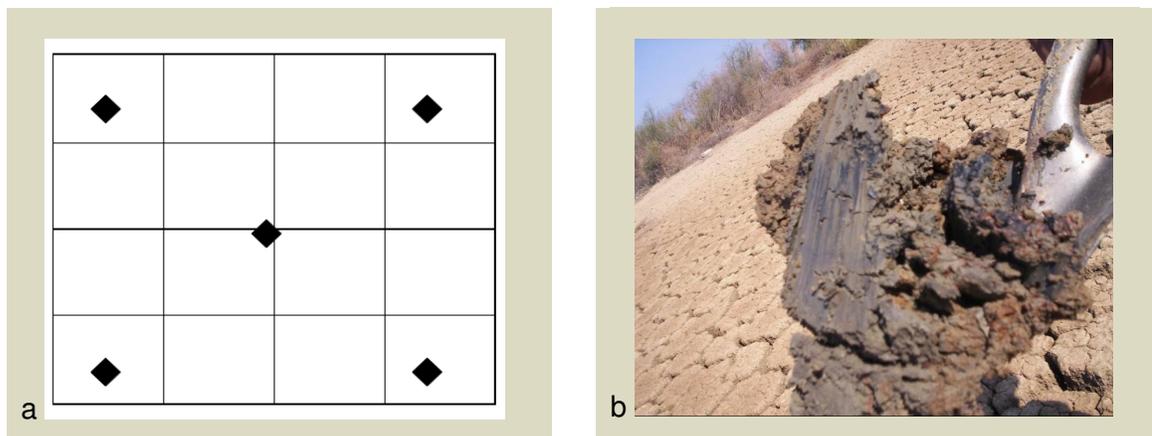


Figura 26 a. Toma de muestras simples. 26 b. Suelo de la Laguna de Lixiviados

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

IV.1 MÉTODO SÍSMICO DE REFRACCIÓN

Analizando el tiempo de arribo de la onda *P*, se obtuvieron siete modelos sísmicos, los cuales se examinan a continuación: El perfil SIS-1 (Figura 27), se interpretó como un modelo de dos estratos, el primero de ellos presenta una velocidad de 400 m/s y un espesor promedio de 7.5 m, asociado con material aluvial, mientras que el segundo estrato tiene una velocidad de 2800 m/s asociado con lutitas sanas.

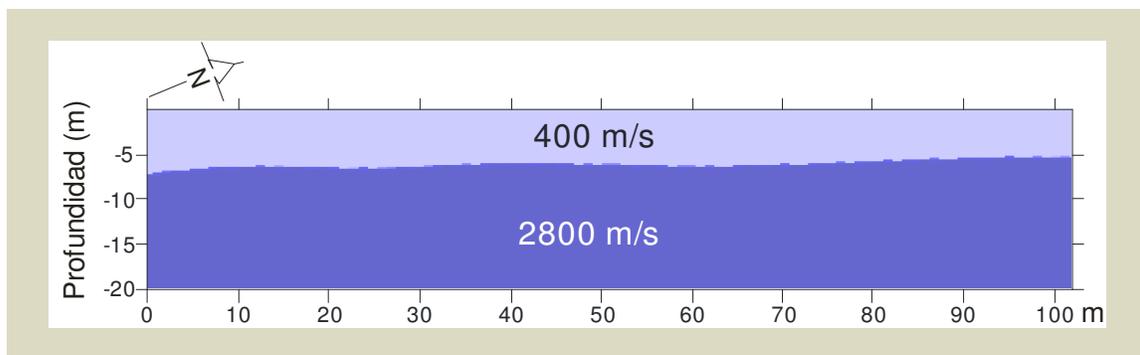


Figura 27. Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-1.

El perfil SIS-2 (Figura 28) del mismo modo que SIS-1, se conforma por dos capas, pero presenta un leve adelgazamiento en el primer estrato, si bien mantiene la velocidad de 400 m/s. El segundo estrato conserva la velocidad de 2800 m/s.

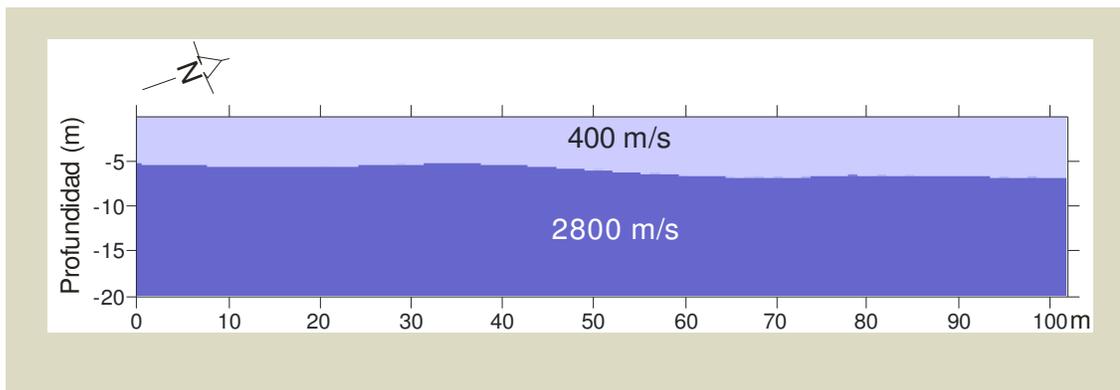


Figura 28. Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-2.

En el perfil SIS-3 (Figura 29) el primer estrato aumenta su espesor hasta 9 m conservando la velocidad que muestran SIS-1 y SIS-2 (400 m/s). El segundo estrato permanece con una velocidad de 2800 m/s.

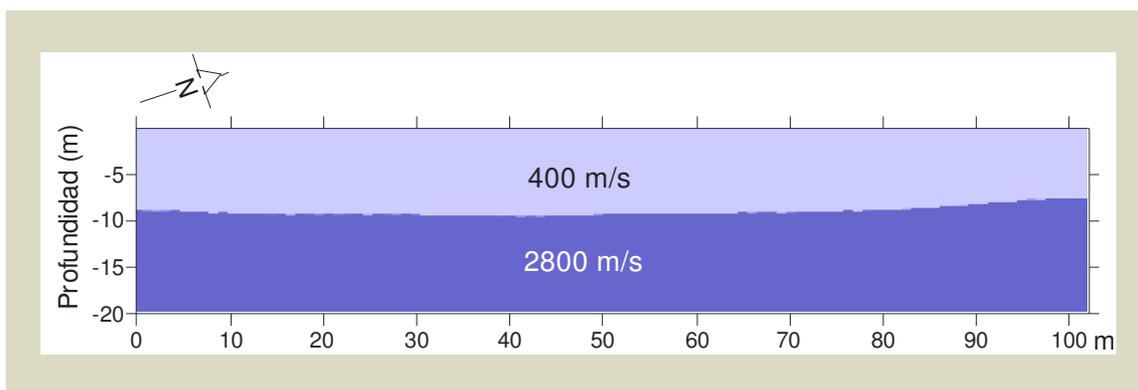


Figura 29. Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-3.

Los perfiles SIS-4, SIS-5, SIS-6 y SIS-7 se interpretaron como modelos de 3 capas. Para el modelo SIS-4 (Figura 30) la primera capa tiene una velocidad de 280 m/s. Esta es una velocidad menor que la presentada por el resto de los modelos obtenidos, como se podrá observar más adelante y que puede estar influenciada por la alteración de las propiedades del suelo, ya que SIS-4 es la respuesta de una zona de inundación, con altos contenido de arcilla, en donde se estancaban los lixiviados al desbordarse de la laguna de captación. SIS-4 muestra en  $x=100$  m, el afloramiento de un estrato con una velocidad de 1300 m/s y a diferencia de los modelos anteriores, el último reflector detectado tiene una velocidad de 3700 m/s, aunque aparece a la misma profundidad de 10 m.

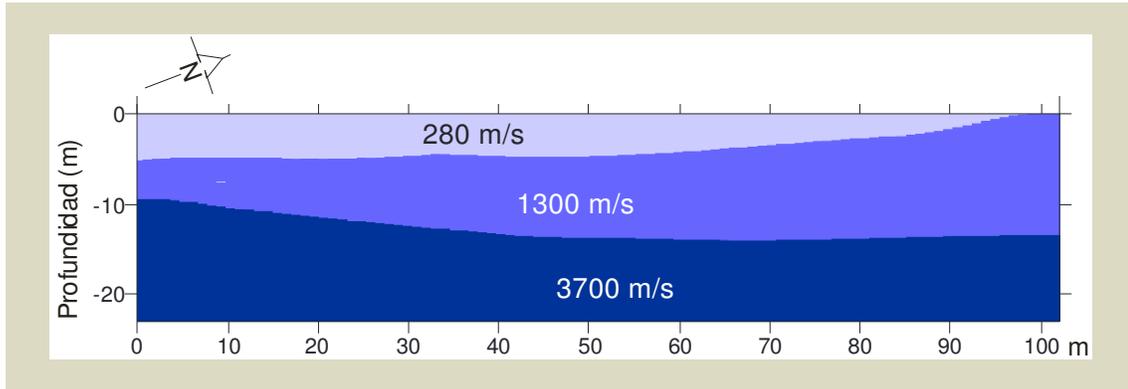


Figura 30. Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-4

En el perfil SIS-5, el primer estrato coincide con los modelos SIS-1, SIS-2 y SIS-3 ya que manifiesta una velocidad de 390 m/s; sin embargo, el espesor de esta capa disminuye a 3 m aproximadamente, mientras que el espesor del estrato intermedio, con velocidad de 1300 m/s, aumenta a 14 m. Finalmente el último estrato aparece a una profundidad de 17 m conservando la velocidad de 3700 m/s (Figura 31).

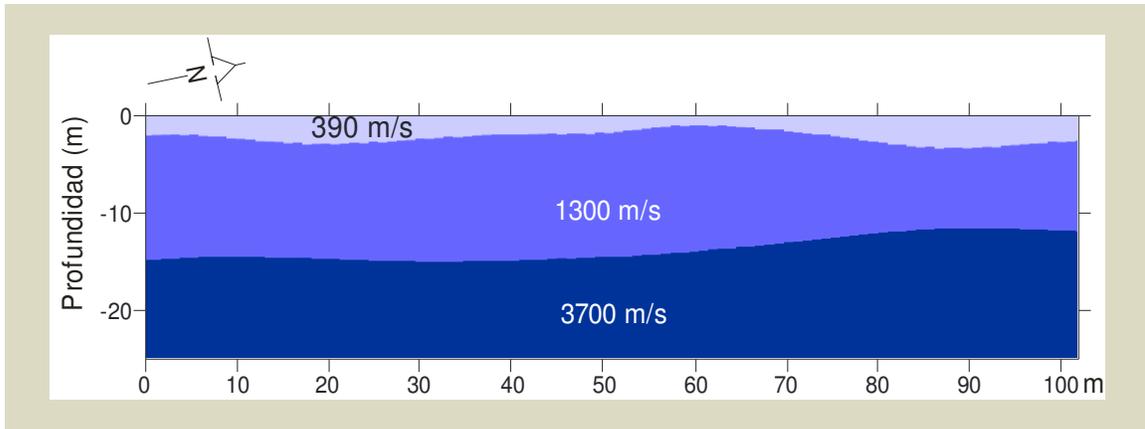


Figura 31. Modelo geológico obtenido con datos sísmicos SIS-5.

El perfil SIS-6 mantiene el primer estrato con una velocidad de 390 m/s, pero aumenta su espesor a 8 m. El segundo estrato tiene una velocidad de 2700 m/s, muy similar al comportamiento de SIS-1, SIS-2 y SIS-3, con un espesor de más de 10 m durante los primeros 50 m en x, para enseguida contraerse a 5 m aproximadamente a partir de x= 60 m. El tercer estrato mantiene la velocidad de 3700 m/s, apareciendo a 25 m de profundidad durante los primeros 40 m y después de x=60 m a una profundidad de 12 m (Figura 32).

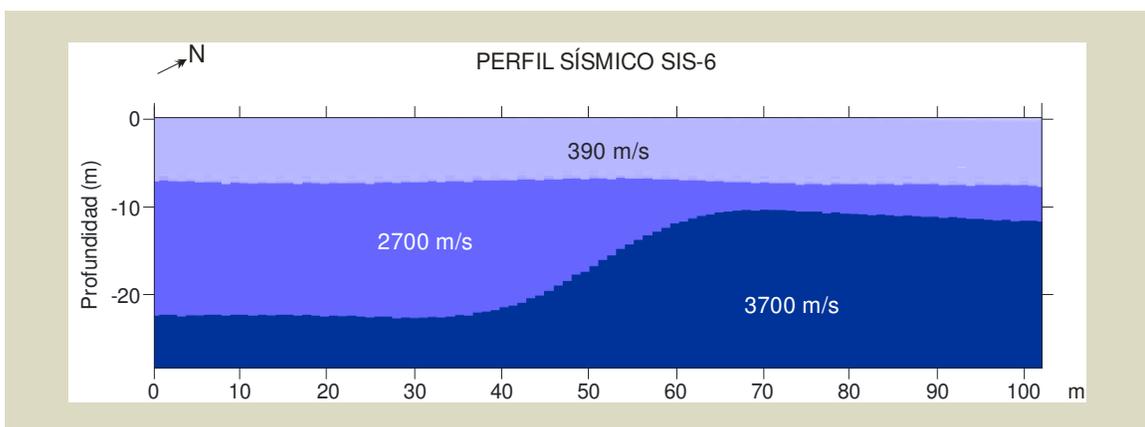


Figura 32. Modelo geológico obtenido con datos del perfil SIS-6.

