



Universidad Nacional Autónoma de México

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**FUENTES ENFOCADAS EN LA POLARIZACIÓN INDUCIDA Y
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA APLICADAS EN LA LOCALIZACIÓN DE
ACUMULACIÓN DE METALES, EN UNA PARCELA DE CULTIVO EN EL
VALLE DEL MEZQUITAL**

**TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

AIDE ESMERALDA LÓPEZ GONZÁLEZ

TUTOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

DR. ANDRÉS TEJERO ANDRADE

MÉXICO, D. F. ABRIL DE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A CONACyT y a la Facultad de Ingeniería, que a través de la División en Ciencias de la Tierra se logró realizar el trabajo de campo, con el apoyo de viáticos y transporte.

A Juan Uresti, a mi familia y a la señora Obdulia Galván y su familia, por ser apoyo en días difíciles.

Al equipo de trabajo de campo: Sandra Esteves, Pablo Aguirre, Mauricio Rosas, Daniel Pinales y Alejandro García, quienes realizaron una gran labor para extraer las muestras de suelo y generaron un buen ambiente de trabajo.

Al Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Ciudad Universitaria; vía Dra. Blanca Lucía Prado Pano, quien me proporcionó el sitio de aplicación de la técnica de tomografía de resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas y proporcionó el apoyo económico para analizar en el laboratorio los suelos muestreados en campo; al Técnico Académico Jorge René Alcalá Martínez por su guía y paciencia en el laboratorio de Física de Suelos; a la maestra KumiKKo Shimada Miyasaka quien trabajó los análisis de suelos en el laboratorio de Edafología Ambiental, quien además salvaguardó el material restante para su posterior análisis textural; a la Dra. Olivia Zamora Martínez por analizar de manera pronta y expedita los metales de los suelos lixiviados.

A mi amiga Jejanny Lucero Hernández, con quien compartí el sitio del trabajo de campo y experiencias de crecimiento personal.

Por último y no por ello el menos importante, al Dr. Andrés Tejero Andrade, primero por su amistad y después por su asertiva creación de propuestas en la ciencia y la técnica, él es el alma de este trabajo.

RESUMEN

La literatura de prospección geoelectrica muestra la problemática que existe en arreglos convencionales para delimitar zonas de interés en exploración y contaminación, lo cual ha creado la necesidad de avanzar en nuevas modalidades en las técnicas de resistividad y polarización inducida. El enfoque de esos trabajos se ha centrado en la disminución en las lecturas del ruido de tipo telúrico, potencial espontáneo y sistemático: acoplamiento inductivo electromagnético, acoplamiento en electrodos por cambios en la corriente y contaminación de canales.

Sin embargo, en el trabajo presente se propone la creación de nuevos parámetros geoelectricos tanto resistivos como de cargabilidad, en los que se emplean las segundas diferencias para disminuir los ruidos mencionados anteriormente, al emplear fuentes múltiples enfocadas la corriente se enfoca verticalmente al punto de atribución asignado. La suma de efectos de las fuentes disminuye los acoplamientos de los canales y electrodos, los efectos laterales de las heterogeneidades del subsuelo adyacente al punto de medición y ruidos sistemáticos.

Las modelaciones de los parámetros en dos semiespacios con frontera vertical muestran que dichos parámetros, sin necesidad de inversión de los mismos, delimitan muy bien la frontera, sobre todo en el caso de datos de fuentes enfocadas.

Los parámetros propuestos se pusieron a prueba comparándose con estudios tradicionales resistivos y de cargabilidad en un sitio agrícola en el Rancho Las Palmas dentro del municipio de Tlahuelilpan, que se encuentra aproximadamente a 100 km al norte de la Ciudad de México en el Estado de Hidalgo, con antecedentes de acumulación por fenómenos de sorción y/o precipitación de metales pesados a través del riego rodado de aguas residuales.

Se realizó una línea de tomografía con datos de resistividad y cargabilidad tratados de manera tradicionales y con arreglos de fuentes enfocadas para obtener los parámetros propuestos (sin inversión numérica). Con estos últimos, se obtuvieron las pseudosecciones de interpretación con las cuales se encontraron zonas de anomalías bajo-resistivas y alta cargabilidad, que de acuerdo a la literatura, corresponden a zonas de acumulación mineral y en este caso, de tipo metálica. Se realizaron muestreos direccionados conforme a las pseudosecciones obtenidas de la prospección geoelectrica. Los análisis químicos de las muestras de las perforaciones manuales corroboran las hipótesis de las interpretaciones de los parámetros desarrollados en esta tesis, a diferencia de las

respuestas resistiva y de cargabilidad interpretadas con la técnica tradicional, en las que no hubo indicios contundentes de las zonas de concentración metálica en el subsuelo.

ÍNDICE TEMÁTICO

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Orígenes de fuentes enfocadas	1
1.2 Tipos de ruido en las lecturas geoelectricas	2
1.2.1 Ruidos sistemáticos	2
1.2.2 Ruido por forma de onda del transmisor	3
1.2.3 Ruido por contaminación de canales	5
1.2.4 Ruido por acoplamiento inductivo.....	6
1.2.5 Ruidos por electrodo	7
1.2.6 Ruidos aleatorios	9
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo general:	10
1.3.2 Objetivos particulares:	10
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
2.1 Teoría de Polarización Inducida en el dominio del tiempo con fuentes enfocadas ...	11
2.1.1 Definición de Polarización Inducida.....	11
2.1.2 El campo electromagnético en medios dispersivos	13
2.1.3 PI en el Dominio del Tiempo y Resistividad Aparente	19
2.2 Definición de resistividad y cargabilidad de segundas diferencias	26
2.2.1 Resistividad aparente de segundas diferencias.....	26
2.2.2 Cargabilidad de segundas diferencias	27
2.3 Desarrollo de las ecuaciones para la obtención de la resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas.....	28
2.3.1 Resistividad aparente de fuentes enfocadas	31
2.3.2 Cargabilidad aparente de fuentes enfocadas	32
2.3.3 Punto de atribución para las resistividades y cargabilidades de segundas diferencias y en fuentes enfocadas	33
CAPÍTULO III. MODELACIÓN DE UN CONTACTO LATERAL	35
3.1 Parámetros de modelación	35
3.1.1 Determinación de potenciales.....	35
3.2 Resultados de la modelación.....	37

3.2.1	Resultados de los parámetros resistividad y cargabilidad aparentes para una arreglo tradicional dipolo dipolo	37
3.2.2	Resultados de los parámetros resistividad y cargabilidad en fuentes enfocadas	39
CAPÍTULO IV. EJEMPLO DE CAMPO Y METODOLOGÍAS		42
4.1	La importancia de los suelos en la exploración geofísica y ambiental.....	42
4.1.1	Los suelos y su composición.....	42
4.1.2	Contaminación de suelos por metales.....	43
4.1.3	Interacciones físico-química-biológicas de los metales con el suelo	44
4.2	Introducción al sitio de estudio	46
4.2.1	Información Geológica-Edafológica	46
4.2.2	El Valle del Mezquital.....	49
4.2.3	Localización del estudio geoelectrico.....	50
4.3	Metodologías.....	51
4.3.1	Levantamiento Geofísico	51
4.3.2	Metodología en el muestreo de suelo y análisis de laboratorio	56
CAPÍTULO V. RESULTADOS		60
5.1	Resultados geofísicos de las pruebas de campo: resistividad y cargabilidad.....	60
5.1.1	Resultados de la resistividad y cargabilidad aparentes de fuentes enfocadas ...	61
5.1.2	Resultados de los datos de segundas diferencias	64
5.1.3	Resultados de la inversión de datos tomados de manera tradicional	67
5.2	Resultados edafológicos	71
5.2.1	Topografía.....	72
5.2.2	Resultados de los barrenos que obtuvo el grupo de Monitoreo Ambiental	73
5.2.3	Perfiles Edafológicos	74
5.3	Resultados de laboratorio de las muestras de suelo	78
5.3	Discusión de Resultados.....	83
5.3.1	Calidad de los datos.....	83
5.3.2	Pseudosecciones de resistividad y cargabilidad enfocadas vs resistividad y cargabilidad invertidas de fuentes izquierda y derecha	83
5.3.3	Observaciones de campo y pseudosecciones de resistividad y cargabilidad enfocadas.....	84
5.3.4	Concentraciones de metales en resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas así como en inversiones de datos de fuente izquierda y derecha.....	85
5.3.5	Parámetros físicos de los suelos y resistividad-cargabilidad	86

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
6.1 Conclusiones	87
6.2 Recomendaciones	88
ANEXO	90
A) Perfiles de suelo (tomado de Monitoreo Ambiental Informe final, 2013)	90
B) Metodología para la obtención de la textura de las muestras de suelos obtenidos en campo 92	
REFERENCIAS	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura (a). Construcción de los apilamientos por superposición de las respuestas impulsivas. Editada de Fiandaca <i>et al.</i> (2012).....	4
Figura (b) Decaimientos en tiempo de corriente en apagado para diferentes apilamientos.	4
Figura (c) Apilamientos para el tiempo de corriente en encendido.....	4
Figura (d). Porcentaje de la diferencia entre decaimientos con diferente número de apilamientos	5
Figura 1. Esquemas de tipos de polarización. Izquierda: electrónica. Derecha: de membrana.....	12
Figura 2. Modelo de capas de roca mineralizadas y su equivalencia en circuitos eléctricos. Modificado de Bleil (1953) y Pelton (1978).	13
Figura 3. Comportamiento de la cargabilidad a través del tiempo.....	20
Figura 4. Polo-Dipolo.....	24
Figura 5. Esquema de los electrodos para la toma de datos diferenciados. a) Fuente izquierda. b) Fuente derecha. M, C y N son los electrodos de potencial y tienen las mismas coordenadas tanto para la fuente izquierda como para la fuente derecha. Los números 1 y 2 representan los cuadripolos de medición.	26
Figura 6. Esquema de los electrodos para fuentes enfocadas. . Los números 1 y 2 corresponden a los cuadripolos de lectura, que son los mismos para ambas fuentes.	29
Figura 7. Representación esquemática de los vectores de corriente eléctrica en un semiespacio homogéneo para fuentes enfocadas (Davydycheva et al., 2006).....	29
Figura 8. Separación electródica para arreglos de fuentes enfocadas.	34
Figura 9. Modelo de 24 electrodos y dos semiespacios homogéneos de contacto vertical.	35
Figura 10. Resistividad aparente de los datos de modelación para una fuente.	38
Figura 11. Cargabilidad aparente de los datos de modelación para una fuente.	38
Figura 12. Gráfica de la resistividad aparente con fuente izquierda para los primeros 4 niveles de la modelación sintética.	39
Figura 13. Resistividad aparente de fuentes enfocadas de los datos de modelación.....	39
Figura 14. Cargabilidad aparente de fuentes enfocadas de los datos de modelación.....	40
Figura 15. Gráfica de la cargabilidad aparente de segundas diferencias para los primeros 5 niveles de la modelación sintética.	40
Figura 16. Gráfica de la resistividad aparente de fuentes enfocadas para los primeros 4 niveles de la modelación sintética.	41
Figura 17. Gráfica de la cargabilidad aparente enfocada para los primeros 4 niveles de la modelación sintética.	41
Figura 18. Sección de la carta geológica-minera de Mixquiahuala F14-C89 editada, correspondiente al municipio de Tlahuelilpan, Hgo (Servicio Geológico Mexicano, 2002).	48
Figura 19. Localización de la zona de estudio. El símbolo P2 representa al piezómetro 2 cercano a la línea de tomografía geoelectrica.....	51
Figura 20. Imagen de la línea de tomografía sobre la parcela de estudio en Rancho Las Palmas, Hgo. Modificado de Google Earth V 7.0.3.8542, 2013.	52
Figura 21. Fotografía editada de la línea de tomografía.....	53

Figura 22. Curvas de nivel proporcionadas por INEGI, 2013. P2 representa el piezómetro cercano a la línea de tomografía.....	54
Figura 23. Ventana triangular o de Bartlett en el dominio del tiempo (izquierda) y su respuesta espectral en el dominio de la frecuencia (derecha), N=21.....	56
Figura 24. Muestreo con perforadora manual.....	57
Figura 25. Pseudosección de resistividad aparente de datos de fuentes enfocadas. P2 simboliza al piezómetro 2.....	61
Figura 26. Pseudosección de cargabilidad aparente de datos de fuentes enfocadas.....	62
Figura 27. Resistividad de datos invertidos con la fuente izquierda.....	63
Figura 29. Resistividad aparente de datos de segundas diferencias obtenidos con la fuente izquierda.....	64
Figura 30. Cargabilidad aparente de datos en segundas diferencias obtenidos con la fuente izquierda.....	65
Figura 31. Resistividad aparente de datos en segundas diferencias obtenidos con la fuente derecha.....	66
Figura 32. Cargabilidad aparente de datos en segunda diferencias obtenidos con la fuente derecha.....	66
Figura 33. Resistividad de datos invertidos con la fuente izquierda. Separación electródica de 1m (puntos negros en superficie).....	68
Figura 34. Cargabilidad de datos invertidos con la fuente izquierda. Separación electródica de 1m (puntos negros en superficie).....	68
Figura 35. Gráfica cruzada de datos medidos versus calculados de la inversión de datos tomados con fuente izquierda.....	69
Figura 36. Resistividad de datos invertidos con la fuente derecha. Separación electródica de 1m (puntos negros en superficie).....	70
Figura 37. Cargabilidad de datos invertidos con la fuente derecha. Separación electródica de 1m (puntos negros en superficie).....	70
Figura 38. Gráfica cruzada de datos medidos versus calculados de la inversión de datos tomados con fuente derecha.....	71
Figura 39. Puntos de medición con el teodolito y forma de la parcela, donde ● son esquinas,- es la línea de tomografía y por último ■ son perfiles y barrenaciones.....	72
Figura 40. Topografía de la parcela. La línea negra gruesa representa la línea de tomografía y P2 el piezómetro de referencia.....	72
Figura 41. Probable dirección del flujo superficial del agua en la parcela Cedros II. La línea azul representa la línea de tomografía y P2 el piezómetro de referencia.....	73
Figura 42. Fotografía del perfil 1(izquierda) y perfil 2 (derecha) en la parcela Cedros II, Rancho Las Palmas. Tlahuelilpan, Hidalgo. Autor: C. Siebe.....	75
Figura 43. Razón de elementos para a) punto de muestreo M3; b) punto de muestreo M4; c) punto de muestreo M5; d) punto de muestreo M6; e) punto de muestreo M7.....	81
Figura 44. Coeficientes de correlación lineal R^2 entre datos de fuentes enfocadas y concentraciones de los elementos de las muestras de suelo.....	82
Figura 45. Coeficientes de correlación lineal R^2 entre datos invertidos y concentraciones de los elementos de las muestras de suelo.....	82

Figura (i) Representación esquemática de un perfil en campo. Siebe et al., 2006.....	91
Figura (ii) Fotografías de las muestras en proceso de desecación después de la remoción de materia orgánica (izquierda) y del centrifugado, después de la remoción de materia orgánica en el enjuague del NaCl (derecha).	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla (a). Desviaciones estándar de las distribuciones de probabilidad del error para mediciones de resistividad y cargabilidad en los electrodos.	8
Tabla 1. Profundidad de Investigación para arreglo dipolar en Segundas Diferencias y Fuentes Enfocadas.	34
Tabla 2. Metales que se encuentran normalmente co-precipitados con minerales secundarios en los suelos. Tomada de Cayetano (2012).	43
Tabla 3. Concentración de metales pesados en el suelo (mg/kg) tomada de Cayetano (2012).	50
Tabla 4. Valores límites de detección de los elementos para el ICP-OES.	58
Tabla 5. Reporte de datos para procesamiento de datos de segundas diferencias y de fuentes enfocadas.	61
Tabla 6. Claves y profundidades de los muestreos de suelo.	62
Tabla 7. Observaciones en barrenaciones.	73
Tabla 8. Perfiles edafológicos.	74
Tabla 9. Densidades aparentes de los perfiles edafológicos de Tlahuelilpan.	77
Tabla 10. Porcentaje de humedad y Resistividad Enfocada de las muestras.	78
Tabla 12. Concentraciones de referencia totales por tipo de uso de suelo. SEMARNAT (2007)	80

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Orígenes de fuentes enfocadas

La idea de fuentes enfocadas surge de los trabajos de Davydycheva *et al.* (2006), en el que se plantea el uso de dos fuentes actuando simultáneamente en la misma zona de estudio lineal (para Tomografía de Resistividad Eléctrica -TRE- con Polarización Inducida – PI-), debido a que el uso de dos fuentes, elimina las corrientes axiales en el receptor, ya que se sabe que los ruidos asociados a toda prospección eléctrica son el potencial espontáneo (por sus siglas en inglés, SP), corrientes telúricas, polarización de los electrodos, distorsión por acoplamiento inductivo y efectos electromagnéticos producidos por fuentes artificiales o antropogénicos. Estas fuentes de error están relacionados con el tipo de arreglo electródico, la calidad del equipo de medición, las reacciones electroquímicas asociadas a los componentes del subsuelo a prospectar y a la cercanía de fuentes electromagnéticas artificiales.

Davydycheva *et al.* (2006) proponen utilizar un parámetro basado en las segundas diferencias del potencial ya que es sensible a variaciones locales de la resistividad, esto es

$$\sum_{AB} \frac{\Delta V^2(t)}{\Delta V(t)} \quad (a)$$

Esto significa que se suman las relaciones de las segundas diferencias sobre las primeras de la fuente A, con las relaciones respectivas de la fuente B. El tiempo de los pulsos de medición usualmente es de 2, 4 u 8 segundos, tiempo en el que los procesos transitorios en la formación de investigación deberían terminar. Mientras que en el numerador y en el denominador decae el potencial con el tiempo, la relación de la ecuación (a) permanece constante sobre un semiespacio homogéneo polarizable.

Este método ha probado la reducción drástica de la influencia de inhomogeneidades superficiales y de la impedancia del contacto de los electrodos, por lo que se obtiene información detallada de estructuras más profundas.

Sin embargo, la ecuación (a) propuesta por Davydycheva *et al.* (2006), tiene como denominador la diferencia de potencial (o la lectura de campo) que contiene aún errores producidos por ruido de diferentes fuentes, por lo cual se tratarán a continuación algunos registrados en la literatura.

1.2 Tipos de ruido en las lecturas geoelectricas

Durante el procesamiento de la información, es común realizar filtros (en frecuencia) o ventanas (tiempo) para resaltar la *señal*, o la parte de la información que queremos medir respecto a todo lo demás, también llamado ruido de fondo. Entonces se define como *ruido*, a todo aquello que es parte del dato adquirido pero que no proporciona información sobre el fenómeno esperado.

Por ello es importante tener claro el objetivo en la adquisición de datos para observar aquellos factores que pudieran perturbar las mediciones. Los ruidos más mencionados han sido: ruidos sistemáticos, por contaminación de canales, por la forma de onda del transmisor-receptor

1.2.1 Ruidos sistemáticos

Este tipo de errores resultan de la naturaleza no-ideal del sistema de mediciones o procedimientos, y están correlacionados al sistema de funciones y no pueden ser removidos con promedios en los datos. Los errores descritos por LaBrecque *et al.* (2007) son tres: errores en la calibración del voltaje y corriente; pérdidas y acoplamiento en cables, multiplexores y conectores, y por último, la impedancia de electrodos (ver apartado 1.2.5).

En cuanto a los errores por calibración tanto de voltaje como de corriente se ha observado que, debido al calor causado por estrés en los circuitos de transmisión como de recepción, es más propenso a causar cambios en la calibración a lo largo del tiempo de la toma de datos.

Otro tipo de error sistemático es debido a la impedancia de entrada finita de los circuitos receptores con la impedancia de los electrodos de recepción. Por ejemplo, para un circuito sencillo donde se tienen 10 mega-Ohm de impedancia de contacto, los voltajes revividos podrían tener valores 0.2 % por debajo de los valores correctos. En la práctica, los manuales de operación de equipos de medición geoelectrica, se recomienda realizar mediciones con impedancias menores a 1 kilo-Ohm,

y es muy difícil encontrar condiciones de mega-Ohm, sin embargo es importante considerar las impedancias de contacto suelo-electrodo-conectores-cable.

1.2.2 Ruido por forma de onda del transmisor

Fiandaca *et al.* (2012) muestran que la forma de onda del transmisor difiere de la forma de onda de la corriente, la cual es idealizada en forma de escalón, por dos razones: el tiempo de encendido (y apagado) de la corriente no es infinitesimal, y la forma de onda completa está compuesta por una secuencia de pulsos de longitud infinita.

Por otro lado, tradicionalmente las señales de IP necesitan segundos o decenas de segundos para completar su decaimiento, pero en la práctica, la duración de pulso de corriente en encendido T_{on} raramente excede el tiempo de decaimiento.

La manera usual de medir datos de cargabilidad es aplicando una secuencia de pulsos de corriente alternantes y después se apilan las señales (sustrayendo las señales con signo opuesto para eliminar potenciales espontáneos -SP-). En el proceso de apilamiento, el voltaje j (ecuación b) debido a la influencia del pulso de corriente j puede expresarse en términos de superposición de las respuestas a la función escalón (ver figura a), donde T_{on} representa la duración del pulso de la corriente en encendido y T_{off} es el tiempo entre pulsos consecutivos en los cuales se llevan a cabo las mediciones de IP.

$$V_{stack(j)}(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{k=1}^2 (-1)^{m+k} V_{step} \left(t + (k-1)T_{on} + (j-m)(T_{on} + T_{off}) \right) \quad (b)$$

Donde $V_{step(j)}(t)$ es el potencial en respuesta en el dominio del tiempo a la corriente en forma escalonada.

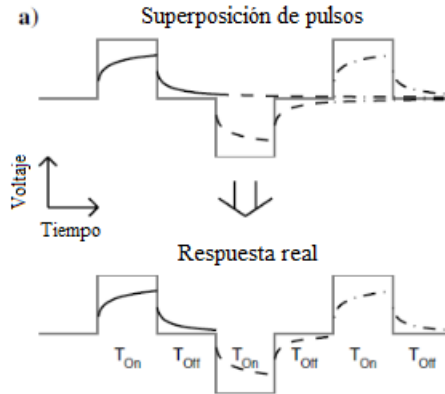


Figura (a). Construcción de los apilamientos por superposición de las respuestas impulsivas. Editada de Fiandaca *et al.* (2012).

Estas características son despreciables en los trabajos tradicionales de TRE y TRE con PI, ya que se han mejorados electrónicamente los equipos de adquisición de datos. Sin embargo, la confiabilidad en las lecturas obtenidas con los nuevos equipos ha dejado de lado la importancia que tiene, al menos para PI, la precisión en la curva de decaimiento del potenciales, crucial para obtener cargabilidades y en su caso, parámetros de Cole-Cole más confiables para su inversión y posterior interpretación como se puede observar en las siguientes figuras (b y c), en las que para los diferentes apilamientos, existen diferencias entre sus decaimientos.

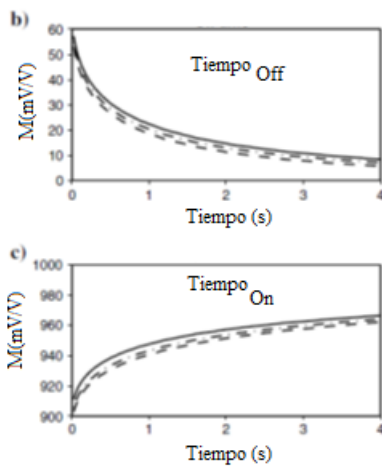


Figura (b) Decaimientos en tiempo de corriente en apagado para diferentes apilamientos.

Figura (c) Apilamientos para el tiempo de corriente en encendido.

Las curvas están graficadas para un semiespacio homogéneo con la expresión del modelo descrito por Cole-Cole con $m_0=100$ mV/V, $\tau=2$ s y $c=0.5$. $T_{off}=T_{on}=4$ s. Las líneas sólidas, las líneas con guiones y las líneas punteadas y con guiones corresponden a la primera señal, la segunda y la tercera inyección de corriente, respectivamente. Editadas de Fiandaca *et al.* (2012).

1.2.3 Ruido por contaminación de canales

Los equipos de medición automatizados han hecho posible la medición de varios cuadripolos de manera simultánea, con esto se reduce el tiempo de medición empleando la misma corriente aplicada al terreno. Por ello, las mediciones de cargabilidad en cada cuadripolo en esa secuencia puede ser influenciada por las que se derivan de las corrientes anteriores, como se muestra en la siguiente ecuación (Fiandaca, *et al.*, 2012):

$$V_{q(n)}(t) = V_A^{AB(n)MN(n)}(t) + \frac{1}{N_S} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{N_S} (-1)^{k+1} V_{stack(N_S)}^{AB(j)MN(n)}(t + T_{dly}) \quad (c)$$

Donde $V_{q(n)}(t)$ es la suma de dos términos: el potencial originado por el cuadripolo n expresado en la ecuación (d) y el potencial producido por todos los cuadripolos previos en la secuencia que dependen también del cambio en el tiempo entre mediciones consecutivas, T_{switch} . $V_A(t)$ es el promedio del potencial y N_S representa el número de apilamientos. El procedimiento de apilamiento expresado en $V_A(t)$ no disminuye el contenido de ruido y suprime el SP, sino que promedia el decaimiento, por ello el número de apilamientos afectan el resultado de la señal.

$$V_A(t) = \frac{1}{N_S} \sum_{j=1}^{N_S} (-1)^{j+1} V_{stack(j)}(t) \quad (d)$$

$$T_{dly} = (T_{switch} + T_{off} + (k - 1)(T_{on} + T_{off})) + (n - j - 1)(2T_{on} + 2T_{off} + T_{switch}) \quad (e)$$

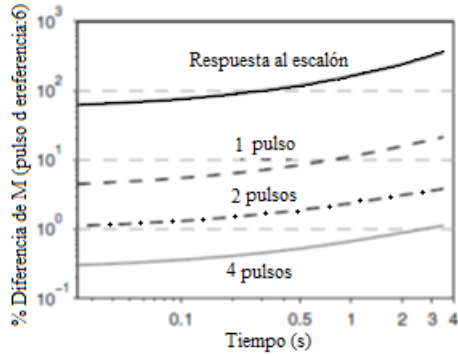


Figura (d). Porcentaje de la diferencia entre decaimientos con diferente número de apilamientos (el decaimiento de referencia usado es el de 6) para un semiespacio homogéneo descrito con los parámetros Cole-Cole ($m_0=100$ mV/V, $\tau=2$ s y $c=0.5$). La línea sólida es la respuesta al escalón. La línea discontinua es de 1 pulso. La línea discontinua con puntos es de 2 pulsos. La línea sólida en gris es de 4 pulsos. $T_{off} = T_{on}=4$ s.

Cuando uno de los electrodos del dipolo de corriente $AB(j)$ coincide con uno de los electrodos del dipolo de potencial $MN(n)$, los efectos de la secuencia del cuadripolo llega a ser dramático, debido a que le toma al electrodo varios minutos para que los efectos de la corriente disminuyan hasta ser despreciables. En otro caso, los efectos en el cuadripolo de la secuencia n estará afectada principalmente por el cuadripolo $n-1$ y su magnitud dependerá de:

- 1) El efecto disminuye con el incremento T_{switch} , T_{off} , T_{on} y N_S , por tanto el tiempo de la adquisición se incrementa.
- 2) El efecto se incrementa cuando aumenta la relación entre $V_{step}^{AB(n-1)MN(n)}$ y $V_{step}^{AB(n)MN(n)}$

Para los arreglos multicanales La Breque *et al.* (2007) ha demostrado que el error en una tierra homogénea con dipolos adyacentes es de 0.33%, el cual es mayor que el error de 0.2% correspondiente a un solo dipolo; por lo que en el presente trabajo, se propone el uso de las segundas diferencias también en el denominador, pero de potenciales adquiridos en diferentes intervalos de tiempo.

1.2.4 Ruido por acoplamiento inductivo

Este fenómeno, también llamado acoplamiento electromagnético, genera ruido en las lecturas de polarización causadas por la impedancia mutua inducida en los circuitos eléctricos enterrados transmisor y receptor, sobre todo en altas frecuencias, grandes distancias o resistividad baja de la tierra (Sherif, 2002).

Los esfuerzos por reducir el ruido en las lecturas de datos de PI también han sido tratados por Flores *et al.* (2012), quienes emplean el uso de lecturas normales y recíprocas en datos de experimentos de laboratorio para cuantificar el error en fase como función de las resistencias medidas, con datos en el dominio de la frecuencia. Este proceso es similar al de fuentes enfocadas en el sentido de que se necesitan dos fuentes (el modo normal tiene la fuente a la izquierda y el modo recíproco tiene la fuente en la derecha, sólo se intercambian los electrodos de corriente por los de potencial y viceversa). La búsqueda de modelos de error, hace énfasis en el error a partir de métodos estadísticos más que en obtener la señal de interés en un ambiente real y mutable, el cual es dependiente de muchas otras fuentes de ruido. Por ello, se determinó emplear el concepto de dos fuentes, definiendo las Segundas Diferencias y las ecuaciones correspondientes para los cálculos de datos de Fuentes Enfocadas, por medio de la superposición de las dos fuentes en Segundas Diferencias calculadas previamente.

1.2.5 Ruidos por electrodo

En la práctica, el empleo del tipo de electrodos usados tanto para resistividad como para cargabilidad, dependen de las condiciones del suelo (ambientales y geométricas) y la reacción que pueda desarrollarse con el electrodo en presencia del flujo de corriente. Esto significa que los electrodos están sujetos a reacciones electroquímicas que también dependen de la temperatura, componentes químicos, estructura molecular, y densidad de corriente.

