



**Universidad Nacional Autónoma de
México**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EL MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA
APLICADO A PROBLEMAS DE
CONTAMINACIÓN EN LA CIUDAD DE
MÉXICO**

TESIS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA GEOFÍSICA

PRESENTA:
AIDÉ ESMERALDA LÓPEZ GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ANDRÉS TEJERO ANDRADE



MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE DE 2010

Definir para ilimitar
y en ello implícito el andar
con el crecimiento y finura
de la búsqueda siempre inconclusa.

En la búsqueda es necesario el recuerdo
que sin más por el momento
el pasado y el futuro van unidos por decreto.

El decreto del son particular
inevitablemente en todo está
y ... ¡Qué barbaridad!
Mirad que “un son particular”
habla de todos y uno a la par.

Sabemos que a la par
la causa y el efecto van.

Todos podrán ver
que en la voluntad está generar
cualquiera de aquel par
induciendo a su vez
a la otra a participar
puesto que quietos
nadie quiere estar.

Aumento el tono de mi voz para anunciar
la cadencia entre la cordura y la demencia
siendo ambas, a la corta o a la larga,
de la misma esencia.

Reconozco en mi hablar y actuar
un fallo de conciencia
sin embargo informar
que en mi mente está el generar
el camino que mi alma
necesite andar.

Porque la vida no es blanco y negro...
Porque es color y movimiento.
En realidad, siempre ha sido lo que hemos querido.
Acepto mi voluntad como parte creativa.
A.E.L.G.

AGRADECIMIENTOS

Para mis padres, Mario Jesús López Díaz y María de Lourdes González Padilla. Por su genética, que me permitió sobrevivir. Por sus pensamientos no materializados que me permitieron soñar. Por su constancia para brindarme el material con el que comencé a realizar mi pensamiento propio.

Para mis amigos: Elizabeth Ibañez, Cecilia Delgado, Francisco Poce, Bernal Manzanilla, Eloy Eslava, Alejandro Vázquez, Daniel Pérez. Encontré fortaleza y alegría en su apoyo.

Para Carlos Uresti, por compartir los sueños, su conocimiento y las ganas de alcanzar a ser un buen ejemplar humano.

Para la familia Galván, por recordarme lo más importante: aquello que no se puede ver.

Para Andrés Tejero, que me ha iluminado el camino en la recta final de la carrera.

A Jorge de la C. Guevara, Fernando Rosique, Arturo Tapia, Alfredo Arenas, Alfredo Velázquez, Alberto Sánchez, Carlos Garza, René Chávez, Gerardo Cifuentes, Esteban Hernández, Sergio Chávez, Olga Mucharráz; gracias por su paciencia, conocimiento e invaluable apoyo.

Para TÍ: mis parientes, compañeros y anónimos... mis maestros de la vida.

ÍNDICE

Resumen

CAPÍTULO I	1
I.1 Introducción	1
I.2 Objetivos	3
I.2.1 Onjetivo general	3
I.2.2 Objetivos particulares	3
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA	4
II.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	4
II.2 MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA	6
II.2.1 Definición de Polarización	6
II.2.2 Tipos de polarización	7
II.2.3 Modalidades del Método de PI	9
II.2.3.1 Dominio del Tiempo	9
II.2.3.2 Dominio de la Frecuencia	16
II.2.3.3 Resistividad Compleja	19
II.2.3.4 Dominio Espectral	21
II.3 ARREGLOS ELECTRÓDICOS	26
II.3.1 Factor Geométrico y Resistividad Aparente	27
II.3.2 Cargabilidad Aparente	29
II.3.3 Configuraciones	31
II.3.4 Fuentes de ruido en la toma de lecturas	
CAPÍTULO III POLARIZACIÓN INDUCIDA EN PROBLEMAS DE CONTAMINACIÓN	34
III.1 MECANISMOS DE CONTAMINACIÓN	34
III.2 POLARIZACIÓN INDUCIDA EN LA LITERATURA	37
CAPÍTULO IV PRUEBAS DE PI EN SITIOS CONTAMINADOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO	44
IV.1 LOCALIZACIÓN Y GEOLOGÍA	44
IV.2 CARACTERÍSTICA TÉCNICAS DE LA TOMA DE DATOS	45
IV.2.1 Caso 1: Contaminación por cobre.	46
IV.2.2 Caso 2: Contaminación por hidrocarburos	47
IV.3 RESULTADOS	48
IV.3.1 Caso 1: Contaminación por cobre	49
IV.3.2 Caso 2: Contaminación por hidrocarburos	54
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema del concepto de polarización electrónica. Modificado de Van Blaricom (1992).	8
Figura 2.2. Esquema del concepto de polarización de membrana, Orellana (1974).	9
Figura 2.3. Modelo de capas de roca mineralizadas y su equivalencia en circuitos eléctricos. Modificado de Bleil (1953) y Pelton (1978).	17
Figura 2.4. Representaciones gráficas de respuestas eléctricas (Zonge y Hughes, 1980).	19
Figura 2.5. Gráficas de clasificación de datos de resistividad compleja (Zonge y Hughes, 1980).	19
Figura 2.6. Circuitos eléctricos (Luo y Zhang, 1998).	22
Figura 2.7 a) Porción de roca mineralizada polarizable y b) circuito eléctrico equivalente (Luo y Zhang, 1998).	23
Figura 2.8. Gráficas de amplitud (arriba) y fase (abajo) de las curvas calculadas del modelo Cole-Cole para cargabilidad con $R_0=1$, $\tau=0.1$ y $c=0.25$.	24
Figura 2.9. Espectro de conductividad para modelos de menas metálicas esféricas (radio de 2mm) en diferente concentración (%en volumen). Wong (1979).	26
Figura 2.10. Semiespacio homogéneo con fuente eléctrica puntual (electrodo).	27
Figura 2.11. Tripolo.	29
Figura 2.12. Configuraciones electrónicas.	30
Figura 2.13. Dispositivos cuadripolares.	31
Figura 3.1. Clasificación de zonas hidrológicas del subsuelo.	35
Figura 3.2. Fases que pueden presentarse en un medio que presenta zona saturada y no saturada.	36
Figura 3.3. Secciones del perfil. PI, gravimétrico y magnetométrico. (Seigel <i>et al.</i> , 1968).	36
Figura 3.4. Secciones del perfil elaborado en Chibougamau, Quebec, Canada. (Seigel <i>et al.</i> , 1997).	37
Figura 3.5. Anomalía calculada para a) contaminación por tolueno en 2% en volumen, b) para etilenglicol en 20% en volumen y c) para tolueno a una frecuencia de 100 [Hz]. Todas en arreglo dipolo-dipolo, $a=2$ y $n=3$ (Vanhala <i>et al.</i> , 1992).	41
Figura.3.6 Secciones de Zogala <i>et al.</i> (2009).	42
Figura 3.7. Gráficos del comportamiento de la conductividad aparente en la sección MM' (Zogala <i>et al.</i> , 2009).	43
Figura 4.1. Corte de la Carta Geológica-Minera E14-2, en la que se muestra la zona de pruebas para ambos casos.	45
Figura 4.2. Esquema de la distribución de los electrodos para la toma de lecturas en el sitio contaminado por cobre.	46
Figura 4.3. Componentes del suelo en el sitio contaminado por cobre.	46
Figura 4.4. Ejemplo de la posición de los electrodos en el suelo contaminado por cobre (Cortesía del M. C. Esteban Hernández).	47
Figura 4.5. Esquema de la distribución de los electrodos para la toma de lecturas en el sitio contaminado por hidrocarburos.	47
Figura 4.6. Sección A-A' de la tomografía eléctrica (resistividad y PI) del Caso 2.	48
Figura 4.7. Representación esquemática de los parámetros de medición de la cargabilidad. Tomada del manual de operación del equipo de medición (Iris Instruments, 2005).	49
Figura 4.8. Pseudo-sección de resistividad aparente para el sitio contaminado por cobre.	51

Figura 4.9. Secciones de resistividad y cargabilidad invertidas de la línea en suelo contaminado por cobre.	52
Figura 4.10. Distribución del parámetro τ de la sección del Caso 1. Profundidades calculadas con los parámetros de Edwards (1977).	53
Figura 4.11. Pseudo-sección de resistividad aparente del sitio contaminado por hidrocarburos.	55
Figura 4.12. Secciones de resistividad y cargabilidad invertidas de la sección A'-A y los pozos de muestreo.	56
Figura 4.13. Distribución de concentración de benceno en suelo y agua correspondiente al perfil eléctrico del Caso 2. Profundidades calculadas con los parámetros de Edwards (1977).	58
Figura 4.14. Sección de la distribución del parámetro τ del modelo Cole-Cole estándar para el Caso 2. . Profundidades calculadas con los parámetros de Edwards (1977).	60

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1. Comportamiento del campo eléctrico para un dispositivo capacitivo.	12
Gráfica 2.2. Función escalón unitario de 2 ciclos, que representa a T y t_0 como corriente en “encendido” y “apagado” respectivamente.	13
Gráfica 2.3. Elementos del cálculo de la cargabilidad del modelo de Seigel.	15
Gráfica 4.1. Potencial espontáneo obtenido en los datos del sitio contaminado por cobre.	50
Gráfica 4.2. Curva de decaimiento de la cargabilidad 51.09 desviación estándar de 137.9, SP 460.8; Vp de 3.614 (mV), ρ_a de 0.48.	53
Gráfica 4.3. Curva de decaimiento de la cargabilidad -34.37 desviación estándar de 161.3, SP -390.3; Vp de 0.79 (mV), ρ_a de 0.43.	54
Gráfica 4.4. Potencial espontáneo obtenido en los datos del sitio contaminado por hidrocarburos	55
Gráfica 4.5. Curva de decaimiento de la cargabilidad 29.8 desviación estándar de 0.3, SP 14.1; Vp de 9.775 (mV), ρ_a de 4.06.	57
Gráfica 4.6. Curva de decaimiento de la cargabilidad 29.8 desviación estándar; SP de -74; Vp de 13.061 (mV), ρ_a de 19.97.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comportamiento cualitativo del parámetro τ .	25
Tabla 2.2. Comportamiento cualitativo del parámetro c .	26
Tabla 3.1. Límites máximos permisibles para algunos hidrocarburos específicos en suelo (SEMARNAT, 2003).	37
Tabla 3.2. Valores característicos de τ (Seigel <i>et al.</i> , 1997).	39
Tabla 3.3. Valores del parámetro c característicos de las provincias Xiaojinshan, Tongling y Anhui, China (Luo y Zhang, 1998).	39
Tabla 4.1. Concentraciones de benceno en agua.	58
Tabla 4.2. Concentraciones de benceno en suelo.	58

RESUMEN

Las pruebas obtenidas por algunos autores dedicados a los métodos eléctricos como Seigel (1968 y 1997), han mostrado que al realizar un levantamiento convencional de resistividad, no ha sido posible diferenciar zonas que presentan comportamientos electroquímicos semejantes, tanto de origen orgánico (Vanhala, 1992) como del inorgánico. Es por ello que, a partir de estudios mineros de los años cincuentas, se desarrolló el método de Polarización Inducida (PI), con bastante éxito en esta industria.

En años recientes el método de PI se ha aplicado a problemas de contaminación en suelos, con resultados alentadores. Esta técnica ha sido puesta a prueba, trabajando en el dominio del tiempo, mediante dos perfiles de tomografía eléctrica con datos de resistividad y cargabilidad tomados simultáneamente. Cada uno de ellos fue realizado en un sitio contaminado por hidrocarburos y por cobre respectivamente en una zona ubicada al Norte de la Ciudad de México, en donde la estratigrafía y la distribución del contaminante eran complicadas.

En el primer caso, los hidrocarburos se encontraban en fase libre y fase disuelta en proceso de remediación, mismo que proporcionó las condiciones para la toma de muestras de suelo y agua que fueron enviadas a un laboratorio para analizarlas de manera analítica, con lo que se obtuvieron concentraciones de benceno en 4 pozos cercanos a la línea del perfil eléctrico.

Para el suelo contaminado por cobre, al igual que en el primer caso, se obtuvieron las respuestas eléctricas y de cargabilidad, donde se identifican anomalías de mayor concentración.

Los resultados obtenidos son alentadores, ya que se logra delimitar las zonas de mayor concentración de contaminantes y que muestran el potencial del método de polarización inducida en problemas de contaminación.

CAPÍTULO I

I.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo del desarrollo de la teoría y técnica de la Prospección Eléctrica, se ha buscado la manera de obtener las respuestas del subsuelo que aborden la información suficiente para delimitar cuerpos materiales de interés industrial como son metales, carbón, materiales de construcción, etc. Aunque existe mucha información en la literatura sobre la adquisición de datos de resistividad, no ocurre lo mismo para el caso de PI. Dicha información se encuentra dispersa debido a las diferentes modalidades que se han desarrollado para su interpretación.

En este sentido, se presenta el Capítulo II con la evolución de aquellos hechos y personajes que desarrollaron el método, así como de los fundamentos teóricos de la Polarización Inducida que han sido desarrollados en paralelo con las investigaciones en resistividad, desde el Dominio del Tiempo (bajo estado transitorio) hasta el Dominio Espectral, pasando por el Dominio de la Frecuencia y Resistividad Compleja, esto es, desde la concepción física y matemática del problema hasta la modelación del fenómeno para diferentes medios geológicos.

Además se hace un recordatorio de las condiciones en la adquisición de datos necesarias en cualquier estudio de PI como son los arreglos electródicos y las fuentes comunes de ruido, que son algunos aspectos indispensables en cualquier levantamiento de esta naturaleza.

El motivo para la elaboración de este capítulo, surge ante la necesidad de establecer la nomenclatura y secuencia clara de la teoría, ya que en la literatura se llegó a tener confusión sobre cómo denominar a las distintas modalidades, ya que podía modificarse según el autor.

En el Capítulo III, dedicado a PI en problemas de contaminación, el lector encontrará una breve descripción de los mecanismos de contaminación de suelos y transporte de los mismos para dos tipos de agentes contaminantes, ya que sería interminable hablar de todos los identificados y caracterizados hasta ahora.

A su vez, en este capítulo se describen los aportes de algunos trabajos para problemas ambientales como son contaminantes orgánicos y la búsqueda de minerales metálicos diseminados, siendo estos últimos, los pioneros en la práctica de esta metodología. Al decir aportes, se hace referencia a las respuestas típicas para algunas litologías y condiciones ambientales de los parámetros físicos que describen el fenómeno, por ejemplo la cargabilidad (μ), el factor dependiente de la frecuencia (c) y la constante de tiempo (τ) de algunos tipos de rocas, que a nivel de geofísica de campo, se pueden considerar como datos auxiliares para las interpretaciones en gabinete.

Al haber desarrollado los aspectos básicos y la presencia en ambiental del método en los capítulos antes mencionados, se llega al Capítulo IV en el que se consolidan la teoría y la práctica sobre suelos contaminados para polarización de membrana y electrónica, se describen las pruebas realizadas en dos sitios ubicados al norte de la Ciudad de México, así como las características técnicas para la adquisición de sus datos y los resultados obtenidos de las mismas.

El primer sitio, contaminado por cobre, muestra significativamente que con realizar un levantamiento convencional de resistividad, no ha sido posible diferenciar zonas con comportamientos electroquímicos semejantes, por lo que no aportaban gran información para delimitar las zonas contaminadas. Se muestran las respuestas de manera comparativa, la respuesta eléctrica (resistividad) con la de polarización inducida (cargabilidad), que como se verá más adelante, la interpretación de ambas características y en general de toda la información que se tenga, es importante para llevar el problema al siguiente nivel en materia ambiental, que bien puede tratarse de las actividades necesarias para la remediación del sitio.