Por último, el perfil SIS-7, cercano a la Laguna de Lixiviados, presenta un comportamiento semejante a SIS-5. En la Figura 33 se aprecia un estrato con espesor de 3 m y una velocidad de 390 m/s; después, un segundo estrato con un espesor de 10 m y una velocidad de 1300 m/s. También se observa un estrato con una velocidad de 3700 m/s a una profundidad de 15 m, aproximadamente.

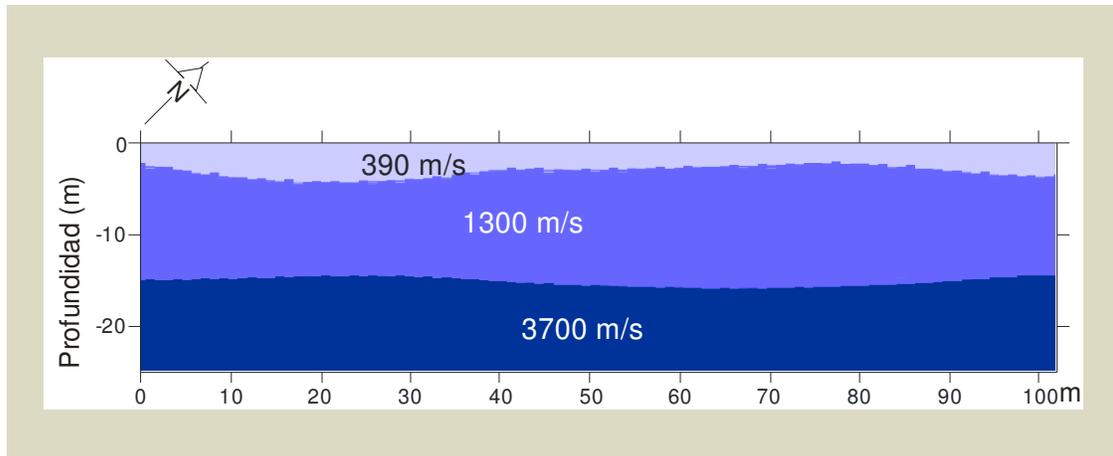


Figura 33. Modelo geológico obtenido con datos del perfil SIS-7.

Unificando los perfiles SIS-1, SIS-2 y SIS-3, se construyó el modelo sísmico general (SIS-A) que se presenta en la Figura 34, en esta Figura se muestra el contraste existente entre los estratos que conforman el borde noroeste de la Laguna y la dirección preferencial de la Falla de Oaxaca (10° NO).

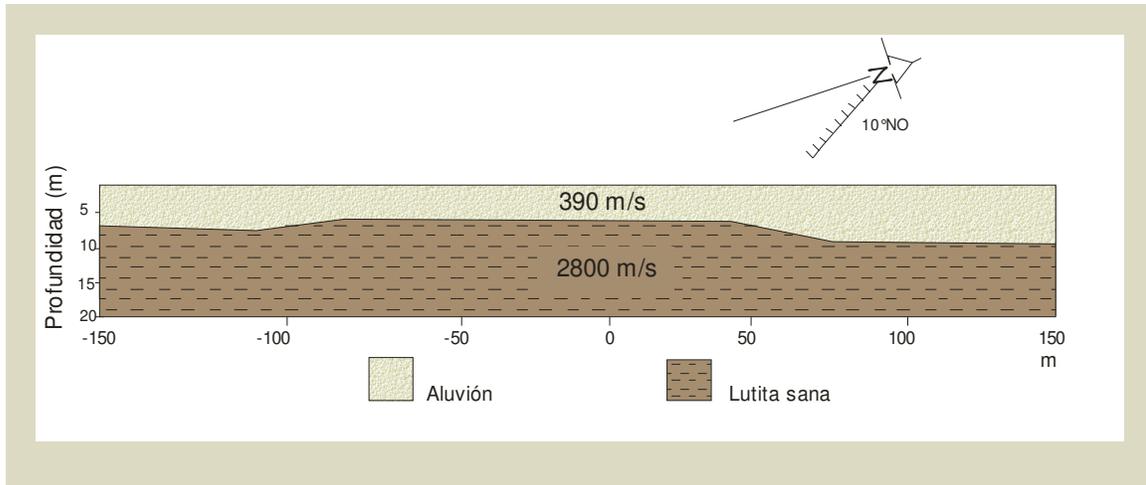


Figura 34. Modelo SIS-A. Se advierte la presencia de material aluvial con un espesor que varía de 5 m a 9 m; subyaciendo al estrato mencionado se encuentra el material consolidado.

El modelo SIS-A se conforma por dos capas: la primera, con velocidad de 400 m/s asociada con material aluvial; la segunda, con velocidad de 2800 m/s asociada a la presencia de lutitas sanas. A partir de esta imagen, a menos que se exprese lo contrario, el 0 en x representa el centro de la Laguna de Lixiviados. El segundo modelo sísmico general SIS-B, mostrado en la Figura 35, se construyó utilizando la información de los perfiles SIS-4, SIS-5, y SIS-6. En esta imagen se aprecia que el medio granular es somero hasta  $x=-50$  m, justamente en donde se encuentra la Laguna de Lixiviados. Este estrato aumenta de espesor hasta alcanzar un valor aproximado de 7 m, presentando velocidades desde 280 m/s hasta 390 m/s relacionados con material aluvial existente en el borde sureste de la laguna. También puede observarse la presencia de un estrato intermedio cuyas velocidades oscilan entre 1300 m/s asociado con lutitas alteradas, hasta 2700 m/s asociado con lutitas sanas. Finalmente aparece un estrato constituido por arenisca, a una profundidad de 15 m a 20 m con velocidad de 3700 m/s.

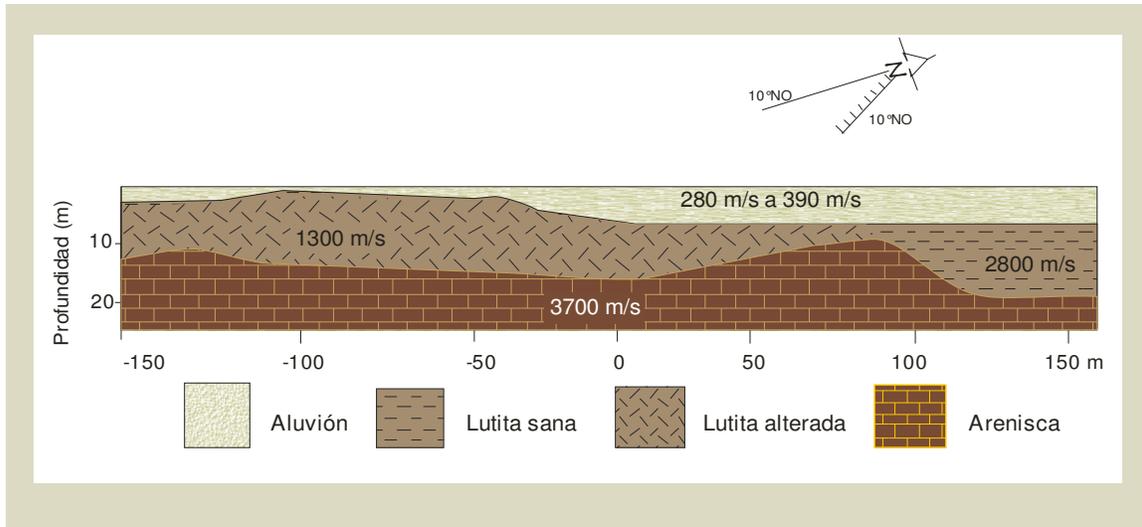


Figura 35. Modelo SIS-B, en esta imagen se nota la presencia somera de material aluvial, un estrato de lutitas y finalmente a presencia de areniscas. Se indica además la dirección preferencial de la falla de Oaxaca.

Comparando SIS-A y SIS-B, se aprecia que a partir de  $x = -100$  m hasta  $x = 50$  m existe un plegamiento del medio, el cual se nota de manera más clara en SIS-B, ya que además de la estructura anticlinal ( $x = 50$  m hasta  $x = 100$  m), el estrato intermedio, representado mayoritariamente por lutitas, se encuentra alterado, pudiéndosele atribuir este comportamiento a la presencia del sistema de la falla de Oaxaca.

## IV.2 MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO

En el modelo obtenido con datos del perfil electromagnético EM-1 (Figura 36) se observa un estrato inclinado, con resistividad de 60 a 100  $\Omega$ -m a partir de  $x=-40$  m, que gradualmente aumenta de espesor hasta alcanzar más de 40 m a partir de  $x=0$  m y que podría interpretarse como una fractura. Debajo de esta estructura se encuentra una zona de baja resistividad (menor a 10  $\Omega$ -m) a partir de  $x = -60$  m hasta  $x = -30$  m a una profundidad de 20 m hasta 40 m, probablemente relacionada con la presencia de una pluma contaminante.

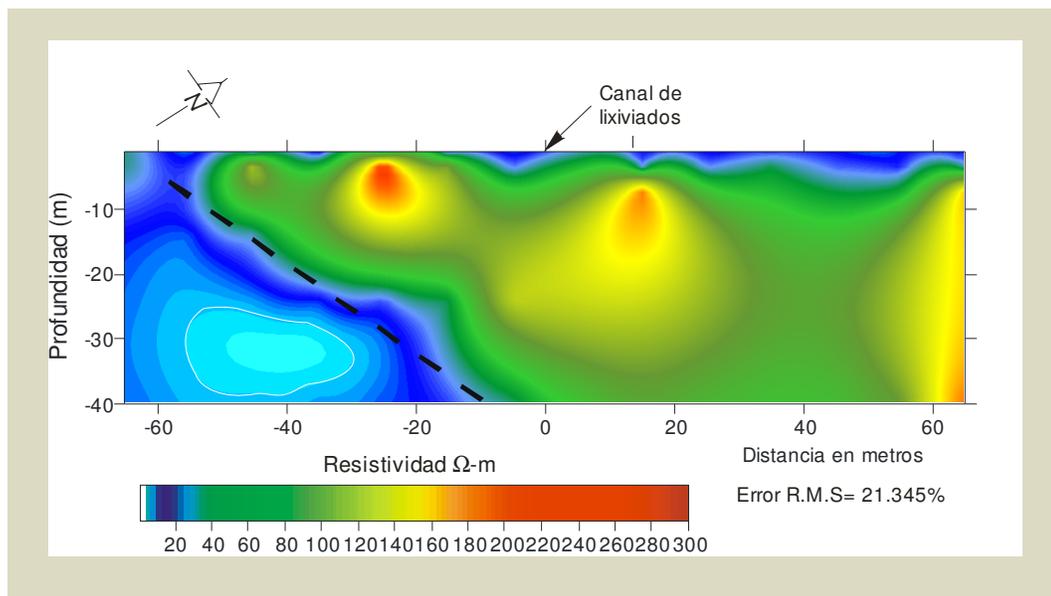


Figura 36. Respuesta resistiva de suelo en el perfil EM-1. En esta imagen se muestra una posible fractura inclinada, mientras que en blanco se resalta una zona anómala que puede relacionarse con una pluma contaminante.

En el perfil EM-2 (Figura 37) se observa una zona con resistividad de 20 a 40  $\Omega$ -m a una profundidad de 5 m y con un espesor aproximado 15 m a partir de  $x=-150$  hasta  $x=50$  m y de más de 30 m a partir de  $x=70$  m que corresponde al aluvión. Debajo de

este estrato se encuentra una anomalía de baja resistividad (menor a  $20 \Omega\text{-m}$ ) que coincide con el borde oeste de la Laguna de Lixiviados. Este perfil muestra la presencia de otra zona anómala al centro de la laguna, con valores de resistividad de 10 a  $20 \Omega\text{-m}$  a una profundidad teórica de 30 m que pueden interpretarse como la presencia de lixiviados. Comparando la Figura 37 con el perfil SIS-A, se puede apreciar que el medio granular presenta el mismo comportamiento propuesto para el borde noroeste de la Laguna de Lixiviados (resaltado en un recuadro).