En los experimentos de LaBreque y Daily (2008) se probaron catorce tipos de electrodos de diferentes materiales como metales, compuestos metálico-salinos y uno de tipo orgánico (carbón), con los que se tomaron lecturas de diferencia de potencial así como transmisión de la corriente y se obtuvieron las desviaciones estándar de dichas lecturas (ver tabla a). Las condiciones experimentales se hicieron tomando en cuenta el tiempo de contacto entre los electrodos y los medios de prueba, que fueron en agua potable y arena parcialmente saturada también con agua potable. Las celdas de la tabla (a) muestran en color azul marino los valores máximos y en verde los mínimos, de donde se observa que el sulfato de cobre presenta los valores más bajos de desviación estándar, seguido de hierro, acero y plomo; el peor, es el aluminio.

Algunas reacciones observadas fueron la generación de gases en el medio acuoso por parte del aluminio así como un óxido insoluble y no poroso, o la corrosión verde-azul en los electrodos de cobre. Otro factor importante fue la galvanización, que genera dos capas, una producida por la polarización de las moléculas del agua ante la corriente y la otra por la acumulación de iones en la superficie del metal llamada capa de Helmholtz (LaBreque y Daily, 2008). Fuera de esa doble capa, se genera otra difusa también llamada difusión iónica, a la cual se le atribuye la causa del fenómeno de la impedancia de Warburg (Wong, 1979).

Tabla (a). Desviaciones estándar de las distribuciones de probabilidad del error para mediciones de resistividad y cargabilidad en los electrodos.												
	Resistividad			Cargabilidad			Resistividad			Cargabilidad		
	Frecuencia (Hz)						Frecuencia(Hz)					
	Electrodo en agua destilada						En arena saturada con agua destilada					
Tipo de electrodo	5	1	0.2	5	1	0.2	5	1	0.2	5	1	0.2
Carbón	0.1	0.14	0.42	0.23	0.2	0.57	0.44	0.46	0.6	1.8	1.45	1.25
Titanio	0.24	0.21	0.21	0.49	0.37	0.67	1.22	1.25	1.18	3.14	3.5	10.41
Acero inoxidable	0.08	0.09	0.16	0.14	0.33	0.34	0.25	0.32	0.29	0.98	1.06	0.41
Bronce	0.06	0.07	0.13	0.19	0.15	0.25	0.98	0.43	0.28	2.71	1.17	0.25
Latón	0.19	0.17	0.26	0.27	0.19	0.23	0.77	0.26	0.26	2.84	1.02	0.44
Cobre	0.27	0.19	0.24	0.27	0.24	0.23	2.05	0.69	0.21	8.62	2.94	0.28
Estaño	0.1	0.14	0.24	0.32	0.26	0.36	0.18	0.26	0.54	0.22	0.27	0.32
Plomo	0.05	0.1	0.11	0.16	0.14	0.16	0.2	0.15	0.17	0.64	0.36	0.31
Varillas de acero	0.3	0.4	0.7	0.15	0.19	0.24	0.17	0.16	0.29	0.52	0.59	0.62
Fierro	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15	0.13	0.05	0.09	0.14	0.15	0.3	0.22
Acero	0.04	0.04	0.14	0.1	0.16	0.14	0.15	0.13	0.17	0.57	0.57	0.28
Aluminio	0.27	0.25	0.88	0.42	0.57	2.35	3.15	3.55	0.77	10.48	23.91	5.01
Zinc	0.29	0.69	0.61	0.51	0.17	0.21	0.17	0.26	0.43	0.66	0.33	0.55
Magnesio	0.49	0.48	0.45	0.65	0.49	0.26	0.47	0.66	0.83	0.85	1.86	2.17
Cu-CuSO4							0.03	0.03	0.03	0.21	0.16	0.08
Caja de resistencias	0.03	0.03	0.02	0.22	0.14	0.06	0.04	0.03	0.03	0.1	0.13	0.05

Nota: las celdas en verde contienen los valores mínimos y las de color azul, los máximos.

Lo anterior muestra que para disminuir los ruidos en los electrodos, se debe contar con electrodos de buena calidad y se usarán según las condiciones del suelo, lo cual puede llegar a ser costoso, según la longitud del arreglo. Estos ruidos aumentan con el tiempo de uso con corriente eléctrica, al menos para el caso de los electrodos de aluminio y en el resto, como por ejemplo en el caso del cobre, debe mantenerse pulida la superficie del electrodo para evitar la oxidación en su superficie. De acuerdo a la propuesta de las segundas diferencias y arreglos de fuentes enfocadas de esta tesis, estos efectos se reducen drásticamente, aunque ello no significa que los electrodos se puedan descuidar, ya que siempre es importante mantener en óptimas condiciones el equipo de medición, incluyendo los conectores.

1.2.6 Ruidos aleatorios

Este tipo de fenómeno es producido por las reacciones electroquímicas entre los minerales y las soluciones con las cuales tienen contacto (Sherif, 1989). Por ejemplo, los cuerpos sulfurosos o grafito, que son buenos conductores, llevan corriente desde una zona de oxidación (por encima del nivel de agua) hacia otra de reducción (por debajo). Las anomalías de este tipo, generalmente son de magnitudes del orden de un volt.

Esta información electroquímica, para el caso de equipos automatizados, es compensada en el momento de la medición de diferencias de potencial mediante la aplicación de corriente en sentido contrario a la del SP. Esto ayuda a disminuir el ruido, aunque no sería recomendable para el caso en el que se desee conocer dicho comportamiento, conocido como el Método de Potencial Espontáneo, que tuvo éxito en el descubrimiento de minas de cuerpos sulfurosos a profundidades someras.

También conocidas como corrientes naturales terrestres, las corrientes telúricas son corrientes que atraviesan la corteza de la Tierra y producen diferencias de potencial, son inducidas por campos variables en el tiempo en la atmósfera, que a su vez, son causadas por el bombardeo de partículas provenientes del sol (Sherif, 1989) o por tormentas eléctricas. Estas corrientes pueden producir anomalías semejantes a las de SP, por lo que no es sencillo separarlas.

Por las consideraciones de errores citadas en la literatura, el empleo de las segundas diferencias, tanto en denominador como en numerador, hace del método propuesto en éste trabajo, un método de mayor precisión para lecturas de PI, para disminuir errores sistemáticos, de electrodo, y algunos aleatorios como ruidos telúricos de bajas frecuencias.

1.3 Objetivos

Dados los antecedentes de la exploración geoelectrica en cuanto a los problemas que se tiene por los ruidos y los procesamientos para mejorar la técnica e interpretación, se tienen los siguientes objetivos.

1.3.1 Objetivo general:

Desarrollar las ecuaciones que describen matemáticamente a los parámetros propuestos de resistividad y cargabilidad aparentes de segundas diferencias así como su empleo para desarrollar los parámetros resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas.

1.3.2 Objetivos particulares:

- 1.- Establecer las ecuaciones de resistividad y cargabilidad de segundas diferencias.
- 2.- Establecer las ecuaciones de resistividad y cargabilidad en fuentes enfocadas.
- 3.- Aplicar los conceptos de resistividad y cargabilidad de segundas diferencias y resistividad y cargabilidad enfocada en un sitio de prueba.
- 4.- Verificar mediante una interpretación cualitativa y otra cuantitativa que el método de fuentes enfocadas y el filtrado, disminuyen el ruido y mejoran la calidad en los datos.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Teoría de Polarización Inducida en el dominio del tiempo con fuentes enfocadas

En este capítulo se describirán los conceptos asociados a la polarización inducida que justifican la propuesta de la tesis presente, cuyo objetivo fundamental radica en proponer parámetros aparentes que tienen como consecuencia, mejorar la calidad de la información para la asertividad en su interpretación. Las ecuaciones de propuesta de los parámetros llevan por nombre *resistividad* y *cargabilidad de segundas diferencias*, y *resistividad* y *cargabilidad de fuentes enfocadas*.

2.1.1 Definición de Polarización Inducida

La PI se descubrió como un fenómeno denominado “over-voltage” o sobre-voltaje (Parasnis, 1973) cuyas patentes primeras las recibiera Conrad Schlumberger en 1912 y se incrementó su investigación para la explotación de yacimientos minerales como oro y cobre en ambientes de difícil acceso por condiciones de profundidad y diseminación.

El diccionario de la SEG (Sherif, 2002), define *polarización* como el momento dipolar por unidad de volumen y a la *polarización inducida* como el momento dipolar de la corriente por unidad de volumen. El parámetro de medición o amplitud de la PI es la *cargabilidad* y se le atribuye ese nombre debido a que el comportamiento físico en la tierra funciona como un sistema capacitivo, que se “carga” o “polariza” al suministrar energía eléctrica al medio. Wong (1979) por su parte, lo define como la *dispersión en bajas frecuencias*, de la conductividad o resistividad entre los materiales de la tierra y el agua que se encuentra en contacto.

Con el paso de corriente eléctrica a través de la roca se crea un campo eléctrico \bar{E} que a su vez, puede producir uno o varios tipos de polarización dependiendo su génesis: acumulación de cargas (interfacial), por movimiento de cargas en un átomo (electrónica), por desplazamiento de iones en la red cristalina (iónica) o bien, por la orientación de las moléculas (bipolar).

Los fenómenos de polarización en el subsuelo han sido investigados por muchos autores y de manera general se han reportado dos tipos: la *polarización electrónica* y la *polarización de membrana*. La primera ocurre cuando los poros del medio que están siendo ocupados por la solución, se encuentran bloqueados por partículas metálicas y la conducción de la corriente que era iónica, se convierte en conducción eléctrica en el metal. Así, la superficie existente entre el metal y el fluido experimenta una polarización, como se muestra en la figura 1 (izquierda). El segundo caso, la polarización de membrana, es causada por la impedancia de interface entre dos medios que resulta cuando, en ciertas regiones de conducción normal en una trayectoria de poro, una capa de difusión es lo suficientemente gruesa para bloquear dicho poro, de manera que hay una transferencia de iones de cierto tamaño y polaridad, reduciendo la movilidad de las cargas causando un almacenamiento que crea una “membrana” polarizada. Generalmente este tipo de polarización ocurre en suelos con algún contenido de arcillas, debido a que poseen una capacidad de intercambio iónico alta que bloquea parcialmente la trayectoria de la solución (figura 1, derecha). De acuerdo con Sogade *et al.* (2006), la polarización de membrana es el efecto de PI observado comúnmente en los mapeos de contaminación.

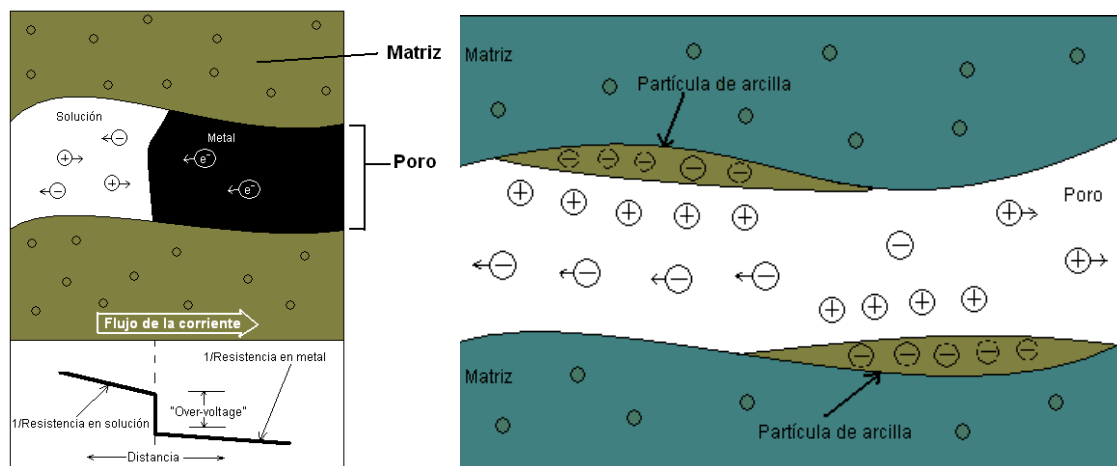


Figura 1. Esquemas de tipos de polarización. Izquierda: electrónica. Derecha: de membrana.

Las definiciones anteriores pueden resumirse mediante una comparación con los efectos que una corriente alterna produce en circuitos eléctricos. En la figura 2 se muestra un modelo geológico bidimensional que representa al tipo de polarización electrónica de dos capas con la intrusión de un cuerpo mineralizado en la segunda. En la parte superior se muestra un arreglo de electrodos en los que A y B corresponden a los de corriente y M y N a los de lecturas del potencial. Las líneas curvas

representan el flujo de la corriente en el subsuelo, que atraviesan la primera capa sin ningún obstáculo, simulando un cuerpo homogéneo que puede representar a su vez una trayectoria de poro con resistividad R_0 en el circuito. Para el caso de la capa inferior (capa de resistividad homogénea R_1), se tiene un medio de características dieléctricas diferente al primero pero circundando un cuerpo mineralizado que representa un poro bloqueado.

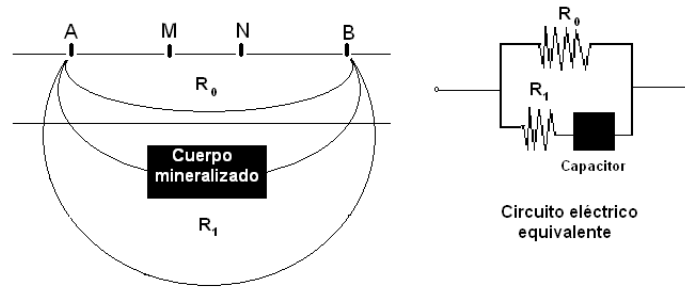


Figura 2. Modelo de capas de roca mineralizadas y su equivalencia en circuitos eléctricos. Modificado de Bleil (1953) y Pelton (1978).

Siguiendo el modelo de circuito equivalente, se puede representar el fenómeno de polarización sustituyendo al cuerpo mineralizado por un capacitor, de ahí que a la respuesta de polarización del medio de investigación también se le llame respuesta *capacitiva*.

2.1.2 El campo electromagnético en medios dispersivos

El campo electromagnético, desde el punto de vista del dominio de la frecuencia, está relacionado con los parámetros del medio (conductividad, σ , permitividad, ϵ , y permeabilidad magnética, μ) a través de la constante de propagación que se define como:

$$k^2 = \omega^2 \epsilon(\omega) \mu + i \omega \sigma(\omega) \mu = i \omega \mu \sigma(\omega) \left(1 - \frac{i \omega \epsilon(\omega)}{\sigma(\omega)} \right) = i \omega \mu \hat{\sigma} = \omega^2 \mu \epsilon(\omega) \left(1 - \frac{\sigma(\omega)}{i \omega \epsilon(\omega)} \right) = \omega^2 \mu \hat{\epsilon} \quad (1.A)$$

Donde $\hat{\sigma}$ es la conductividad compleja y $\hat{\epsilon}$ es la permitividad compleja, de manera que $\hat{\sigma} = -i \omega \hat{\epsilon}$, que también es conocido como la admitividad compleja:

$$\gamma = \sigma(\omega) - i \omega \epsilon(\omega) \quad (1.B)$$

Para muchas de las aplicaciones geo-electromagnéticas (excepto para métodos de frecuencias muy altas como el radar), las corrientes de desplazamiento pueden ser despreciables, de manera que la admitividad llega a ser real o independiente de la frecuencia. A esto se le conoce como aproximación cuasi-estacionaria, donde $k^2 = i\omega\mu\sigma(\omega)$. En el dominio del tiempo también se pueden omitir estas corrientes de desplazamiento. Sin embargo, a continuación se verán las implicaciones de tomar en consideración las variaciones temporales y no la cuasi estacionalidad del campo.

De acuerdo con Kamenetsky (2010), los medios geo-eléctricos en general son vistos como sistemas lineales, los cuales son invariantes en tiempo, están relacionados con el campo electromagnético de un medio sin cargas libres y con disipación de energía térmica únicamente, mediante las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2. A)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\vec{r}, t) = \mathbf{J}_c(\vec{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2. B)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\vec{r}, t) = 0 \quad (2. C)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (2.D)$$

Donde \mathbf{E} y \mathbf{H} son los vectores del campo eléctrico y del campo magnético respectivamente; \mathbf{D} y \mathbf{B} son los vectores de inducción eléctrica y magnética, \mathbf{J}_c es el vector de densidad de corrientes de conducción eléctrica. De la ecuación (2.B) se puede decir que en un medio existen dos tipos de corrientes: las de conducción y las de desplazamiento eléctrico

Las ecuaciones que relacionan las propiedades físicas con los vectores (que se encuentran implícitas en la ecuación 1) son:

$$\mathbf{J}_c(\vec{r}, t) = \sigma(\vec{r}, t) * \mathbf{E}(\vec{r}, t) \quad (3.A)$$

$$\mathbf{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon * \mathbf{E} \quad (3.B)$$

$$\mathbf{B}(\vec{r}, t) = \mu \vec{\mathbf{H}} \quad (3.C)$$

Donde μ constante y (*) es la convolución de las funciones.

En las ecuaciones de Maxwell no es evidente la inclusión del fenómeno dispersivo o PI, fue introducida por primera vez en las ecuaciones electrodinámicas por Kormiltsev en 1989 (Kamenetsky, 2010) mediante la integral de Duhamel (*) que implica la derivada temporal de la integral de convolución, para combinar la componente del campo eléctrico con la función “post-acción” o “espera.

Por otro lado, cabe reiterar que en las ecuaciones de Maxwell se observa que alternando la rotación del campo eléctrico se puede crear cambio temporal tanto en el campo magnético como en la permeabilidad magnética. De manera similar, alternando la rotación del campo magnético se puede causar cambio temporal del campo eléctrico y/o los parámetros eléctricos, cuyo efecto se observa en la segunda ecuación de Maxwell (2.B). La importancia de esta observación radica en el comportamiento del campo eléctrico con corriente alterna, que es la manera en la que se llevan a cabo los estudios geoelectricos.

De acuerdo a la ecuación (3.A) para medios dispersivos y considerando la integral de Duhamel (Kamenetsky *et al.*, 2010) y empleando sólo la componente temporal como dependiente (para una lectura más cómoda), las corrientes de conducción se pueden expresar como:

$$J_c(t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \sigma(t-\tau) \mathbf{E}(\tau) d\tau \quad (4)$$

O en forma alterna como como:

$$J_c(t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \sigma(t-\tau) \mathbf{E}(\tau) d\tau \quad (5)$$

Y considerando la derivada bajo el signo de la integral (fórmula de Leibniz):

$$J_c(t) = \sigma(0) \mathbf{E}(t) + \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} (\sigma(t-\tau) \mathbf{E}(\tau)) d\lambda \quad (6)$$

Asumiendo el valor inicial del campo eléctrico como cero $\mathbf{E}(t)|_{t=0}$, esto es durante la carga (como se muestra en la figura 3). Por otro lado:

$$\int_0^t \frac{\partial}{\partial t} (\sigma(t-\tau) \mathbf{E}(\tau)) d\lambda = \int_0^t \mathbf{E}(\tau) \frac{\partial}{\partial t} \sigma(t-\tau) d\lambda$$

Pero $\frac{\partial}{\partial t} \sigma(t-\tau) = \frac{\partial \sigma(t-\tau)}{\partial (t-\tau)}$, entonces

$$\int_0^t \mathbf{E}(\tau) \frac{\partial}{\partial t} \sigma(t - \tau) d\lambda = \int_0^t \mathbf{E}(\tau) \frac{\partial \sigma(t - \tau)}{\partial(t - \tau)} d\lambda$$

Del teorema de la convolución, se puede escribir que:

$$J_c(t) = \sigma(0)\mathbf{E}(t) + \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (7)$$

De donde se aprecia una corriente de conducción adicional proporcional a la derivada de la conductividad. Si asumimos el cambio de la conductividad con el tiempo, suficientemente lento como para despreciar el último término de (7), quedarán únicamente los efectos de un medio no dispersivo.

Si ahora asumimos el campo eléctrico como una función escalón $E(t) = Eu(t)$, donde $E(0) = 0$.

De la ecuación 7 se tiene que:

$$J_c(t) = \sigma(0)\mathbf{E}(t) + \int_0^t \mathbf{E}u(t - \lambda) \frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial \lambda} d\lambda \quad (8)$$

Entonces:

$$J_c(t) = \sigma(0)\mathbf{E}(t) + \mathbf{E}u(t) \int_0^t \frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial \lambda} d\lambda = \sigma(0)\mathbf{E}(t) + \mathbf{E}u(t)(\sigma(t) - \sigma(0))$$

Por tanto:

$$J_c(t) = \sigma(t)\mathbf{E}u(t) \quad (9)$$

La ecuación anterior nos dice que en $t=0$ la corriente de conducción no están presente y alcanzan un valor estacionario $t=\infty$.

Para las corrientes de desplazamiento eléctrico se tiene de la integral de Duhamel:

$$J_d(t) = \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon(t) * \mathbf{E}(t)) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\varepsilon(t)\mathbf{E}(t) + \int_0^t \mathbf{E}(t - \lambda) \frac{\partial \varepsilon(\lambda)}{\partial \lambda} d\lambda \right]$$

Entonces:

$$J_d(t) = \varepsilon(0) \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}(t) + \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \mathbf{E}(t - \lambda) \frac{\partial \varepsilon(\lambda)}{\partial \lambda} d\lambda \quad (10)$$

De la fórmula de Leibniz:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \mathbf{E}(t-\lambda) \frac{\partial \varepsilon(\lambda)}{\partial \lambda} d\lambda = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} \left[\mathbf{E}(\lambda) \frac{\partial \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)} \right] d\lambda = \frac{\partial \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)} \Big|_{\tau=t} \mathbf{E}(t)$$

Pero:

$$\frac{\partial \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)} \Big|_{\tau=t} = \frac{\partial \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)} \Big|_{t-\lambda=0} = \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \Big|_{t=0}$$

Además

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}(\lambda) \frac{\partial \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)} = \mathbf{E}(\lambda) \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)} \right]$$

Haciendo

$$F(t-\lambda) = \frac{\partial \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} F(t-\lambda) = \frac{\partial F(t-\lambda)}{\partial t} \frac{\partial (t-\lambda)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)^2}$$

Entonces:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \mathbf{E}(t-\lambda) \frac{\partial \varepsilon(\lambda)}{\partial \lambda} d\lambda = \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} \mathbf{E}(t) + \int_0^t \mathbf{E}(\lambda) \frac{\partial^2 \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)^2} d\lambda \quad (11)$$

Sustituyendo (11) en (10):

$$\mathbf{J}_d(t) = \varepsilon(0) \frac{\partial \mathbf{E}(t)}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} \mathbf{E}(t) + \int_0^t \mathbf{E}(\lambda) \frac{\partial^2 \varepsilon(t-\lambda)}{\partial (t-\lambda)^2} d\lambda \quad (12)$$

Por lo que, a diferencia de los medios no dispersivos, existen corrientes de desplazamiento proporcionales a la primera y segunda derivadas de la permitividad. Considerando que el cambio en la permitividad es lo suficientemente lento con el tiempo, entonces el último término de la ecuación (12) se puede despreciar:

$$\mathbf{J}_d(t) = \varepsilon(0) \frac{\partial \mathbf{E}(t)}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} \mathbf{E}(t) \quad (13)$$

En la ecuación anterior el término $\varepsilon(0) \frac{\partial \mathbf{E}(t)}{\partial t}$ es la clásica corriente de desplazamiento, pero el segundo término de la ecuación muestra que se tienen corrientes de desplazamiento eléctrico diferentes a las clásicas en la teoría de campos EM, las cuales se ha comprobado que existen para tiempos menores a 10 μ s.

Sin embargo, considerando un campo $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}u(t)$, las corrientes de desplazamiento eléctrico se expresan como:

$$\mathbf{J}_d(t) = \varepsilon(0) \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}(t) + \left. \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \mathbf{E}(t) \right|_{t=0} + \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \mathbf{E}(t) - \left. \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \mathbf{E}(t) \right|_{t=0}$$

Por lo que:

$$\mathbf{J}_d(t) = \varepsilon(0) \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}(t) + \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \mathbf{E}(t) \quad \text{ó} \quad \mathbf{J}_d(t) = \varepsilon(0) \mathbf{E} \delta(t) + \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \mathbf{E} u(t) \quad (14)$$

La última ecuación enuncia que las corrientes clásicas de desplazamiento eléctrico no existen para $t > 0$. Por otro lado, la derivada temporal de la permitividad se puede considerar como la reacción del medio dispersivo a un cambio de voltaje como escalón. Entonces las corrientes totales serán:

$$\mathbf{J}_t(t) = \mathbf{J}_c(t) + \mathbf{J}_d(t) = \sigma(t) \mathbf{E} u(t) + \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \mathbf{E} u(t)$$

$$\mathbf{J}_t(t) = \left(\sigma(t) + \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \right) \mathbf{E} u(t) \quad (15)$$

Si comparamos la ecuación (15) con la ley de Ohm, el factor que está dentro del paréntesis se puede definir como una conductividad variable en el tiempo, es decir:

$$\mathbf{J}_t(t) = \bar{\sigma}(t) \mathbf{E} u(t) \quad (16)$$

Donde:
$$\bar{\sigma}(t) = \sigma(t) + \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \quad (17)$$

Por tanto, los parámetros σ y ε no son considerados independientes del tiempo en medios dispersivos. Lo descrito anteriormente explica que al haber inhomogeneidades en la distribución de las características electromagnéticas del medio, existe variación temporal de los parámetros eléctricos del mismo, la cual no se puede medir directamente, sólo se miden los efectos totales sobre el campo a través de la diferencia del potencial.

2.1.3 PI en el Dominio del Tiempo y Resistividad Aparente

Para la mayoría de las aplicaciones geo-electromagnéticas, la teoría está basada en aproximaciones cuasi estacionarias debido a que se considera a los semiespacios como medios homogéneos, de manera que se simplifica su análisis. Se considera entonces que las propiedades electromagnéticas dentro de dichos medios no poseen gradientes espaciales ni anisotropía.

Tradicionalmente (Seigel, 1959) define la cargabilidad como:

$$\mu \equiv \frac{\mathbf{E}(t)|_{t=\infty} - \mathbf{E}(t)|_{t=0}}{\mathbf{E}(t)|_{t=\infty}} \quad (18)$$

Si sustituimos $\mathbf{E}(t)|_{t=\infty} - \mathbf{E}(t)|_{t=0} = e_x(t)$ y $\mathbf{E}(t)|_{t=\infty} = E_0$

la cargabilidad queda expresada como:

$$\mu = \frac{e_x(t)}{E_0} \quad (19)$$

O también conocida como cargabilidad instantánea, de manera que en la práctica no puede obtenerse debido a que no hay equipo que pueda medir en un momento el campo eléctrico, sólo se puede medir diferencias de potencial. Por lo anterior, se define el campo eléctrico como sigue

$$e_x(t) = -\frac{dV(t)}{dx} \quad (20)$$

$$E_0 = -\left. \frac{dV(t)}{dt} \right|_{r=\infty} \quad (21)$$

Sustituyendo (20) y (21) en (19):

$$\mu = \frac{\int \frac{dV(t)}{dx} dt}{\int \left. \frac{dV(t)}{dt} \right|_{t=\infty} dt} \approx \frac{\int \frac{\Delta V(t)}{a} dt}{\int \left. \frac{\Delta V(t)}{a} \right|_{t=\infty} dt} \quad (22)$$

Donde a es la abertura del dipolo en la línea de observación. Entonces, la cargabilidad estará dada por:

$$\mu = \frac{\int \Delta V(t) dt}{\int \left. \Delta V(t) \right|_{\infty} dt} \quad (23)$$

Orellana (1974) define la cargabilidad en (ms) integrando la curva de decaimiento en el numerador de la ecuación (23), como se muestra en la (24); por otro lado, también se puede expresar a la cargabilidad normalizada respecto a los tiempos de integración μ_n en ecuación (25), que lleva por unidades (mV/V).

$$\mu = \frac{\int_0^{t_1} \Delta V(t) dt}{\Delta V(t)|_{t=\infty}} \quad (24) \quad \text{y} \quad \mu_n = \frac{1}{\Delta t} \frac{\int_0^{t_1} \Delta V(t) dt}{\Delta V(t)|_{t=\infty}} \quad (25)$$

Donde $\Delta V(t)|_{t=\infty}$ es el valor del potencial medido durante el suministro de la corriente. Cabe decir que el valor de $\Delta V(t)$ propuesto originalmente por Seigel (1959), fue concebido teóricamente medido justo en el corte del suministro de corriente, que por incapacidad instrumental y efectos electromagnéticos, no es posible medir. En la gráfica de la figura 3 se muestra el comportamiento del campo en el tiempo.

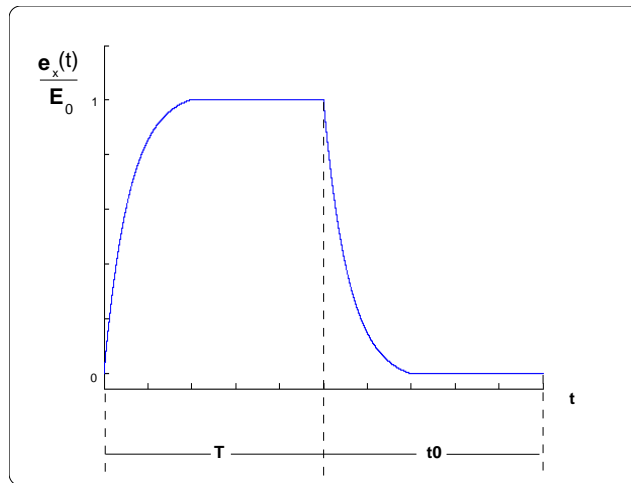


Figura 3. Comportamiento de la cargabilidad a través del tiempo.

Sin embargo, en medios dispersivos (PI) se considera que las rocas contienen micro heterogeneidades, las cuales son caracterizadas por parámetros electromagnéticos (σ, ϵ) variantes en el tiempo (lo suficientemente lento, como se mencionó), lo cual se ha estado determinando experimental y teóricamente. Se tiene entonces que el campo total está compuesto por dos elementos:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{Tr} + \mathbf{E}_{IP} \quad (26)$$

Donde \mathbf{E}_{Tr} es el campo producido por la corriente aplicada y \mathbf{E}_{IP} es el campo asociado a la dispersión.