El segundo ejemplo de aplicación, contaba con estratigrafía complicada de acuerdo con las observaciones de campo e información vía comunicación oral y se hallaba contaminado por agentes de tipo orgánico en las tres fases y en estado de remediación. De este sitio se pudo contar con información de muestras de laboratorio, no así de datos litológicos precisos.

De ambos casos se presentan las curvas de decaimiento de potencial características, las secciones de resistividad aparente con su respectiva interpretación, así como la representación espacial interpolada de los datos de la constante de tiempo, que es un parámetro relacionado con la distribución de los diferentes tamaños de grano. Se verá que este parámetro tiene un gran potencial de desarrollo, al menos para problemas hidrogeológicos y ambientales.

I.2 OBJETIVOS

I.2.1 Objetivo general

Aplicar la teoría de la Polarización Inducida en el Dominio del Tiempo en problemas de contaminación en la Ciudad de México.

I.2.2 Objetivos particulares

1. Desarrollar de manera clara y general los fundamentos teóricos del Método de PI en sus diferentes modalidades, así como los aspectos básicos de todo levantamiento eléctrico que involucre P.I.
2. Exponer algunos ejemplos de la literatura científica que traten de la aplicación de PI en problemas de contaminación.
3. Aplicar pruebas de PI en el Dominio del Tiempo en dos sitios contaminados por fuentes diferentes, al Norte de la Ciudad de México.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA

II.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

De los trabajos de recopilación de Seigel *et al.* (2007) se proporciona la siguiente información y en su caso, se citarán algunas referencias que complementan en grandes rasgos, el tema presente.

Sin duda, uno de los precursores del método de Polarización Inducida (PI) en los inicios de los métodos electromagnéticos en general, fue Conrad Schlumberger, quien recibe la patente del método de PI en 1912, tras haber realizado estudios en resistividad y potencial espontáneo. En trabajos posteriores tras la búsqueda de distinguir diversos tipos de rocas, Schlumberger denominó “coeficiente” a la relación de V_s/V_p (V_s corresponde a la diferencia de potencial en estado estacionario y V_p al pico transiente) obtenidos en estado estacionario en datos de pozo para la exploración de hidrocarburos en 1934.

Entre 1932 y 1934, Weiss y Müller realizaron experimentos de aplicación del método, que no arrojaron resultados satisfactorios debido al dispositivo empleado.

Hacia 1948, después de la interrupción de la investigación por motivos bélicos, A. S. Polyakov utilizó el nombre de “cargabilidad” a ese denominado “coeficiente” de Schlumberger, término que se sigue utilizando hasta nuestros días.

El principio básico de PI fue usado en un proyecto del Laboratorio de Artillería Naval (NOL), llamado “underwater electric potencial (UEP)” durante la Segunda Guerra Mundial, ante la necesidad de detectar zonas marítimas minadas. El desarrollo de éste método surge en la escuela americana como “ultra secreto” y aparentemente, sin tener conocimiento de las monografías reanalizadas por Conrad Schlumberger ni de los trabajos soviéticos.

El nombre de PI se consolida a través de Blail (1953). Su trabajo motivó a Madden, entonces profesor en el MIT, a incursionar en la materia y junto con Vacquier y Brant, obtuvo experiencia proveniente de las compañías mineras Newmont y Anaconda con las que desarrolló las pseudosecciones en 2D para el arreglo dipolo-dipolo, la creación de equipo portátil, el concepto de “polarización de membrana”, el porcentaje del efecto de la frecuencia (PFE), el factor metálico (MF) así como códigos de inversión en 1D y 2D, siendo Vozoff quien implementaría algoritmos de cancelación telúrica y quien después incursionaría en exploración magnetotelúrica.

Como parte del equipo de Madden, Hallof para el año de 1956 complementa su tesis doctoral y trabaja para *McPhar* realizando sondeos de PI en el dominio de la frecuencia, y junto con Pelton, Ward, Phil Nelson y Bill Sill, extiende el uso del análisis espectral para extraer el acoplamiento electromagnético y los parámetros Cole-Cole.

Seigel comenzó a estudiar el fenómeno de decaimiento transiente del voltaje observado, después de que su mentor, Arthur Brant, le informara que la naval estadounidense había encontrado minas con dicho fenómeno. Doce años más tarde, Seigel (1959) hace una gran aportación para PI, con el artículo “Mathematical Formulation and Type Curves for Induced Polarization”, ya que es el primer trabajo de descripción matemática formal del fenómeno en E.U.A., siendo Y. P. Bulashevich el primero a quien se le atribuye la primera teoría física y matemática en “Computation of induced polarization anomalies for spherical ore bodies”, en la entonces llamada URSS.

Con los experimentos realizados por Seigel y Leonard Collett en la empresa Newmont Canada Limited, se obtuvo que la resistividad aparente en corriente alterna (ac) de las muestras de sulfuros decaía rápidamente conforme aumentaban la frecuencia. Así fue como James Wait realizó la teoría apropiada en cuanto a la propagación de ondas electromagnéticas en la Tierra, aunque las pruebas de campo siguieron siendo en el dominio de la frecuencia debido a la poca sensibilidad instrumental para ese tiempo.

Ed McAllister, quien fue uno de los buzos contratados en la Segunda Guerra Mundial por la *Naval Ordinance Laboratory* (NOL) para probar prototipos de detectores de minas, fundó la División de Geofísica en Anaconda, Alaska, con el propósito de descubrir un criterio para diferenciar pirita y calcopirita en depósitos de sulfuros de cobre, siendo éste el mayor de los problemas en la industria minera. Con ello, el 80% de 184 pruebas fueron correctamente identificadas, aunque Mark Halverson consideró que ese método estaba limitado debido a que no se consideraban efectos producidos por el tamaño de grano, interconexión entre partículas y la forma del contorno del mineral de sulfuro.

Los parámetros antes citados son aquellos con los que la NOL desarrollaría el modelo espectral de PI basados en R (radio de la partícula) y k , que es una variable equivalente a los parámetros τ y c del modelo Cole-Cole propuesto por Pelton *et al.* (1978). El parámetro τ ha sido uno de los más importantes para separar las respuestas producidas por arcillas, grafito y sulfidos.

Otros avances, tanto en polarización inducida como en datos de resistividad, obtenidos por los trabajos de McAlister y su equipo de trabajo, fueron el mejoramiento en la relación señal/ruido debido al incremento en la profundidad de exploración que los llevó a realizar un sistema de cancelación telúrico mediante la adición de un electrodo “al infinito” respecto al arreglo.

Aunque en el desarrollo de los métodos eléctricos y electromagnéticos se ha buscado la solución de problemas de tipo bélico y minero, no siempre ha sido así. Una aplicación importante del método PI ha sido en la detección de acuíferos potenciales y un caso de ello se tiene de Victor Vacquier y Pail Kintzinger de New Mexico Institute of Mining and Technology, cuyo problema radicó en diferenciar estratos con arenas sucias de arcillas asociando las respuestas a la polarización de membrana.

A principios de los años ochentas con la caída en los precios del cobre y del petróleo, que en este último PI fungía como método auxiliar no-sísmico para la exploración petrolera, el interés en la polarización también declinó.

Sin embargo, con el progreso tecnológico a nivel electrónico y la automatización en la adquisición de la información, ha resurgido la polarización inducida en países llamados del tercer mundo para encontrar depósitos porfídicos de cobre usando la resistividad compleja o PI espectral para discriminar respuestas del metal buscado y efectos de acoplamiento electromagnético (Matthews y Zonge, 2003). Inclusive, se han elaborado modelaciones de respuestas de datos magnetotéluricos (MT y CSAMT) para extraer la información en polarización bajo ciertas restricciones (Gasperikova, 2005).

En la actualidad se han publicado artículos de polarización inducida aplicados en zonas contaminadas por hidrocarburos (Slater y Lesmes, 2002; Sogade *et al.*, 2006; Vanhala *et al.*, 1992; entre otros), presas de jales, rellenos sanitarios, entre otros, a manera de resolver problemas potenciales en materia de salud pública y legislación sanitaria, motivos principales para la realización de la tesis presente.

II.2 MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA

En la prospección geoelectrica el parámetro a identificar es la resistividad de las rocas mediante el paso de corriente eléctrica en el subsuelo y no ha sido una tarea fácil poder llevar a cabo la modelación de la distribución de ésta en el espacio, debido a que son diversas las consideraciones a tomar. Por ejemplo: si el medio es heterogéneo u homogéneo, si es isótropo o anisótropo, cuáles son los minerales que conforman la red cristalina, la presencia de humedad o cuerpos de agua, salinidad, temperatura, presión y porosidad (Orellana, 1974).

Las investigaciones han probado que una representación en 2D de la distribución de resistividad no es suficiente para encontrar algunas zonas de interés (Seigel *et al.*, 1997). Sin embargo, hay información que puede aprovecharse durante la adquisición de datos resistivos para complementar la información de las características del subsuelo mediante la obtención de la “polarización” que ha sufrido el medio.

Por ello se definen enseguida los principios de las metodologías y después los mecanismos que hacen posible la adquisición en campo.

II.2.1 Definición de Polarización

Debido a la necesidad de encontrar yacimientos de minerales como oro y cobre en ambientes de difícil acceso por condiciones de profundidad y diseminación, se buscó la manera de entender el comportamiento físico de aquellos metales. Fue así como los físico-químicos han estudiado, en pruebas de electrólisis, las interfases entre un electrodo (metal) y una solución iónica (Parasnis, 1973) encontrando el fenómeno denominado “over-voltage” o sobre-voltaje.

De acuerdo con el diccionario de la SEG (Sherif, 2002), se 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. 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 \vec{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).

A continuación, se describen los mecanismos generalmente aceptados en la literatura por los cuales se pueden polarizar materiales de roca natural, que como se verá adelante, depende de las características geoquímicas y geoelectricas del medio.

II.2.2 Tipos de polarización

En estudios de resistividad es usual correlacionar los valores de resistividad de diferentes materiales obtenidos en laboratorio, con las resistividades obtenidas de los datos de campo ya que se cuenta con información preliminar geológica. Sin embargo, en el caso de polarización inducida dicho análisis no puede efectuarse de manera directa ya que la gama de factores que producen el fenómeno es más amplia que para la resistividad por sí sola.

Polarización Electrónica

Las condiciones que se suponen para la polarización electrónica (llamada así por la polarización del electrodo durante el proceso de electrólisis), son que 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 siguiente figura.

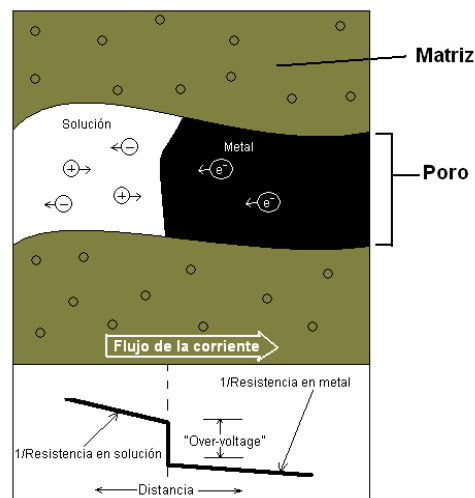


Figura 2.1. Esquema del concepto de polarización electrónica. Modificado de Van Blaricom (1992).

El intercambio de carga a través de la interfase metal-electrolito, sólo puede ocurrir en presencia de reacciones químicas del tipo oxidación-reducción, de esta manera, la interfase presenta una impedancia que es dependiente de reacciones electroquímicas y del transporte de iones reactivos que alimenten esas reacciones (Sherif, 1989), en otras palabras, depende del reactivo limitante.

En cuanto a las características geoelectricas, se ha encontrado que las impedancias en las superficies de electrodos metálicos planos inmersos en soluciones electrolíticas, son dependientes de la frecuencia o dispersivos. Esta impedancia dispersiva involucra el concepto de impedancia Warburg, cuya magnitud es proporcional al inverso de la raíz cuadrada de la frecuencia (Wong, 1979).

Los casos más sobresalientes de la aplicación de la PI en la búsqueda de minerales, se han dado al encontrar piritita, pirrotita, calcopiritita, grafito, galena, bornita, magnetita y pirolusita (Parasnis, 1973), que son minerales que se encuentran íntimamente relacionados en su mecanismo de formación y, debido a que su composición química es semejante, la respuesta eléctrica tiene problemas en diferenciarlos. Esto motivó el desarrollo de metodologías que pudieran proporcionar información adicional, como se verá en el apartado II.2.3.

Polarización de Membrana

De acuerdo con Sogade *et al.* (2006), la polarización de membrana es causada por la impedancia de interfase 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 2.2). De acuerdo con Sogade *et al.* (2006), la polarización de membrana es el efecto de PI observado comúnmente en los mapeos de contaminación.

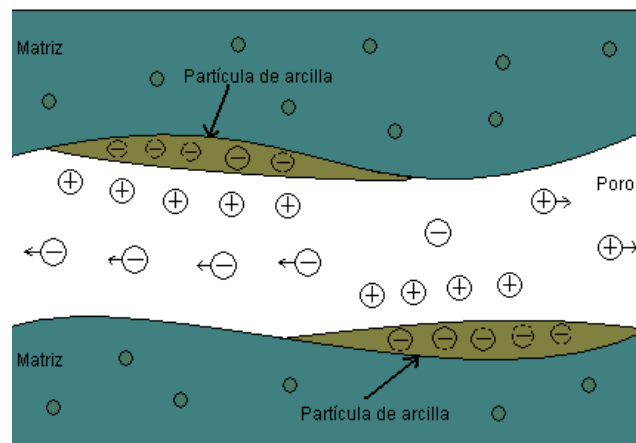


Figura 2.2. Esquema del concepto de polarización de membrana, Orellana (1974).

Como puede apreciarse en la descripción de los 2 tipos de polarización identificados, de manera implícita se involucra la idea de que dicho fenómeno es esencialmente superficial.

II.2.3 Modalidades del Método de PI

Los tipos de métodos para obtener respuestas de PI han sido modificados a través del tiempo y han dependido de la capacidad tecnológica, así como de variables que poco a poco se fueron contemplando, como la granulometría y propiedades electroquímicas, motivos que formaron parte de algunos modelos matemáticos que pretendieron describir mejor el comportamiento eléctrico, como los propuestos por Seigel (1959), Wong (1979), Zonge (1980) y Pelton (1978).

Por ello se describe a continuación las diferentes formas en como fueron llamando a los tipos de medición y análisis de PI, abordando en profundidad al método de PI en el dominio del Tiempo, en el dominio de la Frecuencia, Resistividad Compleja y Espectral.

II.2.3.1 Dominio del Tiempo

Como se mencionó anteriormente, durante las mediciones de propiedades eléctricas tanto en rocas como en laboratorio, hubo la necesidad de responder algunas preguntas que surgieron al notar la variación en la relación V_s/V_p , que Poliakov denominó cargabilidad (Pelton *et al.*, 1978).

Se ha observado que al tener dos electrodos de corriente conectados a tierra y simultáneamente a una batería, se puede medir un voltaje entre dos electrodos de prueba y este voltaje no llega a su máximo valor rápidamente sino que puede tardar desde algunos segundos a varios minutos. Cuando se detiene la corriente, el voltaje en los electrodos de prueba no decae inmediatamente, sino que persiste por un periodo de tiempo y luego decae su magnitud de manera continua en algunos medios o discontinua en otros, dependiendo de las características eléctricas del medio así como de las características geoquímicas.

Debido a la sencillez y el historial científico, la teoría subsecuente está basada en los trabajos de Wait (1982), por lo que se citarán aquellas referencias complementarias en esta modalidad.