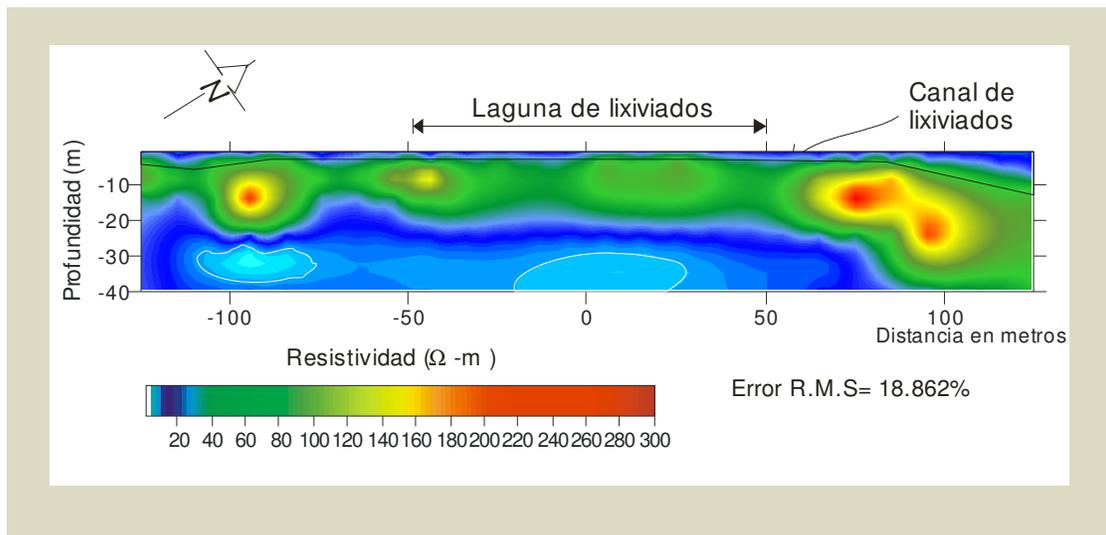


Figura 37. Respuesta resistiva de suelo en el perfil EM-2. En esta imagen muestra el aluvión en una profundidad promedio de 5m. A una profundidad de 30 m se aprecia una zona anómala ( $10 \Omega\text{-m}$ ) que puede atribuirse a la presencia de una pluma contaminante.

En el caso del perfil EM-3 (Figura 38), en  $x=-30 \text{ m}$  se muestra un adelgazamiento del estrato existente a una profundidad de 10 m, coincidiendo con este hecho, aparece una zona de baja resistividad (menor a  $20 \Omega\text{-m}$ ) desde  $x=0 \text{ m}$  hasta  $x=40 \text{ m}$ . Esta anomalía concuerda con la respuesta que presenta el perfil EM-2 desde  $x=-20 \text{ m}$  hasta  $x=20 \text{ m}$ .

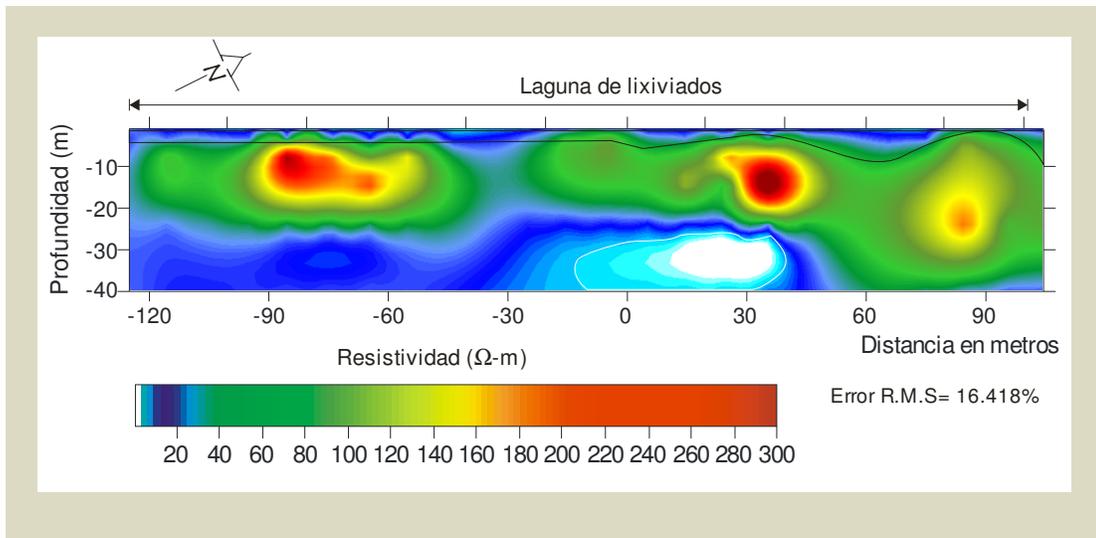


Figura 38. Perfil electromagnético EM-3. En blanco se observa una anomalía que pueden relacionarse con la presencia de lixiviados.

Por otra parte, el análisis de la conductividad aparente medida con el dipolo vertical infiere la presencia de zonas fracturadas si la gráfica presenta dos valores máximos situados a ambos lados de un mínimo de conductividad. Si esta señal es simétrica, se trata de una fractura vertical, de lo contrario, corresponde a una fractura inclinada (Shingal y Gupta, 1999). Considerando lo anterior, en la Figura 39 se aprecia que para el perfil EM-2, en  $x=200$  m existe una señal asimétrica que puede asociarse a una fractura inclinada que supera la profundidad teórica de 60 m ya que aparece con las separaciones de 10 m, 20 m y 40 m entre bobinas.

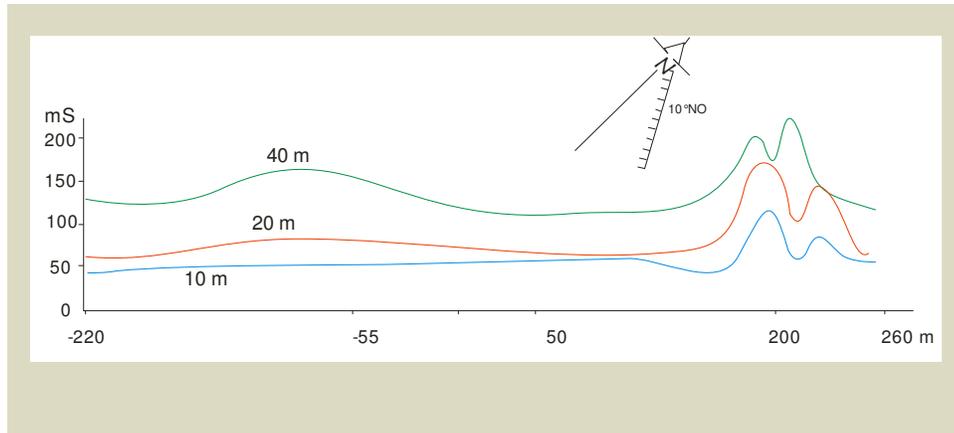


Figura 39. Conductividad aparente del dipolo vertical en el perfil EM-2 que muestra una señal asimétrica en  $x=200$  m asociada con una fractura inclinada perteneciente al sistema de la Falla de Oaxaca.

En el perfil EM-3 (Figura 40), también se observan dos mínimos en la conductividad aparente en  $x=-150$  m y  $x=30$  m, que concuerdan con la estructura anticlinal mostrada en el perfil sísmico SIS-B. Este comportamiento en la conductividad aparente es detectado con la distancia entre bobinas de 10 m y 20 m pero no por la separación de 40 m, por lo que se puede deducir que estas anomalías tienen una profundidad teórica de 35 m.

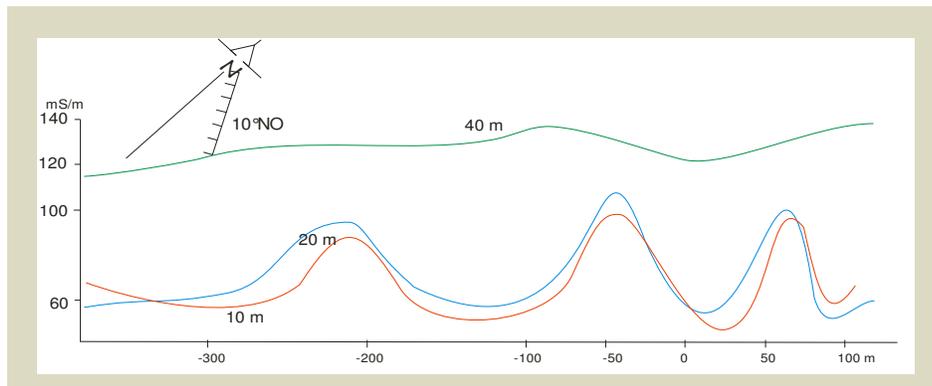


Figura 40. Conductividad aparente del dipolo vertical en el perfil EM-3.

### **IV.3 MÉTODO ELÉCTRICO DE RESISTIVIDAD**

Para un terreno de estratificación conocida se tiene una curva de resistividad aparente única. Por el contrario, para una serie de valores de resistividad aparente medidos no es posible asociar un modelo único, debido a los errores asociados al proceso de medición. Esto ha dado origen a lo que se conoce como “equivalencia”, fenómeno asociado al hecho que modelos estratificados con diferencias apreciables en sus parámetros, pueden originar respuestas de resistividad aparente similares, dentro de cierto rango de tolerancia, a la resistividad aparente medida sobre un terreno dado. La consecuencia principal del principio de equivalencia es que a diferentes cortes geoelectricos le pueden corresponder curvas experimentales muy semejantes entre sí y aunque no sean exactamente iguales pueden considerarse como equivalentes.

#### **IV.3.1 Configuración Dipolo-Dipolo**

Con respecto a los perfiles dipolares, en el perfil DIP-1 (Figura 41) el aluvión se muestra como una zona somera con resistividad de 30 a 40  $\Omega$ -m, desde  $x=-50$  m hasta  $x=-10$ m. Hacia el centro de la laguna ( $x=0$  m) se observa una respuesta relativamente homogénea, con resistividad de 40  $\Omega$ -m, que prevalece hasta  $x=15$  m, donde cambia el comportamiento del subsuelo a valores de más de 80  $\Omega$ -m. La Figura 41 se generó usando el programa CIRCRES35, como se menciona en el Capítulo III, también se utilizó el programa RES2DINV para obtener la respuesta del medio. La Figura 42 fue generada utilizando el segundo programa; en esta imagen, predominan los valores de 20 a 40  $\Omega$ -m. A la profundidad de 2.5 m, aparecen zonas de baja resistividad, con valores desde los 6 a 12  $\Omega$ -m, a partir de  $x=20$  m a  $x=60$  m, aflora una anomalía con valores mayores de 90  $\Omega$ -m, que coincide con el modelo proporcionado por CIRCRES35.

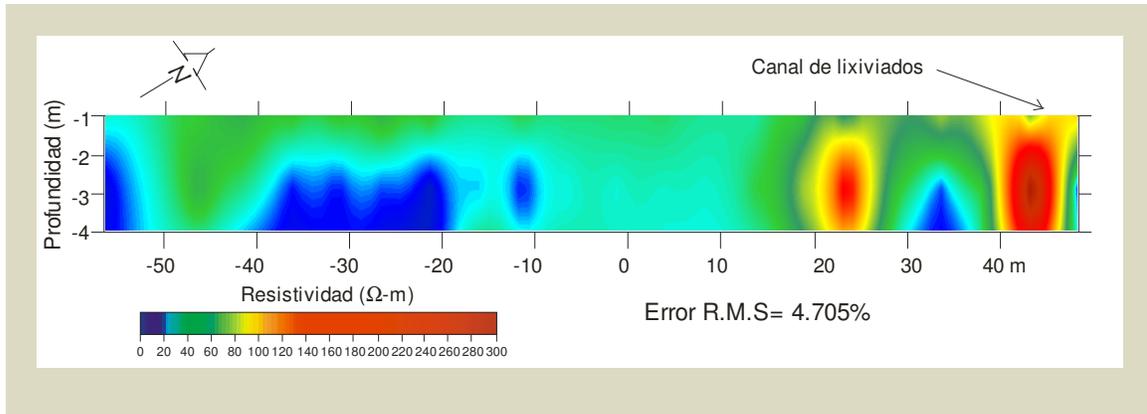


Figura 41. Perfil dipolar DIP-1 generado por CICRES35.

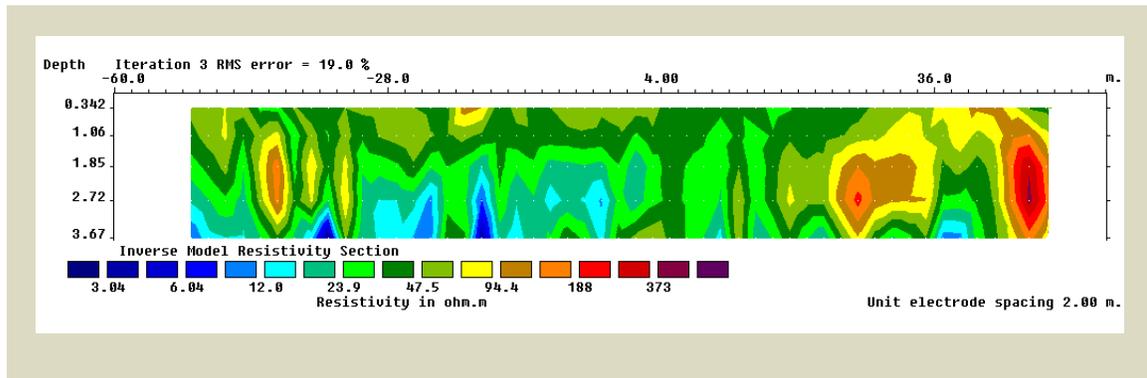


Figura 42. Respuesta del suelo para DIP-1, generada por RES2DINV.