Para el caso de energización galvánica, el campo eléctrico aumenta aproximadamente en forma exponencial cuando un flujo de corriente eléctrica \mathbf{J}_c en forma de función escalón es introducida en el medio, bajo la condición de que la conductividad o resistividad intrínseca del medio es igual a la del medio dispersivo/polarizable, de manera que la cargabilidad se describe como:

$$\mu_j = \frac{E_{IP}}{E_{Tr}} \quad (27)$$

En el caso inductivo (o cuando ya no se suministra corriente al medio), la forma y duración del pulso de la corriente polarizante en el medio depende de las propiedades del medio, por ello se normaliza la cargabilidad estacionaria entre el campo total estacionario

$$\mu_E = \frac{E_{IP}}{E} \quad (28)$$

Donde $0 \leq m_E \leq 1$.

Con las ecuaciones (26) a (28) se puede escribir lo siguiente

$$\mu_j = \frac{\mu}{1-\mu}, \quad \mu = \frac{\mu_j}{1+\mu_j} \quad (29)$$

En caso de tener cargabilidades bajas, los valores μ y μ_j son muy cercanos el uno al otro, lo cual significa que el medio no retiene carga. En general, el cambio de μ de 0 a 1 resulta un cambio de μ_j de 0 a ∞ , esto es, que el campo cambia abruptamente de $\mathbf{E}(0)=0$ a un valor inicial \mathbf{E}_{Tr} . El campo cambiará gradualmente a un valor estacionario de $\mathbf{E}(\infty)=\mathbf{E}$. El valor de la resistividad o conductividad en un medio dispersivo cambiará en el mismo intervalo de tiempo de un valor $\rho(0)$ o $\sigma(0)$ respectivamente a un valor estacionario $\rho(\infty)$ o $\sigma(\infty)$ respectivamente con la contribución completa en tiempos posteriores. Usando las ecuaciones (26) a (29) junto con las ecuaciones $\mathbf{E}=\rho(\infty)\mathbf{J}_c$ y $\mathbf{E}_{Tr}=\rho(0)\mathbf{J}_c$, se muestra que

$$\rho(\infty) = \rho(0)(1 + m_j), \quad \sigma(\infty) = \sigma(0)(1 - m_E) \quad (34)$$

La ecuación (34) nos muestra que tanto la resistividad como la conductividad cambian de valor desde un tiempo cero hasta infinito, lo que sugiere que ambos parámetros son función del tiempo. Donde $\rho(0)$ no cambia en bajas frecuencias tanto en medios dispersivos como no-dispersivos.

Para el campo $E(t)=1(t) \cdot E$, entonces las corrientes se transforman en

$$J_c(t) = \sigma(0)E[1(t) - \mu(t)] \quad (35)$$

y el valor
$$\sigma(t) = \sigma(0)[1(t) - \mu(t)] \quad (36)$$

Para la resistividad se tiene entonces

$$\rho(t) = \rho(0)[1(t) + \mu_j(t)] \quad (37)$$

Las cargabilidades $\mu(t)$ y $\mu_j(t)$ definen la cargabilidad para la conductividad y la resistividad respectivamente; al comparar por ejemplo la ecuación (37) con la conductividad expresada por la ecuación (17) y considerando que en la ecuación (17) $\sigma(0) = \sigma_0$, la cargabilidad está relacionada a los cambios que experimenta el medio en sus características dieléctricas. También es claro que la cargabilidad es una cantidad adimensional y que la expresión de la ecuación (25) es más recomendada para emplear.

Para describir las ecuaciones (36) y (37) en el dominio de la frecuencias, Pelton *et al.* (1978) adoptó el modelo dispersivo Cole-Cole y considera que dicho modelo es aplicable, también para explicar el comportamiento de la resistividad en medios dispersivos, es decir:

$$\rho(i\omega) = \rho_\infty + \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{1 + (i\omega\tau)^c} \quad (38)$$

donde $c=1-\alpha$; ρ_∞ y ρ_0 son las resistividades en frecuencias altas y bajas respectivamente. De la ecuación (34) se puede definir que $\rho_\infty = \rho(0)$, valor de resistividad en el tiempo cero y $\rho_0 = \rho(\infty)$, valor de la resistividad en el tiempo infinito. Entonces $\rho(i\omega)$ se puede expresar como:

$$\rho(i\omega) = \rho(0) + \left[\frac{\rho(0)(1-\mu_j) - \rho(0)}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \quad (39)$$

$$\rho(i\omega) = \rho(0) \left[1 - \frac{\mu_j}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \quad (40)$$

μ_j varía de cero a infinito, para evitar esto, se puede sustituir μ_j de la ecuación (29):

$$\rho(i\omega) = \rho(0) \left[1 - \frac{\frac{\mu}{1-\mu}}{1+(i\omega\tau)^c} \right] \quad (41)$$

$$\rho(i\omega) = \frac{\rho(0)}{1-\mu} \left[1 - \mu \left(1 - \frac{1}{(i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (42)$$

Pero de la ecuación (34) $\frac{\rho(0)}{1-\mu} = \rho(\infty)$, donde $\rho(\infty)$ es la resistividad a tiempo infinito y corresponde a la resistividad observada bajo condiciones de campo estacionario de tal manera que la expresión de la resistividad en el dominio de la frecuencia se expresa como:

$$\rho(i\omega) = \rho_{dc} \left[1 - \mu \left(1 - \frac{1}{(i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (43)$$

2.1.3.1 Resistividad aparente

Para definir el concepto de resistividad aparente, tradicionalmente se emplea el modelo más sencillo que es una fuente eléctrica puntual, la cual se encuentra en contacto con el subsuelo. Si se considera entonces un campo eléctrico estacionario de radio r y se encierra dicho campo en una superficie Gaussiana la cual genera un volumen (la superficie puede ser esférica, para el caso homogéneo, o irregular), entonces el balance de la corriente que entra y sale de esa superficie para \mathbf{J} será:

$$\int \Delta \cdot \mathbf{J} dv = \oint \mathbf{J} \cdot d\vec{s} = I \quad (44)$$

Entonces:
$$\int \Delta \cdot \mathbf{J} dv = \int I \delta(\vec{r}) dv \quad (45)$$

Por tanto:
$$\nabla \cdot \vec{J} = I \delta(\vec{r})$$

Por otro lado, la función potencial satisface la ecuación:

$$\Delta \cdot (\sigma(\vec{r})) \nabla \varphi(\vec{r}) = I \delta(\vec{r}) \quad (46)$$

La diferencia de potencial que se mediría sería de la Ley de Ohm (ecuación 3.A) donde la convolución se sustituye por un producto para campos estacionarios:

$$\Delta \varphi(\vec{r}) = \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{J}(\vec{r}) \rho(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \quad (47)$$

Para explicar el concepto de resistividad aparente como parámetro anómalo, generalmente se considera un espacio homogéneo e isótropo. El vector densidad de corriente volumétrica para dicho medio es (Orellana, 1974; Telford, 1990):

$$\mathbf{J}(\vec{r}) = \frac{I \sqrt{\vec{r}_u}}{2\pi r^2} \quad (48)$$

Integrando en la dirección x:

$$\Delta\varphi(\vec{r}) = \int_{r_1}^{r_2} \frac{I\rho}{2\pi} \frac{\vec{r}_u d\vec{x}}{r^2} \quad (49)$$

Si r_1 y r_2 son las distancias en la dirección x (ver figura 4)

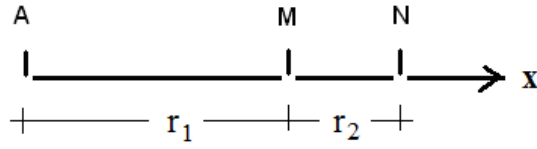


Figura 4. Polo-Dipolo.

$$\Delta\varphi(\vec{r}) = \int_{r_1}^{r_2} \frac{I\rho}{2\pi} \frac{\vec{r}_u d\vec{x}}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2}} = \frac{\rho}{4\pi} \int_{r_1^2+y^2+z^2}^{r_2^2+y^2+z^2} \frac{du}{u^{3/2}} = \frac{\rho}{4\pi} \frac{-2}{\sqrt{u}} \Big|_{r_1^2+y^2+z^2}^{r_2^2+y^2+z^2} \quad (50)$$

Considerando que $y=z=0$

$$\Delta\varphi(\vec{r}) = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{|r_1|} - \frac{1}{|r_2|} \right] \quad (51)$$

El factor $\left[\frac{1}{|r_1|} - \frac{1}{|r_2|} \right] = \frac{1}{K}$, donde a K se le conoce como *factor geométrico* y el cual es función del arreglo eléctrico empleado. Por tanto:

$$\nabla\varphi(\vec{r}) = \frac{I\rho}{K} \quad (52)$$

Si el semiespacio fuese homogéneo e isótropo, sería factible encontrar la resistividad verdadera del medio; para el caso más general esto no es así, por lo que la resistividad deducida de la ecuación anterior se le conoce como *resistividad aparente*.

$$\rho_a = \frac{I\rho}{K} \quad (53)$$

Para el caso de medios dispersivos, donde los parámetros electromagnéticos son función del tiempo, también se puede definir una resistividad aparente.

De la ecuación 3.A, en el dominio de la frecuencia dicha ecuación se expresa como:

$$\mathbf{J}(i\omega, \vec{r}) = \sigma(i\omega, \vec{r})\mathbf{E}(i\omega, \vec{r}) \quad (54)$$

Y por lo tanto $\mathbf{E}(i\omega, \vec{r}) = \rho(i\omega, \vec{r})\mathbf{J}(i\omega, \vec{r})$

Entonces una diferencia de potencial se puede expresar como

$$\Delta\varphi(i\omega, \vec{r}) = \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{E}(i\omega, \vec{r}) \cdot d\vec{r} = \int_{r_1}^{r_2} \rho(i\omega, \vec{r})\mathbf{J}(i\omega, \vec{r}) \cdot d\vec{r} \quad (55)$$

Si consideramos un espacio homogéneo e isótropo

$$\Delta\varphi(i\omega, \vec{r}) = \rho(i\omega, \vec{r}) \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{J}(i\omega, \vec{r}) \cdot d\vec{r} \quad (56)$$

Donde el vector de densidad de corriente

$$\mathbf{J}(i\omega, \vec{r}) = \frac{I(i\omega, \vec{r})}{2\pi r^2} \vec{r}_u \quad (57)$$

$$\Delta\varphi(i\omega, \vec{r}) = \frac{\rho(i\omega, \vec{r})I(i\omega, \vec{r})}{K} \quad (58)$$

Donde $\frac{1}{K} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\vec{r}_u}{r^2} \cdot d\vec{r}$ es el factor geométrico.

La ecuación (58) expresa la diferencia del potencial en el dominio de la frecuencia, para encontrar la expresión en el tiempo y considerando que la corriente inyectada $I(t)=Iu(t)$ donde $u(t)$ es la función escalón y con la condición $I(0)=0$. La ecuación (58) se puede escribir entonces:

$$\Delta\varphi(i\omega, \vec{r}) = \frac{1}{K} \left[\frac{\rho(i\omega)}{i\omega} \right] I \quad (59)$$

Expresada en el dominio del tiempo será:

$$\Delta\varphi(t, \vec{r}) = \frac{\rho(t)}{K} \quad (60)$$

Fórmula muy parecida a la de medios estacionarios. Cuando el medio no es necesariamente un medio homogéneo e isótropo, ecuación (60) define una resistividad aparente temporal:

$$\rho_a(t) = \frac{\Delta\varphi(t, \vec{r})}{I} K \quad (61)$$

2.2 Definición de resistividad y cargabilidad de segundas diferencias

Como se mencionó en la introducción, la idea central de fuentes enfocadas está basada en el trabajo de Davydycheva *et al.* (2006), en el cual se busca reducir ruido de tipo electródico y acoplamiento inductivo mediante la suma de las razones de la segundas diferencias del potencial entre el valor del potencial de cada fuente, este parámetro utiliza los potenciales para eliminar el campo primario y enfatizar el secundario, que es la respuesta de las inhomogeneidades. Este método mostró tener buenos resultados en la búsqueda de anomalías de hidrocarburos, sin embargo, las ecuaciones propuestas a continuación, emplean las segundas diferencias para enfatizar los efectos del campo secundario directamente en los parámetros de resistividad y cargabilidad, de ahí que se nombraran *resistividad y cargabilidad de segundas diferencias*, en las que se toman en consideración otras fuentes de ruido como acoplamiento de canales y efectos sistemáticos.

2.2.1 Resistividad aparente de segundas diferencias

Considere que en el subsuelo existe un campo eléctrico producido por una fuente, como el de la figura (5.a). El campo eléctrico asociado sería $\mathbf{E}(\vec{r})$, del cual se considerará la componente en x ($\mathbf{E}_x(\vec{r})$). Al obtener su derivada en la dirección x, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{E}_x(\vec{r}) = \frac{\partial^2 V(\vec{r})}{\partial x^2} \quad (62)$$

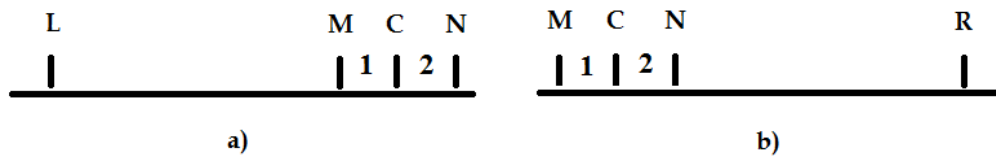


Figura 5. Esquema de los electrodos para la toma de datos diferenciados. a) Fuente izquierda. b) Fuente derecha. M, C y N son los electrodos de potencial y tienen las mismas coordenadas tanto para la fuente izquierda como para la fuente derecha. Los números 1 y 2 representan los cuadrupolos de medición.

Si la ecuación (62) es evaluada para $z=0$ en forma numérica con tres electrodos como se muestra en la figura (5.a) mediante diferencias centrales se tendrá:

$$\frac{\partial^2 V(\vec{r})}{\partial x^2} \cong \frac{\Delta V^2}{\Delta x^2} = \frac{V_M - 2V_C + V_N}{\Delta x^2} = \Delta V_1 - \Delta V_2 \quad (63)$$

De la ecuación (63) se puede definir la resistencia de segundas diferencias, al dividir entre la corriente:

$$\frac{\Delta V^2}{I} = \frac{\Delta V_1}{I} - \frac{\Delta V_2}{I} \quad (64)$$

$$R^2 = R_1 - R_2 \quad (65)$$

Desarrollando (65) con los factores geométricos asociados:

$$R^2 = K_1 R_1 \frac{1}{K_1} - K_2 R_2 \frac{1}{K_2} \quad (66)$$

Escrito de otra forma:

$$R^2 = \rho_1 \frac{1}{K_1} - \rho_2 \frac{1}{K_2} \quad (67)$$

Si el medio es un semiespacio homogéneo e isótropo, se puede definir una resistividad de segundas diferencias, que es igual al semiespacio:

$$\rho^2 = R^2 \frac{K_2 K_1}{K_2 - K_1} \quad (68)$$

Sin embargo, de no cumplirse las condiciones de homogeneidad e isotropía, se define el parámetro anómalo como una resistividad aparente de segundas diferencias:

$$\rho_a^2 = R^2 \frac{K_2 K_1}{K_2 - K_1} \quad (69)$$

Si se hace $K^2 = \frac{K_2 K_1}{K_2 - K_1}$ como el factor geométrico de segundas diferencias entonces (69) se reduce a:

$$\rho_a^2 = R^2 K^2 \quad (70)$$

2.2.2 Cargabilidad de segundas diferencias

Considerando de nuevo que existe un campo eléctrico transitorio $\vec{e}(t)$ y se puede detectar su componente en x , entonces si derivamos con respecto a x e integramos en el tiempo:

$$\frac{\int \frac{dE_x(t)}{dx} dt}{\int \frac{dE_x(0)}{dx} dt} = \frac{\int \frac{d^2V(t)}{dx^2} dt}{\int \frac{d^2V(0)}{dx^2} dt} \quad (71)$$

Entonces, la ecuación que define la cargabilidad de segundas diferencias está dada por:

$$\mu^2 = \frac{\int \frac{d^2V(t)}{dx^2} dt}{\int \frac{d^2V(0)}{dx^2} dt} \cong \frac{\int \frac{\Delta^2V(t)}{\Delta x^2} dt}{\int \frac{\Delta^2V(0)}{\Delta x^2} dt} = \frac{\int \Delta^2V(t) dt}{\int \Delta^2V(0) dt} \quad (72)$$

De la ecuación (63), la ecuación (72) se escribe como:

$$\mu^2 = \frac{\int \Delta V_1(t) dt}{\int \Delta V_1(0) dt} \frac{\int \Delta V_1(0) dt}{\int \Delta V^2(0) dt} - \frac{\int \Delta V_2(t) dt}{\int \Delta V_2(0) dt} \frac{\int \Delta V_2(0) dt}{\int \Delta V^2(0) dt} \quad (73)$$

$$\mu^2 = \mu_1 \frac{\int \Delta V_1(0) dt}{\int \Delta V^2(0) dt} - \mu_2 \frac{\int \Delta V_2(0) dt}{\int \Delta V^2(0) dt} \quad (74)$$

Donde μ_1 y μ_2 son las cargabilidades de los canales 1 y 2. Si el medio fuese homogéneo e isótropo entonces $\mu_1 = \mu_2$ por tanto μ^2 sería igual a la cargabilidad del medio, sin embargo, al no cumplirse dicha condición, la ecuación (74) define la cargabilidad aparente de segundas diferencias:

$$\mu_a^2 = \mu_1 \frac{\int \Delta V_1(0) dt}{\int \Delta V^2(0) dt} - \mu_2 \frac{\int \Delta V_2(0) dt}{\int \Delta V^2(0) dt} \quad (75)$$

2.3 Desarrollo de las ecuaciones para la obtención de la resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas

Enfocar las corrientes puede entenderse de dos maneras: una es pensar en transmitir corriente eléctrica al subsuelo de manera simultánea por medio de dos fuentes colocadas como se muestra en la figuras 6 y 7; la otra manera es pensar en una superposición de fuentes, lo que significa que se aplican en tiempos diferentes pero se puede sumar los efectos de ambas, ya que los campos electromagnéticos al ser campos lineales, el principio de superposición es aplicable. Lo ideal sería en forma simultánea ya que se asegura que los errores sean los mismos para ambas, y como lo hace notar Davydycheva *et al.* (2006), los errores son disminuidos. Sin embargo, también se logra una disminución aceptable sólo por superposición, por ello el desarrollo de los parámetros eléctricos que

a continuación se presentan, están basados en la simultaneidad, mientras que la toma de datos y su tratamiento son en superposición..

La idea principal de emplear fuentes enfocadas es forzar el flujo de corriente a desplazarse verticalmente a la zona donde se encuentran los electrodos de potencial (figuras 5 y 6). Es necesario demostrar entonces que los potenciales de segundas diferencias se suman.

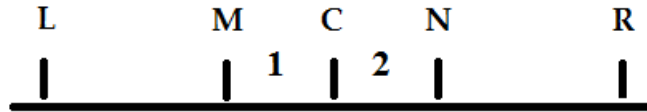


Figura 6. Esquema de los electrodos para fuentes enfocadas. . Los números 1 y 2 corresponden a los cuadrupolos de lectura, que son los mismos para ambas fuentes.

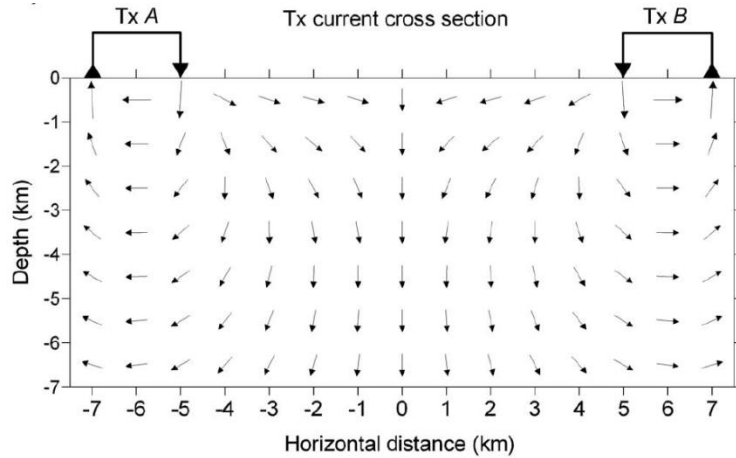


Figura 7. Representación esquemática de los vectores de corriente eléctrica en un semiespacio homogéneo para fuentes enfocadas (Davydycheva et al., 2006).

Consideremos ambas fuentes actuando simultáneamente y los electrodos colineales, entonces el campo eléctrico total en la dirección x será:

$$\mathbf{E}_x = (\mathbf{E}_x^L + \mathbf{E}_x^R)\vec{i} \quad (76)$$

Donde \mathbf{E}_x^L y \mathbf{E}_x^R son las componentes del campo eléctrico en la dirección x para la fuente izquierda y derecha respectivamente, entonces:

$$\mathbf{E}_x^L + \mathbf{E}_x^R = \rho \mathbf{J}_x^L + \rho \mathbf{J}_x^R \quad (77)$$

Derivando la ecuación (77):

$$\frac{\partial E_x^L}{\partial x} + \frac{\partial E_x^R}{\partial x} = \rho \frac{\partial J_x^L}{\partial x} + \rho \frac{\partial J_x^R}{\partial x} + J_x^L \frac{\partial \rho}{\partial x} + J_x^R \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (78)$$

Si se toma en cuenta el sentido de la corriente:

$$J_x^L = |J_x^L|, J_x^R = -|J_x^R| \quad (79.A)$$

Además:

$$|J_x^L| = |J_x^R| \quad (79.B)$$

Al substituir la ecuación (79) en (78):

$$\frac{\partial E_x^L}{\partial x} + \frac{\partial E_x^R}{\partial x} = \rho \frac{\partial J_x^L}{\partial x} + \rho \frac{\partial J_x^R}{\partial x} \quad (80)$$

Por otro lado, considerando que se satisface que la divergencia de la corriente es cero, entonces:

$$\iiint \nabla \cdot J dv = \oint J \cdot d\vec{s} = 0 \quad (81)$$

Donde la integral triple representa las tres coordenadas que demuestran el volumen de terreno donde están los electrodos de potencial. De la ecuación (81).

$$\iiint \nabla \cdot J dv \cong \frac{\partial}{\partial x} J_x \Delta v + \frac{\partial}{\partial z} J_z \Delta v = 0 \quad (82)$$

La componente de J_y es despreciable para electrodos colineales (Davydycheva *et al.*, 2006). De (82):

$$\frac{\partial}{\partial x} J_x = -\frac{\partial}{\partial z} J_z \quad (82.A)$$

Además, de (81):

$$\frac{\partial}{\partial x} J_x \Delta v + \frac{\partial}{\partial z} J_z \Delta v = J_x \Delta y \Delta z + J_z \Delta x \Delta z \quad (82.B)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} J_x = -J_x \frac{1}{\Delta x} \text{ y } \frac{\partial}{\partial z} J_z = -J_z \frac{1}{\Delta z} \quad (82.C)$$

Si hacemos ecuación (82.A) en ecuación (80):

$$\frac{\partial E_x^L}{\partial x} + \frac{\partial E_x^R}{\partial x} = -\rho \frac{\partial}{\partial z} J_z^L - \rho \frac{\partial}{\partial z} J_z^R \quad (83)$$

Ahora la ecuación (82.C) en ecuación (83):

$$\frac{\partial E_x^L}{\partial x} + \frac{\partial E_x^R}{\partial x} = -\rho J_z^L \frac{1}{\Delta z} - \rho J_z^R \frac{1}{\Delta z} \quad (84)$$

Si $E_x = -\frac{dU}{dx}$:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} U^L(x) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} U^R(x) = \frac{\rho}{\Delta z} [J_z^L + J_z^R] \quad (85)$$

La ecuación (85) muestra que la suma de las segundas derivadas de potencial depende del flujo de corriente en la dirección vertical. Una expresión para el cálculo numérico de la segunda derivada para diferencias centrales C por ejemplo.

La desventaja técnica radica en que no existe en el mercado equipos comerciales multifuentes, lo cual impide la simultaneidad de la fuente en un levantamiento geoelectrico. Por ello, se emplearán las ecuaciones obtenidas de las resistividades y cargabilidades de segundas diferencias para obtener la suma de los efectos de las dos fuentes, por superposición, para fuentes enfocadas.

2.3.1 Resistividad aparente de fuentes enfocadas

Al actuar ambas fuentes simultáneamente se tiene que los voltajes de segunda diferencias se suman, del mismo modo se tendría una resistencia, de segundas diferencias por cada fuente, que en la zona donde están los electrodos de potencial, se sumarían, es decir:

$$\sum R^2 = R_L^2 + R_R^2 \quad (86)$$

Donde R_L^2 y R_R^2 están dados por las ecuaciones

$$R_L^2 = \frac{\Delta V_L^2}{I^L} \quad \text{y} \quad R_R^2 = \frac{\Delta V_R^2}{I^R} \quad (87)$$

Si el medio es lineal, homogéneo e isótropo, las resistencias de segundas diferencias serían iguales:

$$\sum R^2 = 2R^2 \quad (88)$$

Si multiplicamos la ecuación anterior por el factor geométrico se tendrá:

$$\sum R^2 K^2 = 2R^2 K^2 \quad (89)$$

Que se puede expresar el término de la derecha de la ecuación (89) como el doble de la resistividad verdadera del medio y por lo tanto:

$$\rho = \frac{1}{2} \sum R^2 K^2 \quad (90)$$

Sin embargo, al no ser realmente el medio un semiespacio homogéneo e isótropo, la ecuación (90) define una resistividad aparente de segundas diferencias para fuentes enfocadas, es decir:

$$\rho_a^2 = \frac{1}{2} \sum R^2 K^2 = \frac{1}{2} (\Delta \bar{V}_L^2 + \Delta \bar{V}_R^2) K^2 \quad (91)$$

Donde $\Delta \bar{V}_L^2$ y $\Delta \bar{V}_R^2$ son voltajes de segundas diferencias normalizados por la corriente de las fuentes. La ecuación (91) también se sostiene para el caso en que las corrientes de ambas fuentes serán iguales, que es lo ideal, sin embargo, debido a las limitaciones técnicas, no es posible garantizar la misma intensidad de corriente en ambas fuentes cuando se opera en campo.

2.3.2 Cargabilidad aparente de fuentes enfocadas

Recordando que las segundas derivadas de los potenciales se suman, entonces:

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{de_x^L}{dx} dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{de_x^R}{dx} dt = - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(t)_x^L}{dx^2} dt - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(t)_x^R}{dx^2} dt \quad (92)$$

Multiplicando y dividiendo por $-\int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(0)_x^L}{dx^2} dt$ y $-\int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(0)_x^R}{dx^2} dt$ a cada elemento de lado derecho de la ecuación anterior, respectivamente:

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{de_x(t)}{dx} dt = \frac{-\int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(t)_x^L}{dx^2} dt}{-\int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(0)_x^L}{dx^2} dt} \left[- \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(0)_x^L}{dx^2} dt \right] + \frac{-\int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(t)_x^R}{dx^2} dt}{-\int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(0)_x^R}{dx^2} dt} \left[- \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V(0)_x^R}{dx^2} dt \right] \quad (93)$$

Pero:

$$\frac{-\int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V_x(t)}{dx^2} dt}{-\int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V_x(t)}{dx^2} dt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{de_x(t)}{dx} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \frac{dE_x(0)}{dx} dt} \quad (94)$$

La ecuación anterior define la cargabilidad de segundas diferencias, entonces:

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{de_x(t)}{dx} dt = \mu_L^2 \left[- \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V_x(0)}{dx^2} dt \right] + \mu_R^2 \left[- \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V_x(0)}{dx^2} dt \right] \quad (95)$$

Si el medio es homogéneo e isótropo $\mu_L^2 = \mu_R^2$, entonces:

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{de_x(t)}{dx} dt = \mu^2 \left[- \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2V_x(0)}{dx^2} dt \right]$$

Que también se puede escribir:

$$\mu_L^2 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{de_x(t)}{dx} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{dE_x(0)}{dx} dt} \quad (96)$$

La ecuación anterior define la cargabilidad de segundas diferencias para fuentes enfocadas, es decir:

$$\sum \mu^2 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{de_x(t)}{dx} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{dE_x(0)}{dx} dt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{d^2V(t)}{dx^2} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{d^2V(0)}{dx^2} dt} \cong \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sum \Delta^2V(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} \sum \Delta^2V(0) dt} \quad (98)$$

$$\sum \mu^2 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{d^2V(t)}{dx^2} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \sum \frac{d^2V(0)}{dx^2} dt} = \mu_L^2 \frac{\Delta^2V_L(0)}{\sum \Delta^2V(0)} + \mu_R^2 \frac{\Delta^2V_R(0)}{\sum \Delta^2V(0)} \quad (99)$$

La ecuación 99 que define la cargabilidad de segundas diferencias, tanto para una ventana como para la global, su expresión práctica es dada por la misma ecuación, el hecho relevante es que la $\sum \mu^2$ no depende de la intensidad de las fuentes.

2.3.3 Punto de atribución para las resistividades y cargabilidades de segundas diferencias y en fuentes enfocadas

Como es costumbre en la prospección eléctrica (así como en otras prospecciones geofísicas), se representan los parámetros anómalos en pseudosecciones, con el objetivo de visualizar la distribución de dichos parámetros en el espacio. Con este fin, se le asigna al parámetro anómalo unas coordenadas, por ejemplo (x, z), donde la coordenada x se acostumbra asignarle el punto medio de la línea que une los dipolos de transmisión y recepción, como es el caso tetra polar. Para el caso de fuentes enfocadas, a la coordenada x le corresponde el punto medio entre ambos dipolos de transmisión, justo debajo del electrodo C de la figura 8.