En general el campo eléctrico se expresa en función de la frecuencia y para un medio homogéneo, isótropo y lineal de un dispositivo capacitivo perturbado por una fuente alterna de onda cuadrada unitaria (o con impulso unitario) se tiene que

$$\rho(i\omega)\mathbf{J}(i\omega) = \mathbf{E}(i\omega) \quad (2.1)$$

donde $\rho(i\omega)$ es la resistividad, $\mathbf{J}(i\omega)$ es el vector de densidad de corriente y $\mathbf{E}(i\omega)$ es el vector del campo eléctrico en función de la frecuencia. Esta ecuación muestra la relación existente entre el campo eléctrico y la densidad de corriente en cualquier punto del medio para campos armónicos en el tiempo.

Debido a las componentes complejas, podemos decir que

$$e_x(t) = \text{Re}(E_x(i\omega)e^{i\omega t}) = |E_x| \cos(\omega t + \Phi_x) \quad (2.2)$$

$$\Phi_x = \varphi_x + \psi \quad (2.3)$$

Donde Φ_x es la fase de E_x , φ_x es la fase de $\mathbf{J}(i\omega)$ y ψ es la fase de $\rho(i\omega)$. De 2.1 se puede asumir que el medio es lineal, en el sentido de que el campo eléctrico es proporcional a la densidad de corriente.

También se puede expresar a la resistividad en función de las propiedades electromagnéticas del medio:

$$\rho(i\omega) = [\sigma(i\omega) + i\omega\epsilon(i\omega)]^{-1} \quad (2.4)$$

Donde $\sigma(i\omega)$ y $\epsilon(i\omega)$ son la conductividad y la permitividad reales del medio. Esta expresión nos indica que la resistividad se presenta en un rango de frecuencia correspondiente a un comportamiento dieléctrico disipativo y conductor, de aquí que matemáticamente se expresen con parte real y parte imaginaria.

En forma experimental se ha observado el comportamiento del campo eléctrico al suministrar corriente eléctrica al subsuelo (gráfica 2.1), en donde le toma un tiempo al medio alcanzar el estado estacionario. Este comportamiento es de tipo exponencial y su representación no puede realizarse sólo con una función, mas bien, se puede asumir un comportamiento de superposición mediante una sumatoria de exponenciales. Así como se puede obtener el comportamiento de la resistividad en el dominio del tiempo, con el fin de manipular las ecuaciones, Wait (1982) la representa en el dominio de la frecuencia, mediante la transformada de Fourier de la función exponencial

$$\rho(i\omega) = |\rho| e^{i\psi} \quad (2.5)$$

Donde

$$e_x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E_x(i\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.6)$$

Ahora, debido a que tratamos con campos variables en el tiempo, podemos sustituir $i\omega$ como s

$$e_x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} E_x(s) e^{st} d\omega \quad (2.7)$$

Y en la notación laplaciana
$$\rho(s) = \sum_{n=0}^N A_n \frac{1}{\alpha_n + s} \quad (2.8)$$

Para la cual A_n y α_n son coeficientes que ajustan mejor los datos experimentales. Además, el campo eléctrico se puede expresar como:

En 2.7, se hizo el cambio de un plano de integración en la superficie s a una línea justo al lado derecho del eje imaginario.

Es conveniente tener en cuenta que la componente x del vector de densidad de corriente (j_x) es una cantidad impresa y la forma en que se debe considerar (debido a que la corriente representativa es proporcionada por nuestra fuente alterna) es la siguiente:

$$j_x = J_0 u(t) \quad (2.9)$$

Donde $u(t)$ es la función escalón unitario definida como:

$$u(t) = \begin{cases} 1 & ; \text{ para } t > 0 \\ 0 & ; \text{ para } t < 0 \end{cases}$$

Si en expresión de Laplace (L) se tiene:

$$J_x(s) = Lj_x(t) = J_0 L u(t) = J_0 \int_0^{\infty} e^{-st} dt = \frac{J_0}{s} \quad (2.10)$$

Entonces se puede escribir:

$$e_x(t) = J_0 \sum_{n=0}^N A_n L^{-1} \frac{1}{s(s + \alpha_n)} \quad (2.11)$$

Al tomar la transformada de Laplace inversa se tiene que:

$$L^{-1} \left(\frac{1}{s(s + \alpha_n)} \right) = L^{-1} \left(\frac{1}{\alpha_n} \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \alpha_n} \right] \right) = L^{-1} \left(\frac{1}{\alpha_n} L [1 - e^{-\alpha_n t}] u(t) \right) \quad (2.12)$$

Por lo que:

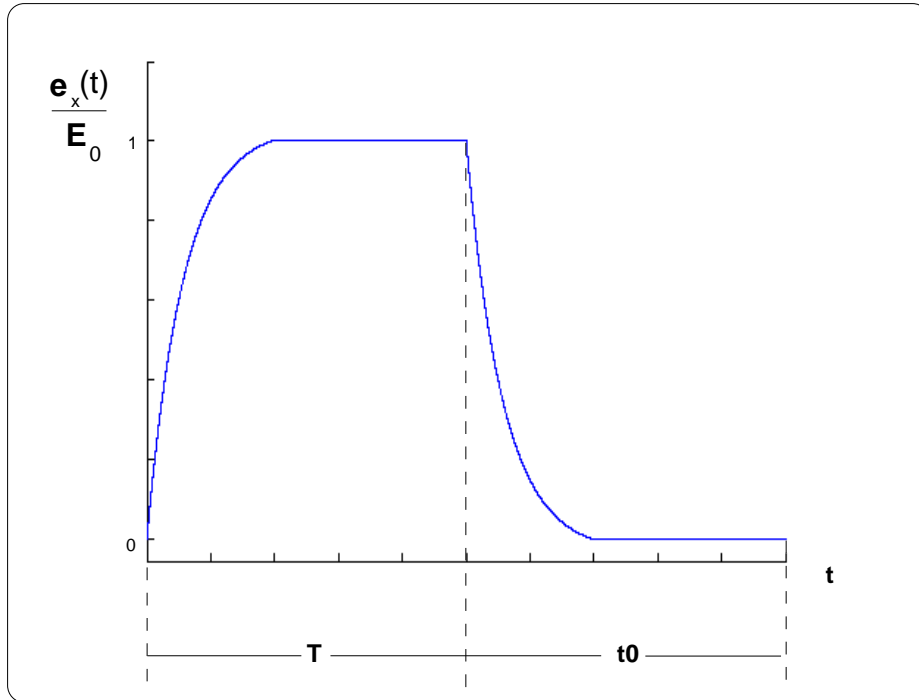
$$e_x(t) = J_0 \sum_{n=0}^N \frac{A_n}{\alpha_n} [1 - e^{-\alpha_n t}] u(t) \quad (2.13)$$

En esta expresión se puede apreciar que al evaluar en tiempo igual con cero, el campo eléctrico en x también vale cero y si hacemos que t tienda a infinito:

$$e_x(\infty) = E_0 = J_0 \sum_{n=0}^N \frac{A_n}{\alpha_n} \quad (2.14)$$

Como puede apreciarse, la relación $e_x(t)/E_0$ se aproxima suavemente a 1 en tiempos suficientemente largos (ver gráfica 2.1). Al dividir la ecuación 2.13 entre E_0 se tiene:

$$\frac{e_x(t)}{E_0} = \frac{J_0}{E_0} \sum_{n=0}^N \frac{A_n}{\alpha_n} [1 - e^{-\alpha_n t}] u(t) \quad (2.15)$$



Gráfica 2.1. Comportamiento del campo eléctrico para un dispositivo capacitivo.

Y si hacemos $\rho_0 = \frac{E_0}{J_0}$, entonces:

$$\frac{e_x(t)}{E_0} = \frac{1}{\rho_0} \sum_{n=0}^N \frac{A_n}{\alpha_n} [1 - e^{-\alpha_n t}] u(t) \quad (2.16)$$

Si se renombra esa relación con C (t) se tiene entonces:

$$C(t) = \frac{1}{\rho_0} \sum_{n=0}^N A_n L^{-1} \left(\frac{1}{s(s + \alpha_n)} \right) \quad (2.17)$$

$$C(t) = \frac{1}{\rho_0} \sum_{n=0}^N A_n L^{-1} \left(\frac{1}{s} \right) \left(\frac{1}{(s + \alpha_n)} \right) \quad (2.18)$$

Pero si se sustituye 2.8 en 2.18 se tiene:

$$C(t) = \frac{1}{\rho_0} L^{-1} \left(\frac{1}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \alpha_n} \right) \quad (2.19)$$

Por lo tanto:

$$C(t) = \frac{1}{\rho_0} L^{-1} \left(\frac{\rho(s)}{s} \right) \quad (2.20)$$

Para una excitación general:

$$J_x = \frac{E_x}{\rho_x}$$

Se tiene:

$$C(t) = \frac{1}{\rho_0} L^{-1} \left(\frac{\rho(s)}{s} \right) [sJ(s)] \quad (2.21)$$

De acuerdo con el teorema de la transformada de una derivada:

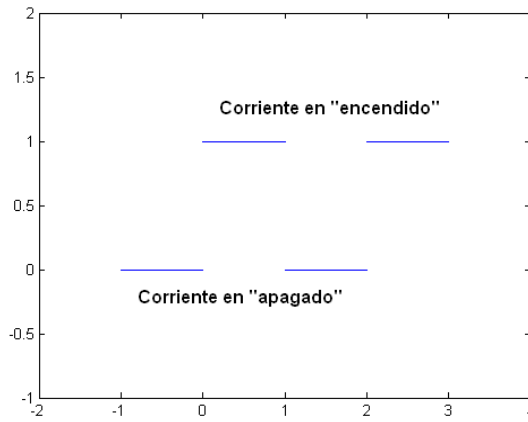
$$sJ(s) = L\left[\frac{d}{dt}J_x(t)\right] \quad (2.22)$$

En términos prácticos se tiene que $\rho_0 = \rho(s)|_{s=0}$ es la resistividad en corriente directa. Además, la corriente j_x aplicada al semiespacio, representada anteriormente en función del escalón unitario en la ecuación 1.9 (gráfica 2.2), puede observarse como una superposición de impulsos unitarios:

$$j_x(t) = J_0 [u(t) - u(t-T) - u(t-T-t_0) + u(t-T-t_0-T) + \dots] \quad (2.23)$$

$$j'_x(t) = J_0 [\delta(t) - \delta(t-T) - \delta(t-T-t_0) + \delta(t-T-t_0-T) + \dots] \quad (2.24)$$

Donde $\delta(t)$ es la función impulso unitario, T es el tiempo en el que se está transmitiendo la corriente y t_0 es el tiempo donde no hay corriente.



Gráfica 2.2. Función escalón unitario de 2 ciclos, que representa a T y t_0 como corriente en “encendido” y “apagado” respectivamente.

Si se convolucionan este tren de impulsos con la transformada de Laplace, para $t \geq 0$:

$$e_x(t) = \rho_0 \left[\int_0^t C(\tau) j'_x(t-\tau) d\tau + C(t) j'(0) \right] \quad (2.25)$$

$$e_x(t) = \rho_0 \left[\int_0^t C(t-\tau) j'_x(\tau) d\tau + C'(0) j(0) \right] \quad (2.26)$$

$$e_x(t) = \rho_0 \frac{d}{dt} \int_0^t C(\tau) j_x(t-\tau) d\tau \quad (2.27)$$

$$e_x(t) = E_0 [C(t) - C(t-T) - C(t-T-t_0) + C(t-2T-t_0) + \dots] \quad (2.28)$$

Para $t < 0$, $C(t) = 0$. En esta expresión se puede observar que, de no haber otros factores que cambien con el tiempo, el campo eléctrico será repetitivo. Sin embargo, en la realidad esto no sucede, el comportamiento del campo justo cuando se deja de suministrar la corriente se observa un decaimiento súbito sin llegar a cero, y para facilitar la discusión de éste fenómeno, desde el punto de vista de Wait (1982), se cambia el origen del tiempo $t=0$ al final de la porción de carga de un ciclo en particular

$$\hat{e}(t) = E_0 [1 - C(t) + C(t+T) + C(t+T+t_0) - C(t+2T+t_0) - \dots + C(t+pT+pt_0)] \quad (2.29)$$

Para $0 < t < t_0$ y asumiendo que se enciende el dispositivo en una porción positiva de corriente en $t = -p(T+t_0)$ donde p es un entero. Cuando este parámetro es lo suficientemente grande, entonces la onda llega a ser repetitiva. Cuando T es lo suficientemente grande, la respuesta del campo para el intervalo anterior se puede expresar como:

$$\hat{e}(t) = E_0 M(t)$$

Donde:

$$M(t) = 1 - C(t), \quad M(t) = 0 \text{ en } t < 0 \quad (2.30)$$

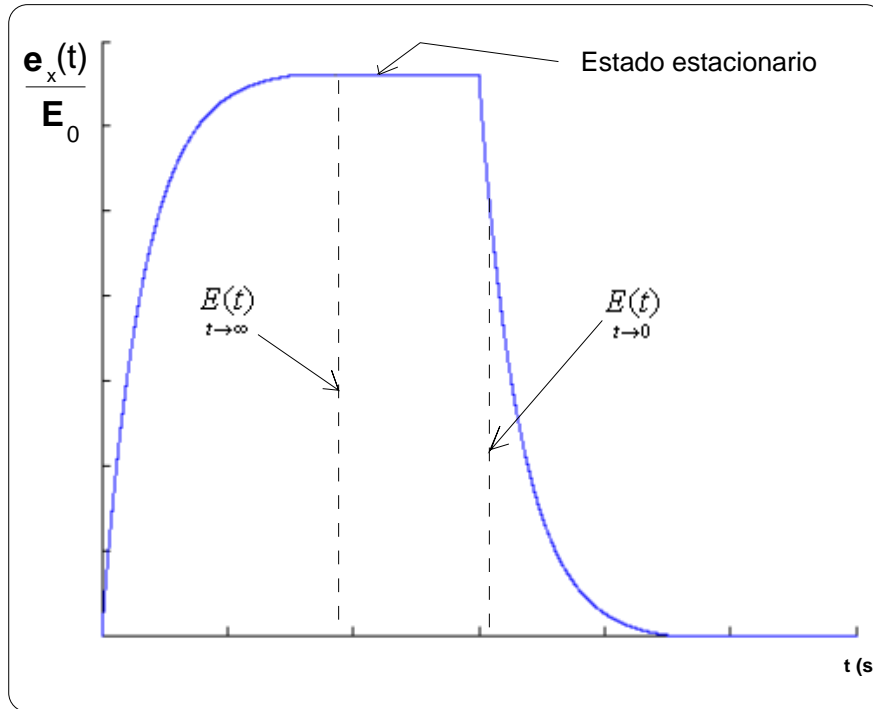
Entonces:

$$\hat{e}(t) = E_0 [M(t) - M(t+T) - M(t+T+t_0) + M(t+2T+t_0) + \dots] \quad (2.31)$$

Esta expresión representa el comportamiento del campo eléctrico en el que es considerado el efecto de la cargabilidad definida como M y es un modelo teórico que se ajusta muy bien a los datos que se pueden obtener en campo. Otra observación que puede hacerse es que la modelación del comportamiento del campo eléctrico es la misma tanto para el tiempo de “carga” (en el tiempo de suministro de corriente eléctrica) como en el de “descarga” (en el tiempo donde no hay corriente),

Sin embargo, en la práctica es común usar la nomenclatura de Seigel (1959) con la letra μ , que se obtiene como lo indica la siguiente ecuación, representada con la gráfica 2.3.

$$\mu \equiv \frac{E(t) - E(t)}{E(t)} \quad (2.32)$$



Gráfica 2.3. Elementos del cálculo de la cargabilidad del modelo de Seigel.