En el perfil DIP-2 la respuesta del suelo es heterogénea, presentando valores desde 10 a 40  $\Omega$ -m y dos anomalías resistivas (mayores de 80  $\Omega$ -m) inclinadas de manera paralela, en  $x=15$  m y  $x=100$  m (Figura 43). Con respecto al modelo de RES2DINV puede interpretarse como la presencia de 3 capas: la primera, con una profundidad máxima de 3 m y resistividad de 40  $\Omega$ -m, debajo del cual existe una zona con un espesor aproximado de 3 m y valores desde los 6 a 20  $\Omega$ -m. La tercera capa se constituye por valores de más de 40  $\Omega$ -m, aflorando en  $x=50$  m, como se puede observar en la Figura 44.

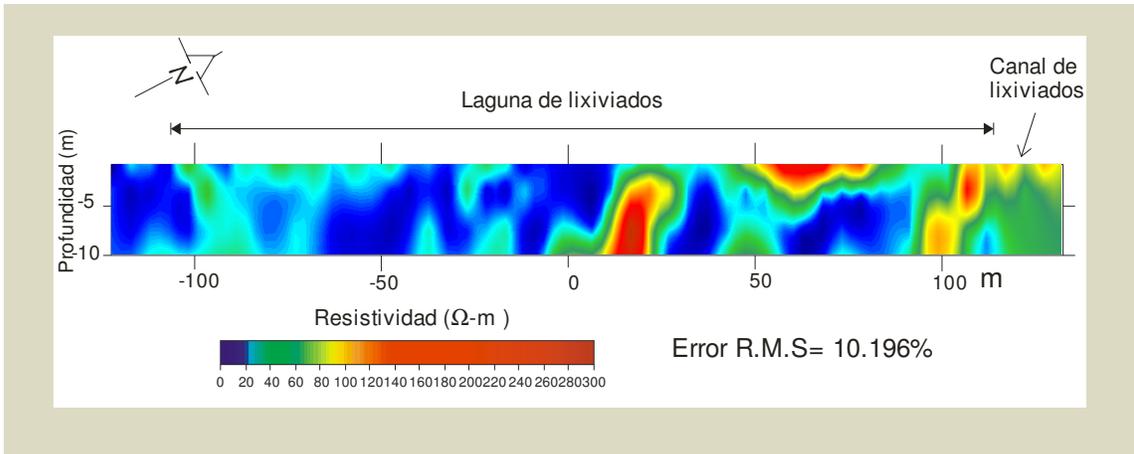


Figura 43. Perfil dipolar DIP-2 generado por CICRES35

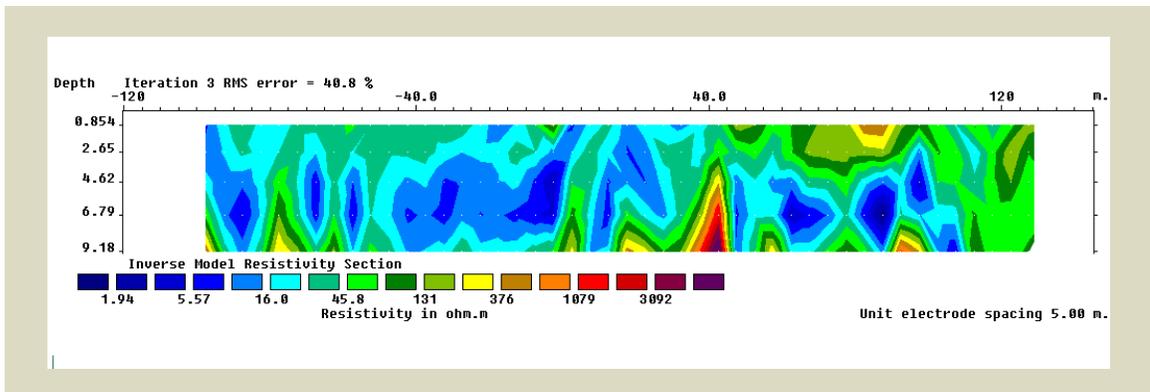


Figura 44. Respuesta del suelo para DIP-2, generada por RES2DINV.

### IV.3.2 Sondeos Eléctricos Verticales

La respuesta generada por los sondeos eléctricos verticales se puede apreciar en las Figuras 43 a 47. El SEV-1 (Figura 45), muestra la presencia de tres estratos: el primero, con una resistividad de  $1.1 \Omega\text{-m}$  y un espesor de  $1.7 \text{ m}$ , el segundo con una resistividad de  $400 \Omega\text{-m}$  y un espesor de  $13 \text{ m}$  y finalmente el tercer estrato presenta una resistividad de  $36 \Omega\text{-m}$ .

El SEV-2 (Figura 46), se interpretó como un modelo de dos estratos. El estrato inicial presenta valores de resistividad de  $2 \text{ a } 5 \Omega\text{-m}$ , y un espesor de  $8 \text{ m}$ . El estrato final tiene una resistividad de  $68 \Omega\text{-m}$ .

El modelo obtenido de SEV-3 (Figura 47), revela un comportamiento similar al obtenido por el SEV-1. El estrato más somero exhibe una resistividad de  $2 \text{ a } 3 \Omega\text{-m}$ , con un grosor de  $3 \text{ m}$ , el estrato siguiente tiene una resistividad de  $340 \Omega\text{-m}$  y un espesor de  $1.3 \text{ m}$ . El tercer estrato tiene una resistividad de  $20 \Omega\text{-m}$ .

SEV-4 (Figura 48), se ajustó como un modelo de dos capas. La primera con una resistividad de  $17 \Omega\text{-m}$  y un espesor de  $12 \text{ m}$ ; la segunda con una resistividad de  $43 \Omega\text{-m}$  y corresponde al semiespacio.

Igualmente, el sondeo SEV-5 (Figura 49), manifiesta la presencia de dos capas: la primera de ellas cuenta con un espesor de  $0.3 \text{ m}$  y resistividad de  $22 \Omega\text{-m}$ . La segunda capa muestra una resistividad de  $34 \text{ a } 46 \Omega\text{-m}$ .

Es importante señalar que SEV's 2 y 3 presentan una variación significativa en los valores de resistividad en los  $AB=20 \text{ m}$ , la cual puede asociarse a zonas fracturadas. Para comprobarlo, se aplicó el método de Piching y Habibullaev (Asfahani, 2007) el cual es considerado como uno de los métodos más robustos para distinguir zonas fracturadas y la dirección de las fracturas. El método se basa en el hecho de que si existen dos SEV's, cada uno a ambos lados de una zona fracturada, todas las curvas de resistividad para cada  $AB/2$  intersectarán en un punto sobre el contacto vertical. Para determinar esto, los datos de resistividad son representados en la forma de curvas mostradas en la Figura 50.

## Curvas de resistividad aparente de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's)

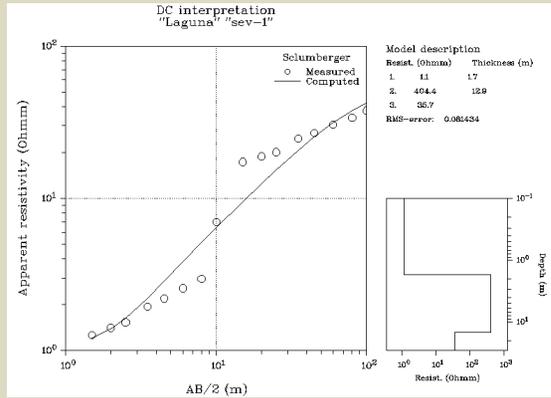


Figura 45

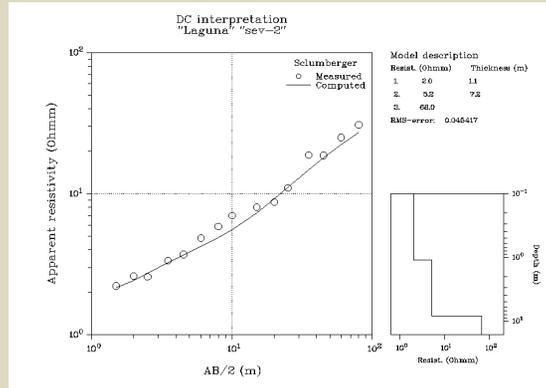


Figura 46

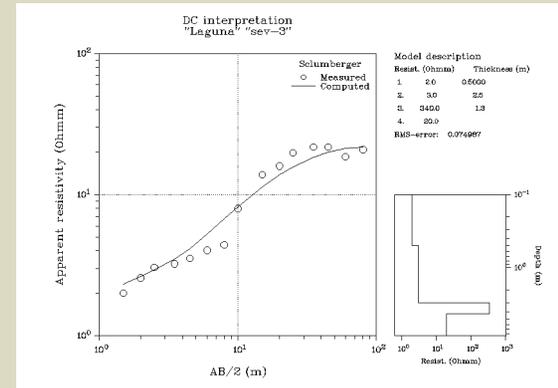


Figura 47

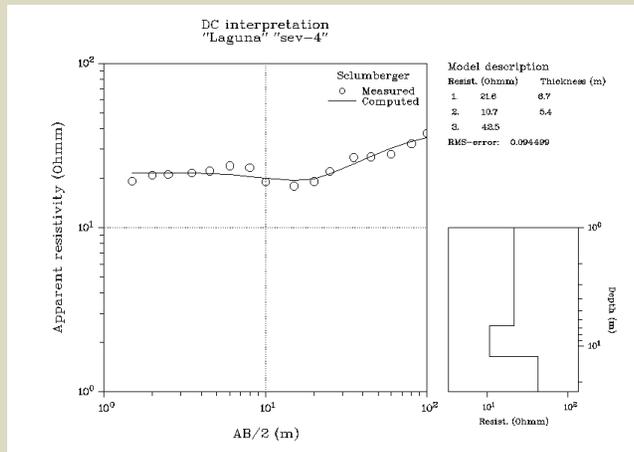


Figura 48

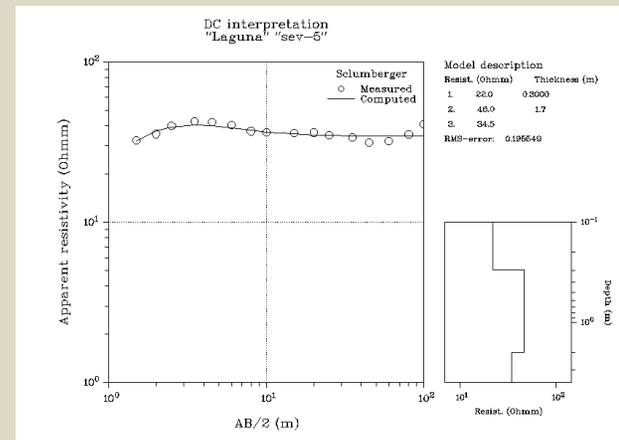


Figura 49

La localización de los SEV's se representa en el eje de las abscisas mientras que en el eje de las ordenadas se registra en forma logarítmica la resistividad aparente para cada AB/2.

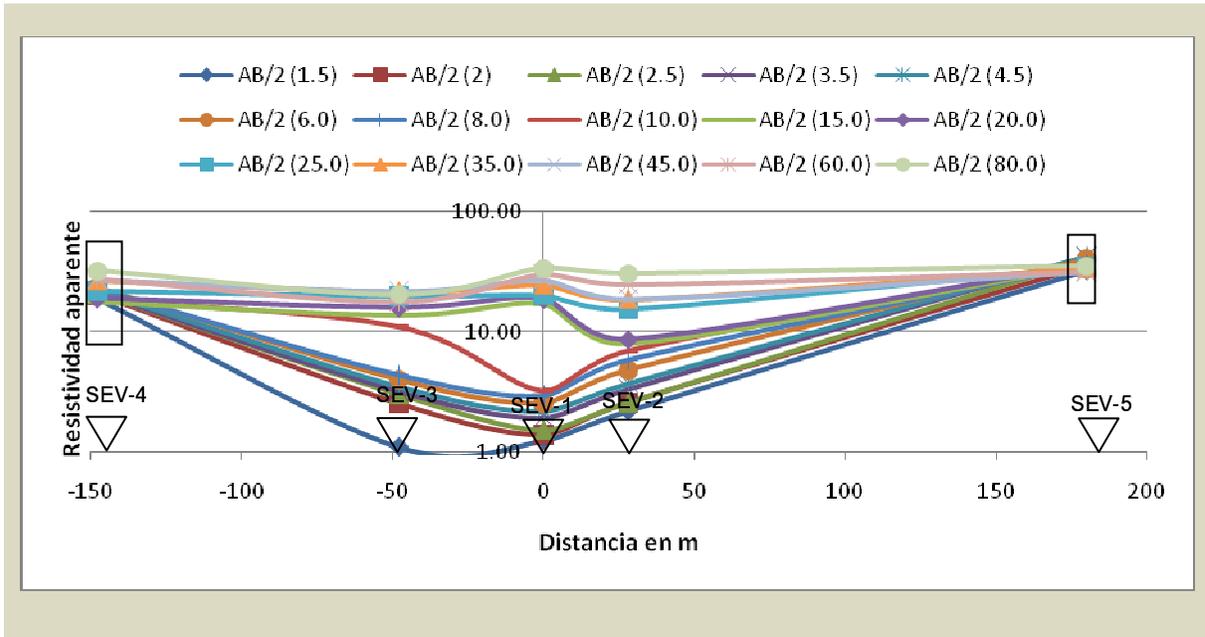


Figura 50. En esta figura se pueden apreciar dos zonas no homogéneas, resaltadas en un cuadro, asociadas con la presencia de fracturas.