La determinación de la coordenada z ha tenido variaciones en la manera de calcular su valor; desde Evjen (1938) quien fue el primero en definir la profundidad de investigación como la profundidad en donde se logra la máxima contribución en la señal medida de una capa delgada y horizontal del suelo, hasta Hallof (1957), Alp'in (1966), Edwards (1977), Barker (1991) y Loke (2010). Los tres últimos han mostrado que la profundidad máxima de investigación es la profundidad en la cual el área bajo la curva de la función de sensibilidad es igual a la mitad del total del área bajo dicha curva; la profundidad no depende de la medición de la resistividad aparente o de la resistividad del modelo de tierra homogénea, además de que depende estrictamente y únicamente válido para una tierra homogénea.

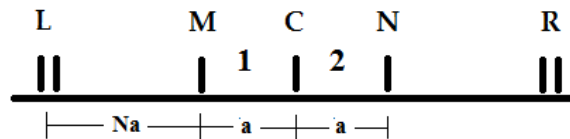


Figura 8. Separación eléctrica para arreglos de fuentes enfocadas.

Por lo anterior, la profundidad de investigación, tanto para resistividad y cargabilidad de segundas diferencias como para resistividad y cargabilidad en fuentes enfocadas, se consideró la sugerencia de Loke (2010), de usar la función de sensibilidad para un medio homogéneo e isotrópico. La siguiente tabla (1) muestra dicha profundidad normalizada con la separación eléctrica en cada nivel, donde el nivel es como se muestra en la figura 8.

Tabla 1. Profundidad de Investigación para arreglo dipolar en Segundas Diferencias y Fuentes Enfocadas.			
Nivel	Z_e/a	Nivel	Z_e/a
1	0.363475	6	1.371427
2	0.585357	7	1.562022
3	0.789023	8	1.751823
4	0.985983	9	1.941063
5	0.179647	10	2.129893

Nota: a = abertura eléctrica

CAPÍTULO III. MODELACIÓN DE UN CONTACTO LATERAL

3.1 Parámetros de modelación

Se propusieron para la modelación, dos semiespacios homogéneos verticales y 24 electrodos con separación electródica de 1m como se muestra en la figura 9. Se usó la cargabilidad de 0.2 y conductividad de 0.1 en el semiespacio 1 (zona azul) y cargabilidad de 0.4 y conductividad de 0.001 en el semiespacio 2 (zona naranja).

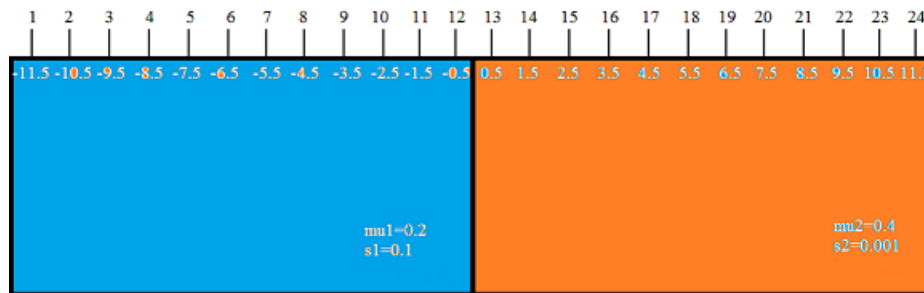


Figura 9. Modelo de 24 electrodos y dos semiespacios homogéneos de contacto vertical.

Así mismo, se muestra el comportamiento por nivel (de los primeros 4 o 5 niveles) de las anomalías generadas con el modelo de la figura 9. Esta es una manera tradicional de interpretar las anomalías, que aunque no es común en artículos recientes, es una herramienta útil para visualizar mejor el comportamiento de los parámetros en cada nivel prospectado, en este caso, modelado.

3.1.1 Determinación de potenciales

La figura 9 es un ejemplo sencillo que nos puede mostrar las diferentes respuestas que se pueden esperar cuando éstas se comparan con la forma tradicional de un levantamiento de polarización inducida.

Recordando que el potencial debido a una fuente puntual en un semiespacio homogéneo e isótropo, como es el considerado para el ejemplo, se expresa como:

$$U(\vec{r}, t) = \frac{I\rho(t)}{2\pi R(\vec{r})} \quad (100)$$

Donde:

$$\rho(t) = \frac{\rho(i\omega)}{i\omega} \quad (101)$$

Por el método de las imágenes para una fuente colocada en la región 1 de la figura 9 (lado izquierdo, color azul), habrá una fuente imagen localizada en la región 2 (lado derecho de la figura 9, color naranja) que representa la contribución de dicha región para el cálculo del potencial para puntos localizados en la región 1. Por otro lado, habrá otra fuente imagen localizada en la región 1 que representa la contribución de dicha región para puntos localizados en la región 2, es decir:

$$U_1(\vec{r}, t) = \frac{I\rho_1(t)}{2\pi R(\vec{r}, \vec{r}')} + \frac{I\rho_1(t)}{2\pi} R_{1,2} \frac{1}{R(\vec{r}, \vec{r}')} \quad (102)$$

$$U_2(\vec{r}, t) = \frac{I\rho_1(t)}{2\pi} T_{1,2} \frac{1}{R(\vec{r}, \vec{r}')} \quad (103)$$

Las ecuaciones 102 y 103 también son válidas para cuando una fuente está localizada en la región dos, sólo hay que hacer los cambios apropiados en la resistividad de la fuente y en los coeficientes de transmisión y reflexión.

$$R_{1,2}(t) = \frac{\rho_2(t) - \rho_1(t)}{\rho_2(t) + \rho_1(t)} \quad (104)$$

$$T_{1,2}(t) = 2 \frac{\rho_2(t)}{\rho_2(t) + \rho_1(t)} \quad (105)$$

Las ecuaciones 104 y 105 son los coeficientes de reflexión y transmisión respectivamente.

La resistividad en el dominio de las frecuencias se expresa como (Pelton, 1978):

$$\rho(i\omega) = \rho_{DC} \left[1 - \mu_0 \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (106)$$

Consideremos un modelo de decaimiento exponencial en el tiempo el cual se logra cuando el exponente c es igual a uno y se multiplica con la función constante menos la función escalón para

representar el comportamiento del potencial cuando se corte la corriente, se tiene en el dominio de la frecuencia (Kamenestky, 2010):

$$\rho(i\omega) \left(\delta(\omega) - \frac{1}{i\omega} \right) = \rho_{DC} \left[1 - \mu_0 \left(1 - \frac{1}{1+(i\omega\tau)} \right) \right] \left(\delta(\omega) - \frac{1}{i\omega} \right) \quad (107)$$

Que al tomar la transformada inversa de Fourier se obtiene (Pelton, 1978; Oldenburg, 1992):

$$\rho(t) = \rho_{DC} \mu_0 e^{-t/\tau} \quad (108)$$

Donde ρ_{DC} es la resistividad determinada en régimen estacionario, μ_0 es la cargabilidad intrínseca y τ es el tiempo de relajación.

3.2 Resultados de la modelación

Se obtuvieron con la modelación las respuestas resistivas y capacitivas para las condiciones del semiespacio propuesto anteriormente, tanto las respuestas tradiciones como segundas diferencias y datos de fuentes enfocadas.

Las pseudosecciones cualitativas con fuentes enfocadas muestran tanto en cargabilidad como en resistividad aparentes una buena aproximación al modelo inicial, a diferencia de las pseudosecciones individuales (normal y recíproco).

3.2.1 Resultados de los parámetros resistividad y cargabilidad aparentes para una arreglo tradicional dipolo dipolo

En la figura 10 se muestra la pseudosección de resistividad aparente para un arreglo dipolo-dipolo con fuente izquierda, se muestran valores mínimos de la parte central hacia la izquierda y valores máximos hacia la parte derecha. Lo mismo ocurre en la figura 11, donde la cargabilidad presenta el mismo comportamiento que la resistividad. En el caso de la fuente derecha ocurre algo similar.

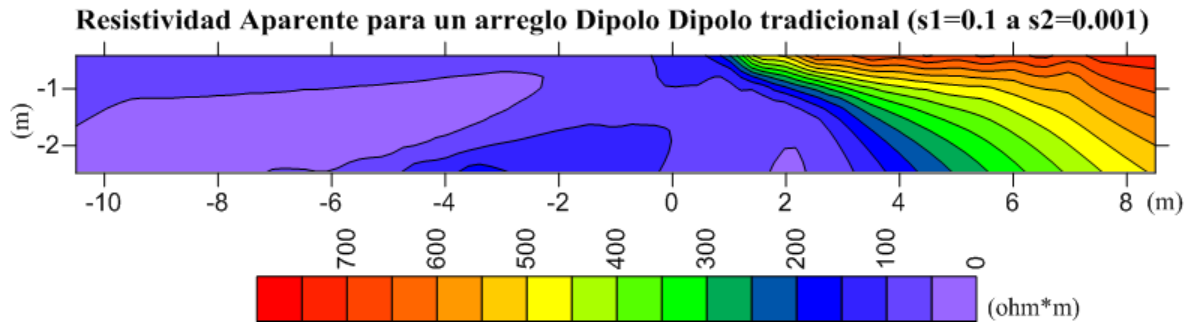


Figura 10. Resistividad aparente de los datos de modelación para una fuente.

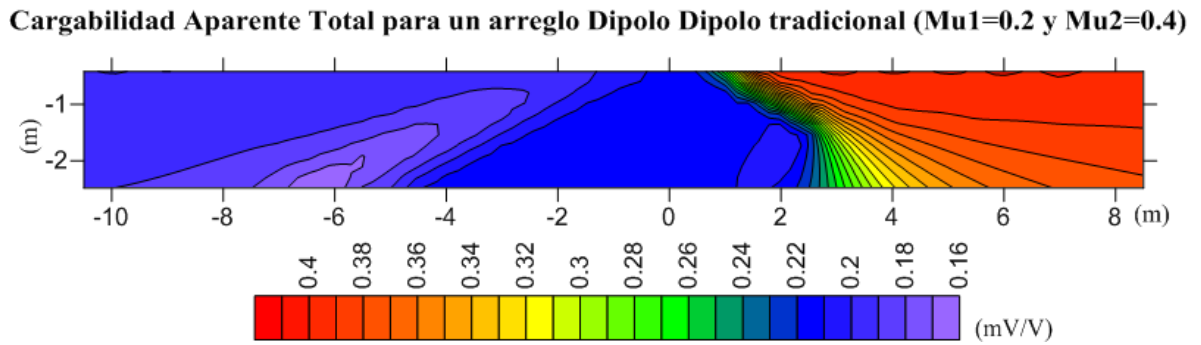


Figura 11. Cargabilidad aparente de los datos de modelación para una fuente.

En la figura 12 se muestra el comportamiento de la resistividad aparente producida por la fuente izquierda (L), en la que se aprecia un aumento significativo entre las posiciones 0.5 y 4.5m. Esto se debe a los efectos de reflexión y refracción en la frontera vertical.

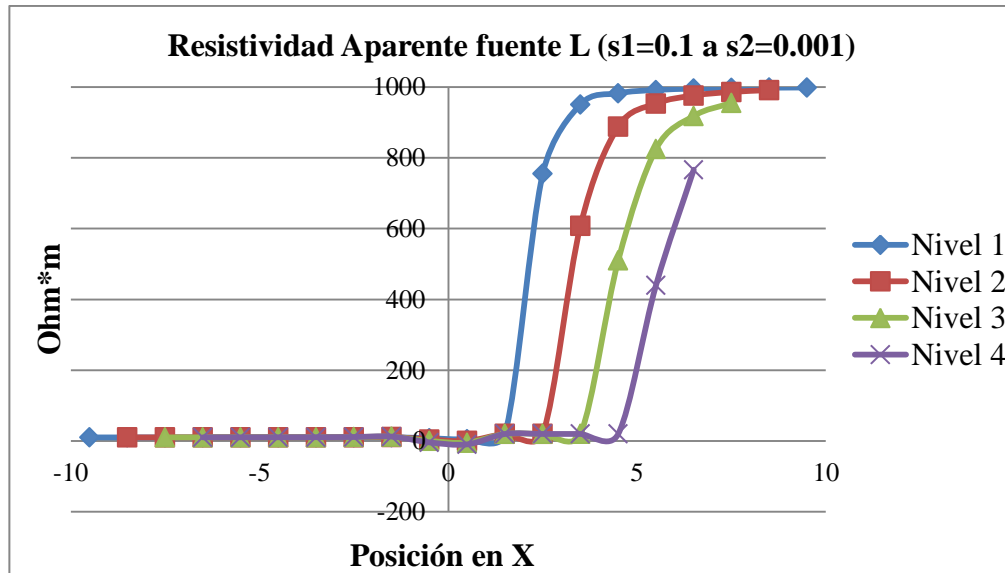


Figura 12. Gráfica de la resistividad aparente con fuente izquierda para los primeros 4 niveles de la modelación sintética.

3.2.2 Resultados de los parámetros resistividad y cargabilidad en fuentes enfocadas

Las figuras 13 y 14 muestran las resistividades y cargabilidades aparentes enfocadas. En la parte central se aprecia una sección de valores máximos para el primer caso y valores medios para el segundo. Esta es la zona de frontera vertical correspondiente al modelo de la figura 9. Por lo que, aun siendo datos aparentes, se detecta la frontera desde el punto de vista de anomalía, los valores de resistividad no representan fielmente los del modelo; a diferencia del caso de la cargabilidad, se aproximan mejor.

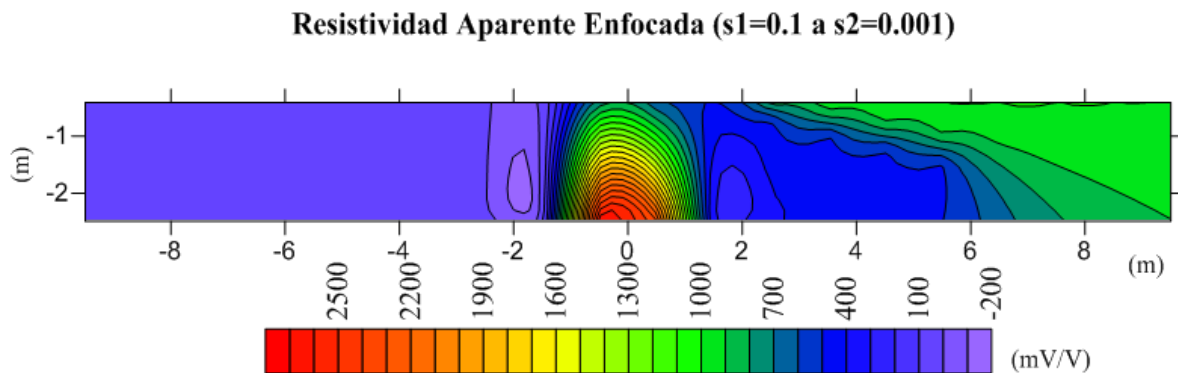


Figura 13. Resistividad aparente de fuentes enfocadas de los datos de modelación.

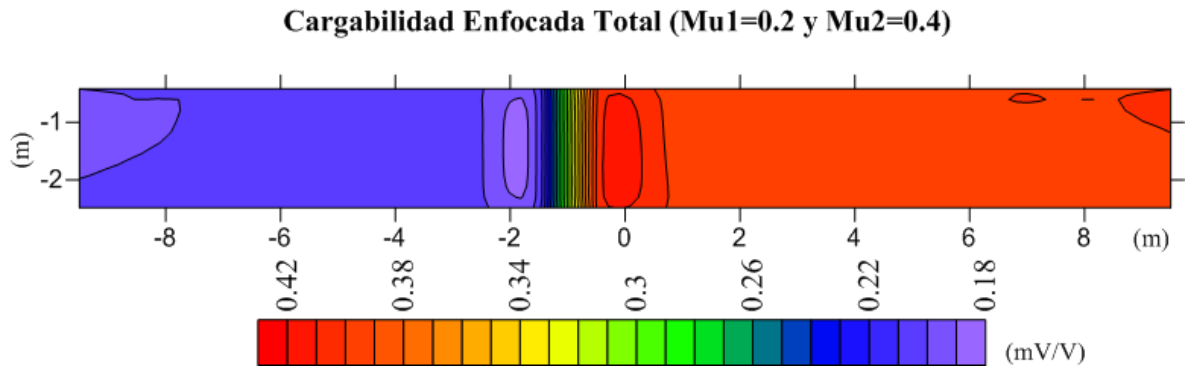


Figura 14. Cargabilidad aparente de fuentes enfocadas de los datos de modelación.

En la figura 15 se muestra el comportamiento por nivel de los datos de Segundas Diferencias de la Cargabilidad para el caso de la fuente derecha. Se aprecia un acercamiento del impulso, producido por la frontera, hacia la posición 0m. Sin embargo, conforme se va profundizando, dicho impulso mantiene un corrimiento a la izquierda producido por la asimetría del arreglo (en caso de tener la fuente en la izquierda ocurre el mismo corrimiento pero ahora hacia la derecha). Lo anterior muestra una mejor definición de la frontera en el semiespacio del modelo propuesto.

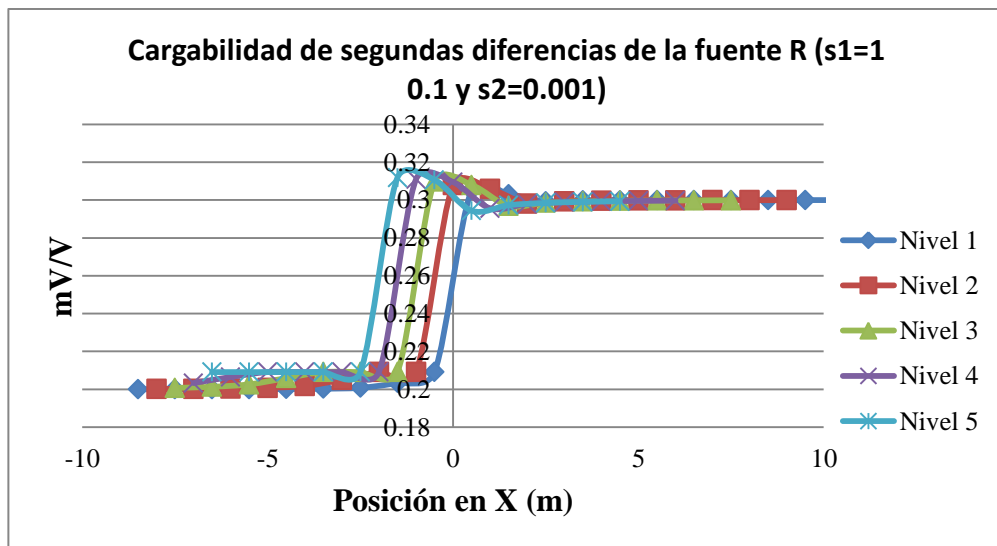


Figura 15. Gráfica de la cargabilidad aparente de segundas diferencias para los primeros 5 niveles de la modelación sintética.

En las figuras 16 y 17 se muestra el comportamiento de las resistividades y cargabilidades Enfocadas para el mismo modelo. En el caso de las resistividades se aprecia un salto en la coordenada 0m, justo en la posición de la frontera vertical.

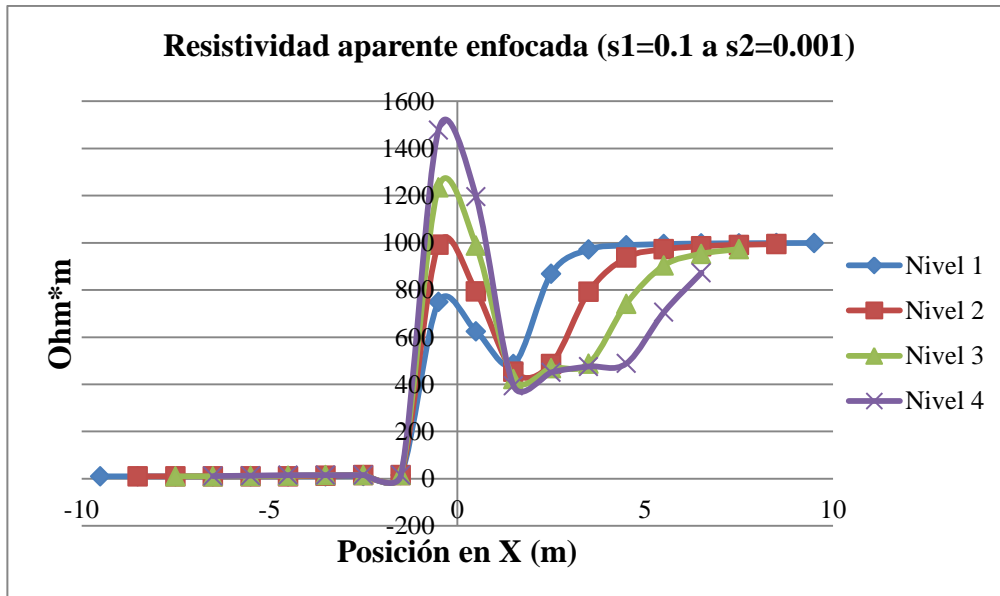


Figura 16. Gráfica de la resistividad aparente de fuentes enfocadas para los primeros 4 niveles de la modelación sintética.

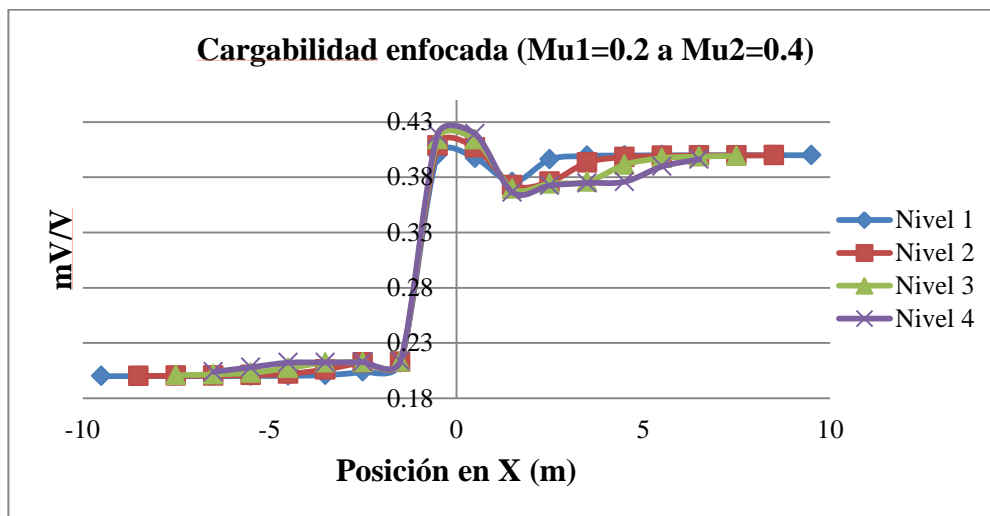


Figura 17. Gráfica de la cargabilidad aparente enfocada para los primeros 4 niveles de la modelación sintética.

En el caso de las cargabilidades, también se muestra un salto en la frontera (0m) y ese salto tiene amplitudes muy semejantes entre los diferentes niveles, que además es de menor amplitud que en el caso de resistividad debido a que la diferencia de cargabilidades (0.4-0.2) es mucho menor que la diferencia de resistividades (1000-10).

Cabe destacar que las cargabilidades descritas con anterioridad corresponden a los valores totales, esto es, a la integral de toda la curva de decaimiento modelada para cada caso.

CAPÍTULO IV. EJEMPLO DE CAMPO Y METODOLOGÍAS

4.1 La importancia de los suelos en la exploración geofísica y ambiental

El suelo es para los estudios geoelectricos el material principal de contacto con los electrodos, por tanto representa el medio de conducción y la primera fuente de ruido en las lecturas de tipo aleatorio, ya que como se describe a continuación, es un medio trifásico dinámico en el que se llevan a cabo diferentes reacciones físicas, químicas y biológicas que alteran tanto la transmisión de corriente como la recepción de información.

4.1.1 Los suelos y su composición

De acuerdo con Alloway (1995) el suelo es un componente clave en los ecosistemas terrestres, tanto naturales como en la agricultura, siendo esencial para el crecimiento de las plantas y la degradación y reciclado de la biomasa muerta. Es un medio heterogéneo que comprende sólidos minerales y orgánicos, y un sistema poroso con componentes acuosas y gaseosas.

Los minerales presentes son usualmente fragmentos de roca intemperada (por descomposición química, física y/o biológica) y minerales secundarios como los filosilicatos o minerales arcillosos, óxidos de hierro, aluminio, manganeso y algunas veces, carbonatos (ver tabla 2). El contenido mineral, desde el punto de vista geoelectrico, genera respuestas conductoras, de manera que las lecturas de la diferencia de potencial lleva la información de todos los metales y/o sales en diferentes estados: cristalinas, disueltas, adsorbidas o atrapadas físicamente (en caso de texturas finas). Por tanto, no se puede determinar el tipo específico de metal sólo con su respuesta resistiva, por ello la cargabilidad es importante, ya que aporta información del medio en relación con la homogeneidad, tamaño de poros y su contenido de fluidos, mediante los parámetros c y τ del modelo Cole-Cole, con lo que se puede mejorar la interpretación encontrando zonas de mayor concentración y/o tamaños de grano.

Tabla 2. Metales que se encuentran normalmente co-precipitados con minerales secundarios en los suelos. Tomada de Cayetano (2012).	
Mineral	Elementos traza co-precipitados
Óxidos de Fe	V, Mn, Ni, Cu, Zn, Mo
Óxidos de Mn	Fe, Co, Ni, Zn, Pb
Carbonatos de Ca	V, Mn, Fe, Co, Cd
Arcillas minerales	V, Ni, Co, Zn, Cu, Pb, Ti, Mn, Fe

La materia orgánica comprende organismos vivos (como microorganismos), materia de plantas muertas y el humus coloidal formado por la interacción de los microorganismos sobre los residuos de plantas. Estos componentes sólidos son usualmente agrupados en forma de agregados, creando un sistema interconectado de poros de varios tamaños, los cuales, dependiendo de su tamaño, interconexión y el tipo de fluido que contienen, pueden ayudar a la transmisión o restricción del flujo de corriente eléctrica. Por ejemplo, si los poros estuvieran ocupados recientemente por hidrocarburos, se obtendría una respuesta resistiva. Si esos hidrocarburos tuvieran cierto tiempo sujetos a la biodegradación producida por microorganismos, se encontraría un halo conductor alrededor del volumen de dichos hidrocarburos.

En el caso de tener agua en los poros del suelo, generalmente se obtienen respuestas conductoras también, debido a la conductividad producida por los iones disueltos en dicho fluido.

Como se describe más adelante (capítulo 4 apartado 2), el sitio de estudio presenta antecedentes de metales pesados en suelo, por ello a continuación se describen algunas generalidades de estos elementos.

4.1.2 Contaminación de suelos por metales

Dentro de la fracción mineral en el suelo, están presentes los metales y metales pesados, los cuales dependiendo de las propiedades del suelo, pueden estar disponibles para la biota y por lo tanto tener efectos tóxicos, en función de la concentración. Las especies químicas en las que se encuentran los metales pueden transformarse unas en otras debido a cambios ambientales (Domínguez, 2008).

Los metales se encuentran en los suelos de manera natural por intemperismo o procesos geológicos, además, las actividades antrópicas como la deposición de desechos urbanos, mineros e industriales, la aplicación de fertilizantes, la precipitación atmosférica de emisiones industriales y automóviles, etc. Introducen metales a los suelos. Es necesario entender los procesos mediante los cuales interactúan con el suelo para determinar su movilidad y/o acumulación y con ello evaluar los riesgos potenciales para los seres vivos.

En años recientes se ha incrementado el interés en la acumulación de metales pesados en el ambiente y particularmente en el suelo, por ser considerados sustancias potencialmente peligrosas. En este sentido, los iones de metal pueden entrar a la solución del suelo de varias formas y a diferentes tasas: pueden permanecer en la solución del suelo, pasar al agua del drenaje, ser tomados por las plantas o retenidos en el suelo, por lo que a partir del suelo, los metales pueden ser transferidos a los organismos vivos a través del agua subterránea o la cadena alimenticia.

En términos geofísicos, la caracterización de suelos contaminados por metales es una tarea complicada, ya que las respuestas de los metales, seas pesados o no, tienen semejanzas que no pueden separarse de los datos tomados de campo. La única manera de determinar si se tienen metales en concentraciones contaminantes o tóxicos, es mediante el muestreo, pero ese muestreo puede ser direccionado con éxito mediante estudios geoelectrónicos realizados con todas las precauciones necesarias del método y con el procesamiento adecuado de la información, motivo por el cual los parámetros que se proponen en esta tesis son una alternativa para mejorar la precisión en la interpretación.

4.1.3 Interacciones físico-química-biológicas de los metales con el suelo

Debido a que la zona de pruebas del presente trabajo se realizó en parcelas con antecedentes de metales pesados, se describen de manera general algunas características físico-químicas que producen o pueden producir acumulación y/o movimiento de metales (contaminantes o no) en el suelo. No es objeto de estudio de la tesis, caracterizar ambientalmente la distribución, acumulación, movimiento y biodisponibilidad de los metales, sino comprender las propiedades del entorno físico-químico que influyen en la respuesta geoelectrónica-capacitiva para los metales en el suelo, sean potencialmente peligrosos o no.

Ciertas propiedades del suelo como el pH, el contenido de materia orgánica, de arcillas, temperatura, la humedad y el contenido de óxidos de hierro alteran la especiación química de los metales en el suelo. De éstas, el pH y el contenido de materia orgánica tienen una gran influencia: el pH ejerce un fuerte efecto sobre la solubilidad y especiación de los metales en el suelo; por ejemplo, cada unidad que decrece el pH resulta aproximadamente, un incremento de dos veces la concentración de metales como Zn, Ni y Cd en la solución.