En la que: $E(t) - E(t) = e_x(t)$ y $E(t) = E_0$
 $t \rightarrow \infty$ $t \rightarrow 0$ $t \rightarrow \infty$

Por tanto, la cargabilidad queda expresada como:

$$\mu = \frac{e_x(t)}{E_0} \quad (2.33)$$

Ecuación que se conoce 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 podemos medir diferencias de potencial. Por lo anterior, se define el campo eléctrico como sigue

$$e_x(t) = -\frac{dV(t)}{dx} \quad (2.34)$$

$$E_0 = -\frac{dV(t)}{dt} \Big|_{t=\infty} \quad (2.35)$$

Sustituyendo 2.34 y 2.35 en 2.33:

$$\mu = \frac{\frac{dV(t)}{dx}}{\frac{dV(t)}{dt} \Big|_{t=\infty}} \approx \frac{\frac{\Delta V(t)}{a}}{\frac{\Delta V(t)}{a} \Big|_{t=\infty}} \quad (2.36)$$

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

$$\mu = \frac{\Delta V(t)}{\Delta V(t) \Big|_{t=\infty}} \quad (2.37)$$

Orellana (1974) define la cargabilidad en (ms) integrando la curva de decaimiento en el numerador de la ecuación 2.37, como se muestra en la 2.38., el equipo de medición de Iris Instruments (2005) por otro lado, integra tanto el numerador como el denominador de 2.37 y multiplicando a éste por el intervalo de integración llamando al producto como cargabilidad normalizada (μ_n en ecuación 2.39), que lleva por unidades (mVs/V).

$$\mu = \frac{\int_0^{t_1} \Delta V(t) dt}{\Delta V(t)|_{t=\infty}} \quad (2.38) \quad \text{y} \quad \mu_n = \frac{1}{\Delta t} \frac{\int_0^{t_1} \Delta V(t) dt}{\Delta V(t)|_{t=\infty}} \quad (2.39)$$

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, por lo que en la gráfica 2.3 se muestra el valor del campo desplazado un tiempo póstumo al de corte.

Ésta descripción corresponde al método de PI en el dominio del tiempo o pulso transientes, en el que se buscan porciones de tierra en las que haya un flujo de corriente eléctrico después de haber cortado el suministro de corriente inicial, que por sí solo brinda una información mayor que sólo la de la respuesta eléctrica.

Una de las ventajas de usar PI en el dominio del tiempo, es la simplicidad en el equipo de medición, así como el tiempo de procesamiento de la información. Sin embargo el tiempo que requiere para tomar la lectura es prolongado.

II.2.3.2 Dominio de la Frecuencia

Keava Vozzof y Philip Hallof llevaron a cabo en el año de 1954 (Seigel *et al.*, 2007) experimentos con su profesor Ted Madden, en los que usaban corriente alterna aplicada a rocas de South Ore Zone de Mindamar Mine en Cape Breton Island, Nova Scotia y posteriormente presentaron su *Percent Frequency Effect* (PFE) así como el *Metal Factor* (MF).

Los experimentos realizados para detectar acuíferos en el año de 1953 por parte de New Mexico Institute of Technology, llevaron a algunos investigadores a observar el comportamiento de la polarización en medios secos y medios saturados además del contenido de arcillas (Vacquier *et al.*, 1957).

En esos estudios se llegó a la conclusión de que las mediciones de PI son sensibles a las propiedades capacitivas de las rocas y suelos en bajas frecuencias, que resultan de procesos de difusión en las interfaces de los granos minerales y la resistividad del fluido que contiene el poro (Slater y Lesmes, 2002). Esto fue un aporte significativo para PI debido a que se incluía en la lista de incógnitas del fenómeno, una fuente o agente que lo generaba, que es el fluido en la matriz.

Ya que la cargabilidad por sí sola no aportaba más información que la referente a la magnitud capacitiva, surgen una serie de investigaciones en cuanto al comportamiento de la polarizabilidad al variar la frecuencia.

Las observaciones del efecto que produce una corriente alterna en circuitos eléctricos pueden compararse con las observaciones del fenómeno de PI, en el que ocurre una disminución en la resistividad de las rocas al aumentar la frecuencia de la corriente aplicada.

En esta modalidad, la teoría se basa en el comportamiento de fenómenos físicos sencillos. En este sentido se tiene un circuito eléctrico con resistores y dispositivos capacitivos. La similitud entre ellos es la siguiente: los resistores son materiales con diferentes permitividades electromagnéticas como rocas, sedimentos y fluidos; los dispositivos capacitivos serían las reacciones electroquímicas entre el paso de corriente y el medio circundante (metálico o iónico) y el cable conector del circuito serían las trayectorias de las líneas de corriente en el medio.

En la figura 2.3 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 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, se tiene un medio de características dieléctricas diferente la primero pero circundando un cuerpo mineralizado que representa un poro bloqueado.

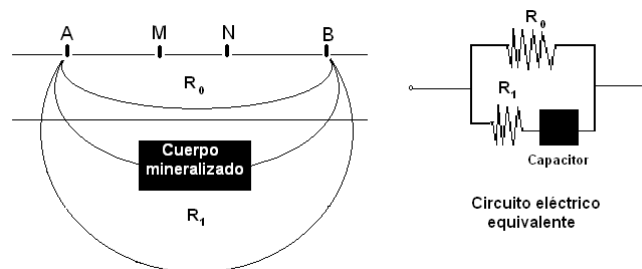


Figura 2.3. Modelo de capas de roca mineralizadas y su equivalencia en circuitos eléctricos. Modificado de Bleil (1953) y Pelton (1978).

Siguiendo el modelo de circuito equivalente, se puede representar el fenómeno de polarización de membrana sustituyendo al cuerpo mineralizado por un capacitor. Es debido a ello que la teoría de polarización inducida, desde una aproximación cuasi-estática, considera a la resistividad como una función de la frecuencia.

En un sistema que se está cargando, la resistividad del medio se ve disminuida debido a la cargabilidad como se vio en la ecuación 2.40, generalizando la expresión para cualquier frecuencia, se tiene para frecuencias altas ($\omega \rightarrow \infty$ ó $t \rightarrow 0$)

$$\rho(i\omega) = \rho_{\infty} \quad (2.41)$$

Haciendo que $\omega \rightarrow 0$ (ó $t \rightarrow \infty$) se tiene

$$\rho(i\omega) = \rho_{\infty}(1 - \mu) = \rho_0 \quad (2.42)$$

Donde

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \rho(i\omega) = \rho_0 \quad \text{y} \quad \lim_{\omega \rightarrow \infty} \rho(i\omega) = \rho_{\infty} \quad (2.43)$$

Sustituyendo 2.41 y 2.42 en la ecuación 2.32, para medios homogéneos isótropos y polarizables, se define la cargabilidad

$$\mu = \frac{J\rho_0 - J\rho_{\infty}}{J\rho_0} \quad (2.44)$$

En un intento por cuantificar dicho comportamiento, en esta metodología se estableció como parámetro adimensional el *frequency effect* (*fe*) o el efecto de la frecuencia, que es homólogo a la cargabilidad en el dominio del tiempo. Así como se definió μ , la definición de *fe* surge del comportamiento de la resistividad (o conductividad) en un rango de frecuencias, pero debido a que no es sencillo obtener las respuestas en un rango continuo, se optó por normalizar una diferencia de 2 frecuencias (Hollof, 1964), consideradas, una a frecuencia cero (o resistividad medida en tiempos largos, ρ_0) y la otra, lo más alta posible (resistividad tomada en tiempos cercanos a cero, ρ_{∞}), de esta manera se tiene:

$$fe = \frac{\rho_0 - \rho_{\infty}}{\rho_{\infty}} \quad (2.45)$$

El factor metálico (MF), semejante a la conductividad (Parasnis, 1971; Van Blaricom, 1992), es un parámetro que proporciona un poco más de información. Fue empleado para distinguir zonas de mayor concentración de minerales metálicos para la exploración minera.

$$MF = 2 \times 10^5 \frac{(\rho_0 - \rho_{\infty})}{\rho_0 \rho_{\infty}} \quad (2.46)$$

En esta metodología se requiere del equipo especializado para tomar lecturas en las frecuencias necesarias o se puede modelar el decaimiento en el dominio del tiempo como una serie de exponenciales desde las cuales puede generarse el espectro de fase en el dominio de la frecuencia (Johnson, 1994), obteniéndose no sólo la cargabilidad, sino también los parámetros τ y c del dominio espectral que se verá en el apartado II.2.3.4 de este capítulo.

II.2.3.3 Resistividad Compleja

El *Método de Resistividad Compleja*, es parecido al método del dominio de la frecuencia, en la que tanto fase como magnitud de la impedancia son funciones de la frecuencia (Luo y Zhang, 1998; Zonge y Hughes, 1980) por su parte, definen a la *Resistividad Compleja* como la representación en el plano complejo de los datos espectrales de PI corregidos por efectos electromagnéticos, en un rango de frecuencias de interés.

Comúnmente, las respuestas eléctricas se representaban con la magnitud y la fase (figura 4 a). En este sentido, la importancia del método propuesto por Zonge y Hughes (1980), radica en que la información se presenta en gráficas del plano complejo como en la figura 2.4 b), en datos espectrales (reales e imaginarios), con los que puede llevarse a cabo y debido a que las respuestas imaginarias han sido generalmente negativas, el eje imaginario lo han dispuesto negativo.

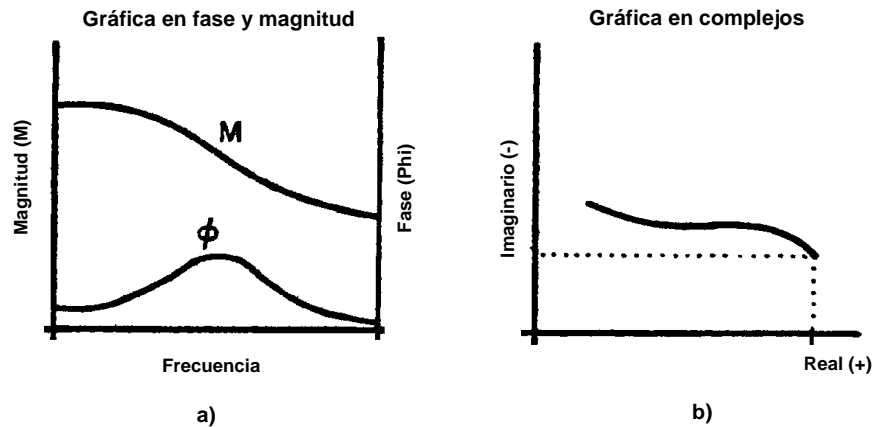


Figura 2.4. Representaciones gráficas de respuestas eléctricas (Zonge y Hughes, 1980).

De acuerdo con Zonge y Hughes (1980), en campo se corrige la fase en tres frecuencias puntuales usando una ecuación cuadrática y extrapolando a corriente directa (dc), asumiendo que el acoplamiento electromagnético es suave y que no existe en dc, además que la respuesta de PI es constante en bajas frecuencias; esto es

Para frecuencias armónicamente relacionadas, $f_0, 3f_0, 5f_0$ (Hz):

$$\phi_{3pt} = \frac{1}{8} (15\phi_{f_0} - 10\phi_{3f_0} + 3\phi_{5f_0}) \quad (2.47)$$

Donde f_0 es la menor frecuencia medible. Los arreglos de ajuste en tres frecuencias dependen del tipo de equipo de adquisición que se disponga.

Deben recordarse las suposiciones hechas para este cálculo, ya que no se está corrigiendo el acoplamiento frecuencia por frecuencia, sólo se observan los datos para una frecuencia en la cual no existe tal acoplamiento, ello implica que no se está obteniendo una respuesta espectral libre de acoplamiento. También debe observarse que un error de un mili radian en las tres frecuencias puede resultar en uno o dos mili radianes de diferencia en el cálculo de ϕ_{3pt} . De la suposición de que la respuesta de PI es constante en bajas frecuencias, es parcialmente cierto, ya que para arcillas aluviales y sulfuros por ejemplo, no se comporta como tal. Por lo anterior, esta metodología no se usa en interpretaciones finales.

Esta manera de representar la información, ha permitido discriminar de manera cualitativa las respuestas eléctricas de medios conocidos como de tipo A, B o C, dependiendo de la inclinación de las curvas en el plano complejo, como se muestra en la

figura 2.5, en la que se esquematizan las gráficas tipo y se indica hacia dónde se incrementa la frecuencia. Estas gráficas proveen una descripción de la roca encajonante o de la mineralización. La clasificación de este tipo de curvas se definió de acuerdo a la pendiente de la curva, la tipo A con pendientes que van del 10 al 20%, las tipo B de -10 al 10% y las C de -10 a -20%.

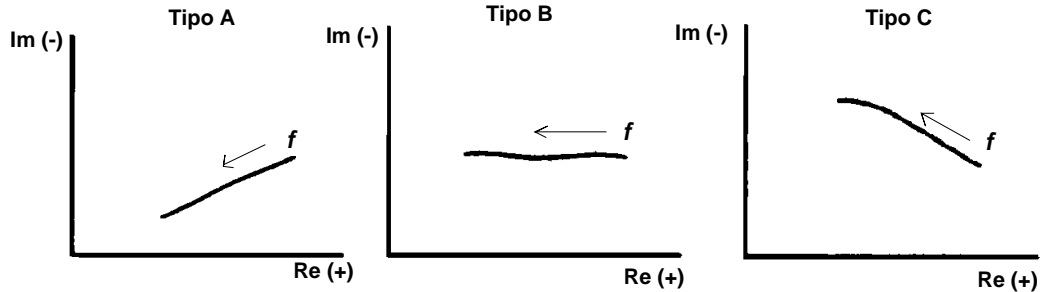


Figura 2.5. Gráficas de clasificación de datos de resistividad compleja (Zonge y Hughes, 1980).

La gráfica correspondiente al tipo A es usualmente asociada con alteraciones intensas como arcillas, grafito, cobre y pirita. La tipo C, es frecuentemente relacionada con ciertos tipos de alteración como la cloritización y usualmente sin sulfuros asociados. El tipo B representa una transición entre la A y la C que puede ser interpretada como un indicador de mineralizaciones sulfuradas.

La manera en como presentan la información, es a través de datos electromagnéticos residuales (REM), que consisten en remover el acoplamiento de una tierra homogénea así como el efecto de polarización de la misma a los datos de resistividad compleja totales en el plano complejo, esto es:

$$REM = \text{respuesta total} - \text{respuesta PI} - \text{acoplamiento tierra de homogénea}$$

Además, se obtiene el porcentaje del efecto de la frecuencia (PFE), como dato adicional, midiéndose las resistividades aparentes en 0.1 y 1 (Hz) como se indica en la siguiente ecuación.

$$PFE = \frac{\rho_{0.1} - \rho_1}{\rho_1} \times 100\% \quad (2.48)$$

Una variante del método es la *Impedancia Compleja*, que es otra metodología basada en el dominio de la frecuencia, en la que se mide el desfase de las amplitudes entre el electrodo de voltaje y el de corriente (Parasnis, 1973), aunque en la literatura actual no se mencionan trabajos al respecto.

II.2.3.4 Dominio Espectral

Los trabajos realizados por Pelton *et al.* (1978) y Wong (1979) en la década de los setentas, trajo como resultado investigaciones de otros grupos de trabajos que trataron de responder algunas incógnitas de la aplicación del método de PI multifrecuencial, en los que obtuvieron poca información en varios tipos de mineralizaciones sobre rangos amplios de frecuencias. Las incógnitas principales rondaban sobre el espectro típico de los materiales, si estos podían modelarse matemáticamente, además si esos modelos

eran únicos o dependían de otros parámetros aparte de consideraciones geológicas como el tamaño de grano, concentración o tipo de mineral.