Como se aprecia en la Figura 48 existen dos zonas no homogéneas, que pueden relacionarse con zonas fracturadas. El método electromagnético en su variable dipolo vertical detecta una anomalía asimétrica en  $x= 200$  m, la cual coincide con la zona de no homogénea detectada por el SEV-5. Otra zona interesante se encuentra representada por el SEV-4, sin embargo, el análisis de la señal del dipolo vertical del método electromagnético no indicó una zona fracturada, si bien en el perfil EM-3 (Figura 38) se observa la presencia de una estructura inclinada, lo cual puede indicar un cambio litológico en la zona.

La Figura 51 es el modelo geoelectrico propuesto en esta investigación, en él se observa la secuencia: aluvi3n, lutitas alteradas, y alternancia de lutitas y arenisca.

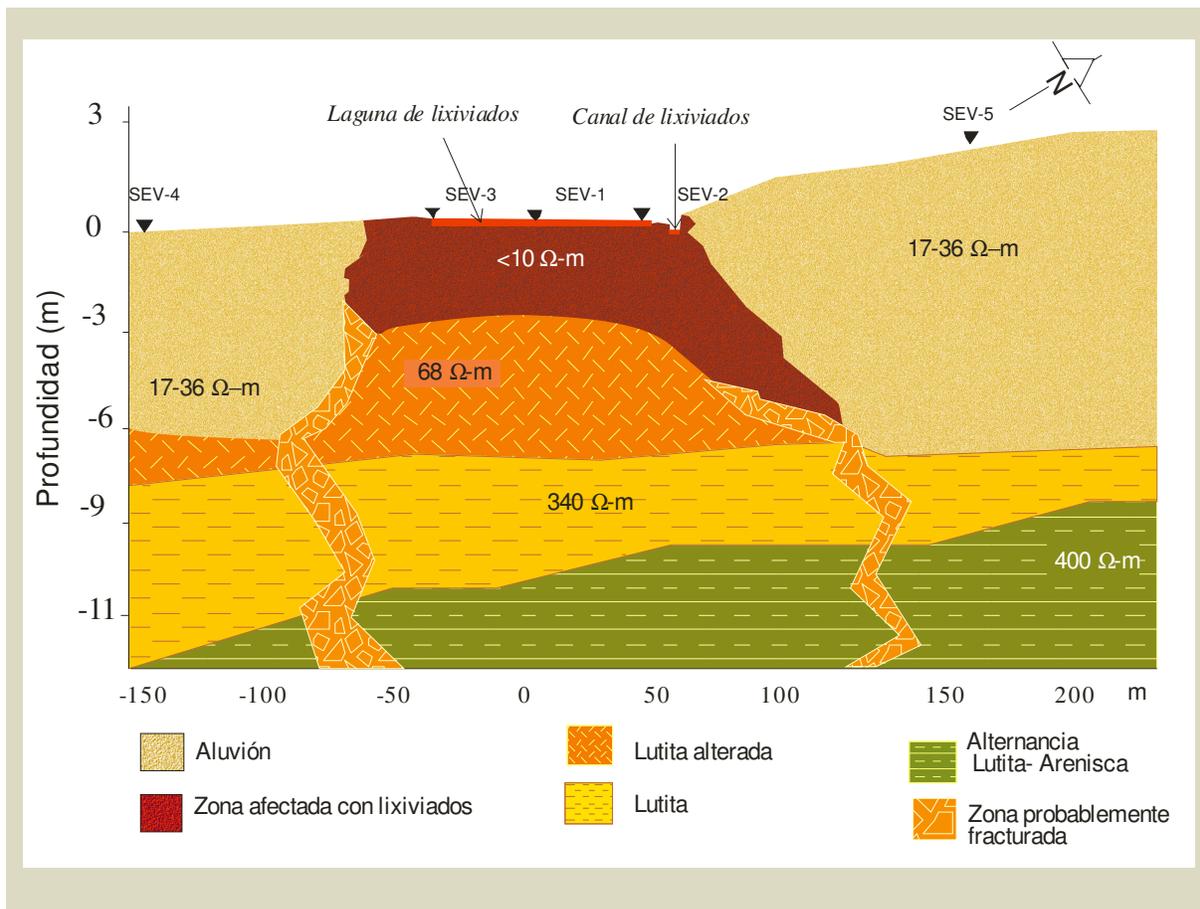


Figura 51. Modelo geoelectrico propuesto para la Laguna de Lixiviados del TMCO.

#### IV.4 PARÁMETROS DE CONTROL

La interpretación de los datos obtenidos por un método geofísico se deben corroborar con los datos obtenidos por un segundo método, de manera que las ambigüedades propias de estas técnicas sean las menores posibles. Otra forma de validar los resultados obtenidos es determinando los parámetros fisicoquímicos que pueden corresponder al comportamiento del medio y que son utilizados como parámetros de control.

Como se menciona en el Capítulo III, uno de los datos de control utilizados en esta investigación fue el análisis del lixiviado proveniente del TMCO. Los análisis indican un pH alcalino (8.4), el cual se asocia con un lixiviado viejo, pero también puede estar influido por los carbonatos existentes en la zona del tiradero. La demanda química de oxígeno se estableció en 27887.8 mg DQO/l, mientras que la conductividad eléctrica aproximada fue 46 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Con respecto al análisis de metales mostrados en la Tabla 7, se detectaron: bario (Ba), calcio (Ca), cobalto (Co), cobre (Cu), escandio (Sc), estaño (Sn), estroncio (Sr) fierro (Fe), fósforo (P), magnesio (Mg), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb), potasio (K), selenio, (Se), sodio (Na), zinc (Zn) y titanio (Ti) cuyas características de toxicidad son resumidas en la Tabla 8.

**Tabla 7. Metales pesados en lixiviado, agua y suelo (ppm) julio/2008**

METAL	SUELO	LIXIVIADO	AGUA	NORMA	METAL	SUELO	LIXIVIADO	AGUA	NORMA
<b>Al</b>	7.67	5	0	0.2	<b>Fe</b>	3.55	26	0	0.3
<b>Sb</b>	0	0.1	0	0.02	<b>P</b>	675	15	0	--
<b>As</b>	17	0	0	0.01	<b>Mg</b>	0.79	44.8	9.6	--
<b>Ba</b>	472	0.8	0.2	0.7	<b>Mn</b>	377	0	0	0.15
<b>Ca</b>	5.54	108	66	--	<b>Mo</b>	0	0.1	0	0.07
<b>Co</b>	17	0.1	0	--	<b>Ni</b>	26	0.3	0	0.02
<b>Cu</b>	60	0.3	0	2	<b>Pb</b>	0	0.2	0	0.01
<b>Cr</b>	66	1.4	0	0.05	<b>K</b>	2.32	1809.4	15.4	--
<b>Sc</b>	15	0.002	0	--	<b>Na</b>	1.07	1635	23	200
<b>Sn</b>	0	1.2	0.03	--	<b>Zn</b>	157	1	0.004	--
<b>Sr</b>	185	0.7	0.3	--	<b>Ti</b>	0.19	1.2	0	--

**Tabla 8. Toxicidad de metales encontrados en la Laguna de Lixiviados**

Elemento	Toxicidad	Comentarios
Al	Moderadamente tóxico para la mayoría de las plantas. Levemente tóxico para los mamíferos. Se ha sugerido como participe de la etiología de la enfermedad de Alzheimer y enfermedades neurológicas.	Relativamente inaccesible, excepto en medios ácidos como resultado de la insolubilidad del Al(OH <sub>3</sub> ). Suelos y agua con alto contenido de Al <sup>+</sup> y bajo contenido de Mg <sup>2+</sup> y Ca <sup>2+</sup> parecen estar implicado en enfermedades neurológicas.
As	Moderadamente tóxico para las plantas, sumamente tóxico para los mamíferos.	Sus fuentes incluyen minería, quema de carbón, insecticidas y herbicidas.
Ca	Relativamente no dañino.	Puede ocasionar deficiencia de otros elementos, como el Fe, por efecto de la alcalinidad de la piedra caliza.
Co	Muy tóxico para las plantas.	Se conocen casos donde la baja concentración de Co afecta la salud de los animales que consumen la pastura que crece en estos sitios.
Cu	Muy tóxico para la mayoría de las plantas, sumamente tóxico para invertebrados y moderadamente tóxico para los mamíferos.	Contaminación por gases industriales y posiblemente por uso agrícola.

**Tabla 8. Toxicidad de metales encontrados en la Laguna de Lixiviados  
(continuación)**

Elemento	Toxicidad	Comentarios
Cr	Sumamente tóxico como Cr(VI), carcinogénico.	Posible contaminante, el Cr(IV) es considerado un riesgo ambiental.
Sc	Poco tóxico.	
Sn	Sus compuestos se emplean como bacteriostáticos y fungistáticos.	
Fe	Levemente tóxico. Su consumo excesivo puede ocasionar siderosis y hemocromatosis.	Elemento muy abundante (5% de la corteza terrestre), puede no estar disponible a pH alto.
P	P <sub>4</sub> y PH <sub>3</sub> . Muy tóxicos para mamíferos y peces. Los venenos de fósforo atacan centros nerviosos.	Lixiviación a partir de fertilizantes, se encuentra en detergentes y aguas negras.
Mg		Puede provocar deficiencia de otros elementos (como el Fe) por efecto de la alcalinidad de la dolomita.
Mn	Moderadamente tóxico.	
Mo	Moderadamente tóxico.	Los gases de molibdeno se relacionan con enfermedades pulmonares.
Ni	Muy tóxico para la mayoría de las plantas y moderadamente tóxico para los mamíferos, carcinogénico	Contaminante industrial.
Pb	Sumamente tóxico para la mayoría de las plantas, veneno acumulativo en los mamíferos. Tóxico para el sistema nervioso central.	Contaminante que se concentra en áreas urbanas debido a la combustión del tetraetilo de plomo existente en las gasolineras.
K	Sumamente tóxico si se inyecta por vía intravenosa.	Produce problemas por lixiviación en terrenos agrícolas.
Na	No dañino excepto en dosis excesivas. Se asocia con ciertos tipos de hipertensión.	La tolerancia, dependencia o ambas con respecto al NaCl tiene importancia en la supervivencia de plantas y animales.
Zn	Moderado o ligeramente tóxico.	
Ti	Relativamente no dañino.	Relativamente no disponible por la insolubilidad del TiO <sub>2</sub> .
Si	Grandes cantidades de silicatos finamente divididos son nocivos para los pulmones de los mamíferos.	Se puede asociar con enfermedades cardíacas.

Fuente: Huheey *et al.* (2003).

Con respecto a la calidad del agua, la Figura 52 muestra el comportamiento del pH determinado *in situ*, indica una ligera basicidad (7.12) en el agua de la zona aumentando levemente en los pozos cercanos a la laguna de lixiviados (7.38). Los análisis fisicoquímicos del agua del pozo P04 confirman el valor del pH, ya que detectaron iones que le confieren dureza al agua (Mg y Ca), además de cloruros (26.42 mg/l como Cl<sup>-</sup>) y nitratos (0.5 mg/L como N-NO<sub>3</sub>). Los metales detectados (Tabla 8) fueron: bario (Ba), calcio (Ca), estaño (Sn), estroncio (Sr), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na) y zinc (Zn).

La conductividad eléctrica del agua presentó valores entre 543 y 752  $\mu\text{S/cm}$ , excepto en el pozo P01 donde alcanzó un valor de 2148  $\mu\text{S/cm}$  (Figura 53).

En los mapas de flujo subterráneo se puede observar una dirección preferencial hacia el suroeste (Figura 54 der.) y hacia el sur (Figura 54 izq.).