La materia orgánica, en estado sólido o disuelto, posee una gran superficie específica y una elevada carga negativa, lo que le permite atraer metales, estableciéndose así, fuertes enlaces entre los metales y la materia orgánica (Lopera, 2005). Además, la materia orgánica puede proporcionar sitios para las reacciones de intercambio catiónico, pero su fuerte afinidad por los cationes de los metales pesados es debida a los ligandos o grupos que forman quelatos y/o complejos con los metales. Es capaz de formar complejos solubles e insolubles con los iones de metal, pero existen factores que afectan la solubilidad de los complejos órgano-metálicos como son: la temperatura, humedad, pH, óxidos de hierro, la presencia de sales o cationes, la disociación de grupos funcionales y la saturación de sitios de enlace. Las reacciones en el suelo entre la materia orgánica y los metales pesados, están sujetas a transformaciones a largo plazo, por lo tanto puede tener un efecto transitorio en la retención de metales. (Lopera, 2005)

Cabe mencionar, que siendo el lugar de estudio un sitio con alta actividad biológica debido a que son zonas de cultivo es importante evaluar la biodisponibilidad de los metales. Ésta se define como la fracción del metal que está disponible para los seres vivos. Esta biodisponibilidad está determinada por la interacción entre los iones que se encuentran en la fase acuosa con las superficies de los componentes de la fase sólida del suelo. Son varios los procesos que controlan la cantidad de iones metálicos y complejos en la solución del suelo, los cuales influyen directamente en la absorción por las raíces de las plantas (Alloway, 1995); los procesos son: adsorción/desorción a arcillas minerales y a grupos funcionales de la materia orgánica sólida; precipitación/disolución, quelatación a la materia orgánica, oclusión en óxidos de hierro y manganeso. Estos procesos son catalizados o se encuentran determinados por el pH, el potencial redox, el contenido de humedad, la temperatura, la concentración de sales solubles, el tipo de iones que se encuentran en la solución, la cantidad de arcillas minerales, materia orgánica y óxidos de hierro y manganeso presentes en el suelo.

4.2 Introducción al sitio de estudio

El método de fuentes enfocadas con sus resultados en resistividad y cargabilidad de segundas diferencias, así como resistividades y cargabilidades enfocadas fue puesto a prueba en un sitio de cultivo ya que se ha estudiado durante varias décadas respecto a metales pesados. En este sentido, se encontró que después de 80 años de irrigación con agua residual las cantidades de metales fueron de 3 a 6 veces mayores que en los suelos regados con agua de pozo o cultivo de temporal (Siebe, 1994). Resultó interesante realizar geofísica para probar si con el método propuesto, se pueden detectar pequeños contrastes en las anomalías de resistividad y cargabilidad de los metales en general, y dentro de este grupo, posibles metales pesados.

No existen en la literatura trabajos de investigación geofísica en donde se puedan encontrar metales pesados exclusivamente en suelos y con todo lo que ello implica (caracterización: concentraciones, densidades, humedad, temperaturas, elementos mayores, etc.). Por lo que la propuesta de tesis probada en este sitio, sólo pretende poner a prueba si el método puede mejorar la resolución en los contrastes de resistividades y cargabilidades respecto a las técnicas tradicionales.

A continuación se presenta la información necesaria para identificar el lugar de investigación y las características geológicas y edafológicas propias del sitio.

4.2.1 Información Geológica-Edafológica

De la Carta geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (2002), se extrajo la siguiente información.

Fisiográficamente la zona de estudio queda comprendida en la zona limítrofe de la provincia del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental. El Eje Neovolcánico está caracterizado por un cinturón de estrato-volcanes y conos cineríticos que han generado grandes volúmenes de rocas volcánicas, mientras que la Sierra Madre Oriental está constituida por rocas sedimentarias del Cretácico. Las rocas más antiguas que afloran en la carta corresponden a estas últimas y conforman una secuencia carbonatada definida como Formación El Doctor la cual consiste de calizas mudstone con

horizontes wackestone a packstone. Le sobreyace la Formación Soyatal que consiste de alternancia de lutita y arenisca calcárea con intercalaciones delgadas de caliza mudstone a wackestone. De manera discordante, se tiene una secuencia de conglomerado constituido por guijarros y clastos calcáreos, dolomía y arenisca de grano fino, con intercalaciones de lavas andesíticas (Servicio Geológico Mexicano, 2002).

A continuación, se deposita la unidad de toba dacítica y después se desarrolla otro evento volcánico representado por la extrusión de coladas de composición andesítica-basáltica. Cubriendo de manera discordante a las unidades anteriores, se observan depósitos lacustres (TplQptla), que se proponen en la carta como parte del paleolago del Mezquital, constituido en su base por niveles arenosos, poco consolidados; hacia la cima se observa toba riolítica, mal preservada, variando a lapilli con cuerpos lenticulares de caliche.

Intercalados en la parte superior de los depósitos lacustres se presentan derrames y flujos de escoria gruesa de composición basáltica (QptB) los cuales no han sido descritos formalmente. Rocas carbonatadas, de origen continental de la unidad (QptTr), consisten de travertino. Los derrames de basalto (QhoB) de color negro a pardo, afanítico y vesicular morfológicamente corresponden a la parte inferior de pequeños conos volcánicos, con depósitos de piroclastos en la parte superior (QhoPc), constituidos por escoria de composición basáltica, cenizas y en menor proporción brechas volcánicas.

Estructuralmente, en la carta (ver figura 18) se presentan deformaciones correspondientes a los dominios dúctil-frágil y frágil. Del primero, se tienen cabalgaduras intraformacionales como la de El Tepozán 1 de rumbo N10°W con inclinación de 48° a 53° al SW dentro de la secuencia de caliza de la Formación El Doctor. El dominio frágil está representado por un sistema de NW-SE y NE-SW. También se reconocen los conos cineríticos como el cerro Cinco de Febrero y La Cruz.

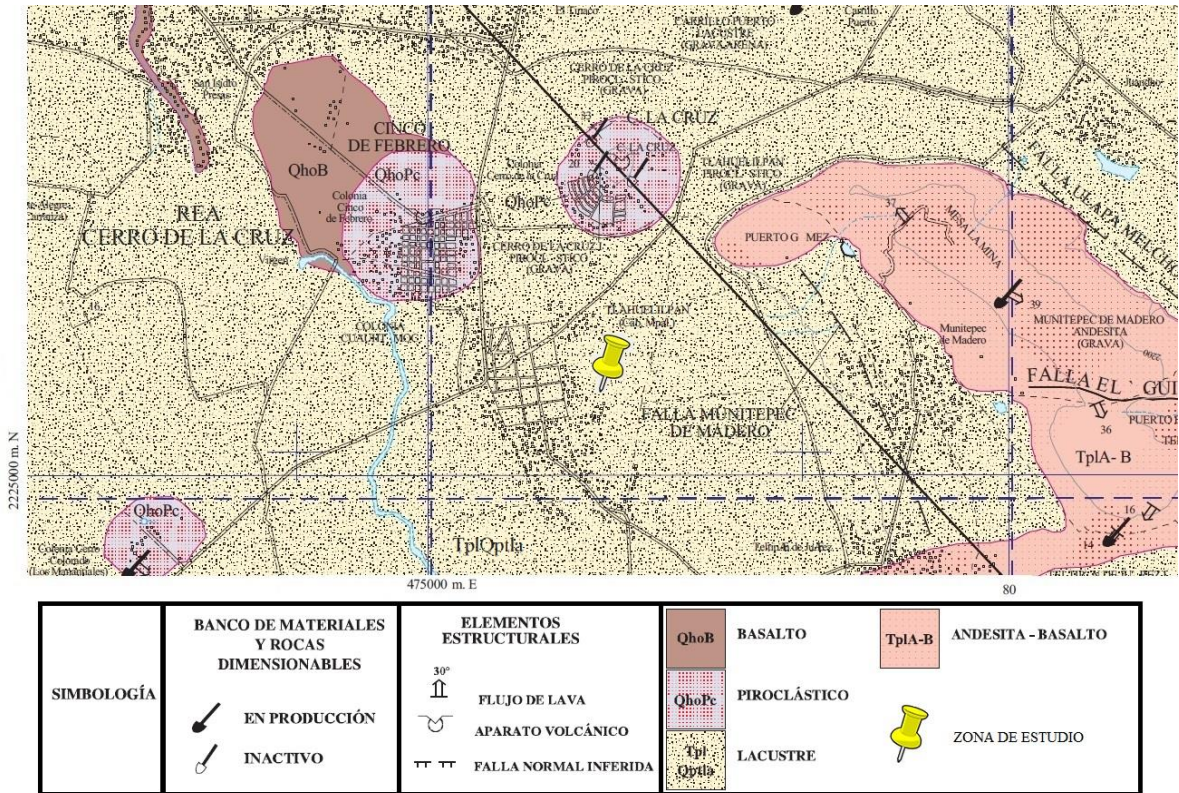


Figura 18. Sección de la carta geológica-minera de Mixquiahuala F14-C89 editada, correspondiente al municipio de Tlahuelilpan, Hgo (Servicio Geológico Mexicano, 2002).

Por último, lo más somero se encuentra constituido por depósitos de Piamonte constituidos por grava y boleo (Qhogv-bo), arena-limo así como suelos residuales (Qhoar-Im) y depósitos de aluvión (Qhoal), en el lecho y márgenes de arroyos.

Estos depósitos aluviales han generado los suelos de la zona de estudio de este trabajo. Sobre estos depósitos se han desarrollado suelos de tipo leptosol, feozem y vertisol, siendo los feozems el tipo de suelos donde se realizó el estudio.

Los feozems (del griego *phaios*, oscuro y del ruso *zemplja*, suelo) son, a diferencia de los leptosoles, de profundidades medias a profundas, ricos en materia orgánica humificada y por ello muy fértiles y aptos para el cultivo. Se desarrollan sobre todo en climas templados y estacionales, por lo que se encuentran recubriendo el Eje Neovolcánico Transversal y porciones de la Sierra Madre Occidental (Luege, 2005).

4.2.2 El Valle del Mezquital

El Valle del Mezquital cuenta con una superficie aproximada de 2,365 km². En él se encuentran los distritos de riego 03-Tula, 100-Alfajayucan, 25-Ixmiquilpan y 112-Ajacuba. El clima es seco-semiárido con precipitación media anual de 492.2 mm siendo en promedio 73.3 días con lluvia que equivale al 20% de días por año; de esa precipitación el 74% anual se da entre los meses de mayo a septiembre. La evaporación anual suma 1931.1mm con temperatura media anual de 17.3°C y extremos de 9.4 a 25.2°C promedio (Bautista *et al.*, 2013).

Actualmente el Valle recibe aproximadamente 50 m³/s de agua residual no tratada proveniente de la Ciudad de México, la cual se usa para el riego de cultivos como maíz, alfalfa, avena forrajera, pastos y praderas, así como tomate verde. Además de los cultivos, la vegetación natural se limita a las partes montañosas y se compone de matorrales xerófilos principalmente mezquites, huizaches (*Acacia farnesiana*), yucas (*Yucca sp*) así como una gran diversidad de cactáceas (Bautista *et al.*, 2013).

Es una zona regada con agua residual proveniente de la Ciudad de México desde 1912 y con ello, la productividad agrícola de la zona ha aumentado debido a la incorporación de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en los suelos (Cayetano, 2012). Sin embargo, también se aportan sustancias contaminantes como sales, surfactantes y metales pesados que tienden a acumularse en el suelo. Esta práctica de riego con agua que presenta patógenos y metales pesados puede representar un problema de salud pública, razón por la cual, se han llevado a cabo estudios durante varios años en esta zona (Bautista *et al.*, 2013).

El riego no se ha distribuido uniformemente en todo el valle, sino que ha habido parcelas con más años en riego que otras, lo cual ha permitido una investigación en el tiempo en el contenido de metales tanto en los suelos como en cultivos. Se ha encontrado que los metales pesados totales y biodisponibles se incrementan en forma lineal con el tiempo en suelos y en cultivos de alfalfa y granos de maíz (Siebe, 1994), aunque en estudios recientes (Chapela y Siebe, 2011) se ha mostrado que las concentraciones de metales pesados en suelos los incrementos son mayores en parcelas que llevan poco tiempo bajo riego respecto a 1990, que en parcelas que llevan más de 50 años regándose, donde el incremento es menor, (ver tabla 3).

Tabla 3. Concentración de metales pesados en el suelo (mg/kg) tomada de Cayetano (2012).							
Sitio	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd	Fe	pH
Agua residual+	94.4	285.37	77.5	94	4.8	31808	5.6
Control *+		32.5	61.5	16.7	1.5	21214	5
100 años de riego	44	171	-----	-----	1.14	-----	----
0 años de riego	13	68	-----	-----	0.089	-----	----
* Sitio sin riego por agua residual.							
+ Masona <i>et al.</i> , 2011.							

Las muestras de suelo tomadas para las concentraciones de metales reportadas del Valle del Mezquital, fueron extraídas de los primeros centímetros de suelo (0 a 0.3m de profundidad) con una barrena.

4.2.3 Localización del estudio geoelectrico

El sitio de prueba se ubica en zona agrícola al norte de Tula de Allende (Hidalgo) llamada Valle del Mezquital; al sureste del municipio de Tlahuelilpan, a 100 km aproximadamente al norte de la Ciudad de México y a 2113 m sobre el nmm. Se representa el punto de referencia como P2 en la figura 120 (derecha), con coordenadas UTM Zona 14 Q 477292 m E y 2225312 m N, dentro de una parcela del Rancho Las Palmas.



Figura 19. Localización de la zona de estudio. El símbolo P2 representa al piezómetro 2 cercano a la línea de tomografía geoelectrónica.

4.3 Metodologías

La toma de datos tanto geofísicos como de muestreo de suelos se realizaron en el siguiente orden: primero se levantó una sección de tomografía eléctrica, luego se procesaron los datos y finalmente se tomó la decisión para dirigir el muestreo de suelo conforme a los resultados geofísicos resistivo-capacitivos, por ello, se describirán las metodologías geofísicas a continuación y después, las metodologías edafológicas.

4.3.1 Levantamiento Geofísico

La línea de tomografía se localizó en la parte suroeste de la parcela Cedros II en el Rancho Las Palmas, a una distancia de 7 metros al este del piezómetro P2 y a 15.5 m de longitud (de sur a norte) como se muestra en la figura 21.



Figura 20. Imagen de la línea de tomografía sobre la parcela de estudio en Rancho Las Palmas, Hgo. Modificado de Google Earth V 7.0.3.8542, 2013.

Los datos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) se tomaron con una línea en arreglo Dipolo-Dipolo en directo (fuente izquierda) y otra en reverso (fuente derecha), con 96 electrodos de cobre de 50 cm y ½ pulgada de diámetro espaciados a 1 m y usando el equipo de adquisición eléctrica Syscal Pro Standard & Switch (Iris Instruments, 2005) de 48 electrodos, usando un Switch Box adicional para controlar el segundo conjunto de 48 electrodos. Se tomaron 3784 datos en total entre el 30 de noviembre y el 2 de diciembre de 2012, en modalidad de resistividad y cargabilidad.

Los datos de cargabilidad se tomaron en 2 segundos con un tiempo de espera (en inglés, *time delay*) de 240 ms para empezar a medir el decaimiento del potencial y 20 ventanas de espaciamento aritmético de 80 ms (Iris Instruments, 2005). Además, para efectos de calidad en las lecturas, se midieron 3 lecturas como mínimo y 6 como máximo con un factor de calidad $Q=5\%$. Este factor se aplica tanto para las lecturas de resistividad como para cargabilidad, sólo que en el segundo caso, se aplica para la cargabilidad global.

Se calcularon las resistividades y cargabilidades aparentes de segundas diferencias así como las enfocadas correspondientes con las ecuaciones del capítulo I, habiendo corregido los valores con ventanas de Bartlett en tiempo para obtener las pseudosecciones mediante una interpolación con el método de Kriging en Surfer v. 10, usando para los valores de profundidad, los valores calculados

con la función de sensibilidad (Loke, 2010). Por otro lado, a modo comparativo se invirtieron los datos de cada fuente sin utilizar ventanas en tiempo para verificar la efectividad del método propuesto para esta tesis.



Figura 21. Fotografía editada de la línea de tomografía.

Para efectos geofísicos, no hubo necesidad de utilizar datos de levantamiento topográfico para realizar la corrección topográfica a los datos de inversión ya que la línea de tomografía se localizó en zona relativamente plana de pie de monte, aproximadamente paralelo a las curvas de nivel como se aprecia en la siguiente figura (22). Para el análisis del flujo del agua de riego, sí fue necesario realizar un levantamiento topográfico ya que el terreno fue preparado para el cultivo, de manera que hay canales que llevan el agua por gravedad a las salidas del exceso, para alimentar a otras parcelas del mismo riego. Existen zonas en las que el agua se acumula por las irregularidades del terreno, las cuales se localizan en la parte este de la línea de tomografía (lado izquierdo de la figura 21), lo cual es importante mencionar, ya que esas zonas pueden ser factibles de mayor infiltración del agua de riego o lluvia y por tanto pueden indicar los lugares a donde puedan moverse metales en disolución.

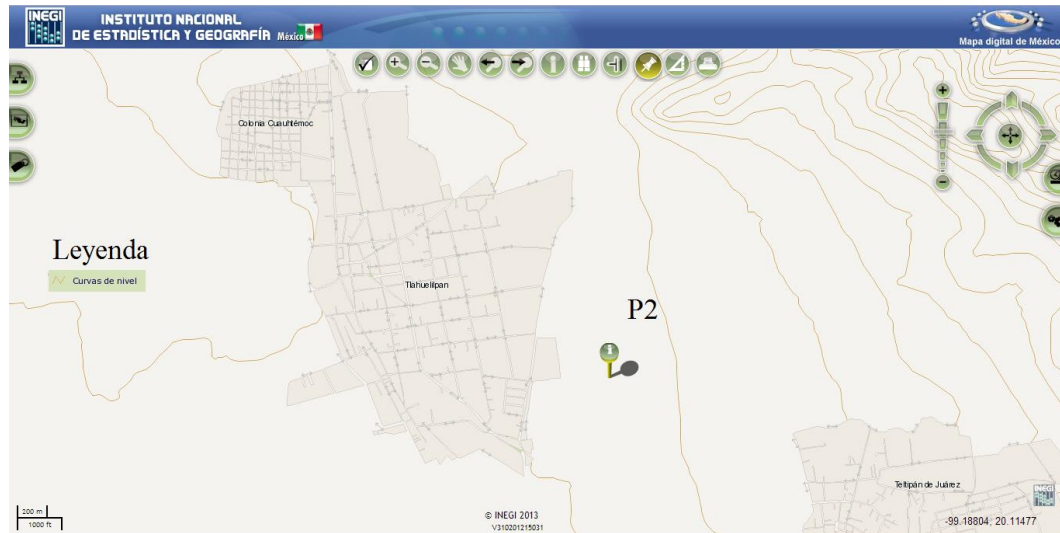


Figura 22. Curvas de nivel proporcionadas por INEGI, 2013. P2 representa el piezómetro cercano a la línea de tomografía.

En cuanto a las condiciones de campo, el suelo se encontraba saturado ya que el último riego se había hecho tres días antes, lo cual, en conjunto con el suelo arcillo-limoso, cumplió con las condiciones de contacto óptimas para la transmisión de la corriente en el subsuelo.

4.3.1.1 Inversión de datos

Se elaboró la inversión de los datos obtenidos de manera independiente con cada fuente (izquierda y derecha) para poder compararlos con el método propuesto en esta tesis. A estos datos no se les realizó un pre-tratamiento de ventanas aplicadas a las curvas de decaimiento de potencial, ya que tradicionalmente, sólo reciben un procesamiento típico de remoción de datos extremos.

El software usado fue EarthImager (Advanced Geosciences, 2009) para 2D, el cual emplea el método de inversión de mínimos cuadrados con norma L2 para resistividad, y en el caso de cargabilidad, se usó una inversión lineal la cual se realiza con una iteración después de haber realizado la inversión de la resistividad, empleando el criterio de Siegel (1959). Se utilizó mallas en elementos finitos.

4.3.1.2 Ventanas de Bartlett

Anteriormente se discutió la problemática del ruido en las lecturas de PI, lo cual tiene su fundamento en ruidos aleatorios y sistemáticos. Debido a ello, a continuación se describe la teoría para el manejo de la información en cuanto a la reducción del ruido en las lecturas del sitio de estudio para los parámetros de resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas (ver capítulo III).

Tradicionalmente en geofísica, se han empleado ventanas o filtros para reducir y/o eliminar errores en los datos, de hecho existe toda una rama de estudio con diferentes diseños de filtros, según las necesidades del método y del intérprete. Para efectos de este trabajo, se empleó la ventana de Bartlett (Robinson and Silvia, 1978), la cual es un filtro de promedios corridos de tipo triangular (ecuación 52) o lo que es igual, la convolución de un rectángulo consigo mismo. Este tipo de ventana es simétrica por lo que tiene un espectro en fase lineal.

$$W_B = \begin{cases} \frac{2n}{N-1}, & 0 \leq n \leq \frac{N-1}{2} \\ 2 - \frac{2n}{N-1}, & \frac{N-1}{2} \leq n \leq N-1 \end{cases} \quad (109)$$

$$MS = \frac{1}{M} \left| \frac{\sin\left(\frac{M\omega}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)} \right| \quad (110)$$

Donde W_B es la expresión matemática de la ventana de Bartlett, n es el número de muestra y N es el número total de elementos de la ventana; MS representa la magnitud espectral correspondiente a la ventana de Bartlett, M es el punto de simetría y equivale a $M=(N-1)/2$ y ω es la frecuencia. La forma de la ventana en el dominio del tiempo y su respuesta en el dominio de la frecuencia se muestran en la siguiente figura.

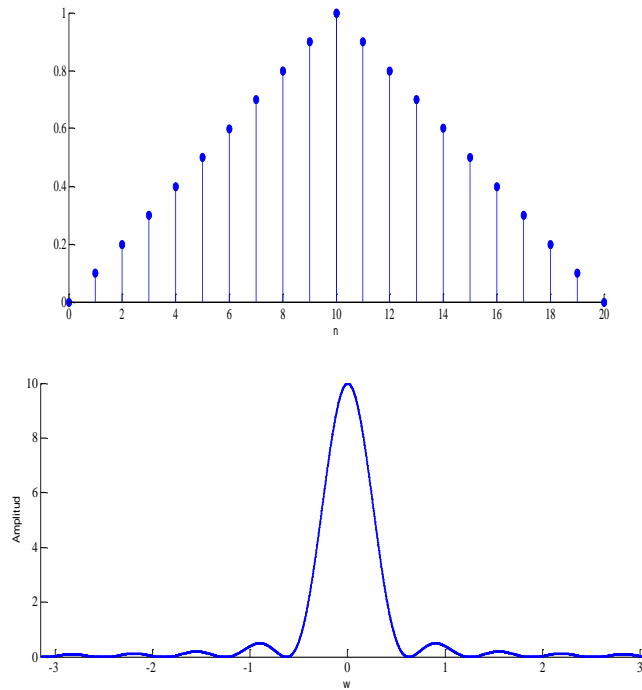


Figura 23. Ventana triangular o de Bartlett en el dominio del tiempo (izquierda) y su respuesta espectral en el dominio de la frecuencia (derecha), $N=21$.

Se utilizaron factores $(1 \ 2 \ 1)/4$, usando tres ventanas de tiempo adjuntas, de manera que para las 20 ventanas se mantuvo intactas la primera y la última.

Existen otro tipo de ventanas como la Binomial, Hamming, Parzen, Daniel, entre otras (Sheriff, 2002); sin embargo, se eligió la ventana de Bartlett por ser una ventana sencilla y por tener una distorsión lateral relativamente menor y el lóbulo central agudo.

4.3.2 Metodología en el muestreo de suelo y análisis de laboratorio

De acuerdo a la NMX-AA-132-SCFI-2006, se recomienda que los muestreos de suelos para detección de metales y metaloides deben seguir alguno de los tipos de muestreo como: el muestreo a juicio del experto, el estratificado, el sistemático, el simple aleatorio o algún método indirecto validado. De los anteriores, no se especifica ni sugiere qué tipo de método indirecto usar, por lo que, además, el trabajo presente es una técnica recomendable para realizar un muestreo direccionado.

4.3.2.1 Diseño del muestreo de suelos

Se realizaron 5 muestreos de suelo el día 9 de febrero de 2013 con perforadora manual (ver figura 25) dos meses y 10 días después de haber realizado el levantamiento geofísico. Los puntos y las profundidades de muestreo se tomaron con forme a los resultados de las pseudosecciones obtenidas de los datos de resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas. En el capítulo V, los muestreos se localizan en cada pseudosección y en las secciones invertidas con las notaciones M3, M4, M5, M6 y M7, para comparar los resultados geofísicos con los datos de laboratorio.



Figura 24. Muestreo con perforadora manual.

Después de haber elegido los lugares y profundidades del muestreo, se tomaron las muestras registrando en la libreta de campo las características del suelo conforme se profundizaba en la perforación, como los cambios en el contenido de humedad así como en el color. Una vez extraídas, se envasaron y etiquetaron, para trasladarlas en hielera y mantenerlas a baja temperatura y sin radiación UV.

4.3.2.2 Generalidades de los análisis físicos y químicos de los suelos.

4.3.2.2.1 Textura y densidad de partículas.

La textura se realizó con el método de la pipeta, el cual cuantifica la distribución de tamaño de las partículas minerales del suelo (arcilla, limo, arena) en forma gravimétrica (Burt, 2004) con la adaptación de las técnicas de Day (1965) y Green (1981) y con la guía y ayuda del personal del

laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (ver Anexo). Previo a la determinación se eliminó la materia orgánica y se agregó un dispersante (hexametáfosfato, ver anexo apartado B, pretratamientos).

4.3.2.2.2 Contenido de metales

El análisis del contenido de metales en las muestras se llevó a cabo con la digestión de las muestras (0.5 g de cada una) usando como extractante el ácido nítrico (HNO₃). Después se analizaron por espectroscopía de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) para la determinación y cuantificación de As, Se, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Be, Mo, Co, Li, Sb, Ti, Tl, y Zn de las 5 muestras, realizado por el laboratorio de Química de Aguas del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. En la tabla 4 se presentan los valores límites de detección de los elementos para el ICP-OES.

Tabla 4. Valores límites de detección de los elementos para el ICP-OES.											
Elemento	As	Se	Cd	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Sr
LOD* (mg/Kg)	7	8	2	12.2	0.3	1	0.7	1	3	0.7	0.3
%Exactitud	86.8	86.7	96.7	100.8	94.7	94.7	97.7	93.9	86.7	80.5	99.8
Elemento	Mo	Ti	Co	Mn	V	Be	Ca	Li	Sb	Tl	Mg
LOD* (mg/Kg)	3	2	0.6	0.7	5	0.3	2	2	5	2	1
%Exactitud	89.2	102.6	94.4	97.7	97.6	94.8	88.6	95.6	94.6	94.2	94.8
* Valores límites de detección instrumentales (por sus siglas en inglés, LOD) para cada elemento.											

La concentración de cada elemento fue determinada por triplicado y el valor reportado corresponde al promedio de las tres determinaciones. La precisión del análisis se reporta como desviación estándar relativa (RSD por sus siglas en inglés) para n=3. Adicionalmente se utilizaron estándares de control analítico de concentración conocida (10 ppm), los cuales fueron analizados como muestras para determinar su concentración por medio de las curvas de calibración preparadas. Las concentraciones determinadas se encontraron entre 80% y 100% en relación con la esperada, lo cual indica un buen desempeño del método de análisis.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las tomografías de resistividad eléctrica y capacitiva, iniciando con las pseudosecciones de resistividad y cargabilidad aparentes enfocadas, ya que son esas respuestas con las cuales se tomaron los puntos de muestreo de suelo para su verificación. A modo comparativo se presentan las pseudosecciones de resistividad y cargabilidad aparentes de segundas diferencias, que contienen la información previa para los cálculos de fuentes enfocadas. Después se muestran las respuestas tradicionales, esto es, con las inversiones de los datos tomados con las fuentes izquierda y derecha por separado, sin aplicar ventanas de Bartlett en tiempo. Generalmente, esto es lo que se realiza en trabajo de gabinete en estudios de tomografía. Cabe reiterar que todas las modalidades de secciones y pseudosecciones corresponden a los datos de la misma línea de prospección.

Es necesario enfatizar que las respuestas obtenidas en las imágenes están basadas en la búsqueda de contrastes y no en aproximar los valores tanto de resistividad como de cargabilidad, a los valores cercanos a la realidad, lo cual se busca en programas de inversión de datos comerciales.

Al final, se presentan los datos de laboratorio de los muestreos de suelo, con la discusión correspondiente respecto a las pseudosecciones resistivo-capacitivas.

5.1 Resultados geofísicos de las pruebas de campo: resistividad y cargabilidad

Los datos obtenidos con la fuente izquierda tienen un error promedio de 1.02%, siendo que el 99.4% de las lecturas tiene un error menor al 10% a excepción de 11 lecturas con errores de hasta 428%. Para el caso de los datos con fuente derecha, el error promedio es de 1.23% con un 98.3% de lecturas con error menor al 10%, y 33 lecturas con un error máximo de 167.8 %. Por tanto, las lecturas fueron tomadas con buena calidad en campo y estadísticamente significa que se puede obtener buenas aproximaciones a la realidad geoelectrica, lo cual nos da una condición necesaria mas no suficiente para una buena interpretación, sea esta cualitativa o cuantitativa.

Tabla 5. Reporte de datos para procesamiento de datos de segundas diferencias y de fuentes enfocadas.				
	# Total de Datos	Valor Máx/min referencia	# De datos suprimidos	% Datos suprimidos
P2L	541	100/-100	1	0.2
P2R	541	100/-100	19	3.5
ENFOCADOS	541	100/-100	17	3.2

5.1.1 Resultados de la resistividad y cargabilidad aparentes de fuentes enfocadas

Las figuras 25 y 26 muestran las pseudosecciones de los datos de resistividad y cargabilidad enfocadas respectivamente, obtenidas de los datos medidos en campo. Estas imágenes muestran a profundidad la distribución de los parámetros correspondientes con distancias en metros. De ellas, se aprecia como referencia el piezómetro P2, mostrado con anterioridad en el capítulo 4.