Los procesos de PI desde los puntos de vista físico y químico, han sido vistos de dos maneras: como polarización superficial y polarización volumétrica. A nivel microscópico, puede considerarse que todos los efectos son producidos como la suma de polarizaciones superficiales.

Entonces, experimentalmente se sabe que el “sobre voltaje” es producido por la componente normal del vector de densidad de corriente j_n y por una constante positiva k que representa la capacidad del cuerpo a polarizarse.

$$\Delta V = -kj_n \quad (2.49)$$

Donde k es función del tiempo T de carga del sistema, ante una función de corriente en función escalón (gráfica 2.2)

$$k(T) = A\sqrt{T} \quad (2.50)$$

Para el proceso de carga y descarga se tiene:

$$k(T, t) = k_0(1 - e^{-T/k_0x})e^{-t/k_0x} \quad (2.51)$$

En el que k_0 es la impedancia superficial (en la frontera) cuando la carga alcanza su saturación ($T \rightarrow \infty$) y x es la capacitancia del área interfacial (figura 4). Asumiendo la linealidad y la no variación en el tiempo, entonces la respuesta en frecuencia de la impedancia superficial de PI en un campo de corriente armónico es:

$$k(i\omega) = i\omega \int_0^{\infty} k(T)e^{-i\omega T} dT = i\omega \int_0^{\infty} A\sqrt{T}e^{-i\omega T} dT = \frac{A\sqrt{\pi}}{2\sqrt{i\omega}} \quad (2.52)$$

El cual, después de reorganizar se tiene:

$$k(i\omega) = \frac{1}{\sqrt{i\omega x}} = (1\omega x)^{-1/2} \quad (2.53)$$

También llamada, Impedancia de Warburg, puede ser usada para describir la concentración de la polarización, para un modelo equivalente de circuitos eléctricos como el de la figura 2.6a (Luo y Zhang, 1998). A partir de esta ecuación, se puede llegar a la Impedancia de Debye si se considera a la resistencia superficial k_0

$$k(i\omega) = i\omega \int_0^{\infty} k_0(1 - e^{-T/k_0x})e^{-i\omega T} dT = i\omega k_0 \left(\frac{1}{i\omega} - \frac{1}{i\omega + \frac{1}{k_0x}} \right) \quad (2.54)$$

Reescribiendo:

$$k(i\omega) = \left(\frac{1}{k_0} + i\omega x \right)^{-1} \quad (2.55)$$

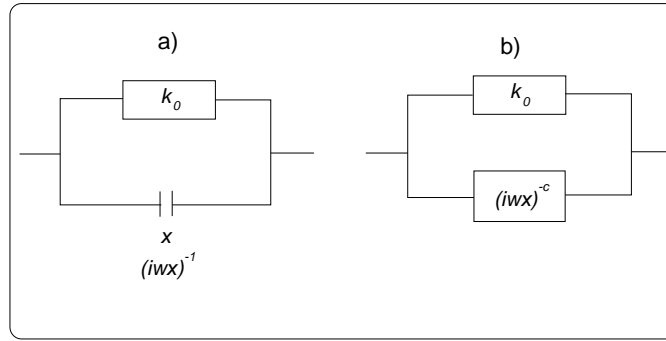


Figura 2.6. Circuitos eléctricos (Luo y Zhang, 1998).

Sintetizando la impedancia de Warburg y la de Debye, se obtiene el comportamiento de la impedancia para un circuito eléctrico como el de la figura 2.6b, en la que se describe los efectos de la polarización superficial general con la conexión en paralelo de la resistencia superficie k_0 y una reactancia superficial $(i\omega x)^{-c}$ con la ecuación:

$$k(i\omega) = \left(\frac{1}{k_0} + (i\omega x)^c \right)^{-1} \quad (2.56)$$

En esta ecuación se puede hacer la observación que cuando $k_0 \rightarrow \infty$ y $c=0.5$, la ecuación se simplifica a la ecuación 2.54. El rango de valores que puede adquirir comúnmente c está aproximadamente entre 0.5 y 1.

Para hacer la generalización de la impedancia hacia un volumen pequeño de roca mineralizada polarizable, se utiliza el modelo conocido como *IP Espectral* de Pelton *et al.* (1978), en el que se tuvo como meta obtener los parámetros del modelo de Cole y Cole.

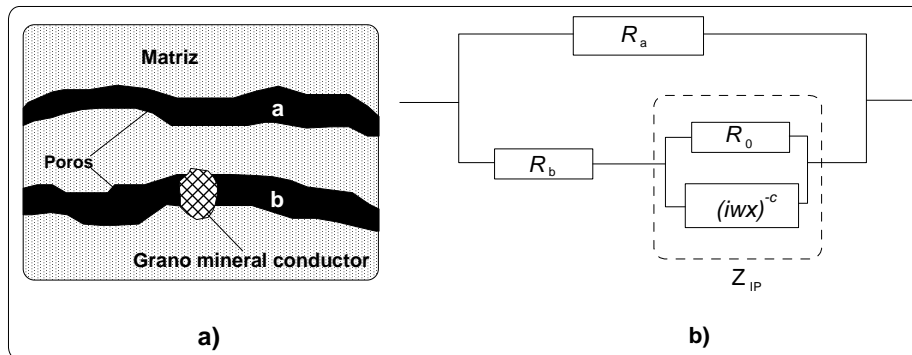


Figura 2.7 a) Porción de roca mineralizada polarizable y b) circuito eléctrico equivalente (Luo y Zhang, 1998).

De la figura anterior inciso b, se tiene que la impedancia es calculada para un circuito mixto (serie y paralelo):

$$Z(i\omega) = \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b + Z_{IP}} \right)^{-1} = \frac{R_a(R_b + Z_{IP})}{R_a + R_b + Z_{IP}} \quad (2.57)$$

Donde:
$$Z_{IP} = \left[\frac{1}{R_0} + (i\omega X)^c \right]^{-1} = \frac{R_0}{1 + (i\omega X)^c R_0} = \frac{R_0}{1 + (i\omega \tau^{(s)})^c} \quad (2.58)$$

Y
$$\tau^{(s)} = R_0^{1/c} x \quad (2.59)$$

τ es el parámetro en unidades de tiempo, que describe la frecuencia o el tiempo característico de los efectos de la polarización en superficie, por lo cual, recibe el nombre de *constante de tiempo de la polarización superficial* (Luo y Zhang, 1998). En éste contexto, el factor c adquiere una mayor importancia, ya que indica la frecuencia a la cual Z_{IP} , depende de la frecuencia, por tanto se le llamó el *factor dependiente de la frecuencia*. R_0 representa la resistencia asociada a la impedancia de la PI.

Si en 2.58 a $\omega = 0$ y a $Z_{IP} = R_0$ se tiene:

$$Z(0) = \frac{R_a(R_b + R_0)}{R_a + R_b + R_0} \quad (2.60)$$

Ahora con $\omega \rightarrow \infty$ y $Z_{IP} \rightarrow 0$, entonces:

$$Z(\infty) = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b} \quad (2.61)$$

Y la cargabilidad estaría dada por

$$m = \frac{Z(0) - Z(\infty)}{Z(0)} = \frac{R_a R_0}{(R_a + R_b)(R_b + R_0)} \quad (2.62)$$

Al sustituir las ecuaciones 2.58 en 2.57 tomando en cuenta a 2.60 y 2.62, se redefine a τ en todo el rango de frecuencias

$$\tau = x \left[\frac{(R_a + R_b)R_0}{R_a + R_b + R_0} \right]^{1/c} \quad (2.63)$$

Por lo que la impedancia del circuito equivalente está dado por

$$Z(i\omega) = R_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega \tau)^c} \right) \right] \quad (2.64)$$

Que es el modelo estándar usado por Cole y Cole (Pelton *et al.*, 1978) para describir el comportamiento de polarizaciones dieléctricas y ha sido de los más usados en la descripción de curvas de decaimiento de potencial. En la siguiente figura se muestran los modelos para 5 curvas de cargabilidad con valores que van de 0.1 a 0.9. Las curvas de fase son importantes debido a que, mediante la obtención de la frecuencia crítica (F_c) que es la frecuencia a la cual ocurre el máximo cambio de fase, se determina la constante τ , ya que F_c es inversamente proporcional a τ (Van Blaricom, 1992). En

cuanto a la amplitud, se observa que ésta disminuye al aumentar la cargabilidad y la frecuencia, esto es concordante con la teoría en el dominio de la frecuencia, en la que se prueba que la resistividad disminuye al aumentar la frecuencia.

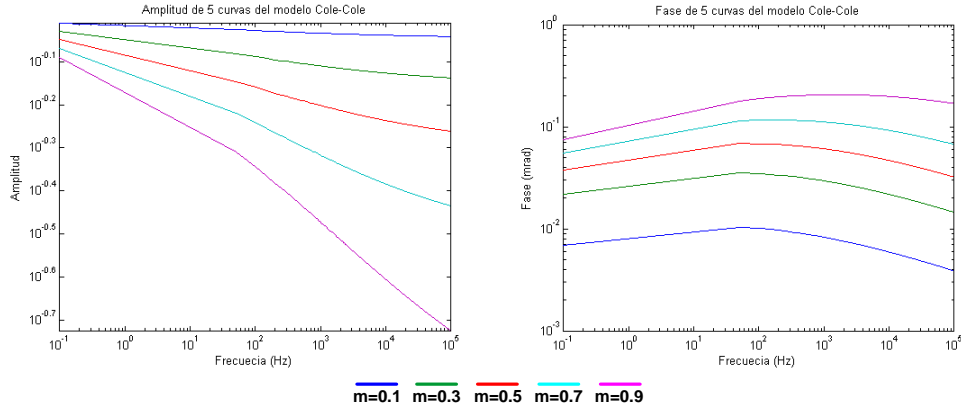


Figura 2.8. Gráficas de amplitud (arriba) y fase (abajo) de las curvas calculadas del modelo Cole-Cole para cargabilidad con $R_0=1$, $\tau=0.1$ y $c=0.25$

Aunque se han desarrollado otro tipo de variantes, como la forma generalizada del modelo Cole-Cole (ecuación 2.65) y el modelo simplificado de Debye en el que, tanto la constante a como c valen uno (Nordsiek y Weller, 2008.)

$$Z(i\omega) = R_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{(1 + (i\omega\tau)^c)^a} \right) \right] \quad (2.65)$$

Si se recurre a la Ley de Ohm y se considera la geometría del arreglo de medición de la impedancia y se aplica la impedancia obtenida en 4.1 se tiene

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} = kZ \quad (2.66)$$

$$\rho(i\omega) = \rho(0) \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (2.67)$$

Donde k es el factor geométrico e I es la corriente aplicada. Este modelo sirve para describir el espectro de la polarización inducida en medios porosos, en este caso, rocas.

Por otro lado, comparando las ecuaciones 2.59 y 2.63, que son las representaciones superficial y volumétrica de la constante de tiempo, se puede llegar a la siguiente expresión

$$\tau = \tau^{(s)} \left[\frac{(R_a + R_b)R_0}{R_a + R_b + R_0} \right]^{1/c} < \tau^{(s)} \quad (2.68)$$

Esto significa que la constante volumétrica de tiempo (τ) es menor a la superficial ($\tau^{(s)}$), para el caso en el que se tienen granos minerales obstruyendo los poros de la roca.

Además, mientras sean más pequeñas dichas partículas, se tendrá más superficie de contacto, con la cual aumentará la resistencia R_0 y τ se aproximará a $\tau^{(s)}$.

Puede notarse que el factor dependiente de la frecuencia (c) es el mismo en ambos casos (τ y $\tau^{(s)}$) cuando el medio se comporta de manera homogénea o bien, con partículas minerales de tamaño homogéneo. Sin embargo, aún cuando se tengan condiciones electroquímicas semejantes en cada elemento volumétrico polarizable, pueden variar los tamaños de granos de un elemento a otro, entonces las variaciones en τ pueden generar respuestas en las impedancias diferentes, por lo que:

$$c \leq c^{(s)}$$

Las investigaciones y el trabajo de campo indican que la constante de tiempo τ de los efectos medidos de PI, es dependiente directamente del tamaño de grano de las partículas y determina la cantidad de tiempo requerido para el decaimiento del potencial en el dominio del tiempo, que se han modelado principalmente para metales. En términos generales, se concluye lo siguiente

Tabla 2.1. Comportamiento cualitativo del parámetro τ.	
Tamaño de grano	τ
Fino	Pequeño
Grueso	grande

El comportamiento de c también ha sido investigado en diferentes medios, obteniéndose rangos desde 0.1 hasta 1: Van Blaricom (1992) dice que el rango es de 0.1 a 0.5, mientras que el diccionario de la SEG propone hasta 0.6 y Luo y Zhang (1998) encontraron valores de 0.5 a 1. De manera cualitativa se resume en la siguiente tabla su comportamiento.

Tabla 2.2. Comportamiento cualitativo del parámetro c.	
Tipo de medio	c
Homogéneo	Grande
No homogéneo	Pequeño

En la figura 2.9, se muestran las gráficas del modelo de conductividad propuestas por Wong (1979), en las que se observa el aumento tanto en fase como en amplitud en tanto la concentración del mineral aumenta. Estos modelos, no forman parte de la teoría de PI Espectral, pero es importante tomarlo en consideración, ya que como se verá en el Capítulo IV, se registra el mismo comportamiento para medios saturados con contaminantes no metálicos.

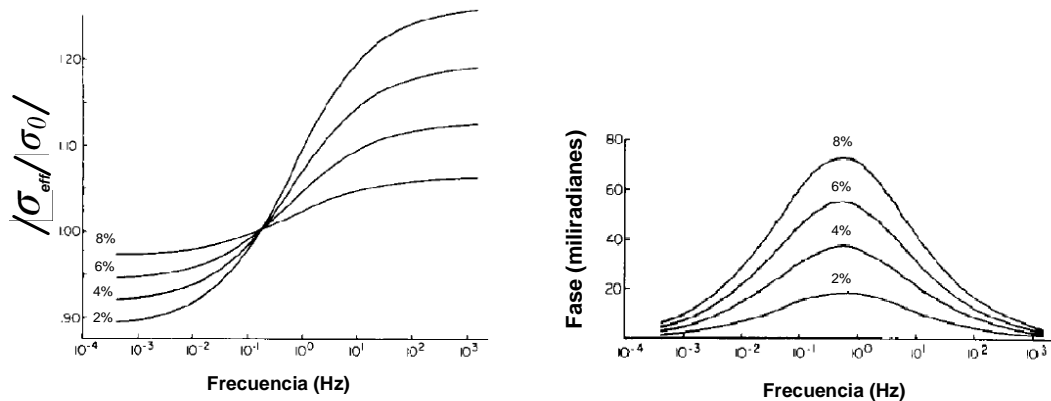


Figura 2.9. Espectro de conductividad para modelos de menas metálicas esféricas (radio de 2mm) en diferente concentración (%en volumen).Wong (1979).

Cabe mencionar que en la literatura no hay un consenso sobre la denominación de los métodos. Por ejemplo, Vanhala y Peltoniemi (1992) le llaman PI espectral a los espectros de fase en un rango de frecuencias, semejante a la definición de PI en el Dominio de las Frecuencias de Parasnis, sólo que Vanhala no obtiene los parámetros PFE ni MF.