Para el extremo noreste de la Laguna de Lixiviados, la conductividad hidráulica determinada fue de 157 m/d. a través de la ecuación de Kozeny-Carman se obtuvo una porosidad del 39%.

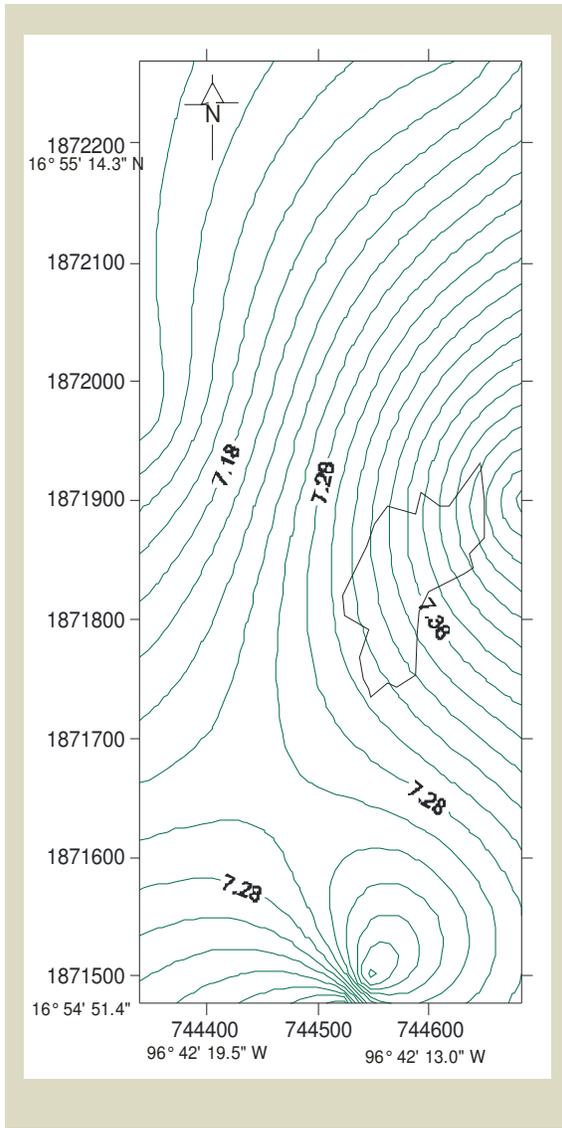


Figura 52. Variación del pH en el área de influencia de Laguna de Lixiviados.

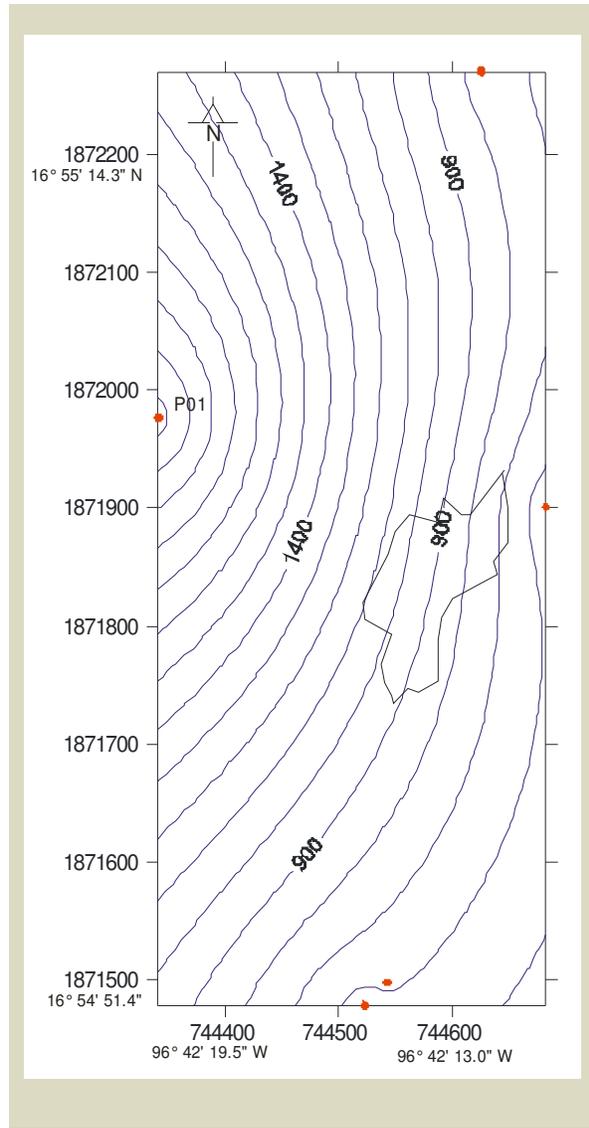


Figura 53. Variación de la conductividad hidráulica en el área de influencia de Laguna de Lixiviados.

En base a los datos obtenidos del método sísmico de refracción se obtuvo una transmisividad hidráulica de 1413 m<sup>2</sup>/d. En el borde suroeste de la laguna la conductividad hidráulica fue de 64 m/d y la porosidad del 35%. La transmisividad tiene un valor de 282 m<sup>2</sup>/d, debido al espesor mínimo establecido.

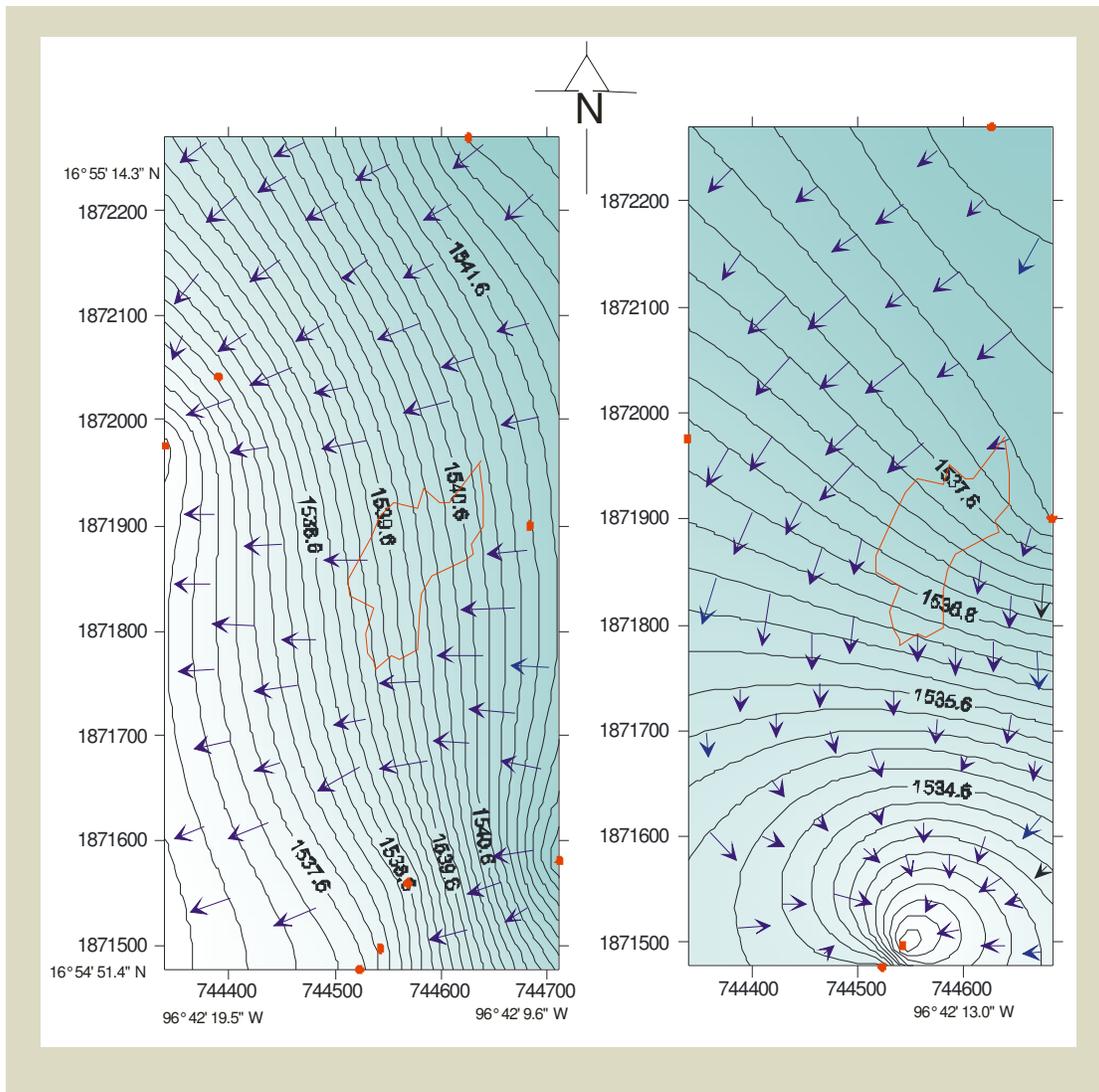


Figura 54. Mapa de flujo subterráneo para noviembre de 2007 (Izq.) y julio de 2008 (Der.)

Se ha inferido que el valor detectado en la conductividad eléctrica del agua de P01 está influenciado por la dirección de flujo subterráneo el cual puede haber arrastrado sales y lixiviados hacia él; además, el pozo P01, no presentó variación en su nivel piezométrico (Figura 55); es decir que el agua subterránea fluye desde el pozo P03 y P04 hacia P01, lo cual aunado a la baja transmisividad de la zona, puede estar influyendo en la presencia y permanencia de una pluma contaminante.

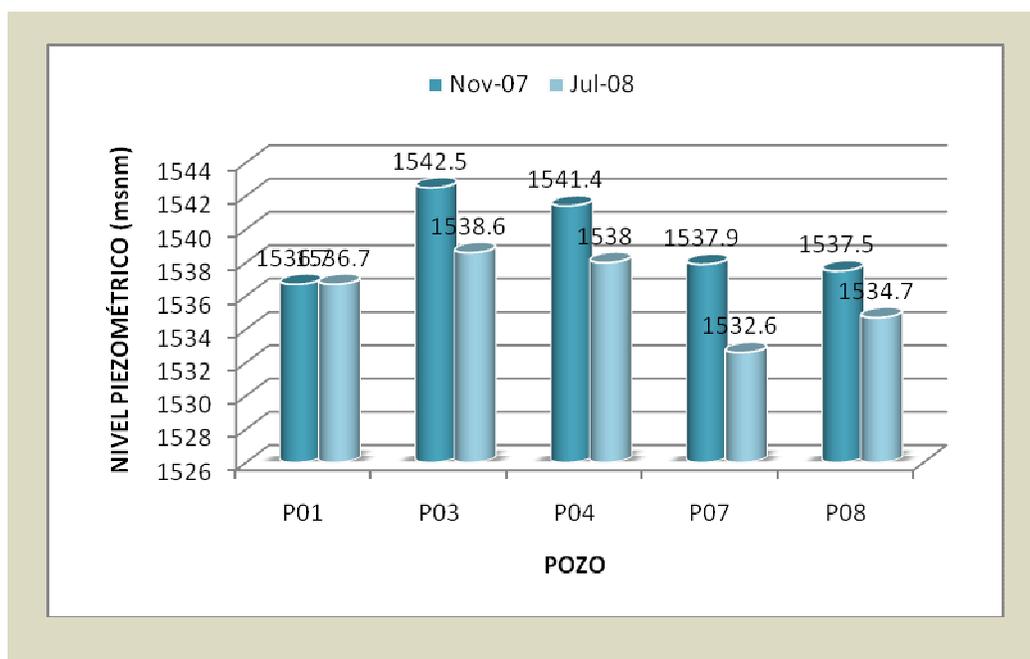


Figura 55. Variación del nivel freático. Puede observarse un abatimiento de 3 m relación a los datos obtenidos en noviembre del 2007.

Un tercer dato de control fue el análisis de metales pesados en suelo. Este análisis (Tabla 7) indica la presencia de aluminio (Al), arsénico (As), bario, (Ba), calcio (Ca), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), escandio (Sc), estroncio (Sr), fierro (Fe), fósforo (P), magnesio (Mg), manganeso (Mn), níquel (Ni), potasio (K), sodio (Na), zinc (Zn) y titanio (Ti). Varios de estos elementos se pueden encontrar en la composición mineralógica del suelo ya que se cuenta con la presencia de silicoaluminatos, óxidos de fierro, carbonatos de calcio y magnesio y sílice, entre otros, por lo que algunos de ellos no pueden considerarse como contaminantes, si bien una fracción puede provenir de la lixiviación del TMCO (Tabla 8).