En la figura 25 se encuentra la pseudosección de los datos de resistividad aparente enfocada, la cual muestra un rango de resistividades de 9.5 a 23 Ohm*m. Se aprecia en la zona superficial (hasta 0.8 m o 1 m de profundidad) una zona bajo-resistiva y que aumenta su espesor del lado izquierdo hasta la posición 67 m. Del lado derecho entre la posición 89 m hasta 95 m y entre 3.5 m y 4.6 m de profundidad, existe una zona alto-resistiva de forma diagonal buzando a la derecha, la cual se asocia a una zona de relleno para la construcción de los canales de riego, sin haber sido comprobado.

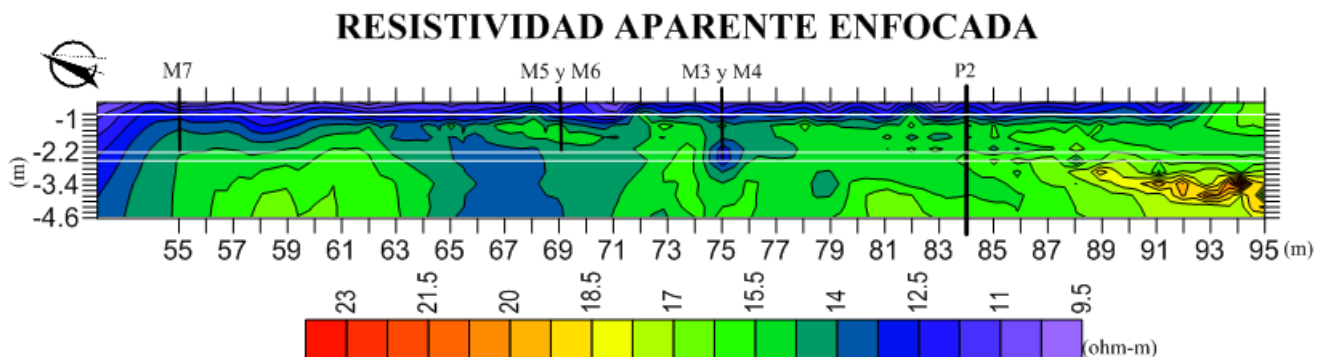


Figura 25. Pseudosección de resistividad aparente de datos de fuentes enfocadas. P2 simboliza al piezómetro 2.

En el caso de la cargabilidad enfocada, el rango de valores va de -45 a 45 mV/V y en general, esos valores se distribuyen en casi toda la pseudosección valores intermedios. Mediante una isolínea de 6

mV/V se aprecia una tendencia horizontal, un metro más profunda que la zona de menor resistividad en la figura 25, y en ambos casos, aumenta su profundidad hacia el lado izquierdo. Por otro lado, en la posición 75m tanto en resistividad como en cargabilidad a una profundidad aproximada de 2.2m existe una anomalía de interés, ya que en la industria minera se ha observado que en bajos resistivos y altos capacitivos se encuentran mineralizaciones asociadas a metales diseminados.

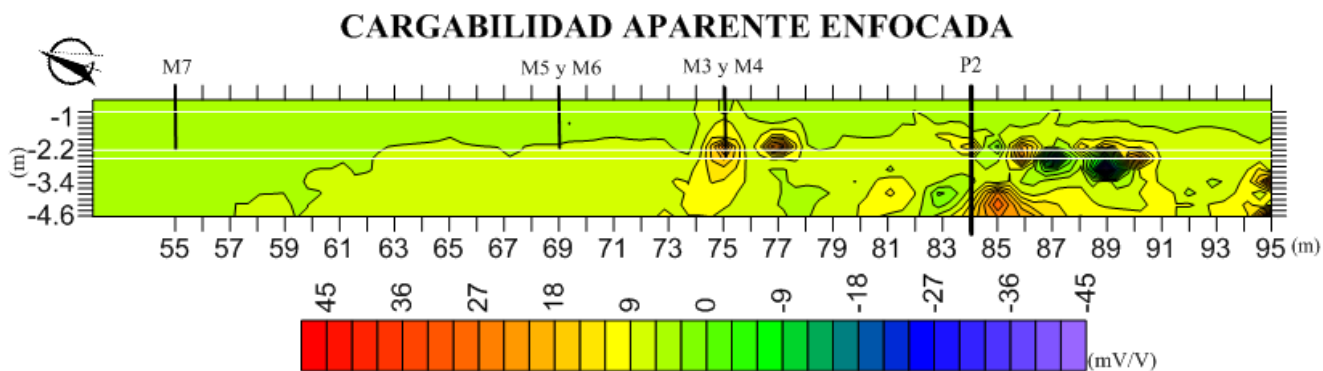


Figura 26. Pseudosección de cargabilidad aparente de datos de fuentes enfocadas.

Por lo anterior, se propuso una serie de hipótesis referentes a las anomalías encontradas para llevar a cabo el muestreo y con ello verificarlas. Las claves M3 a M7 fueron utilizadas para designar las muestras de material colectadas en zonas de interés (Tabla 6).

Tabla 6. Claves y profundidades de los muestreos de suelo.					
Clave	M3	M4	M5	M6	M7
Profundidad (m)	2.2	2.5	0.8	2.2	2.2

Las muestras de interés geoelectrico corresponden a M3 y M4, que existe anomalía tanto en el caso resistivo y capacitivo (figuras 25 y 26). Las muestras M5 y M6 se propusieron para corroborar la homogeneidad del suelo tanto en la parte superficial (80cm) como en la profunda (2.2m). La muestra M7 se tomó debido a que es la zona más alejada y asociada a una zona homogénea capacitiva (figura 26) y de aumento gradual al profundizar resistivamente hablando (figura 25). Específicamente para el caso de resistividad enfocada se tuvieron las siguientes hipótesis:

- a) M3 y M4 presentan alto contenido mineral y/o humedad, ya que presentan resistividades muy bajas.
- b) M5 se encuentra en una zona de conductividad alta, asociado a una zona muy húmeda, probablemente en un límite impermeable que genera la acumulación de agua y saturación del medio.
- c) M6 y M7 se encuentra en una zona de transición entre valores bajo resistivos y valores medios, probablemente corresponde a cambios en el contenido de humedad y/o mineral, de mayor a menor magnitud.

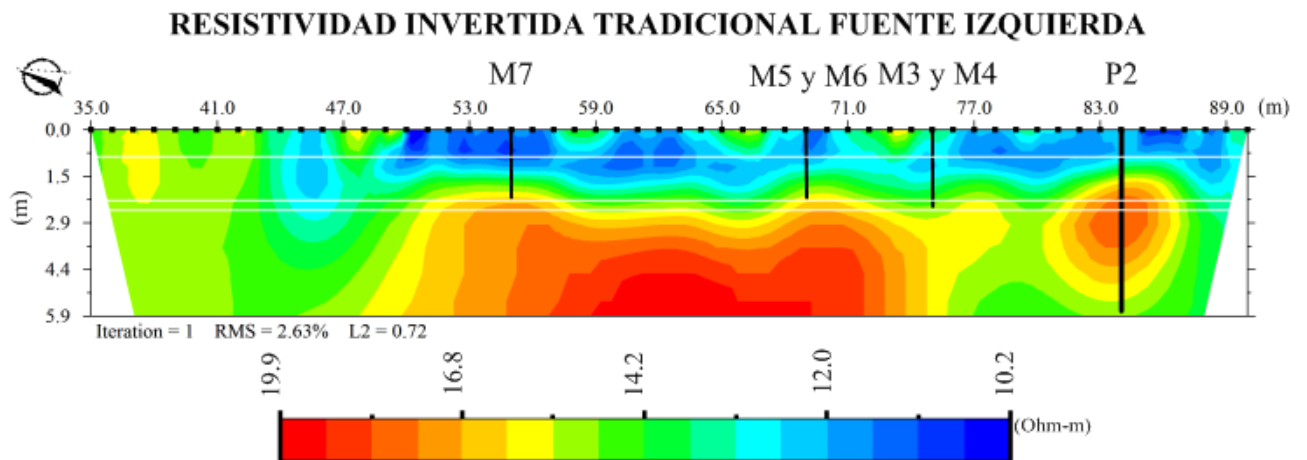


Figura 27. Resistividad de datos invertidos con la fuente izquierda.

Para el caso de cargabilidad enfocada (ver figura 26), se observa un rango de cargabilidades de -45 a 45 mV/V. Los valores negativos no están definidos en la naturaleza, son producto de las diferencias calculadas y por tanto, deben interpretarse sólo como bajo-capacitivos.

Las hipótesis que surgen para los muestreos fueron las siguientes:

- a) M3 tiene un valor de cargabilidad mayor que M4, lo que podría sugerir una concentración mineral más alta.
- b) M5 tiene el comportamiento de valores medios de la escala de valores, lo cual sugiere que son valores de fondo capacitivamente hablando.
- c) M6 marca un cambio de cargabilidad y probablemente de concentraciones minerales y/o materiales.

- d) M7 tiene una respuesta igual que en M5, que corresponde a una probable respuesta media del subsuelo en este sitio.

5.1.2 Resultados de los datos de segundas diferencias

Las siguientes imágenes corresponden a datos de los que se obtuvieron las segundas diferencia y también la ventana de Bartlett, estos datos también se usaron en los cálculos de datos aparentes de fuentes enfocadas mostrados en la sección anterior.

5.1.2.1.1 Segundas diferencias con fuente izquierda

Las pseudosecciones muestran el comportamiento de los datos después de haber realizado la segundas diferencias. Como se observa para la fuente izquierda, ni para resistividad (figura 28) ni para cargabilidad (figura 29) existe correlación de información, excepto en la zona izquierda (aproximadamente hasta la posición 65), donde se tiene un aumento gradual en ambos parámetros y entre la posición 77m y 81m a casi 5m de profundidad, la cual coincide con valores altos en ambos parámetros. En el primer caso, el rango de resistividad va de 8 a 21 Ohm*m, guarda ciertas similitudes con la pseudosección de resistividad aparente enfocada (figura 27), aunque no aparece la zona de baja resistividad en la posición 75m, para los muestreos M3 y M4. Existe otra anomalía del lado derecho en forma diagonal buzando a la derecha entre las posiciones 83m hasta la esquina inferior derecha, más grande que la vista en la figura 27 (Resistividad Aparente Enfocada), la cual se asoció con una zona de relleno para la construcción de un canal de riego.

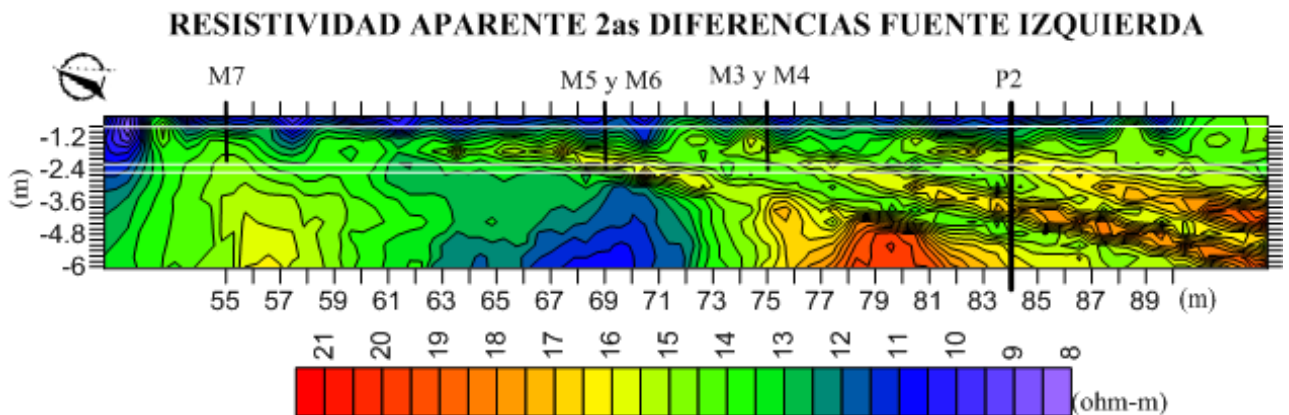


Figura 28. Resistividad aparente de datos de segundas diferencias obtenidos con la fuente izquierda.

En el caso de la cargabilidad de segunda diferencias (figura 30), el rango de valores capacitivos es de 2 a 30 mV/V y se aprecia en casi toda la pseudosección valores bajos de aproximadamente 2-10 mV/V. En general no existe otra característica significativa para esta sección, debido a que la mayor parte de la imagen tiene valores muy similares y menores o iguales a 10 mV/V.

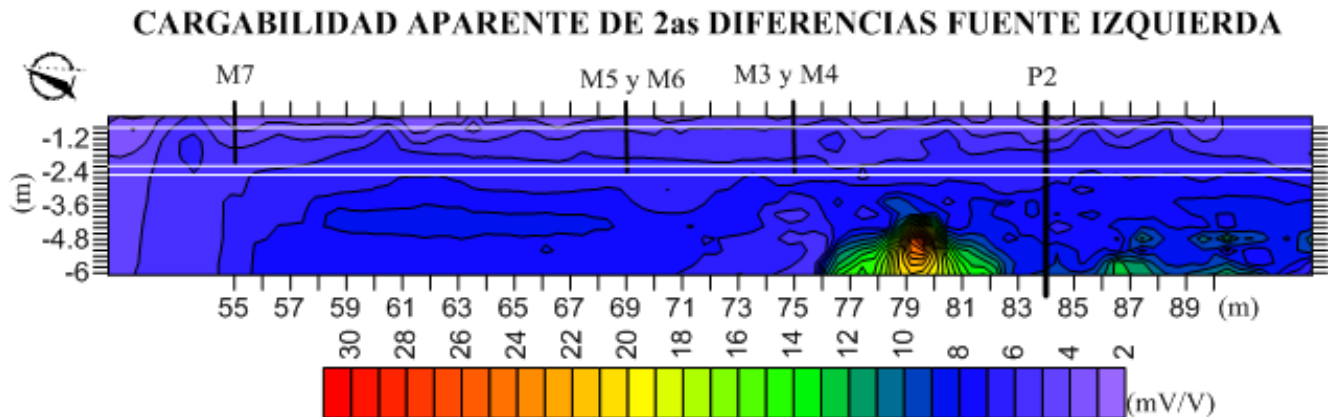


Figura 29. Cargabilidad aparente de datos en segundas diferencias obtenidos con la fuente izquierda.

5.1.2.2 Segundas diferencias con fuente derecha

Para la fuente derecha se observa una mejor definición de las anomalías, tanto en resistividad como en cargabilidad (ver figuras 31 y 32, respectivamente). En el primer caso se tiene un rango de 8 a 30 Ohm*m y en la parte superficial hasta casi 2m de profundidad se observan varios horizontes homogéneos y del lado derecho (de los 83 m en adelante) se aprecia una anomalía alto-resistiva semejante a la observada con la fuente izquierda. Las zonas de muestreo M5 y M6 apuntan a una zona de transición entre valores bajos (alrededor de 14 Ohm*m) y valores medios (de 16 a 20 Ohm*m) a diferencia de los otros puntos de muestreo (M3, M4 y M7), en los que no hay alguna anomalía de interés superficial. Al igual que en el caso de fuente izquierda, aparece una anomalía diagonal en el esquina inferior derecha, pero de menor tamaño, lo cual sugiere una concordancia con la información entre las dos fuentes, así como las geometrías en general.

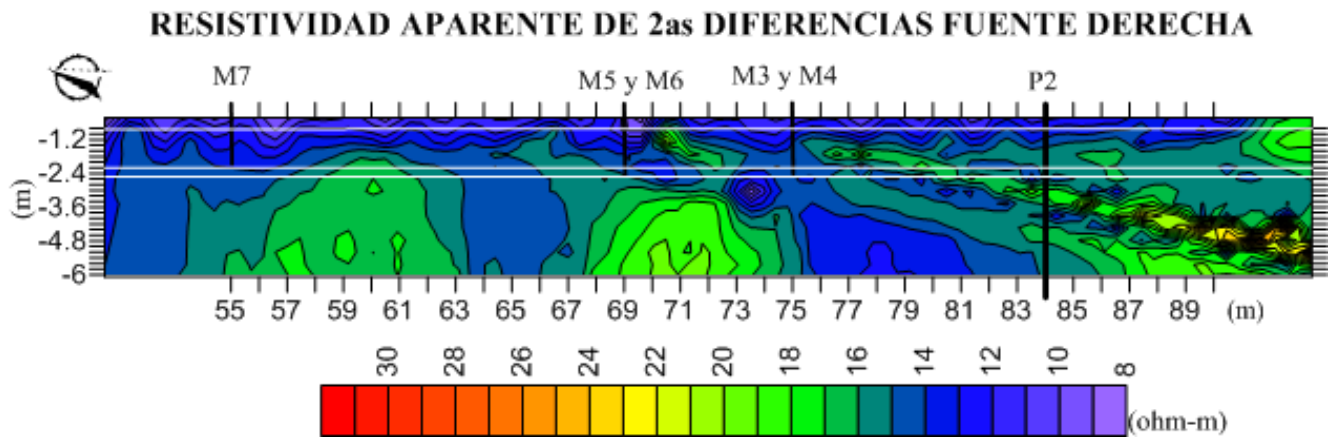


Figura 30. Resistividad aparente de datos en segundas diferencias obtenidos con la fuente derecha.

En el caso de la cargabilidad (figura 32) se aprecia una anomalía alto-capacitiva en los puntos de muestreo M3 y M4, en M5 y M6 no se observa nada en particular ni en M7, sólo son valores intermedios. Hacia la esquina inferior derecha se observa una línea de anomalías, semejante al caso de resistividad tanto de la fuente izquierda como de la derecha, sin embargo, esta anomalía no aparece en la imagen de cargabilidad aparente de segundas diferencias de la fuente izquierda (figura 28).

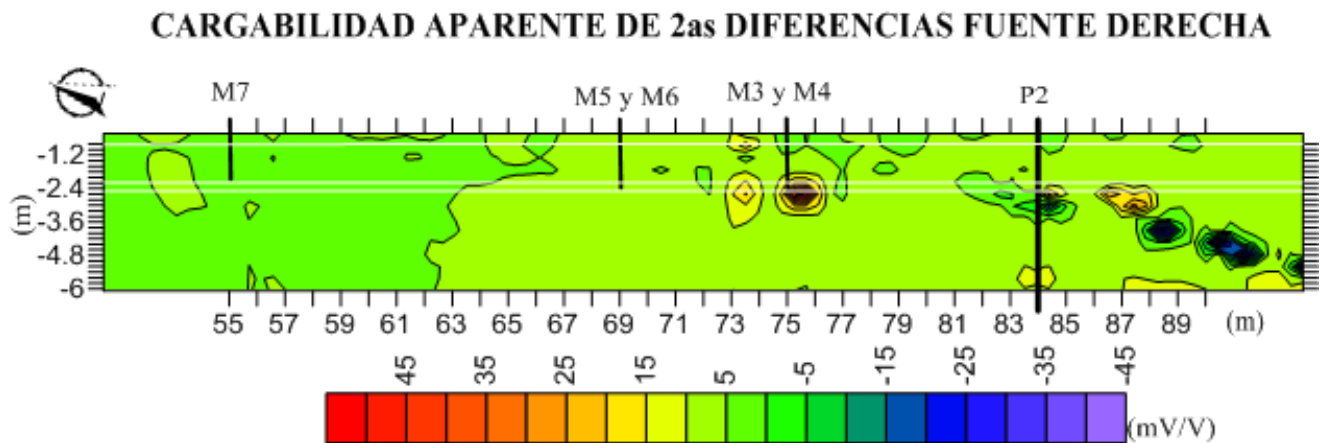


Figura 31. Cargabilidad aparente de datos en segunda diferencias obtenidos con la fuente derecha.

5.1.3 Resultados de la inversión de datos tomados de manera tradicional

A modo comparativo se muestran las secciones correspondientes a los datos de resistividad obtenidos de forma tradicional: usando sólo una fuente.

Los datos de las secciones que se muestran a continuación no llevan ningún proceso de ventanas aplicadas a las curvas de decaimiento, son en realidad los datos sin procesar empleados para obtener las segundas diferencias y el cálculo de fuentes enfocadas mostrados anteriormente.

5.1.3.1 Inversión de datos con fuente izquierda

El arreglo empleado fue dipolo-dipolo y de tiro directo, esto es, con fuente a la izquierda. Se obtuvo un rango de 10.2 a 19.9 Ohm*m (figura 33); existe una zona alto-resistiva en tonos rojos en la posición 50 m - 74 m con 19.9 ohm*m en el centro de la sección y otra bajo la posición 84 m, ambas a profundidades por debajo de los 2 m; se aprecian bajo-resistivos en la zona más superficial del perfil, justo en la zona circundante a los electrodos enterrados en el suelo, lo cual es común en estos estudios y puede atribuirse también a ruido causado por los electrodos. Por otro lado, en los puntos de muestreo no se haya alguna anomalía de interés en relación con las resistividades obtenidas con las segundas diferencias y con fuentes enfocadas.

Como se observa en la parte inferior izquierda de la imagen, se realizó una iteración y se obtuvo un error cuadrático medio (RMS por sus siglas en inglés) de 2.63 % y una norma $L=$ 0.72 %, por tanto, desde el punto de vista estadístico es una buena inversión.

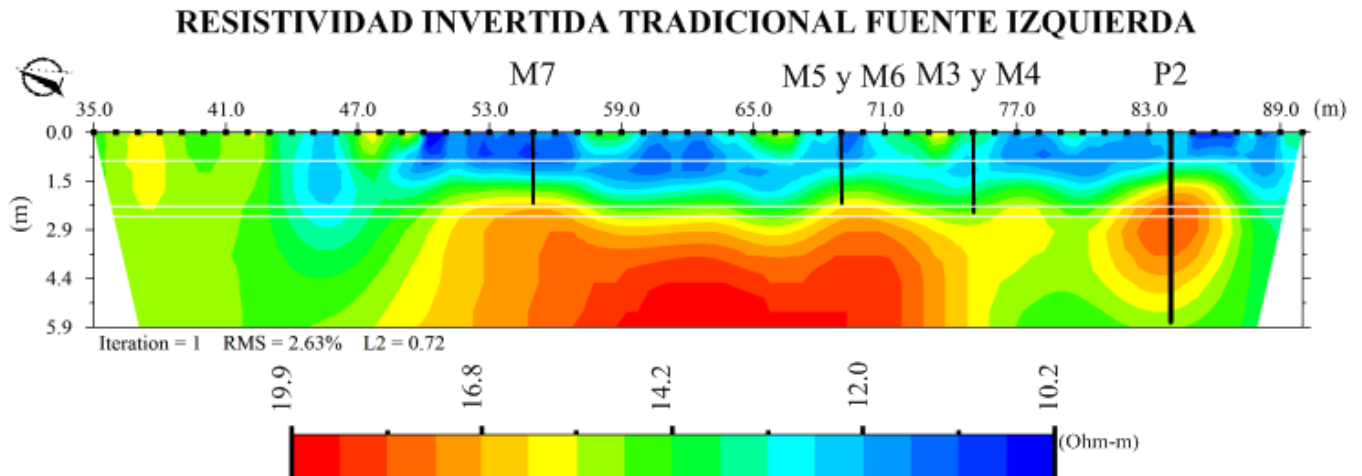


Figura 32. Resistividad de datos invertidos con la fuente izquierda. Separación electródica de 1m (puntos negros en superficie).

Hipóticamente, las muestras de claves M7 y M6 presentan los mismos valores de resistividad, lo mismo para M3 y M4. M5 es el de menor resistividad que los anteriores.

En el caso de la cargabilidad (figura 34), se obtuvo 0.34 ms de RMS para un rango de 2.7 a 10.6 mV/V. Las anomalías que sobresalen se encuentran también en la parte central y no hay evidencia de anomalías en los puntos de muestreo. En términos generales el medio es homogéneo, capacitivamente hablando.

Las claves M7, M6, M3 y M4 indican en la figura un comportamiento capacitivo muy similar, a diferencia de M5, el cual está en una zona de valores bajos.

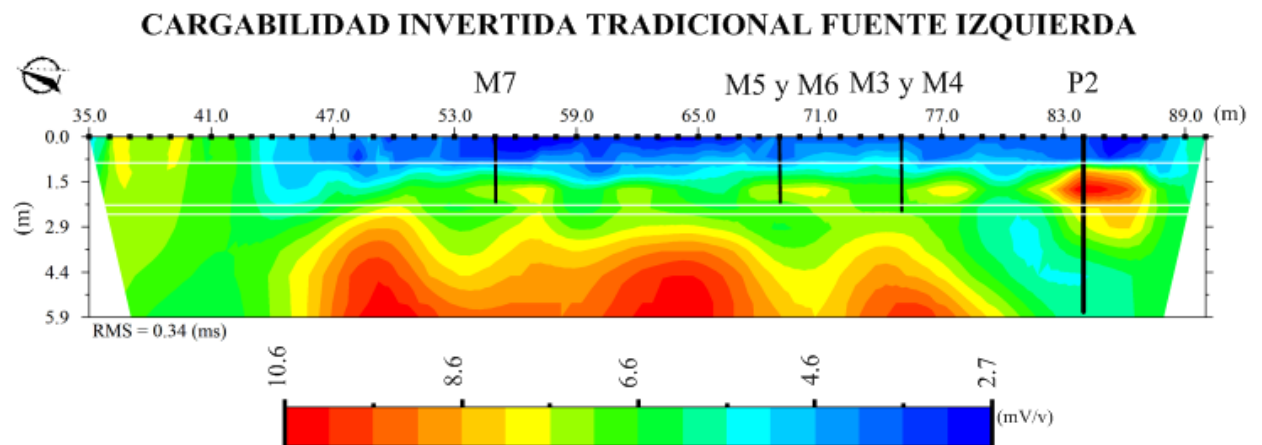


Figura 33. Cargabilidad de datos invertidos con la fuente izquierda. Separación electródica de 1m (puntos negros en superficie).

La gráfica que corrobora el ajuste de la inversión se muestra en la figura 35, en la que se observa la distribución de los datos cercana a la línea de referencia.

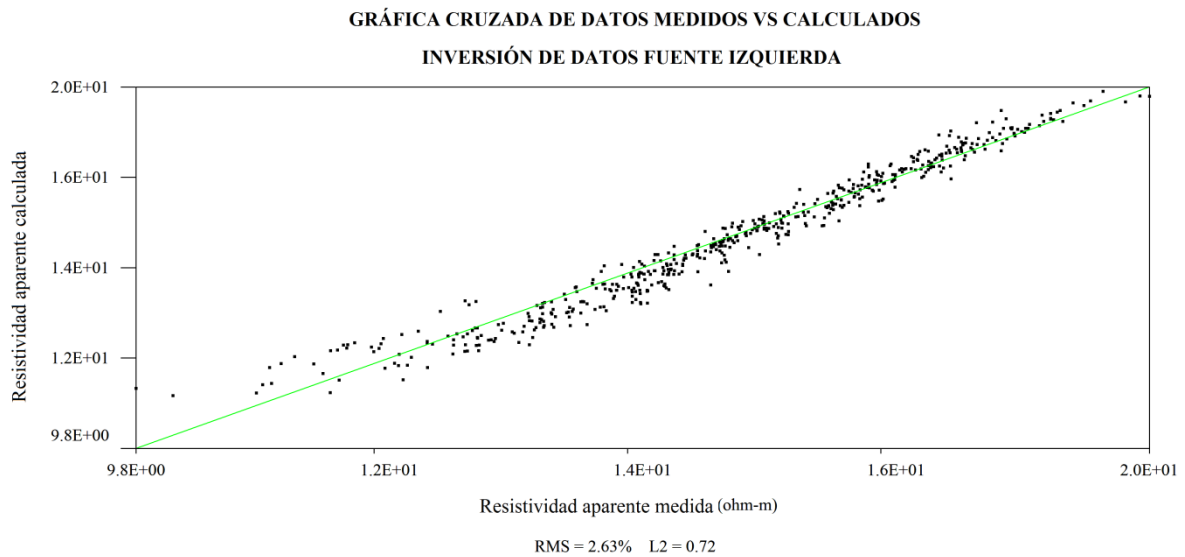


Figura 34. Gráfica cruzada de datos medidos versus calculados de la inversión de datos tomados con fuente izquierda.

5.1.3.2 Inversión de datos con fuente derecha

La figura 36 muestra la imagen de resistividad invertida de los datos con fuente derecha. Presenta un rango de resistividades de 11.4 a 21.4 Ohm*m. Existe una anomalía alto-resistiva por debajo de los 3m y casi toda la superficie (de 0 a 2.5m de profundidad) se mantiene en bajo-resistivos. Sólo se realizó una iteración y con los mismos parámetros de inversión, se obtuvo un error RMS de 1.94% y una norma L2 de 0.37. En esta figura, todas las claves se encuentran en la misma zona resistiva, con valores bajos (alrededor de 12 Ohm-m).