De las diferentes modalidades se puede concluir que con el desarrollo de la teoría en el dominio del tiempo y al observarse los cambios de la frecuencia en la corriente emitida, las rocas pasan de un estado dieléctrico a uno dieléctrico disipativo llegando así al dominio de la frecuencia; de manera conjunta se llevan a cabo cambios en la presentación de la información y se desarrollan filtros para el mejoramiento de la relación señal/ruido (Resistividad Compleja); por último, las modelaciones del decaimiento de la cargabilidad (PI Espectral), agregan al catálogo de parámetros la información de τ y c , con lo que se tienen mayores posibilidades de definir con menor incertidumbre las anomalías de interés.

II.3 ARREGLOS ELECTRÓDICOS

El propósito de los métodos de prospección eléctrica es investigar el cambio de la resistividad de la formación tanto en profundidad como en extensión lateral, llamando al producto de la distribución de la información, pseudo-secciones en 2 o en 3 dimensiones. Para obtener esas representaciones es necesario aplicar alguna técnica de obtención de la información, tal es el caso de los *sondeos eléctricos verticales* (SEV) de los que se obtiene valores de resistividad aparente sobre una línea vertical (1D). Después se mejoró esa técnica para obtener información en 2D (horizontal), mediante *calicatas* eléctricas, aunque era bastante tardado y complicado de realizar.

Surge entonces la técnica de *tomografía eléctrica* que consiste básicamente en cubrir un área vertical a la posición de la línea de electrodos enterrados en el suelo, con los puntos de atribución de la configuración establecida para los objetivos de interés.

Este tipo de representación superficie-superficie ha sido usado comúnmente, aunque existe otra metodología que requiere la perforación de uno o dos pozos y se obtiene información de superficie a pozo o de pozo a pozo.

Sin embargo, esa definición está hecha para medios volumétricos isótropos y homogéneos. Por ello, la resistividad medida en condiciones distintas requiere considerar que la corriente pasa a través de trayectorias irregulares, así como el voltaje medido está influenciado por la suma de todos los efectos del subsuelo por tanto la posición de los electrodos auxiliares en proceso debe tomarse en cuenta.

Los métodos de medición son una parte importante en la adquisición de la información, sin embargo, ésta se obtiene cuando se ha elegido el tipo de arreglo o configuración electrónica; esto significa que se debe planear la manera en como se organizarán los electrodos de envío de corriente y los de lectura del potencial. La importancia en la separación de los electrodos de corriente y su posición respecto a los de potencial, radica en que la profundidad de donde se está obteniendo la información de la resistividad de formación depende de su geometría.

II.3.1 Factor Geométrico y Resistividad Aparente

Para definir estos conceptos, es necesario considerar un semiespacio homogéneo de resistividad ρ constante y sobre la superficie, un electrodo puntual asignado como origen de coordenadas.

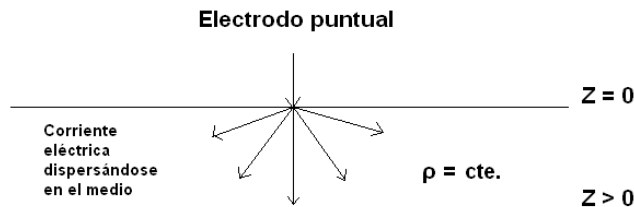


Figura 2.10. Semiespacio homogéneo con fuente eléctrica puntual (electrodo).

La función potencial para estas condiciones, satisface la ecuación de Poisson, en $Z > 0$

$$\nabla^2 u = -I\rho\delta(\vec{r}_s) \quad (2.69)$$

Donde I es la corriente suministrada, ρ es la resistividad y δ es una función impulsiva. Además, para una superficie gaussiana S limitada por el plano $Z = 0$, con radio infinito se tiene

$$\nabla u \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.70)$$

Donde \vec{n} es un vector normal a la superficie S . Entonces de la segunda identidad de Green

$$\int_v (G_N \nabla^2 u - u \nabla^2 G_N) dv = \oint_s (G_N \nabla u - u \nabla G_N) \cdot \vec{ds} \quad (2.71)$$

Donde $G_N(\vec{r}, \vec{r}')$ es la función de Green para el problema de Newman en un semiespacio (recordando que las funciones de Green son las respuestas del sistema ante funciones impulsivas)

Para $Z > 0$:
$$G_N(\vec{r}, \vec{r}') = -\delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (2.72)$$

En S
$$\nabla \cdot G_N(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.73)$$

Bajo todas estas condiciones, la integral de superficie de la segunda identidad de Green es igual a cero, por tanto se puede escribir al potencial como

$$u(\vec{r}) = -\int_v G_N(\vec{r}, \vec{r}') \nabla^2 u(\vec{r}') dv \quad (2.74)$$

La función de $G_N(\vec{r}, \vec{r}')$ de acuerdo con Kaufman (1992):

$$G_N(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + (z - z')^2}} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z + z')^2}} \right) \quad (2.75)$$

Donde $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$ y $x' = y' = z'$.

Sustituyendo las ecuaciones 2.69 y 2.75 en 2.74 con $x' = 0$, se tiene:

$$u(\vec{r}) = \int_v \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) I\rho \delta(0, 0, 0) dv \quad (2.76)$$

De donde:

$$u(\vec{r}) = \frac{I\rho}{2\pi\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (2.77)$$

Que es el potencial para una fuente puntual. El campo eléctrico debido a que es lineal, entonces, la contribución de varias fuentes puntuales es la suma de los potenciales (Orellana, 1974).

Si ahora se considera un arreglo trielectrónico como el de la figura 2.11, donde A es el electrodo fuente y M y N representan los electrodos de medición del potencial.

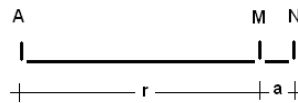


Figura 2.11. Tripolo

Entonces la caída de potencial sería:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+a} \right) \quad (2.78)$$

Que siguiendo la ley de Ohm, se puede obtener la resistividad como se muestra en la siguiente ecuación

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (2.79)$$

Sustituyendo 2.78 en 2.79 se tiene que

$$k = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+a} \right)^{-1} \quad (2.80)$$

Donde ρ_a es la *resistividad aparente* y a k se le llama *factor geométrico* que representa el “alejamiento” del campo eléctrico respecto a la fuente que lo genera.

Para explicar el concepto de resistividad aparente, ahora se supondrá que se encuentran cuerpos de diferente resistividad sumergidos en el semiespacio, los cuales queremos encontrar mediante la medición de la diferencia de potencial en diferentes posiciones sobre $Z = 0$, la resistividad (ecuación 2.79) no será constante ni tendrá el valor de algunos de los cuerpos o alguna combinación de los anteriores, debido a que el campo eléctrico total del semiespacio es la suma del campo eléctrico primario y los campos eléctricos secundarios generados por las diferentes heterogeneidades, entonces el potencial medido será el reflejo de ello.

De esta manera, la ecuación 2.79 define al parámetro anómalo de resistividad a través de la desviación del semiespacio homogéneo e isótropo, que es la finalidad de la prospección eléctrica, determinar qué produjo tal desviación.

II.3.2 Cargabilidad Aparente

Este concepto es análogo al de resistividad aparente, ya que como se mencionó antes, la cargabilidad es un factor que afecta a la conductividad, como se muestra en la siguiente ecuación (Seigel, 1959)

$$\Delta V(t) = \frac{I}{\sigma(1-\mu)} k \quad (2.81)$$

Donde σ y μ son la conductividad y la cargabilidad del medio homogéneo respectivamente. Cuando se mide la diferencia de potencial en estado estacionario y en el tiempo de descarga, se está midiendo la respuesta total del medio, esto es, el reflejo de las polarizaciones de las heterogeneidades.

II.3.3 Configuraciones

Se denomina arreglo (configuración o dispositivo) electródico a la disposición geométrica de un conjunto de electrodos, usados para la medición de la diferencia de potencial y/o para la transmisión de corriente eléctrica. Para la tomografía, son tres los tipos de configuraciones empleados usualmente: dipolo-dipolo (o cuadripolo), polo-polo y una combinación de los dos anteriores, polo-dipolo (o tripolo) como se muestra en la figura 2.12. De estos dispositivos, el único que cumple con el principio de reciprocidad es el cuadripolar.

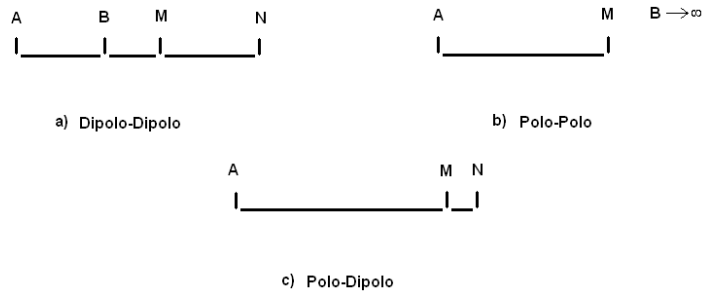


Figura 2.12. Configuraciones electródicas.

Estos dispositivos pueden programarse en el software del equipo a emplear (o realizar manualmente en su caso) para la adquisición en los que se definen los electrodos que serán de corriente y los que serán de diferencia de potencial en cada lectura para todos los electrodos necesarios en la campaña de exploración.

a) Dipolo-Dipolo

Este dispositivo fue creado por Al'pin (1966) y la distribución espacial en perfiles o secciones nació en un grupo dentro de las instalaciones del Massachusetts Institute of Technology (MIT), bajo la coordinación de Ted Madden con datos adquiridos en la Zona Minera del Sur de Mindamar en Cape Breton Island, Nueva Escocia (Seigel *et al.*, 2007). En este dispositivo se puede observar (figura 2.12a) que la corriente se dirige entre los electrodos A y B y que la diferencia de potencial se toma en algún punto entre ellos con M y N, con lo que se asegura la transmisión de la corriente eléctrica del volumen de tierra a observar y eso implica que la señal/ruido sea buena. Además, la distribución de los puntos de atribución hace que este arreglo tenga una buena resolución horizontal, aunque la profundidad de investigación se limita a la distancia entre los electrodos de corriente.

Las variantes de este dispositivo son por ejemplo los arreglos Wenner y Schlumberger, en los que cambian las distancias entre los electrodos cada vez que se quiere profundizar como se muestra en la siguiente figura.

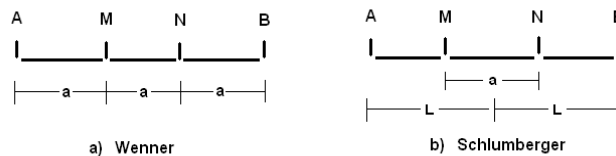


Figura 2.13. Dispositivos cuadrupolares.

En el caso del dispositivo Wenner, se tiene una buena resolución vertical y poca sensibilidad horizontal, además que la profundidad de investigación también es pobre respecto a otras variantes del mismo arreglo Wenner como otras dipolares. Éste arreglo fue popularizado por un grupo de investigación de la Universidad de Birmingham y fue de los más empleados en los primeros años después de que se dio a conocer la tomografía eléctrica (Loke, 2010). El arreglo Schlumberger presenta una distribución de

los puntos de atribución vertical, de manera que se comportan como si fueran una sucesión de SEV.

b) Polo-Polo

A diferencia del arreglo anterior, este dispositivo está diseñado para una profundidad de investigación mucho mayor, ya que la corriente el electrodo de A se cierra con un electrodo B (figura 2.12 b) que se coloca a una distancia lo suficientemente grande (al menos 20 veces la distancia entre A y M; Loke, 2010). En este sentido, lo que se está perdiendo es la intensidad de la señal, que por efectos telúricos o de potenciales espontáneos, puede disminuir la calidad de la información en los últimos niveles de los puntos de atribución.

c) Polo-Dipolo

Para muchos autores, éste es de los mejores arreglos (figura 2.12c), ya que se combina la capacidad que posee para profundizar con la intensidad de la señal/ruido del dipolo-dipolo, con la profundidad de investigación del polo-polo. A su vez, este arreglo es muy noble en la disposición de adquisición en campo. Debido a que no es un dispositivo simétrico, se puede presentar distorsión lateral, que bien puede mejorarse al realizar una toma de datos de manera inversa.

Como se mencionó anteriormente, la calidad en los datos adquiridos dependen del método y la configuración de adquisición. En el caso de la aplicación de geofísica somera que bien puede ser de algunos metros hasta varias decenas de ellos, la configuración se convierte en un factor decisivo para asegurar la calidad de la información ya que al separar la distancia entre los electrodos de corriente y los de potencial se da pie al aumento en la incertidumbre del dato debido a fuentes de ruido naturales o antropogénicas. A continuación se describen algunas que se presentan generalmente en la adquisición de la información.

II.3.4 Fuentes de ruido en la toma de lecturas

De acuerdo con Sherif (1989), el principal objetivo en el procesamiento de la información es 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.

◆ Potencial Espontáneo (*SP*)

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 sulfurados 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.

Ésta 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.

- ◆ Corrientes telúricas

También conocidas como corrientes naturales terrestres, 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. Éstas corrientes pueden producir anomalías semejantes a las de SP, por lo que no es sencillo separarlas.

- ◆ Polarización de los electrodos

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, además de otras consideraciones tales como el presupuesto que se disponga.

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. 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.

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).

- ◆ Distorsión por acoplamiento inductivo

Este tipo 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).

Existen otros tipos de acoplamiento como el capacitivo, que se origina entre los circuitos de corriente y de potencial, que aunque el proveedor del equipo de medición asegura el aislamiento de los canales, es recomendable generar archivos de lectura que eviten el acoplamiento mencionado.

- ◆ Efectos electromagnéticos producidos por fuentes artificiales

Estos efectos son generados principalmente por líneas de alta tensión eléctrica, generadores particulares de corriente, antenas de emisión radiofónica, ruido electrónico del equipo de cómputo, etcétera., que producen variaciones electromagnéticas en frecuencias específicas. Este tipo de ruido puede eliminarse por medio del filtrado digital y puede ser muy útil si se conoce la frecuencia en la que perturba la señal que se necesita.

CAPÍTULO III

POLARIZACIÓN INDUCIDA EN PROBLEMAS DE CONTAMINACIÓN

III.1 MECANISMOS DE CONTAMINACIÓN

En lo siguiente, se describen algunos conceptos básicos extraídos de van der Perk (2006), concernientes a los aspectos físicos y químicos así como condiciones en el transporte de contaminantes.

La *contaminación*, definida como la introducción al ambiente de sustancias que son dañinas o venenosas para la gente y los ecosistemas, puede ocurrir de dos maneras: la primera es que esas sustancias sean generadas y acumuladas de manera antropogénica y la segunda, que ya existan en el ambiente de manera natural. Esta clasificación no es única, también se han hecho otras clasificaciones basándose en sus propiedades físicas y químicas, abundancia, permanencia en el ambiente, su efecto en los ecosistemas o a su toxicidad.

Lo anterior sugiere que la presencia de concentraciones detectables de sustancias químicas no implica que se tenga contaminado el sitio, por lo que es necesario conocer las concentraciones de *fondo* o naturales tanto en agua como en suelo para clasificar al lugar de estudio como contaminado o no. Por ello, existen instancias de investigación que laboran de manera conjunta con dependencias gubernamentales para establecer las concentraciones máximas permisibles de sustancias químicas en agua, suelo y aire.