Ahora bien, es importante resaltar que existen metales (Sb, Sn, Mo y Pb) detectados en el lixiviado y que no se encuentran en el suelo debido a que aun no han sido transportados o quizá estén presentes en trazas. De manera similar existen metales en el suelo que no se encuentran en el lixiviado (As y Mn). Este comportamiento puede explicarse si se considera que la muestra analizada es de un lixiviado joven, comparado con las 2 décadas de acumulación de lixiviados en el suelo y que durante este tiempo la composición de la basura ha cambiado considerablemente. El agua que se analizó, aunque no es representativa de la calidad del agua de la zona, brinda una idea del importante papel que juega el suelo en la neutralización y retención de una pluma contaminante, ya que es necesario destacar que, a la fecha (2008) el agua del pozo P01 es prácticamente es potable, siendo la característica más desfavorable la dureza que presenta y los metales detectados no infringen la normatividad vigente.

De manera que integrando los datos obtenidos de los tres métodos geofísicos manejados en esta investigación y ajustándolos con los datos de control establecidos, se propone el modelo 2D mostrado en la Figura 56 para representar el comportamiento de la Laguna de Lixiviados.

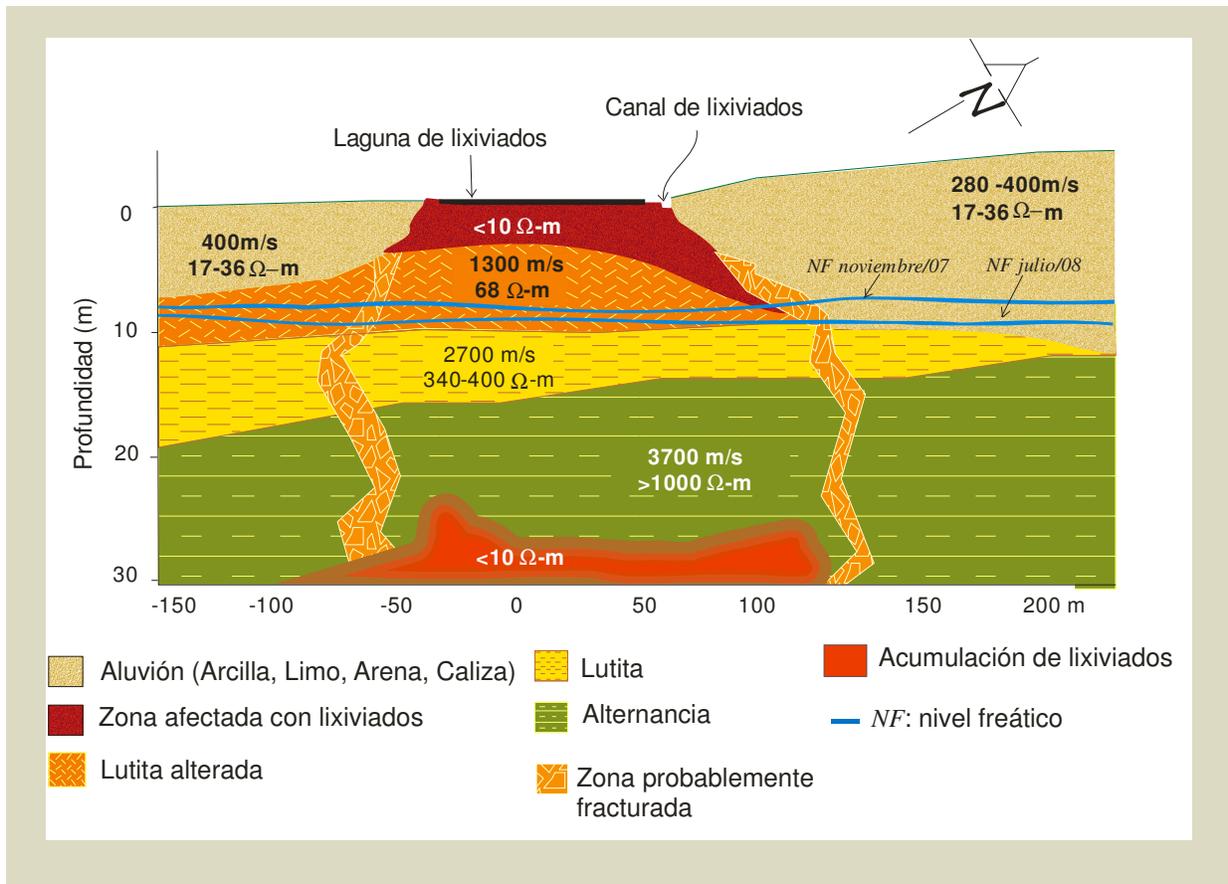


Figura 56. Modelo hidrogeológico de la Laguna de Lixiviados.

Puede observarse que debajo de la Laguna el suelo se encuentra altamente contaminado con lixiviados. Nótese también que la Laguna se encuentra en una zona afectada por el sistema de la falla de Oaxaca es decir, en una zona fracturada, por lo que se infiere que estas fracturas conducen los lixiviados al lecho rocoso, situación detectada por el método EM y el eléctrico de resistividad como una anomalía a una profundidad de 30 m, aproximadamente.

La Figura 57 muestra un modelo 3D de la Laguna de lixiviados. Este modelo se propone utilizando los resultados obtenidos a partir de la inversión de datos del método EM realizada con CICEM-35. Las zonas fracturadas se obtuvieron a partir de los datos de resistividad eléctrica. En Esta figura se pueden apreciar afloramientos de Lutita y Arenisca, así como el estrato somero de material aluvial, también se señala la dirección preferencial de la falla de Oaxaca ( $10^\circ$  NO).

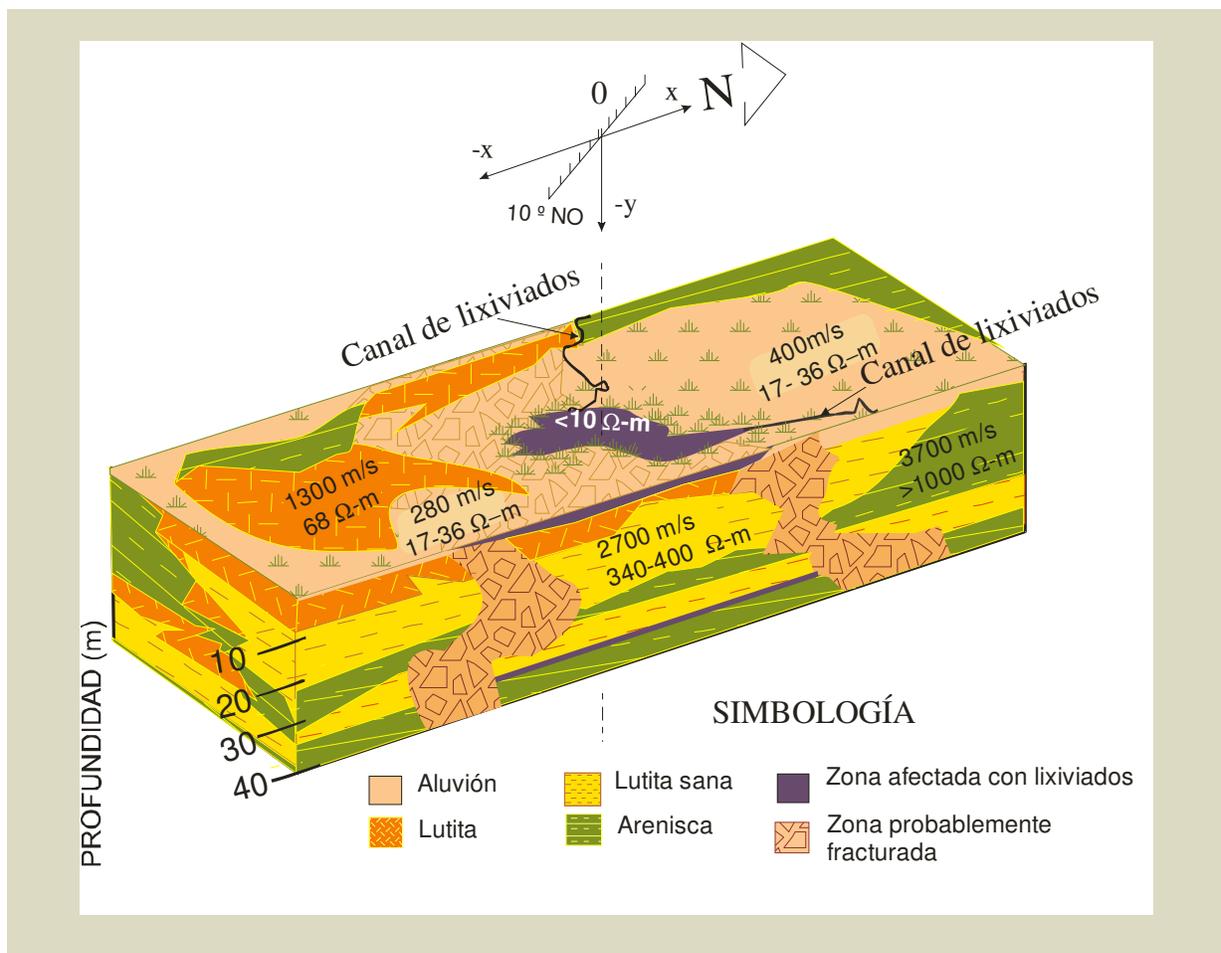


Figura 57. Modelo 3D propuesto para la Laguna de Lixiviados.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

---

#### V.1 CONCLUSIONES

En esta tesis se realizó la integración del método sísmico de refracción, el método electromagnético y el método eléctrico de resistividad para el estudio y detección de una pluma contaminante proveniente del Tiradero Municipal de la Ciudad de Oaxaca.

El método electromagnético fue útil para detectar la zona contaminada de manera global, pero no para delimitar estructuras geológicas, por lo que se utilizó el método sísmico de refracción ya que permitió identificar las estructuras de manera más clara, principalmente gracias a cambios significativos en las velocidades del medio. La configuración dipolo-dipolo estableció las variaciones laterales del comportamiento resistivo del suelo, mientras que los sondeos eléctricos verticales comprobaron el espesor del medio granular indicado por el método sísmico y detectaron zonas fracturadas en la laguna de lixiviados. Los parámetros de control establecidos (análisis fisicoquímicos de lixiviado, suelo y agua) proporcionaron datos que restringen y corroboran la información geofísica obtenida, además indican la posibilidad de que los contaminantes acumulados en la Laguna de Lixiviados no afectan aún el manto freático, gracias a la composición mineralógica del sitio y a los parámetros hidráulicos del suelo.

A través del análisis de los datos geofísicos y los datos de control se ha propuesto un modelo hidrogeológico para la Laguna de Lixiviados en el que se infiere la presencia de una zona fracturada por la que se infiltran estos contaminantes al subsuelo. Es necesario recordar que las fracturas presentadas en los modelos de las Figuras 56 y 57 no son zonas puntuales, mas representan un área probablemente afectada por el sistema de la Falla de Oaxaca. Asimismo, se determinaron valores de resistividad eléctrica asociados con la presencia de lixiviados (menores a  $10 \Omega\text{-m}$ ), a nivel superficial (3 m), así como una

anomalía (10-20  $\Omega$ -m) encajonada en un medio resistivo (1000  $\Omega$ -m) a una profundidad de 30 m, que se deduce es la presencia de los lixiviados en el lecho rocoso.

## **V.2 RECOMENDACIONES**

El suelo es un sistema altamente complejo y la presencia de contaminantes en él no sólo se encuentra determinada por las características geológicas del medio, sino por todo un conjunto de procesos, químicos, biológicos, físicos e hidrológicos que interactúan entre sí, de manera que es conveniente realizar más estudios que clarifiquen la dinámica del suelo de la Laguna de Lixiviados en la neutralización y difusión de los contaminantes.

Se sugiere que se realicen estudios más específicos sobre la calidad del agua y la variación de sus propiedades correlacionándola con la presencia de contaminantes presentes en el lixiviado y en el suelo.

Es conveniente realizar un muestreo de suelo de manera más detallada con el fin de detectar los metales y/o compuestos presentes en el suelo de la Laguna de Lixiviados y que no existen en el suelo sano.

Sería interesante valorar el papel que juegan la microflora y microfauna en la degradación de contaminantes y determinar quizá las adaptaciones que estos organismos han sufrido durante su exposición a los lixiviados, porque si bien la Laguna de Lixiviados es un sitio altamente contaminado, también puede ser una importante fuente de conocimiento para la prevención y remediación de sitios contaminados.



## ANEXO A PRODUCTIVIDAD ACADÉMICA

---

---

Jiménez-Castañeda, M. E.; Bortolotti-Villalobos, A.; Belmonte-Jiménez, S. I. **Los lixiviados producidos por el tiradero municipal de la ciudad de Oaxaca y su relación con el medio hidrogeológico.** II Jornadas Politécnicas 2006. Oaxaca, México. 13 de octubre de 2006.

Jiménez-Castañeda, M. E.; Belmonte-Jiménez, S. I.; Ladrón de Guevara-Torres, M. **Aplicación de algunos métodos geofísicos en problemas ambientales.** III Congreso Nacional Estudiantil de Investigación III Congreso de Investigación Politécnica. Ciudad de México, México. 3 al 5 de octubre de 2007.