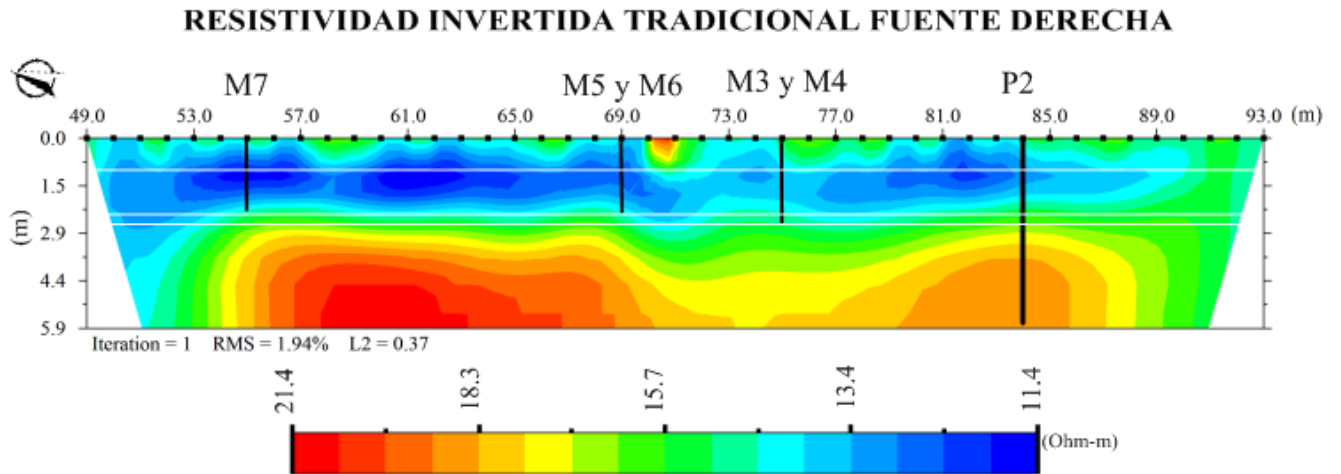


Figura 35. Resistividad de datos invertidos con la fuente derecha. Separación eléctrica de 1m (puntos negros en superficie).

La cargabilidad invertida para la misma fuente (ver figura 37) presenta un rango de cargabilidades de -13.0 ms a 20.3ms, con un RMS de 4.42 ms. Muestra dos anomalías sobresalientes en el centro de la imagen: una alto-capacitiva y otra bajo-capacitiva. La primera tiene su centro aproximadamente bajo la posición de 74m a una profundidad de alrededor de 3m, la segunda bajo la posición de 70m y también a 3m de profundidad. En esta sección, M3 y M4 se encuentran en la anomalía con valores de cargabilidad alta; M6 cercana a la anomalía bajo-capacitiva y M5 en valores intermedios (alrededor de 3) al igual que M7.

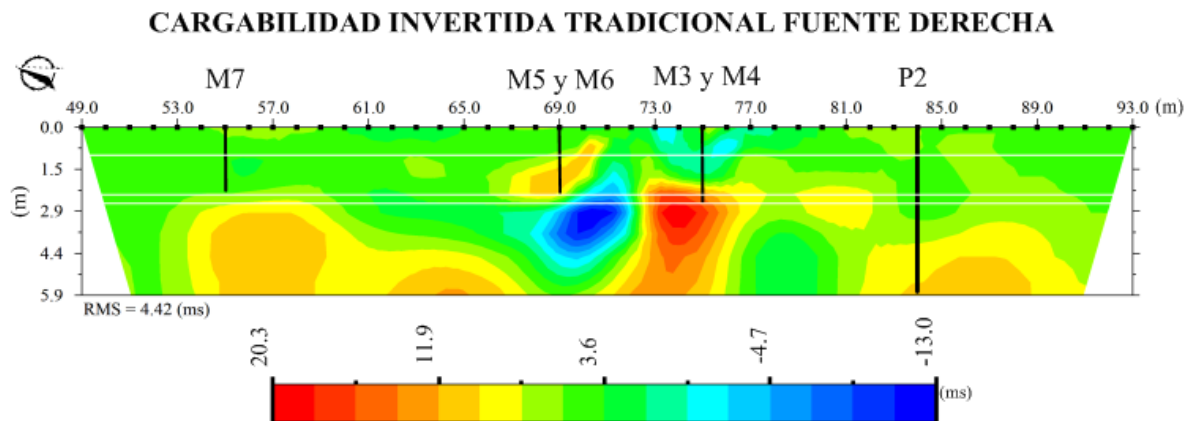


Figura 36. Cargabilidad de datos invertidos con la fuente derecha. Separación eléctrica de 1m (puntos negros en superficie).

La figura 38 corrobora el ajuste de la inversión lineal de la cargabilidad, de manera semejante al caso de fuente izquierda.

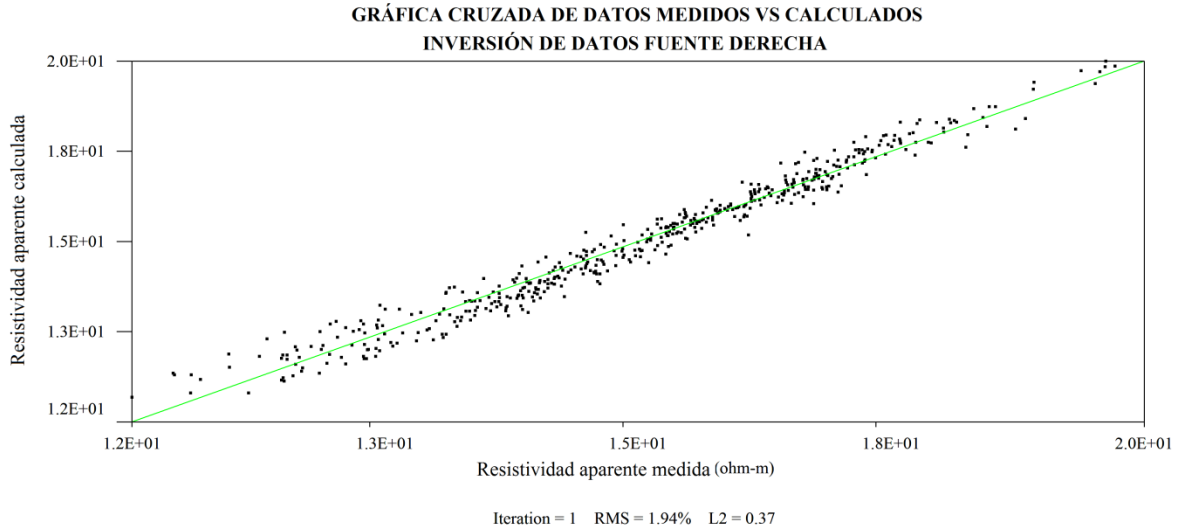


Figura 37. Gráfica cruzada de datos medidos versus calculados de la inversión de datos tomados con fuente derecha.

5.2 Resultados edafológicos

Esta sección tiene como fin proporcionar elementos para la interpretación de las anomalías geoeléctricas, mediante características como la humedad y porosidad del suelo, así como la dirección del flujo laminar del agua en superficie y zonas de inundación de las aguas residuales.

La siguiente figura (39) contiene la localización de los perfiles edafológicos, de los pozos de observación preexistentes y los límites de la parcela, así como la línea de tomografía que se encuentra hacia el Este de la barrenación 2 y del piezómetro de referencia P2.

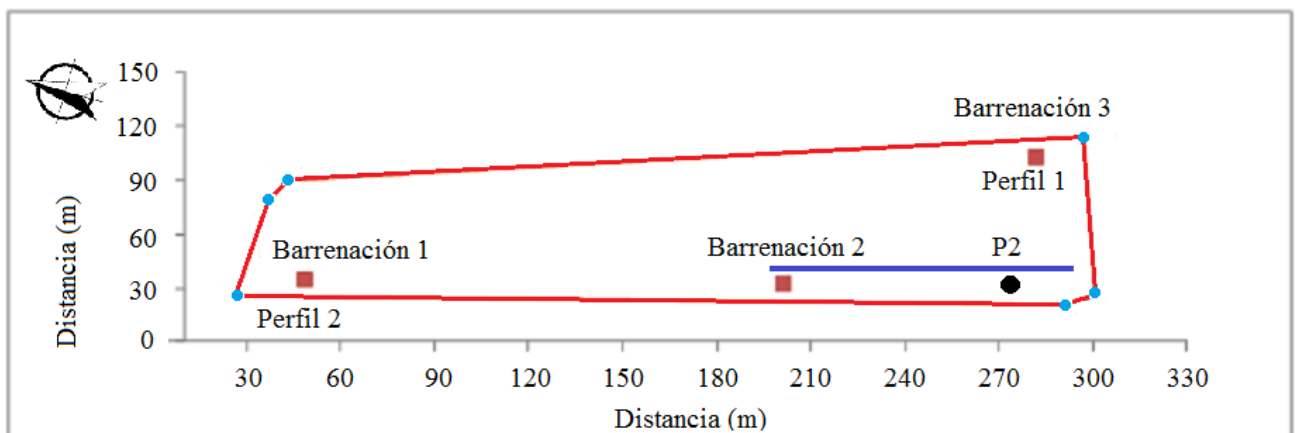


Figura 38. Puntos de medición con el teodolito y forma de la parcela, donde ● son esquinas, - es la línea de tomografía y por último ■ son perfiles y barrenaciones

5.2.1 Topografía

Los datos de la altimetría se graficaron con Surfer V. 10.1.561 de Golden Software Inc. con el método de interpolación de kriging (ver figura 40), donde se observa una diferencial de altura de 2 m aproximadamente; de Este a Oeste disminuye la altura por lo que las puertas de paso del agua residual se encuentran al Este de la parcela y se distribuye hacia al Oeste, donde se encuentran las cotas mínimas. En la esquina inferior izquierda de la figura se encuentra la salida del excedente de agua, así como en la esquina inferior derecha.

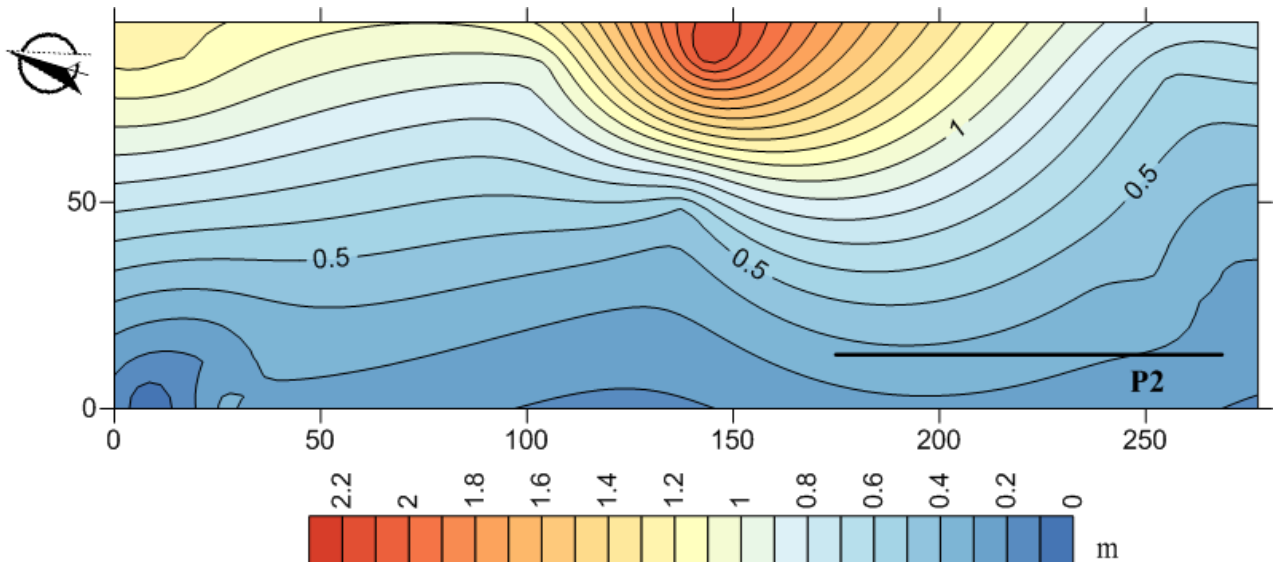


Figura 39. Topografía de la parcela. La línea negra gruesa representa la línea de tomografía y P2 el piezómetro de referencia.

Con los mismos datos de la topografía se elaboró un mapa de vectores de flujo de corriente del agua, donde se puede apreciar los puntos de entrada y salida de agua: esquina superior izquierda, el centro del extremo Este y esquina superior derecha son las 3 entradas; la esquina inferior izquierda y derecha corresponden a las salidas.

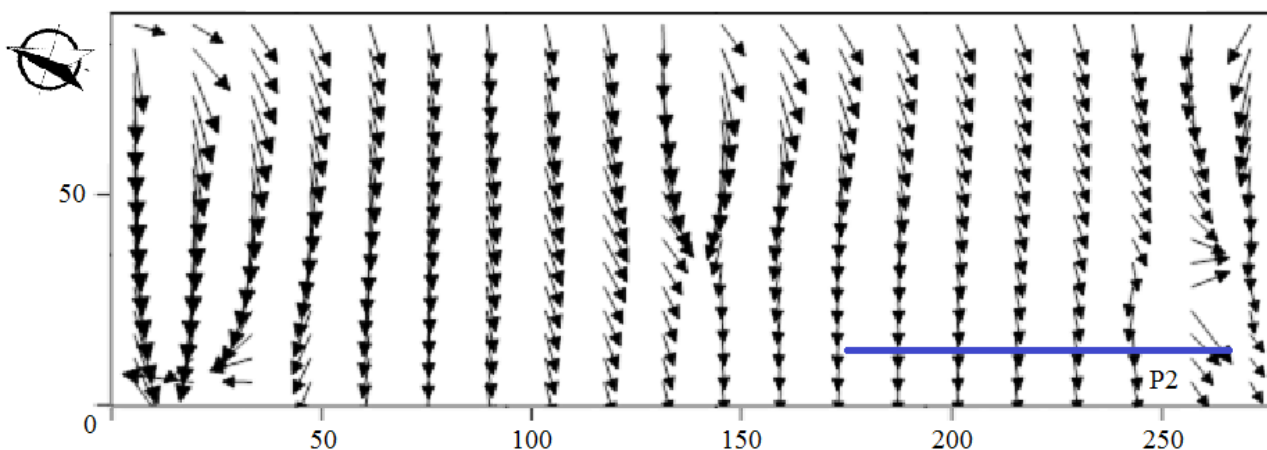


Figura 40. Probable dirección del flujo superficial del agua en la parcela Cedros II. La línea azul representa la línea de tomografía y P2 el piezómetro de referencia.

En la figura 41, se observa que la línea de tomografía se encuentra cerca del borde inferior de la parcela (suroeste) hacia donde corre el flujo de agua por gravedad, así como en la salida derecha del exceso de agua. El borde frena el flujo superficial de agua el cual, debido a la pendiente, se dirige hacia una de las salidas superficiales.

5.2.2 Resultados de los barrenos que obtuvo el grupo de Monitoreo Ambiental

La siguiente tabla (7) contiene la descripción de campo de las barrenaciones, en cuanto a la humedad del suelo y fronteras de interés (Bautista *et al.*, 2013). El valor de pF es el logaritmo en base 10 del potencial matricial del suelo de -1, -10, -100, y -1000 cm de agua, esto es, 0, 1, 2, y 3 respectivamente (Lal and Shukla, 2005).

Tabla 7. Observaciones en barrenaciones.								
Barrenación 1			Barrenación 2			Barrenación 3		
(m)	Descripción	pF	(m)	Descripción	pf	(m)	Descripción	pF
0.15	Húmedo	2	0	húmedo	2	0	Menos húmedo	3
0.63	Menos húmedo	3	0.3	Menos húmedo	3	0.5	húmedo	2
0.78	Menos húmedo muy poroso	3	0.85	Saturado	1	1.25	Saturado	1
0.85	Más húmedo el flujo corrió	2	1.3	Tepetate		1.4	Saturado	1
1	por aquí					1.6	Tepetate	
1.1	Inicia tepetate							

Como se observa, el tepetate se encuentra en 1.1, 1.3 y 1.6 m en las barrenaciones 1, 2 y 3 respectivamente y con mayor humedad o saturación antes del mismo.

5.2.3 Perfiles Edafológicos

Los datos que se muestran en la tabla 8 se obtuvieron de un curso de monitoreo ambiental elaborado por estudiantes del Posgrado en Ciencias de la Tierra del Instituto de Geología (Bautista *et al.*, 2013) en la misma parcela donde se realizaron las tomografías eléctrico-capacitivas (ver figura 39).

Tabla 8. Perfiles edafológicos.		
Número de perfil	1 (figura 39, junto a la barrenación 3)	2 (figura 39, junto a la barrenación 1)
Coordenadas UTM	X=477356, Y=2225321	X = 477262, Y = 2225362
Tipo de suelo	Feozem	Feozem
Material parental	Toba volcánica	Toba volcánica
Condiciones de humedad	Seco en superficie, fresco en horizontes intermedios y húmedo en horizontes a profundidad	Muy seco en superficie, fresco en profundidad
Profundidad del manto freático	23.5 m	24 m
Suelo profundo	1.5 m	1 m
Observaciones	Bien drenado, pH ligeramente alcalino hasta 1.3 m de profundidad y después moderadamente alcalino; sin piedras; alta densidad de poros y raíces, densidad aparente media. Piso de arado de 17 a 25 cm. Textura dominante: franca con alto contenido de arcillas lo cual ayuda a retener el agua en el perfil. Porosidad moderada, conductividad hidráulica media. No hay pedregosidad.	Características muy semejantes al perfil 1, las diferencias son: pH es moderado y fuertemente alcalino en superficie de 3/7 a 21/23 cm y hay pedregosidad de 1-3%.

Las imágenes de la figura 42 muestran las fotografías del suelo en los perfiles 1 y 2 (de izquierda a la derecha, respectivamente), de las cuales se observa un aumento en la tonalidad oscura al profundizar en el perfil, relacionado con el aumento de la humedad registrada en la tabla 7. Al fondo se observan tonos rojizos asociados al tepetate que a su vez, es el límite del suelo, para dar paso al material parental, el tepetate constituye un factor importante para la retención de agua y humedad en el suelo.



Figura 41. Fotografía del perfil 1(izquierda) y perfil 2 (derecha) en la parcela Cedros II, Rancho Las Palmas.

Tlahuelilpan, Hidalgo. Autor: C. Siebe.

La tabla 9 muestra el comportamiento de las densidades aparentes en los perfiles hechos por el grupo de Monitoreo Ambiental (Bautista *et al*, 2013). Además, se agregaron las resistividades de los datos con fuentes enfocadas aproximadas a la posición de los perfiles, esto es, el perfil 1 se encuentra en la extrema superior izquierda de la figura 39 y corresponde verticalmente al sur del perfil de TRE (posición 84m de la figura 27). Por otro lado, para el perfil 2, que se encuentra en la extrema inferior izquierda de la figura 39, se le atribuyeron los valores de resistividad en fuentes enfocadas del extremo norte de la línea de TRE (posición 55m de la figura 27). Cabe mencionar que se omitieron los datos de cargabilidad en esta tabla, ya que la zona de interpretación en los primeros centímetros es homogénea según la imagen obtenida por fuentes enfocadas.

Así mismo, se observa en la figura 27 y de los datos de campo, que al aumentar la profundidad aumenta la resistividad y la humedad (hasta aproximadamente 2m de profundidad); lo cual sugiere que la humedad no determina la resistividad aparente calculada para fuentes enfocadas, por tanto, es el contenido mineral el que aporta mayoritariamente la respuesta geoelectrica.

Tabla 9. Densidades aparentes de los perfiles edafológicos de Tlahuelilpan.

Perfil 1					Perfil 2				
Profundidad (cm)	humedad	Densidad Aparente (g/cm ³)*	Textura al tacto	Resistividad Enfocada (84m horizontal) [ohm*m]	Profundidad (cm)	humedad	Densidad Aparente (g/cm ³)	Textura al tacto	Resistividad Enfocada (55m horizontal) [ohm*m]
0-12/20	seca	<1	franco limosa fina/franco arcillosa	12	0-3/7	muy seca	1.1	franco arcillosa	12
12/20-17/25	fresca	1.4	franco arcillosa	13	3/7-21/23	fresca	1.3	franco arcillosa	12
17/25-45/50	fresca	1.4	franco arcillo-limosa	13	21/23-42	fresca	1.2	franco arcillosa/arcillosa	12
45/50-90/99	fresca	1.4	franco arcillo-limosa	14	42-60	fresca	1.2	franco arcillo-limosa	12
90/99-130	húmeda	1.3	franco arcillosa	14	60-80	fresca	1.1	franco arcillo-limosa	12
130-155	húmeda	1.4	franco limosa fina	15	80-90	fresca	1.3	franco arcillosa	12
>155	húmeda	<1	franco limosa fina	16	>90	fresca	1.5	franco arcillo-arenosa	13

*Datos de campo; densidad aparente semi-cuantitativa, tomados antes del riego.

Tabla 10. Por ciento de humedad y resistividad enfocada de las muestras.

Clave	Prof. (cm)	Capacidad de campo	%Humedad		Resistividad Enfocada
			Muestra de campo*	Punto de marchitez	
M3	220	51.9	40.6	21.4	13
M4	250	30.0	37.1	19.7	13
M5	80	28.2	34.2	25.8	13
M6	220	30.1	37.7	23.9	15
M7	220	27.6	35.9	19.2	15

*Medida 9 meses después de la toma de muestra

La tabla 10 muestra los valores de capacidad de campo y punto de marchitez de las muestras de campo, así como la humedad de la muestra en el estado natural o extraída del subsuelo, medida 9 meses después del día del muestreo que locura,. Los valores de humedad en muestra de campo son muy parecidos entre sí, con un mínimo de 34.2 % (que es la muestra más superficial, a 80 cm) y un máximo de 40.6 % (a 220 cm de profundidad). La resistividad no cambia para el máximo y el mínimo de porcentaje de humedad (se mantiene en 13 Ohm*m) y un máximo de 15 Ohm*m para 37.75 % y 35.9 %, lo cual indica que el contenido de humedad aproximado al momento de la tomografía no influyó en los valores de resistividad, la lógica diría que al aumentar el contenido de humedad disminuye la resistividad, lo cual no ocurre en este estudio.

5.3 Resultados de laboratorio de las muestras de suelo

Como se muestra en la tabla 11, los metales encontrados en el análisis de laboratorio de los suelos, fueron calcio, hierro, litio, magnesio, manganeso, estroncio, titanio y zinc. Debido a que en la interpretación de secciones geoelectricas es posible detectar contrastes, se emplearon los valores mínimos y máximos de las concentraciones en la tabla 11.

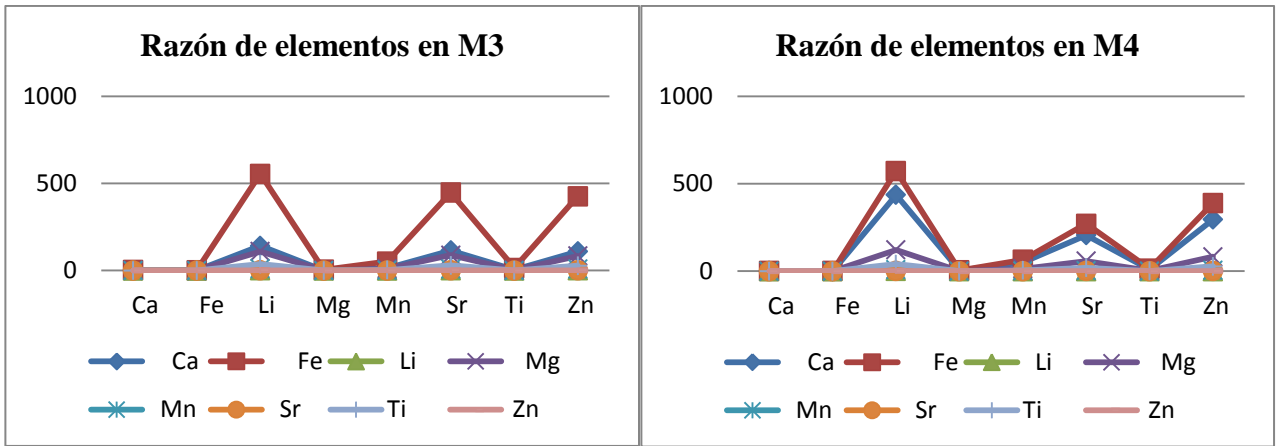
Tabla 11. Resultados de laboratorio de las muestras de suelo y sus respectivas resistividades y cargabilidades asociadas.						
		M3	M4	M5	M6	M7
	x(m)	75	75	69	69	55
	Prof. (m)	2.2	2.5	0.8	2.2	2.2
Concentración (mg/kg)	Ca	6814	17008	33338	14467	21767
	Fe	26608	22335	22682	23970	19534
	Li	48	39	36	39.5	29.5
	Mg	5244	4746	4961.5	4777	4324
	Mn	517.5	342	288	423.5	213
	Sr	59.5	82.5	124	74.5	84.5
	Ti	1760	1590	1487	1653	1372
	Zn	62.5	57.5	48	52	38
Resistividad (Ohm*m)	Enf	13	13	13	15	15
	Inv Izq	14.8	15.6	11.5	16.2	16.8
	Inv Der	15.1	16.3	12	14	14.5
Cargabilidad (ms)	Enf	21	15	6	3	3
	Inv Izq	7.1	7.6	5.1	7.1	7.1
	Inv Der	14	16.1	7.7	9.8	7.7
Arenas (%)		26.03	24.89	24.45	22.39	29.79
Limos (%)		27.67	36.01	23.25	32.23	36.71
Arcillas (%)		46.3	39.1	52.3	45.38	33.5
Nota: las celdas resaltadas en verde corresponden a valores mínimos y en fondo azul los máximos.						

De acuerdo con los valores de fondo obtenidos en trabajos previos de Chapela (2011), los metales cuantificados en una parcela sin riego de aguas residuales son Cd, Zn y Cu, de los cuales sólo se encuentra Zn aproximadamente igual en proporción en nuestra zona de estudio.

De todos los metales analizados de las muestras obtenidas para esta tesis (sección 4.3.2.2.2), sólo fueron detectables Ca, Fe, Li, Mg, Mn, Sr, Ti y Zn, esto significa que los elementos restantes pueden existir o no, y debido a que se encuentran por debajo de los límites de detección del método, esos elementos restantes no son potencialmente nocivos para el ser humano (SEMARNAT, 2007), al menos de acuerdo a los valores máximos permisibles en concentraciones de referencia totales (CR_T) por tipo de uso en suelos de cultivo (ver tabla 12).

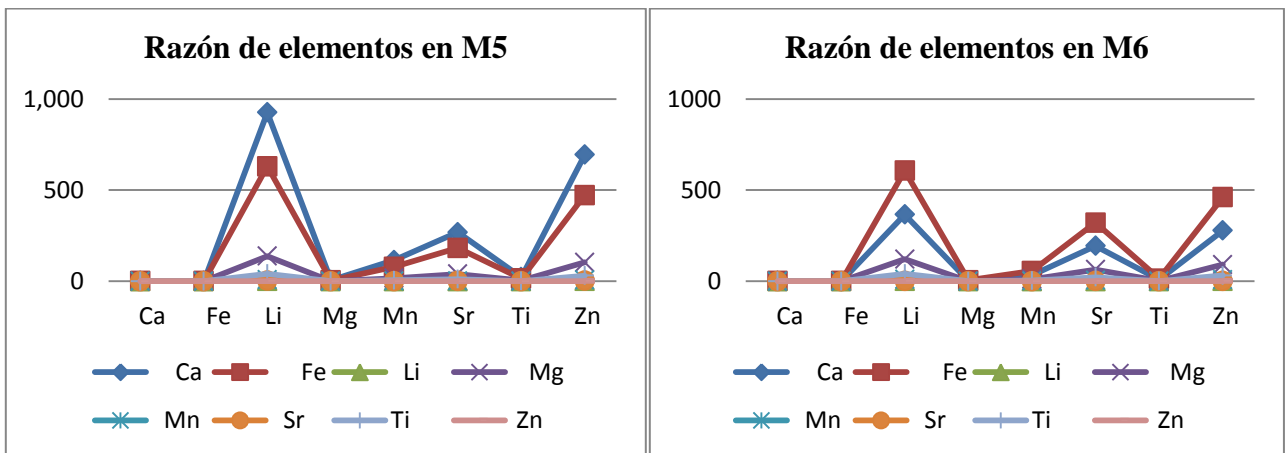
Tabla 112. Concentraciones de referencia totales por tipo de uso de suelo. SEMARNAT (2007)		
Contaminante	Uso agrícola/residencial/comercial (mg/Kg)	Uso industrial
Arsénico	22	260
Bario	5400	67000
Berilio	150	1900
Cadmio	37	450
Cromo Hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1600	20000
Selenio	390	5100
Talio	5.2	67
Vanadio	78	1000
Nota: a) En caso de que se presenten diversos usos del suelo en el sitio, debe considerar el uso que predomine. b) Cuando en los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano no estén establecidos los usos del suelo, se usará el valor residencial.		

Se obtuvieron las razones de las concentraciones de los elementos de la tabla 9 para determinar qué elemento responde más al campo eléctrico generado en el suelo-subsuelo con las tomografías eléctrico-capacitivas, de manera que por ejemplo, a todas las concentraciones de los elementos se les dividió entre la concentración de Ca, luego entre Fe y así sucesivamente con todos los elementos en todos los puntos de muestreo (figura 43a).



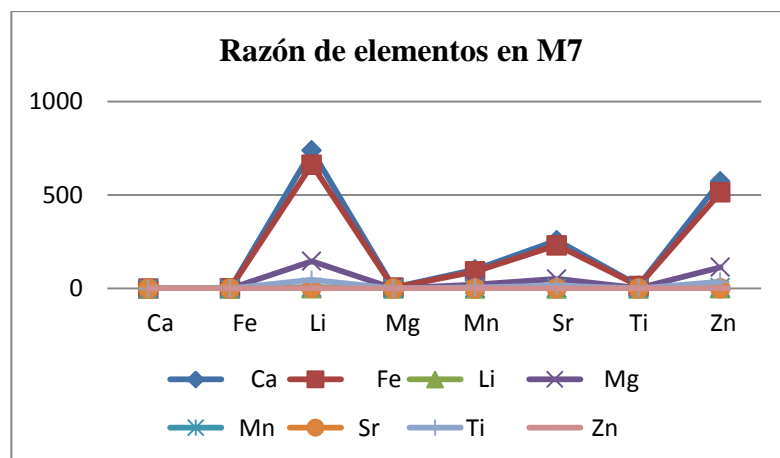
a)

b)



c)

d)



e)

Figura 42. Razón de elementos para a) punto de muestreo M3; b) punto de muestreo M4; c) punto de muestreo M5; d) punto de muestreo M6; e) punto de muestreo M7.