Las fuentes contaminantes pueden ocurrir de manera directa o indirecta mediante fuente *puntual* o *difusa* respectivamente. Para el primer caso, generalmente se tiene confinada la contaminación en lo que se denomina *pluma contaminante*, la cual se expande y/o se desplaza dependiendo de las concentraciones de fondo, tipo de fuente, la cantidad liberada del contaminante y su tendencia a desplazarse en el ambiente (por advección, difusión molecular o dispersión) que a su vez es influenciada por las condiciones geológicas, geohidrológicas y geoquímicas del medio como son la granulometría, porosidad, permeabilidad, densidad, contenido de agua, presión capilar, presencia de arcillas y limos, entre otras. En este caso es común encontrar derrames de petróleo de contenedores o descargas naturales de minerales pesados en zonas mineras.

El segundo tipo de fuente corresponde a la liberación de una o varias sustancias contaminantes en una gran extensión de área o que no puede identificarse con claridad el punto o los puntos de origen; por ejemplo, la lluvia ácida o la descarga de agua de uso doméstico a la red de desagüe subterráneo en toda una ciudad.

En general, las sustancias se pueden presentar en tres fases, sólido, líquido y gas. De esta manera se define como *fase sólida* a aquellas sustancias que se encuentran en el

suelo, sedimentos sólidos o sólidos suspendidos en agua. Los químicos que son solubles en agua se les denominan *fase disuelta* o fase acuosa, diferente a la fase líquida que se refiere a líquidos puros. Otro término usado comúnmente en materia ambiental es el de *fase adsorbida*, llamando así a los químicos que son adsorbidos a superficies sólidas o materia suspendida.

De esta forma, las fases antes descritas pueden desplazarse hacia el subsuelo hasta el basamento, permanecer en alguna zona hidrológica (figura 3.1) o formar parte de la matriz del medio que lo contiene.

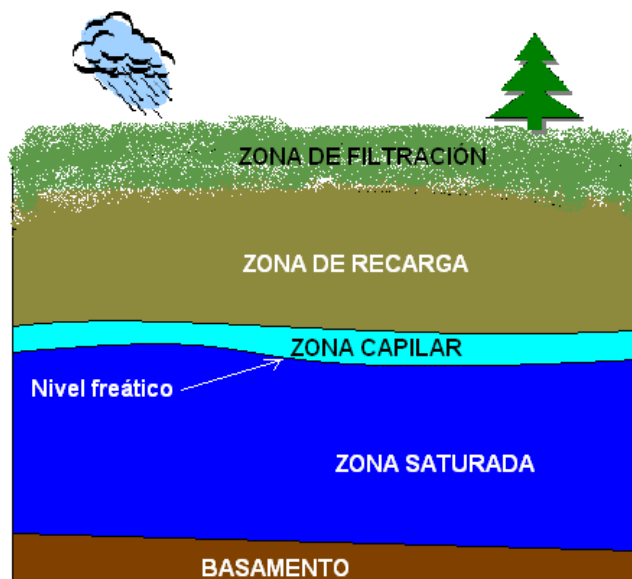


Figura 3.1. Clasificación de zonas hidrológicas del subsuelo (Hernández, 2009-1).

En materia de contaminantes se podría discutir una gran cantidad de sustancias, sin embargo, para efectos del presente trabajo se mencionan dos tipos de contaminantes: cobre e hidrocarburos, los cuales fueron motivo de las pruebas de PI en la Ciudad de México descritos en el siguiente capítulo.

En este sentido, el cobre es considerado como metal pesado (van der Perk, 2006; Lottermoser, 2007) ya que posee una densidad mayor a $6 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ y se puede presentar en la corteza terrestre en dos estados de oxidación ($1+$ ó $2+$) en solución, aunque ocurre predominantemente en $2+$ en agua ventilada bajo reacciones redox o formando compuestos como hidróxidos o carbonatos que son ligeramente solubles en agua con pH básico. Además, se presenta por adsorción y precipitación con oxi-ácidos férricos y bajo condiciones reductoras en minerales sulfurosos como la calcopirita. En exceso, el cobre puede afectar la fijación del nitrógeno en suelos e incluso la muerte de niños pequeños. La deficiencia puede afectar el crecimiento de de los productos de cultivo o deficiencias en ganado.

Los hidrocarburos (HC), considerados en general como sustancias orgánicas compuestas principalmente de carbono, oxígeno, nitrógeno, fósforo, sulfuros, entre otros, se consideran dañinos debido a que pueden causar una reducción del oxígeno disuelto en el agua que los contiene.

Una clasificación de estos HC, desde la perspectiva norteamericana, se ha hecho en cuanto a su volatilidad identificándolos como VOC's (*volatile organic compounds*, por sus siglas en inglés) o SVOC's (*semi-volatile organic compounds*) y otra por su grado de solubilidad, siendo mayor el número de compuestos contaminantes del tipo hidrofóbico, a los que se les ha denominado NAPL's (*non-aqueous phase liquids*) que a su vez tienen dos variantes, la ligera y la densa (LNAPL's y DNAPL's). Estas características son de gran importancia para la predicción de la localización en el subsuelo de la pluma contaminante y su cuantificación en trabajos de remediación.

Por otro lado, la clasificación mexicana ha hecho para los HC's tres subdivisiones en función del número de carbonos en cadenas lineales: fracción ligera que consta de 5 a 10 carbonos, fracción media con un número que va de 10 a 18 y por último a la fracción pesada, para hidrocarburos con peso molecular mayor a 18 carbonos lineales (SEMARNAT, 2003).

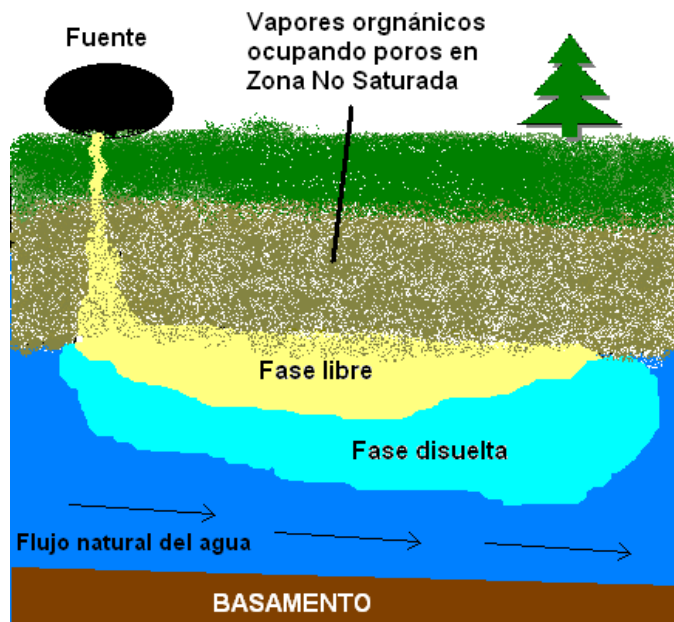


Figura 3.2. Fases que pueden presentarse en un medio que presenta zona saturada y no saturada (Hernández, 2009-1)

Además, se tienen listas extensas de compuestos con fórmulas químicas específicas que bien, independientemente de su comportamiento físico, producen algún grado de toxicidad, como en las tablas expedidas por la USEPA (*United States of Environmental Protection Agency*) y por las NOMs (Normas Oficiales Mexicanas). Por ejemplo, algunos hidrocarburos específicos y su concentración máxima permisible para México se muestran en la siguiente tabla (3.1).

Tabla 3.1. Límites máximos permisibles para algunos hidrocarburos específicos en suelo (SEMARNAT, 2003)			
Uso de suelo predominante (mg/kg base seca)			
Hidrocarburos específicos	Agrícola	Residencial	Industrial
Benceno	6	6	15
Tolueno	40	40	100
Etilbenceno	10	10	25
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100

Aún falta mucho por hacer en legislación ambiental del país, como se observa de las normas oficiales existen lagunas en cuanto a especificaciones en la caracterización, inclusión de otros contaminantes, especificaciones para la remediación, entre otras.

III.2 POLARIZACIÓN INDUCIDA EN LA LITERATURA

De los primeros trabajos realizados con PI en el Dominio de la Frecuencia, se tiene por ejemplo, el trabajo de Seigel *et al.* (1968), en el que se realizaron tres estudios (un perfil de polarización eléctrica, uno de gravimetría y uno magnetoteléxico) y responde principalmente a un medio que presenta polarización de tipo electrónica.

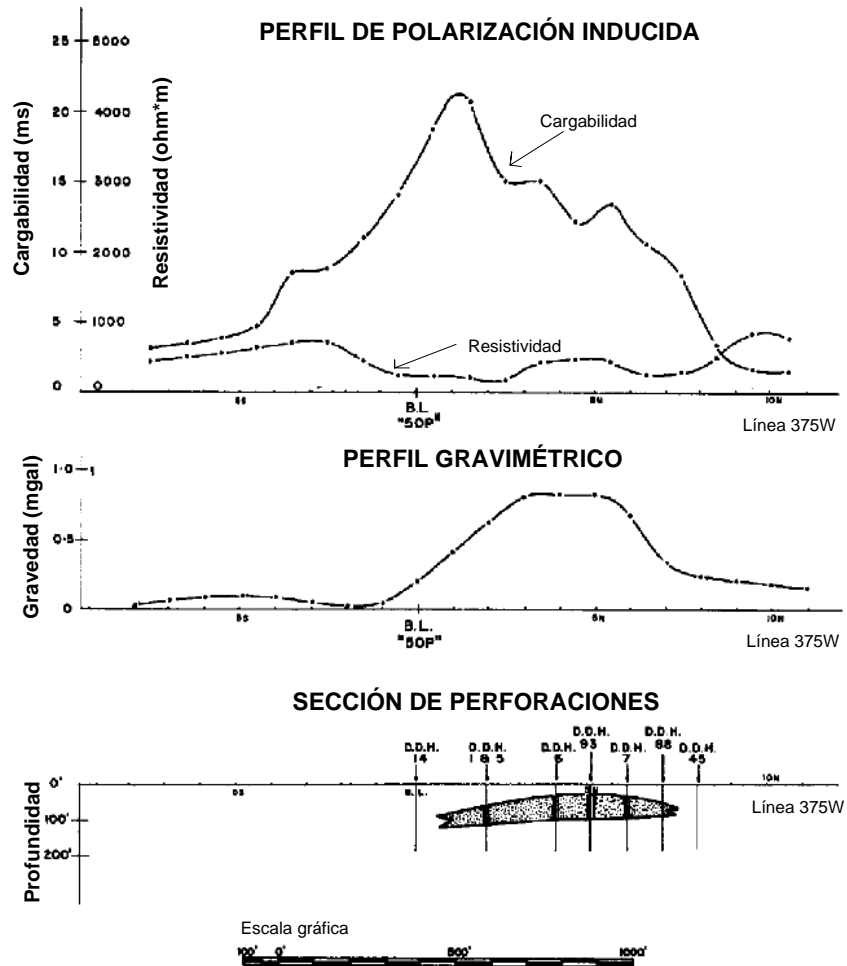


Figura 3.3. Secciones del perfil de PI, gravimétrico y magnetométrico (Seigel *et al.*, 1968).

También se han realizado estudios en el Dominio Espectral, como el trabajo de Seigel *et al.* (1997), en el cual muestran resultados del comportamiento del parámetro τ de 3 sitios en Canadá (dos en Quebec y uno en Ontario), 2 en Australia (New South Wales y Mount York) y 3 en Finlandia (Pisamaniemi, Honkajoki y Jokisivu), usando arreglos polo-dipolo. En la interpretación se analizaron tres parámetros: la cargabilidad total (todas las ventanas), la ventana M7 (que se encuentra entre 690 y 1050 (ms) después de que se detuvo la corriente eléctrica) y la constante de tiempo τ .

Uno de los ejemplos que demuestra la importancia del parámetro τ , se encuentra en la figura 3.4, en el cual se observa que la zona B presenta valores de τ menores a 1, asociados a tamaños de grano fino, a diferencia de la zona A, con valores de decenas relacionados con tamaños de grano grueso que, está de acuerdo con lo que predice la teoría. Al observar el comportamiento de la resistividad, vemos que no se puede concluir determinantemente cuál es la zona que presenta mayor concentración, ya que son resistividades altas y casi uniformes.

Se resume en la tabla 3.2 los valores de τ encontrados en todos esos sitios de exploración, como un referente para la práctica de PI Espectral y tener a priori la asociación de esas respuestas con el medio geológico.

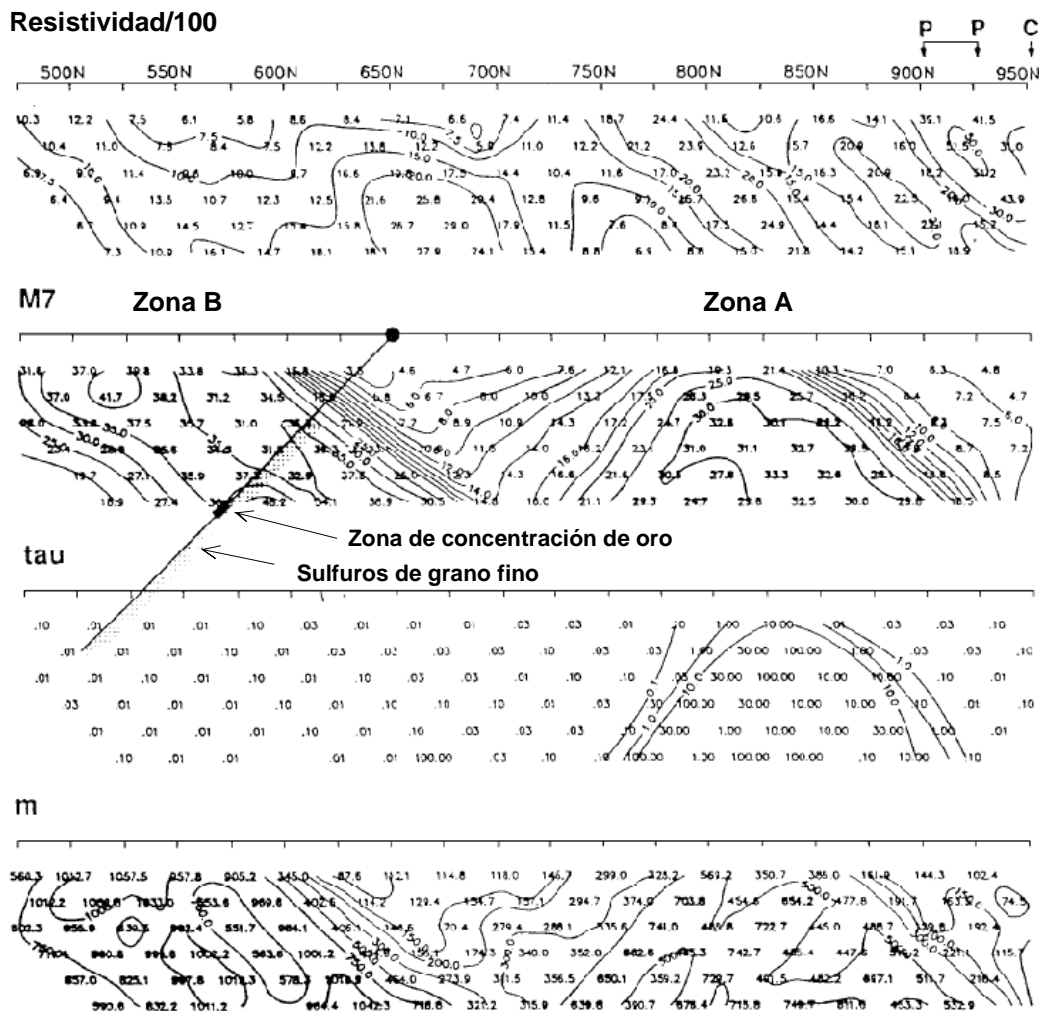


Figura 3.4. Secciones del perfil elaborado en Chibougamau, Quebec, Canada (Seigel *et al.*, 1997).