Belmonte-Jiménez, S. I.; Jiménez-Castañeda, M. E.; Salazar-Peña, L. **Determinación de la posición de lixiviados producidos por un tiradero, a partir de estudios geofísicos.** Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana 2007. Puerto Vallarta, Jalisco, México. 28 de octubre al 2 de noviembre de 2007.

Jiménez-Castañeda, M. E.; Belmonte-Jiménez, S. I.; Ladrón de Guevara-Torres, M.; Bortolotti-Villalobos, A.; Reyes-López, F. **Respuesta geofísica en el monitoreo espacial de lixiviados producidos por un tiradero, en la ciudad de Oaxaca.** XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Ciudad de México, México. 21 al 26 de abril de 2008.

Jiménez-Castañeda, M. E.; Belmonte-Jiménez, S. I.; Ladrón de Guevara-Torres, M. **Aplicación ambiental de los métodos eléctrico y electromagnético en la detección de lixiviados.** V encuentro participación de la mujer en la ciencia. León, Guanajuato, México. 21 al 23 de mayo de 2008

Belmonte-Jiménez, S. I.; Jiménez-Castañeda, M. E.; Bortolotti-Villalobos, A.; Reyes-López, F. **Evaluación de un suelo contaminado con lixiviados, a partir de métodos indirectos.** IV Congreso Internacional XII Congreso Nacional III Congreso Regional de Ciencias Ambientales. Cd. Obregón, Sonora, México. 4 al 6 de junio de 2008.

Belmonte-Jiménez, S. I.; Jiménez-Castañeda, M. E.; Bortolotti-Villalobos, A. **Estudio de una pluma contaminante producida por lixiviado, utilizando métodos geoelectrónicos.** Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana 2008. Puerto Vallarta, Jalisco, México. 26 al 31 de octubre de 2008.

Jiménez-Castañeda, M. E., Belmonte-Jiménez, S. I. **Delineación de la contaminación subterránea producida el tiradero de la ciudad de Oaxaca, México, utilizando métodos indirectos.** 11<sup>º</sup> foro Estatal de Investigación Científica y Tecnológica. Oaxaca, México. 11 de diciembre de 2008

## REFERENCIAS

---

---

1. Abu-Zeid N.; Bianchini, G.; Santarato. G.; Vaccaro, C. (2004) **Geochemical characterisation and geophysical mapping of Landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy)**. *Environmental Geology* 45 pp. 439–447. DOI 10.1007/s00254-003-0895-x.
2. Asfahani, J. (2007) **Goelectrical investigation for characterizing the hydrogeological conditions in semi-arid region in Khanasser valley, Syria**. *Journal of Arid Environments* 68 pp. 31–52.
3. Atekwana, B.; Sauck, W.; Werkem, D. (2000) **Investigations of goelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site**. *Journal of Applied Geophysics* 44 pp. 167–180.
4. Bauer, P.; Supper, R.; Zimmermann S.; Kinzelbach, W. (2006) **Goelectrical imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana**. *Journal of Applied Geophysics* 60 pp. 126–141.
5. Belmonte-Jiménez, S.; Campos-Enríquez, J.; Alatorre-Zamora, M. (2005) **Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, México**. *Geofísica Internacional* 44 (3) pp. 283-300.
6. Bengtsson, L.; Bendz, D.; Hogland, W.; Rosqvist, H.; Aksson, M. (1994) **Water balance for landfills of different age**. *Journal of Hydrology* 158 pp. 203 – 217.
7. Buselli, G.; Lu, K. (2001) **Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods**. *Journal of Applied Geophysics* 48 pp. 11 – 23.
8. Batu, V. (1998) **Aquifer Hydraulics. A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis**. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY.
9. Bauer, P.; Supper, R.; Zimmermann S.; Kinzelbach, W. (2006) **Goelectrical imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana**. *Journal of Applied Geophysics* 60 pp.126–141.

10. Chandra, S.; Anand Rao, V.; y Singh. V. (2004) **A combined approach of Schlumberger and axial pole–dipole configurations for groundwater exploration in hard-rock areas**. Current Science 86(10) pp. 1437- 1442.
11. CICESE, 2006 Release. **Geophysical's Application Server Project: 2D Resistivity And EM Inversion**. <http://arcada.cicese.mx/geofisica/dc2/index.html>
12. Corwin, D., Lesch, S. (2005 a) **Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. Part I. Survey protocols**. Computers and Electronics in Agriculture 46 pp. 103–133.
13. Corwin, D., Lesch, S. (2005 b) **Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. Part II. Case study**. Computers and Electronics in Agriculture 46 pp. 135–152.
14. Cosenza P.; Marmet, E.; Rejiba, R. Jun Cui , Y.; Tabbagh, A. Charlery, Y. (2006) **Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France**. Journal of Applied Geophysics 60 pp. 165–178.
15. Dávalos-Álvarez, O.; Nieto-Samaniego, A.; Alaniz-Álvarez, S.; Martínez-Hernández, E.; Ramírez-Arriaga, E. (2007) **Estratigrafía cenozoica de la región de Tehuacán y su relación con el sector norte de la falla de Oaxaca**. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 24 (2) pp. 197-215.
16. deGroot-Hedlin, C. and Constable, S. (1990) **Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data**. Geophysics, 55 pp. 1613-1624.
17. De la Vega, M.; Osella, A.; Lascano, E. (2003) **Joint inversion of Wenner and dipole–dipole data to study a gasoline-contaminated soil**. Journal of Applied Geophysics 54 pp. 97– 109.
18. Fatta, D.; Papadopoulos, A.; Loizidou, M. (1999) **A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area**. Environmental Geochemistry and Health, 21 (2) pp. 175-190.
19. Feng, S.; Wang, X.; Wei, G.; Peng.P.; Yang, Y.; Cao, Z. (2007) **Leachates of municipal solid waste incineration bottom ash from Macao: Heavy metal concentrations and genotoxicity** Chemosphere 67(6) pp. 1133-1137 DOI:10.1016/j.chemosphere.2006.11.030.

20. Geonics Limited, **Operating Instructions for model EM-34 & EM-34XL (with digital read out)**, Canada, 1996.
21. Geotomo Software (2006) **RES2DINV 2D Resistivity and IP Inversion**. ver. 3.56.18 semidemo. Malaysia.
22. Gómez-Treviño, E. (1987) **Nonlinear integral equations for electromagnetic inverse problems**. Geophysics, 52 pp. 1297-1302.
23. Griffiths D.H. and Barker R.D. (1993) **Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology**. Journal of Applied Geophysics, 29 pp. 211-226.
24. Higuera-Díaz, C.; Carpenter, P.; Thompson, M. (2007) **Identification of buried sinkholes using refraction tomography at Ft. Campbell Army Airfield, Kentucky**. Environmental Geology 53 pp. 805–812, DOI 10.1007/s00254-007-0693-y.
25. Huheey, J.; Keiter, E.; Keiter, R. (1997) **Química inorgánica. Principios y estructura**. Oxford University Press México.
26. Inman, D.; Freeland, R.; Ammons, J. y Yoder, R. (2002) **Soil Investigations using Electromagnetic Induction and ground-penetrating radar in southwest Tennessee**. Soil Science Society of America Journal 66 pp. 206–211.
27. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (I.N.E.G.I) **Superficie de los tiraderos de basura a cielo abierto y de los rellenos sanitarios, volumen de basura recolectada y vehículos de motor recolectores por región, distrito y municipio hasta el 31 de agosto del 2005**.
28. Kumar, D.; Alappat, B. (2005) **Evaluating leachate contamination potential of landfill sites using leachate pollution index**. Clean Technologies and Environmental Policy 7 pp. 90–197.
29. Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996) **Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method**. Geophysical Prospecting, 44 pp. 131-152.
30. M-MMP-1-06/03. Libro: MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. Parte 1: Suelos y materiales para terracerías. Título: 06. **Granulometría de materiales**

**compactables para terracerías.** Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte.

31. Nieto-Samaniego, A.; Alaniz-Álvarez, S.; Ortega-Gutiérrez, F. (1995) **Estructura interna de la falla de Oaxaca (México) e influencia de las anisotropías litológicas durante su actividad cenozoica.** Revista Mexicana de Ciencias Geológicas (12) 1 pp. 1-8.
32. Nobes, D. (1996) **Troubled Waters: Environmental Applications of Electrical and Electromagnetic Methods.** Surveys in Geophysics. 17 pp. 393-454.
33. Norma Oficial Mexicana **NOM-052-SEMARNAT-2005**, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
34. Norma mexicana **NMX-AA-132-SCFI-2006** Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.
35. Owen, R.; Gwavava, O.; Gwaze, P. (2005) **Multi-electrode resistivity survey for groundwater exploration in the Harare greenstone belt, Zimbabwe.** Hydrogeology Journal 14 pp. 244–252.
36. Park, Y.; Doh, S.; Yun, S. (2007) **Geoelectric resistivity sounding of riverside alluvial aquifer in an agricultural area at Buyeo, Geum River watershed, Korea: an application to groundwater contamination study.** Environmental Geology 53 pp. 849–859.
37. Pellerin, L. (2002) **Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations.** Surveys in Geophysics 23 pp. 101–132.
38. Pérez-Flores, M.; Gómez-Treviño, E. (1997) **Dipole-Dipole resistivity imaging of the Ahuachapan-Chipilapa geothermal field, El Salvador.** Geothermics 26 pp. 657-680.
39. Pérez-Flores, M.A., Méndez-Delgado, S. y Gómez-Treviño, E. (2001) **Imaging low-frequency and DC electromagnetic fields using a simple linear approximation.** Geophysics, v. 66, pp. 1067-1081.
40. Pirttijärvi, M. **DCINV 1-D** Interpretation of electrical (DC) soundings ver 1.4 Finland 2005.

41. Porsania, J.; Filho, W.; Elisa, V.; Shimelesa, F.; Douradob, J.; Mourab, H. (2004) **The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil.** Journal of Applied Geophysics 55 pp.199– 209.
42. Proyecto de Norma Oficial Mexicana **PROY-NOM-SSA1-250-2007**, Agua para uso y consumo humano. Límites máximos permisibles de la calidad del agua, control y vigilancia de los sistemas de abastecimiento.
43. Rodríguez, R. **Procesos de contaminación acuífera y su relación con cambios climáticos.** First International Conference on Climatic Change in México. Taxco, Guerrero, México 5-9 de julio 1993.
44. Rogenhagen, J.; Jokat, W.; Hinz, K.; Kristoffersen, Y. (2004) **Improved seismic stratigraphy of the Mesozoic Weddell Sea.** Marine Geophysical Researches Volume 25, (3) pp. 265-282 DOI 10.1007/s11001-005-1335-y.
45. Rosqvist, H; Dahlin, T; Fourie A; Röhrs, L; Bengtson, A; Larsson , M. **Mapping of leachate plumes at two landfills sites in South Africa using geoelectrical imaging techniques.** Proceedings of 9th. International Waste Management and Landfill Symposium, 2003.
46. Sharma, P. (1997) **Environmental and engineering geophysics.** Cambridge University Press. Reino Unido.
47. Sherif, R. (1989) **Geophysical Methods.** Prentice Hall. U.S.A.
48. Singhal, B.; Gupta R. 1999.**Applied hydrogeology of fractured rocks,** Kluwer Academic Publishers Netherlands.
49. Sundararajan, N.; Srinivas, Y., Narasimha Chary, M.; Nandakumar, G.; Hanmantha C. (2004) **Delineation of structures favorable to groundwater occurrence employing seismic refraction method: A case study from Tiruvuru, Krishna district, Andhra Pradesh A.** The Proceedings of the Indian Academy of Sciences: Earth and Planetary Sciences, 113 (3) pp. 259 267.
50. Summer, M. (2000) **Handbook of Soil Science** CRC Press. U.S.A.
51. Sun, B.; Zhao, F.; Lombi, E.; McGrath, S. (2001) **Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA** , Environmental Pollution 113 pp. 111-120.
52. Telford, W.; Geldart, L.; Sheriff, R. (1990) **Applied Geophysics.** Cambridge University Press, U.S.A.

53. Thales Navigation. (2000) **Astech Solutions** ver. 2.60 U.S.A.
54. Valenta J. y Dohnal, J. (2007) **3D seismic travel time surveying a comparison of the time-term method and tomography (an example from an archaeological site)** Journal of Applied Geophysics 63 pp. 46–58
55. Williams, C.; Agassi, M.; Letey, J.; Farmer, W.; Nelson, S. y Ben-Hur, M. (2000) **Facilitated Transport of Napropamide by Dissolved Organic Matter Through Soil Columns.** Soil Science Society of America Journal 64 pp .590-594.
56. Yan, Z.; Clayton, R.; Saleeby, J. (2005)**Seismic evidence for step faults cutting highly attenuated continental basement in the central Transverse ranges, California. Geophysical Journal International.** 160, pp. 651-666. DOI:10.1111/j.1365-246X.2005.02506.x
57. Yoon, G.; Park. J. (2001) **Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils.** Journal of Hazardous Materials B84 pp. 147–161.