Las gráficas de la figura 43 muestran el predominio que tienen los elementos Fe, Ca y Mg (en ese orden) en los puntos de muestreo M3, M4 y M6. Para los puntos M5 y M7 se tiene Ca, Fe y Mg.

En las figuras 44 y 45 se muestra el comportamiento que guardan los coeficientes de correlación lineal (R^2) de los parámetros de resistividad y cargabilidad con respecto a las concentraciones de todos los elementos encontrados en el muestreo de suelos. El valor máximo fue de $R^2=0.72$ para cargabilidad en el caso de Zc.

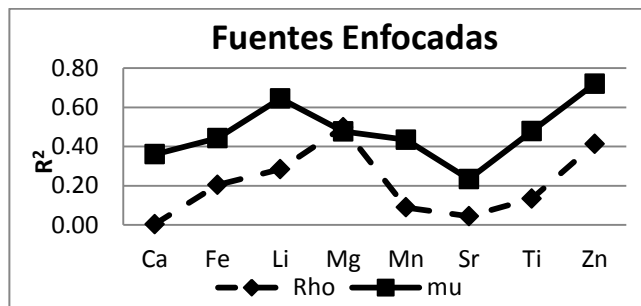


Figura 43. Coeficientes de correlación lineal R^2 entre datos de fuentes enfocadas y concentraciones de los elementos de las muestras de suelo.

En la figura 45 se observa un comportamiento similar entre resistividad y cargabilidad, de manera que los valores mínimos de R^2 se encuentran en Ca y Sr. Por el contrario, en la figura 46, tanto la resistividad como la cargabilidad de los datos invertidos de la fuente izquierda presenta valores máximos de R^2 en Ca y Sr y no es evidente la similitud del comportamiento de la resistividad con la cargabilidad en los demás elementos, que además tiene valores bajos. En la fuente derecha hay similitud de las curvas de R^2 entre los valores de resistividad y cargabilidad, excepto en Ca y Sr.

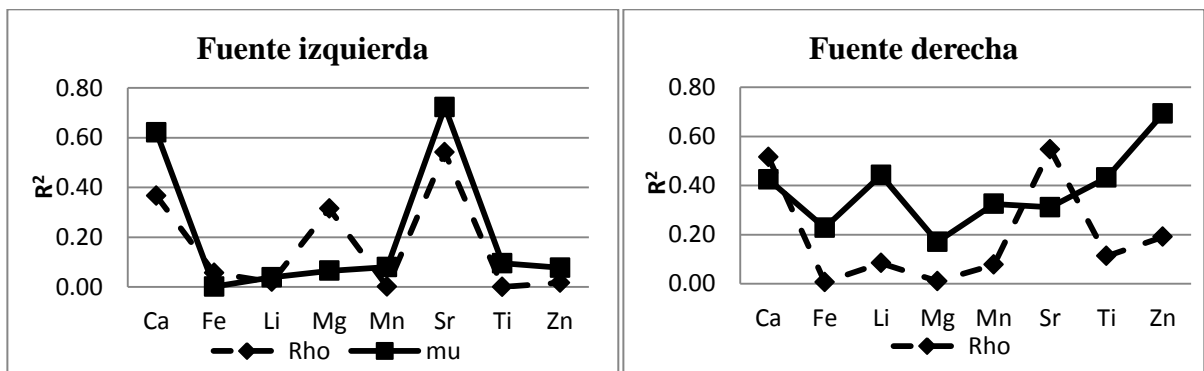


Figura 44. Coeficientes de correlación lineal R^2 entre datos invertidos y concentraciones de los elementos de las muestras de suelo.

5.3 Discusión de Resultados

5.3.1 Calidad de los datos

Los datos geoelectricos obtenidos en campo presentan buena calidad en el sentido estadístico, ya que como se mencionó anteriormente, el equipo de medición realiza un número mínimo de 3 mediciones para obtener el promedio de la diferencia de potencial y con ello calcula la desviación estándar, que es el factor de calidad del dispositivo. Se obtuvo más del 98% de datos con desviación estándar menor al 10%, lo cual implica buena calidad durante la adquisición.

La diferencia de cantidad de datos con factor de calidad Q menor al 10% entre los datos de la fuente izquierda y la fuente derecha es de 1.1% (99.4% para la fuente izquierda y 98.3% para la fuente derecha), esto implicó un error RMS por debajo del 5% en las inversiones tradicionales de los datos de ambas fuentes, lo cual hace suponer que son confiables las mismas para su interpretación en correlación con la geología.

La buena calidad de datos adquiridos en campo (con desviación estándar menor al 10%) no significa necesariamente que no exista ruido producido por el tipo de arreglo, ruido sistemático o telúrico.

5.3.2 Pseudosecciones de resistividad y cargabilidad enfocadas vs resistividad y cargabilidad invertidas de fuentes izquierda y derecha

De acuerdo a las imágenes de las pseudosecciones de resistividad y cargabilidad enfocadas (figuras 27 y 28) es evidente la ausencia del efecto de los electrodos y su contacto con el suelo así como en las pseudosecciones de resistividad y cargabilidad de segundas diferencias (figuras 29 a la 32), a diferencia de las secciones de datos invertidos, tanto para la fuente izquierda (figuras 33 y 34) como para la fuente derecha (figuras 36 y 37), ya que en las inversiones tradicionales no se realizó ningún tipo de ventana para mejorar la calidad de los datos en cargabilidad, esto prueba que mediante las segundas diferencias de los datos, se elimina el campo primario (que corresponde a los efectos de los electrodos) y se mantiene el campo secundario (que sería la respuesta intrínseca del medio).

Las imágenes de los parámetros de las segundas diferencias tienen características de ruido, que pueden notarse por los alineamientos escalonados diagonales, buzantes a la derecha de las anomalías los cuales prácticamente desaparecen cuando se realiza el análisis de datos de fuentes enfocadas, lo cual prueba la eficacia del método para reducir ruido de acoplamiento inductivo de las fuentes.

En cuanto a las secciones de datos invertidos, se observa que carecen de elementos de interpretación para determinar la presencia de metales por medio de bajas resistividades y altas cargabilidades, que son respuestas típicas en la industria minera para metales diseminados en el subsuelo. La única imagen invertida que aproxima la posición de las anomalías de interés es la sección de cargabilidad de la fuente derecha, en la anomalía alto-capacitiva cercana a los puntos con clave M3 y M4, que se aproxima a la anomalía encontrada en resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas en la posición 75 m a las profundidades de 2.2 m a 2.5 m señaladas con las claves M3 y M4. El inconveniente con la anomalía de cargabilidad de la fuente derecha es que no tiene correspondencia con la resistividad de la fuente derecha porque no exista baja resistividad en la misma zona, por ello no puede sugerirse que esa anomalía es de interés. Además, las inversiones no delimitan con tanta precisión anomalías menores, sólo se encontraron zonas bajo resistivas hasta los 2.5m y por debajo, alto resistivas. No se encuentran anomalías significativas menores a 3m, por lo que las fuentes enfocadas son más resolutivas en objetivos de dimensiones de hasta 1m de diámetro.

5.3.3 Observaciones de campo y pseudosecciones de resistividad y cargabilidad enfocadas

De las observaciones de campo, se tiene que la humedad del suelo aumenta al avanzar en profundidad y se satura hasta una profundidad de 1.6 m (tabla 7 y 8). En las imágenes de la figura 27 (resistividad de fuentes enfocadas) se observa un cambio de resistividad (de azul a verde) marcando un horizonte que puede asociarse al tepetate, ya que su profundidad tanto en datos de campo como en la imagen resistiva, coinciden. En el caso de las imágenes de datos invertidos, la zona posiblemente saturada llega hasta los 2.5m de profundidad (zona en tonos azules), esto es, 1 m más profundo que en las observaciones de campo (humedad de las muestras) y de los datos geoelectricos aparentes (resistividad y cargabilidad enfocados), lo cual implica que en las inversiones hay menos precisión en la delimitación de horizontes.

5.3.4 Concentraciones de metales en resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas así como en inversiones de datos de fuente izquierda y derecha.

Las concentraciones de metales que se encuentran en la tabla 9, muestran que 6 de los 8 metales detectados se obtuvieron en la muestra M3 con los valores máximos de todos los muestreos. El otro extremo es en M7, donde se encuentran los valores mínimos para los mismos metales. Estas respuestas corroboran las hipótesis de las pseudosecciones de datos de fuentes enfocadas (figuras 27 y 28), a diferencia de las pseudosecciones de las segundas diferencias y de las inversiones de las fuentes izquierda y derecha individuales. Los valores intermedios, entre los máximos y mínimos de las concentraciones de los elementos, se encuentran en las muestras de M4, M5 y M6 que corresponden, al menos M5 y M6, con las hipótesis de la resistividad y cargabilidad enfocadas. M4 se encuentra 0.3m más profundo que M3 bajo la posición de 75m, y aunque se encuentra muy cerca de M3, se puede detectar diferencias entre ambos.

Los valores de correlación R^2 de la figura 44, muestran que los valores mayores corresponden a los datos de resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas para todos los elementos, excepto para Ca y Sr. Por otro lado, Ca es el elemento que se comporta diferente en las gráficas (e) y (c) de la figura 44, en las que predominan las razones de Ca sobre Fe y Mg para los puntos de muestreo M5 y M7, en los demás puntos de muestreo (M3, M4 y M6) el orden del predominio es Fe-Ca-Mg. M5 y M7 son los muestreos extremos: M5 es el más somero (0.8m) y M7 (2.2m) el más alejado de los demás muestreos, cuyo objetivo era tomarlo como el comportamiento promedio del semiespacio, debido a que en las pseudosecciones de resistividad y cargabilidad enfocadas se tuvo esa respuesta intermedia, en otras palabras, es el punto con los valores de fondo para los parámetros geoelectricos de fuentes enfocadas. M5 tiene los valores máximos de Ca y Sr de todos los puntos de muestreo y M7 tiene los valores mínimos de todos los elementos excepto Ca y Sr, así como también las correlaciones más bajas en los datos de resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas, por tanto los parámetros de resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas responden mejor en la presencia de Fe que en Ca-Sr.

Cabe mencionar que algunos de los valores de las correlaciones lineales en el caso de los datos enfocados son parecidos entre los diferentes métodos (de fuentes enfocadas e invertidos de fuente derecha e izquierda), mientras que algunos otros son cercanos a cero, lo cual sugiere poca

correlación entre datos geoelectricos y concentraciones encontradas en las muestras de suelos. En terminos generales, existe mayor correlación entre los datos de resistividad y cargabilidad enfocados y las concentraciones de los metales extraídos de los suelos muestreados en campo. Además, el comportamiento de esas correlaciones es semejante entre los datos de resistividad y cargabilidad, a diferencia de los datos invertidos.

5.3.5 Parámetros físicos de los suelos y resistividad-cargabilidad

La textura de las muestras indica que va disminuyendo el contenido de arcilla al aumentar la profundidad, esto es de 52.3% (muestra M5) a 33.5% (M7). Entre 2.2m y 2.5m el promedio es de 41.07% y una desviación estándar de 5.9%. El único punto muestreado a 0.8m contiene 52.3% de arcilla. Debido a que las arcillas juegan un papel importante para el parámetro de cargabilidad por su característica carga negativa; en la figura 28 se observa que el contenido de arcillas en el punto de muestreo M5 y M7 se comportan de la misma manera en cargabilidad, lo cual muestra que el contenido de arcillas no afectó sustancialmente las interpretaciones cualitativas ni cuantitativas (en las imágenes de inversión de datos). Por lo anterior, se puede decir que en las respuestas geoelectricas se obtuvieron anomalías de tipo geomorfológicas así como zonas de concentración mineral (metálico), por consecuencia, en la pseudosección de resistividad podrían interpretarse las zonas donde posiblemente haya rutas de migración del agua en el subsuelo.

La tabla 9 muestra que las densidades aparentes no guardan relación con las resistividades enfocadas, ya que al profundizar aumenta la resistividad y la densidad no muestra cambios significativos. Lo cual hace suponer con datos aparentes y aproximados espacialmente, que no hay correlación directa entre la densidad aparente de los suelos con la resistividad, esto es, que el espacio poroso que tienen los suelos para retener agua no es proporcional a la resistividad aparente del subsuelo, entonces las bajas resistividades están asociadas al contenido mineral y su interconexión, más que al contenido de humedad.

De manera general se puede decir que la textura y las correlaciones de los parámetros geoelectricos (enfocados) respecto a las concentraciones de metales, muestran que el contenido de humedad prácticamente no afecta a la detección de anomalías por metales, ya que el método pudo identificar cambios dentro de las zonas de texturas y densidades aparentes parecidas (2.2-2.5 m).

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- * Para disminuir los efectos de acoplamiento inductivo y ruido sistemático (contaminación de canales de medición), no sólo es importante la calidad de la toma de datos en campo (elección correcta de electrodos, buenas condiciones de los mismos, conectores y cables en buen estado, entre otras) sino también el diseño de iluminación del subsuelo con el campo eléctrico, de manera que el uso de fuentes enfocadas permite direccionar verticalmente la corriente y su simetría proporciona certeza horizontalmente.
- * Los parámetros resistividad y cargabilidad de segundas diferencias muestran, tanto en la modelación como en las imágenes de los datos obtenidos en campo, que no definen bien la posición de las anomalías de manera horizontal por la asimetría de las fuentes, por ello sólo funcionan como un medio para llegar a los parámetros de fuentes enfocadas mencionados en el punto anterior.
- * Se delimitan claramente anomalías con respuestas típicas de alta conductividad y cargabilidad, correspondientes a zonas de minerales metálicos con los parámetros propuestos, a diferencia de las respuestas obtenidas con levantamientos tradicionales, en las que no hay correlación entre la resistividad y la cargabilidad.
- * Los parámetros de resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas definen con mayor precisión anomalías más pequeñas (al menos hasta el tamaño de la abertura mínima electródica) que las encontradas en la inversión de datos con software especializado. Además de definir mejor las fronteras verticales, como en el caso del tepetate en la parcela estudiada, así como se muestra vertical y horizontalmente la variación de la conductividad superficial, relacionada perfectamente a la saturación de agua del suelo, como lo demuestran las correlaciones entre las densidades aparentes y los parámetros geoelectricos obtenidos del medio saturado.

- * Los análisis de las muestras de suelo, las cuales fueron obtenidas con el muestreo direccionado con las respuestas geoelectricas de las anomalías de los parámetros propuestos, presentan valores máximos en las concentraciones promedio de metales, en 6 de los 8 metales encontrados y en las posiciones sugeridas en las hipótesis de interpretación, y debido a que el contenido de arcillas es casi uniforme a la profundidad de 2.2m y 2.5m, entonces las anomalías relacionadas a las concentraciones metálicas no son, aparentemente afectadas por dichas arcillas, aunque éstas pueden ser la razón por la que los metales tengan preferencia eléctrica hacia ellas.
- * El contenido de humedad en los suelos, no condiciona de forma evidente la respuesta resistiva o capacitiva de los metales que componen el suelo-subsuelo, sólo para los parámetros de resistividad y cargabilidad de fuentes enfocadas, por lo que dichas respuestas están más asociadas al contenido mineral.
- * Sin duda, el uso de dos fuentes en la práctica de tomografía resistiva y capacitiva mejora la calidad de los datos y ofrece mayor confiabilidad, en este caso, en la interpretación cuantitativa.

6.2 Recomendaciones

- * Se recomienda probar otro tipo de ventanas para disminuir ruido en tiempo, para evaluar la mejor opción de procesamiento de los datos, por ejemplo las onduletas o *wavelets*.
- * Para tener mejor resolución en los primeros centímetros del suelo, es necesario disminuir la distancia eléctrica y usar electrodos más pequeños y delgados para asegurar la condición del electrodo puntual.
- * Obtener muestras de suelo que no hayan sido regados para tener los valores de fondo de cada uno de los elementos analizados.
- * Se recomienda obtener muestras de suelo de manera rápida (después de haber realizado la prospección geoelectrica, el mismo día o cercano a la prospección), así como medir la humedad

y obtener muestras intactas para elaborar un análisis detallado que permita interpretar mejor los parámetros de resistividad y cargabilidad.

- * También se recomienda llevar a cabo el análisis de las ventanas de decaimiento de la cargabilidad para determinar si existe correlación entre las ventanas de tiempo y las concentraciones de los elementos encontrados, ya que en la literatura se sugiere que existe información en las curvas que puedan asociarse a los constituyentes del suelo o rocas prospectados.

A pesar de dar buenos resultados con datos aparentes, se podría mejorar la interpretación de los datos con los parámetros propuestos en esta tesis, mediante un programa de inversión que contemple multifuentes simultáneas, para contar con elementos de interpretación cuantitativa.

ANEXO

A) Perfiles de suelo (tomado de Monitoreo Ambiental Informe final, 2013)

Material

- Pala recta
- Pala curva
- Kit de descripción
- Hojas de descripción

Metodología

En la parcela Cedros II, perteneciente al rancho Las Palmas se describieron dos perfiles de suelos. Dado que las calicatas ya estaban cavadas, se procedió directamente a la descripción de los perfiles.

Previamente a la descripción, se limpió la cara con la que se iba a trabajar. Para ello se hace uso de una pala recta, la cual se coloca en forma vertical a unos 5 centímetros del borde y se empuja hacia abajo para quitar protuberancias o agujeros hechos mientras se cavaba la calicata. En todo momento, se cuidó de no perturbar la superficie donde se encontraba la cara sujeta a descripción. Se colocó una cinta métrica en el borde superior del perfil para poder medir el límite de los horizontes (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. i).



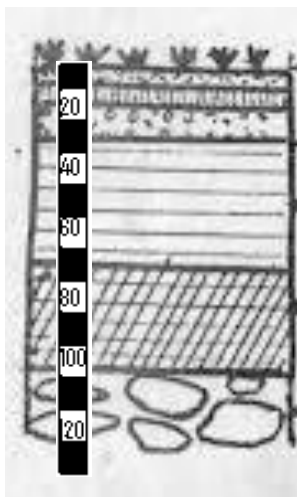


Figura (i) Representación esquemática de un perfil en campo. Siebe et al., 2006.

Con apoyo del manual para para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo, se evaluaron los siguientes parámetros: profundidad y espesor, textura, pedregosidad, color, pH, presencia de carbonatos, humedad actual, estructura, rasgos pedológicos, estabilidad de agregados, poros, densidad aparente, profundidad y densidad de raíces, límite entre horizontes, tipo de humus. Los parámetros que componen la evaluación ecológica en gabinete son: profundidad de desarrollo, profundidad fisiológica, porosidad y retención de agua, espacio poroso total, capacidad de aireación, capacidad de agua disponible, capacidad de campo, conductividad hidráulica bajo condiciones de saturación de agua, drenaje natural, estimación de la erodabilidad, balance de nutrimentos, capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables, abastecimiento de nitrógeno.

El manual, proporcionado en el curso, es una guía paso a paso en la descripción del perfil, desde reconocer la ubicación y los factores ambientales del sitio, hasta la evaluación ecológica en gabinete.

B) Metodología para la obtención de la textura de las muestras de suelos obtenidos en campo

Materiales y reactivos

- Vasos de precipitado de 100 a 1000 mL
- Recipientes de vidrio y plástico de 250 mL con tapa para centrífuga
- Centrífuga de baja y alta velocidad (hasta 12 000 rpm)
- Bujías de cerámica porosa, 0.05 Mpa (0.5 bar) de presión
- Agitadores mecánicos (de movimiento horizontal y agitador de tamices)
- Provetas de 1000 mL
- Agitador mecánico o manual para probeta de 1000 mL
- Soporte (Rack) para colocar la pipeta
- Pipeta especial de 25 mL de capacidad
- Tamíz de 250 μm
- Parrilla eléctrica
- Baño maría
- Estufa para secar a 105°C
- Reactivos. Peróxido de hidrógeno ($\approx 30\%$); NaOAc M (acetato de sodio ajustado el pH a 5); ditionito de sodio (hidrosulfito); solución saturada de NaCl; solución de NaCl al 10 %; hexametáfosfato de sodio (HMF) 50 g/L solución “stock”.

Pretratamientos

Remoción de carbonatos

Se usaron inicialmente 25 g de muestra de cada suelo secado y tamizado. Se agregó 100mL de agua destilada y 10 mL de NaOAc M pH5.

Se removió y se extrajo el sobrenadante y se agregó de nuevo 100 mL de agua destilada y 10 mL NaOAc 2 veces, para que en total se hicieran 3 extracciones. El agua extraída se centrifugó a 3000 rpm para no perder muestra, la cual se incorporó al recipiente original.

Remoción de materia orgánica

Después, se agregaron aproximadamente 5 ml de peróxido en frío. Al día siguiente se pusieron las muestras a baño maría y se agregó más peróxido a 50 °C por unos minutos. Después se pusieron en la parrilla a 80 °C, a modo de reducir el volumen a 50 mL y rellenar 2 veces con agua destilada. Se secaron las muestras (a 105 °C) toda la noche.

No hubo necesidad de remover óxidos de hierro, ya que el color de las muestras indicaba un bajo contenido en los mismos.

De la muestra seca, se pesaron 10 g y se agregaron 25 mL de NaCl saturado, se agitó y centrifugó a 3000 rpm. Después se enjuagó con 50 mL de NaCl al 10%, se agitó y centrifugó dos veces. Se enjuagó 2 veces también con agua destilada (agitado y centrifugado pero ahora con 6000 rpm, debido a que las partículas están más limpias y no hay nada que promueva la formación de agregados).

Se transfirieron las muestras en botellas de centrífuga de 1L con 10 mL de HMF (hexametafosfato, dispersante) y se agitaron toda la noche.



Figura (ii) Fotografías de las muestras en proceso de desecación después de la remoción de materia orgánica (izquierda) y del centrifugado, después de la remoción de materia orgánica en el enjuague del NaCl (derecha).

Separación de fracciones

Se filtraron las muestras con un tamiz del número 250 para extraer las arenas. Después se pasaron las muestras (con limos y arcillas) en probetas de 1 L con 10 mL de HMF (a 0.5 g/L) para obtener alícuotas de 5 cm de pipeta, con 1 min de agitación y 3°33'12'' para una densidad de partículas de 2.6 a 25 °C.

REFERENCIAS

- **Advanced Geosciences, Inc., 2009.** *Instruction Manual for Earth Imager 2D Version 2.4.0 Resistivity and IP Inversion Software.* 139 p.p.
- **Alloway, B. J. 1995.** *Heavy Metals in Soils.* Blackie Academic and Professional. New York.
- **Alpin, L. M., Berdichevskii, M. N., Vedrintsev, G. A., and Zagarmistr, A. M., 1966.** *Dipole methods for measuring earth conductivity.* Translation by G. V. Keller, New York, Consultantbureau.
- **Bautista, I., Betanzos, L., Hernández, G., Jiménez, D., Jurado, O., López, S., Martínez, A., Mata E., Quiñones, G., Ugalde, M., 2013.** *Curso de Campo de Monitoreo Ambiental. Informe de Práctica de Campo.* Universidad Nacional Autónoma de México.
- **Bleil, D. F., 1953** Induced Polarization, a method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18: 636-661.
- **Burt, R. 2004.** *Soil Survey Laboratory Methods Manual.* Soil Survey Investigations Report No. 42. V. 4.0. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. 700 pp.
- **Cayetano, M., 2012.** *Transferencia suelo-planta de metales pesados en parcelas regadas con agua residual en el Valle del Mezquital.* Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, Tesis de Maestría.
- **Chapela, M. y Siebe, C., 2010.** *Variación temporal en el contenido de metales pesados en suelos regados con aguas residuales.* Sesión Especial: Geoquímica Ambiental.
- **Davydycheva, S., Rykhlini, N., Legeido, P., 2006.** *Electrical-prospecting method for hydrocarbon search using the induced-polarization effect.* *Geophysics*, 71: G179-G189.
- **Day P.R., 1965.** *Particle fractionation and particle size analysis.* Ed. C. A. Black. American Society of Agronomy, Inc., Madison.
- **De la Cruz Campa, S. 1965.** *Rehabilitación integral del Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo.* Escuela Nacional de Agricultura Chapingo, Texcoco, México, Tesis de licenciatura.

- **Domínguez, J., 2008.** *Soil contamination research trends*. Nova Science Publishers, Inc. New York. 250 p.p.
- **Edwards, L. S., 1977.** *A modified pseudosection for resistivity and IP*. *Geophysics*, 42: 1020-1036.
- **Fiandaca, G., Auken, E., Vest Christiansen, A., and Gazoty, A., 2012.** *Time-domain-induced polarization: Full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole-Cole parameters*. *Geophysics*, 77: E213-E225.
- **Flores, A., Kemna, A. and Zimmermann, E., 2012.** *Data error quantification in spectral induced polarization imaging*. *Geophysics*, 77: E227-E237.
- **Green, A. J., 1981.** *Particle size analysis. Manual on soil sampling and methods of analysis*. Ed. McKeague. Canadian Society of Soil Science. Ottawa.
- **Hallof P. G., 1957.** On the interpretation of resistivity and induced polarization field measurements. Tesis for the degree doctor of science. Massachusetts Institute of Technology.
- **Hönig, M. and Tezkan, B., 2007.** *1D and 2D Cole-Cole-inversion of time-domain induced-polarization data*. *Geophysical Prospecting*, 55: 117-133.
- **INEGI, 2013.** Mapa Digital de México <<http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.html#>> [con acceso el 19 de junio de 2013]
- **Iris Instruments, 2005.** *User's Manual of Syscal Pro Standard & Switch, 48 -72 or 96 Version, 10 channels Resistivity-meter for Resistivity and IP measurements*, 85 p.p.
- **Kamenetsky, F. M., Stettler, E. H., Trigubovich, G. M., 2010.** *Transient Geo-Electromagnetics*. Ludwig-Maximilian-University of Munich. 304 p.p.
- **La Brecque, D., Daily, W. and Adkins, P., 2007.** *Systematic Errors In Resistivity Measurement Systems*. 20th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Session: EM Applications I. Publications date: 01 April 2007.
- **Lal, R. and Shukla M. K., 2005.** *Principles of soil physics*. The Ohio State University Columbus, Ohio, U. S. A. Ed. Marcel Dekker. Taylor & Francis e-Library.

- **Loke, M. H., 2010.** *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys* [disponible en línea] <http://www.cas.umd.edu/geosciences//faculty/sheriff/495-subsurface%20imaging%20in%20archaeology/Sources/Loke_elect_tutorial.pdf> [con acceso el 22 de julio de 2013].
- **Lopera, A., 2005.** *Efecto de un incremento de la temperatura sobre la mineralización del carbono y la liberación de metales pesados en suelos del Valle del Mezquital.* Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, Tesis de Maestría.
- **Luege, J. L., 2005.** *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México* [disponible en línea] <http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/introduccion/presentacion.html> [con acceso el 14 de marzo de 2013]
- **Luo, Y and Zhang, G., 1998.** *Theory and Application of Spectral Induced Polarization.* SEG Geophysics Reprint Series N° 8,171 p.p.
- **Masona Ch., Mapfai L., Mapurazi S., Makanda R., 2011.** *Assessment of heavy metals accumulation in wastewater irrigated soil and uptake by plants (Zea Mays L) at firle farm in Harare.* Journal of Sustainable Development, 4 (6), 132-137.
- **NMX-AA-132-SCFI-2006,** *Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.* Secretaría de Economía.
- **Orellana, E., 1974.** *Prospección Geoeléctrica por campos variables:* Madrid, Paraninfo.571 p.p.
- **Parasnis, D. S., 1973.** *Mining Geophysics. Methods in Geochemistry and Geophysics.* Netherlands, Elsevier, Second revised edition. Fourth impression. 570 pp.
- **Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R. and Nelson, P. H., 1978.** *Mineral Discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP.* Geophysics, 43: 588-609.
- **Robinson, E. A. and Silvia, M. T., 1978.** *Digital signal processing and time series analysis.* Ed. Holden Day. Unated States of America. 411 p.p.
- **Seigel, Harold., 1959.** *Mathematical Formulation and type curves for Induced Polarizacion.* Geophysics, 24: 547-565.

- **SEMARNAT, 2007.** *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.*
- **Sherif, Robert E., 2002.** *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics: Society of Exploration Geophysicist, Fourth Edition, CD-ROM.*
- **Sherif, Robert E., 1989.** *Geophysical Methods.* New Jersey, USA. Prentice Hall. 605 pp.
- **Servicio Geológico Mexicano, 2002** Carta Geológico-Minera, Ciudad de México, E14-2, Edo. de Méx., Tlax., D.F., Pue.,Hgo. y Mor. Primera Edición.
- **Siebe, Christina, 1994.** *Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo, México.* Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 10(1), 15-21.
- **Siebe, C., Jahn, R. y Stahr, K., 2006.** *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo.* Segunda Edición. Publicación Especial 4. Sociedad Mexicana de Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, Edo. de México, México.
- **Sogade, J. A., Scira-Scappuzzo, F., Vichabian, Y., Shi, W, Rodi, W., Lesmes, D. P. and Morgan, F. D., 2006.** *Induced-Polarization Detection and Mapping of Contaminant Plumes.* Geophysics, 71:B75-B84.
- **Telford, W.M., Geldart, I.P., Sheriff, R., 1990.** *Applied Geophysics.* Segunda edición, Cambridge University, 770 p.
- **Tejero A., Cifuentes G., Chavez R., Lopez A., Delgado C.** L-and corner array for 3D Electric Resistivity Tomography: al alternative for geophysical surveys in urban zones. Submitted to revision Octubre 2012, Near Surface Geophysics.
- **Vanhala, H., Soininen, H., Kukkonen, I., 1992.** *Detecting organic Chemicals contaminants by spectral-induced polaritation method in glacial till enviroment.* Geophysics, 57: 1014-1017.
- **Wong, J., 1979.** *An Electrochemical Model of the Induced-Polarization Phenomenon in Disseminated Sulfide Ores.* Geophysics, 44: 1245-1265.