Tabla 3.2. Valores característicos de τ (Seigel <i>et al.</i>, 1997).						
Fuente de respuesta en PI	τ (s)					
	10^{-2}	10^{-1}	1	10	100	
Suelo (sin metales)	X	X				
Depósitos de oro con sulfuros o arsénicos diseminados	X	X				
Capas de plomo-zinc	X	X	X			
Depósitos de cobre porfídico	X	X	X			
Sulfuros piriticos masivos				X	X	X
Depósitos asociados a pirrotitas					X	X
Magnetita relacionada con ultramáficos				X	X	X
Fuentes culturales (líneas de drenaje, estructuras de construcción, líneas de corriente eléctrica subterránea, etc.)					X	X

El parámetro τ no ha sido el único caracterizado en campo, también se ha estudiado al factor dependiente de la frecuencia (c). La siguiente tabla (3.3) muestra los resultados recopilados por Luo y Zhang (1998) en las montañas Anhui en China, conocidas por sus depósitos de cobre, estaño y otros minerales.

Tabla 3.3. Valores del parámetro c característicos de las provincias Xiaojinshan, Tongling y Anhui, China (Luo y Zhang, 1998).		
Tipo de roca	Rango de c	Promedio de c
Diorita intemperizada	0.44-0.72	0.58
Mármol	0.35-0.69	0.52
Diorita	0.25-0.75	0.50
Diorita porfídica	0.29-0.41	0.38
Aluvión intemperizado con depósitos de óxidos hidratados de hierro	0.28-0.45	0.35
Depósitos de óxidos hidratados de hierro	0.14-0.48	0.31
Diorita mineralizada	0.20-0.22	0.21

Como puede observarse de los datos de la tabla 3.3, los valores mayores corresponden a medios más homogéneos y los menores a los no homogéneos, como se planteó en el capítulo anterior. Aunque los rangos son amplios de hasta 0.5, al menos se cuenta con información para interpretar a priori las condiciones del subsuelo.

En el siguiente ejemplo se describe el artículo Heikki Vanhala *et al.* (1992), en el que se expusieron los resultados del comportamiento de la fase de PI en el Dominio de la Frecuencia, en muestras areno-arcillosas controladas (con 2.5% en peso de arcillas) contaminadas con hidrocarburos específicos como el tolueno, heptano y etilenglicol, así como en muestras no contaminados. Este trabajo es uno de los ejemplos de la literatura en el que el tipo principal de polarización es de membrana.

Sería utópico, en materia ambiental, encontrar las respuestas características en PI de contaminantes de hidrocarburos específicos. En la exploración eléctrica es difícil definir sólo con un levantamiento la fuente que genera las anomalías y por ello se requiere

tener información de tipo geológica y algún muestreo de pozo para reducir la incertidumbre, ya que distintos materiales pueden presentar respuestas eléctricas semejantes en magnitud. Sin embargo, se han realizado estudios que pretenden modelar respuestas de hidrocarburos como es el caso de Vanhala *et al.* (1992).

La importancia de las arcillas en el suelo en combinación con compuestos orgánicos, radica en las reacciones electroquímicas. Vacquier *et al.* (1957) ya había observado que en arenas limpias saturadas en agua, casi no se observaba el fenómeno de polarización (o era imperceptible), a diferencia de las arenas parcialmente cubiertas con arcillas (cabe mencionar que la resolución y precisión de las mediciones en los años cincuentas era mucho menor que en años recientes, por ejemplo, del trabajo de LaBreque y Daily (2008), se pudo obtener las respuestas eléctrica y de polarización en condiciones acuosas y arenas saturadas en agua potable).

Vanhala *et al.* (1992) cita el trabajo de Olhoef del año de 1985, debido a que pudo identificar en bajas frecuencias una fase mínima, con tendencia a desaparecer cuando la frecuencia tiende a cero, sustentando este comportamiento a un proceso de inhibición de intercambio catiónico. En otras palabras, cuando se perturba el medio con corriente eléctrica en tiempos largos, las superficies de las partículas de arcilla catalizan la polimerización del tolueno.

El aporte de esta investigación está en que, la amplitud se mantiene casi constante en todas las frecuencias para todas las muestras; además, el etilenglicol y el tolueno presentaron amplitudes mayores que las no contaminadas. En cuanto a las fases, se observó que aumentan en altas frecuencias (>50 Hz) en todas las muestras y particularmente, los casos del tolueno y del heptano superan, en esas frecuencias, a las fases de las muestras no contaminadas.

Por otra parte, se tiene que la fase se incrementa positivamente al aumentar las concentraciones del contaminante, en anomalías calculadas para tolueno en una frecuencia constante. En el caso del etilenglicol, ocurre lo contrario, las anomalías son negativas en todas las frecuencias (figura 3.5).

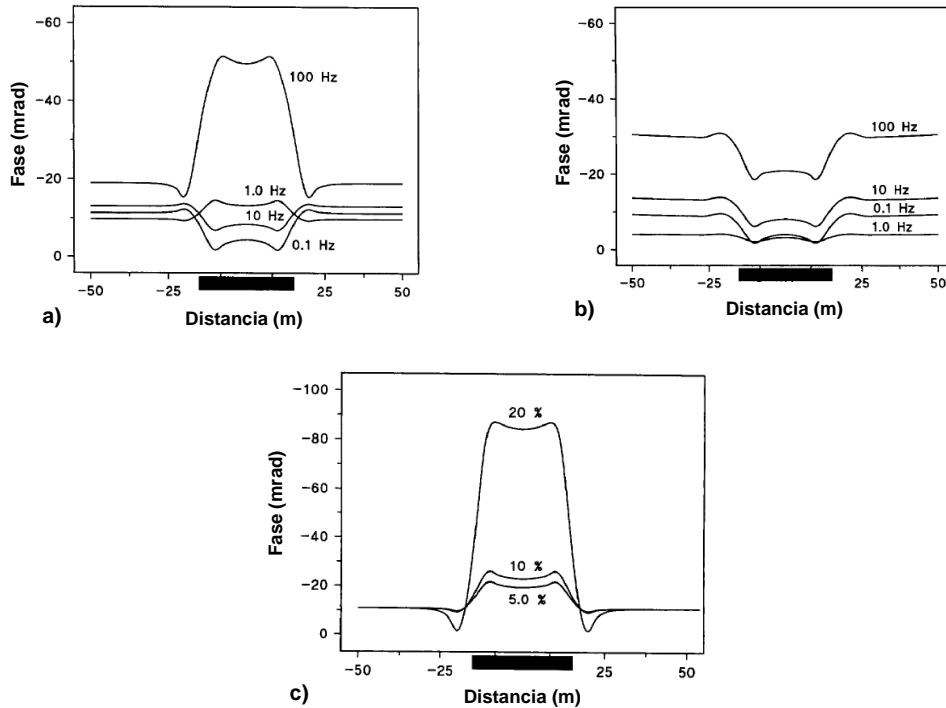


Figura 3.5. Anomalia calculada para a) contaminación por tolueno en 2% en volumen, b) para etilenglicol en 20% en volumen y c) para tolueno a una frecuencia de 100 [Hz]. Todas en arreglo dipolo-dipolo, $a=2$ y $n=3$ (Vanhala *et al.* 1992).

Otro ejemplo de polarización de membrana se encuentra en *Geoelectrical Methods for detection of oil contaminations in soils and bioremediation process monitoring* de Zogala *et al.* (2009), que consistió en monitorear la remediación de zonas contaminadas por hidrocarburos de manera natural, vía microorganismos. Este es un ejemplo de cómo se genera en la superficie contaminante una membrana bajo resistiva en comparación con la respuesta eléctrica del HC.

En la figura 3.6a se muestra una zona contaminada con NAPL entre los 16 y 18 metros de la sección MM', con valores poco mayores a 68 mil ($\text{ohm}\cdot\text{m}$), con datos tomados días después de la contaminación. Un año más tarde, se observa la misma zona alterada por la gravedad (desplazamiento vertical de la pluma contaminante) y con valores de resistividad aproximadamente 2000 ($\text{ohm}\cdot\text{m}$) menores a la sección anterior, que además, presenta un halo prominente alrededor de la pluma.

Entre los 17 y 18.5 (m), se inyectó la suspensión de microorganismos que al parecer, declinó parcialmente la anomalía (figura 3.6b) y que en los datos de conductividad aparente (figura 3.7), se muestra un aumento en un año de 1 (ms/m).

La imagen resistiva es muy buena y las condiciones geológicas, constituidas principalmente por arenas, favorecieron las mediciones.

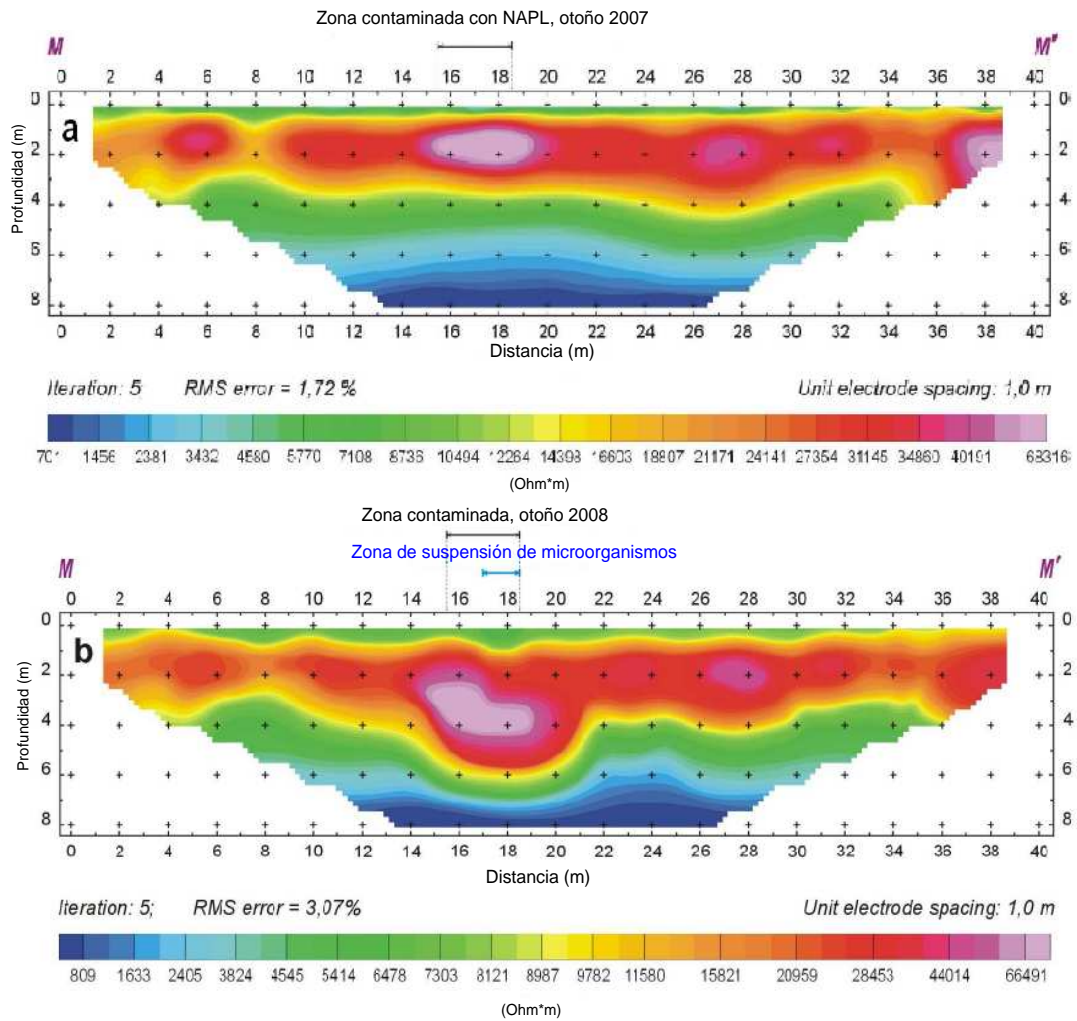
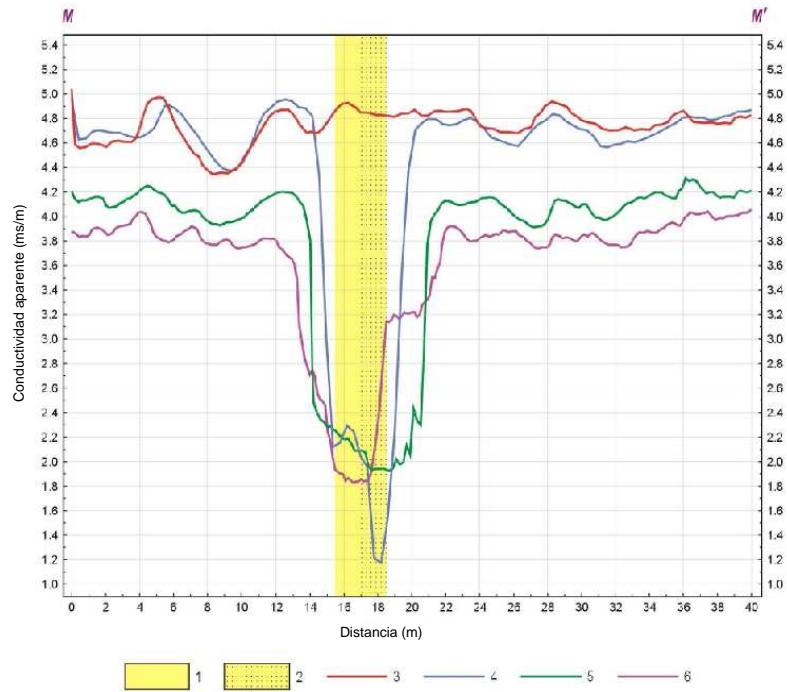


Figura.3.6 Secciones de Zogala *et al.* (2009).



1. Zona contaminada. 2. Parte del contaminante sujeta al proceso de bioremediación. 3. Antes de la contaminación con NAPL.
4. Varios días después de la contaminación en otoño de 2007. 5. Primavera de 2008. 6. Otoño de 2008

Figura 3.7. Gráficos del comportamiento de la conductividad aparente en la sección MM' (Zogala *et al.*, 2009).

CAPÍTULO IV

PRUEBAS DE PI EN SITIOS CONTAMINADOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

IV.1 LOCALIZACIÓN Y GEOLOGÍA

Para comparar la respuesta de PI en medios conductores y en medios resistivos, se elaboraron 2 pruebas de campo una en suelo contaminado por cobre y la otra en suelo contaminado por hidrocarburos que se nombrarán en adelante de la siguiente manera: Caso 1, contaminación por cobre y Caso 2, contaminación por hidrocarburos. Ambos casos se ubican en la zona de pruebas que se muestra en la figura 4.1 comprendida entre las coordenadas 19.4681° y 19.4971° latitud norte y 99.1627° y 99.2037° de longitud oeste, y debido a que la información es confidencial, no se mencionan las coordenadas exactas ni el nombre de las industrias que proporcionaron el apoyo para elaborar dichas pruebas.

La geología regional que a continuación se describe, fue obtenida del Servicio Geológico Mexicano (2002), y pertenece a la Provincia Fisiográfica de la Zona Neovolcánica cuyas rocas del Eje Neovolcánico sobreyacen a la secuencia vulcanosedimentaria del Terreno Guerrero al este, a rocas sedimentarias de la Cuenca de Zimapán al norte, al noroeste las calizas de la Cuenca Sierra Madre Oriental y al suroeste las calizas de la Cuenca Guerrero-Morelos.

El comportamiento estratigráfico de la geología regional contempla, para el Terreno Guerrero, las formaciones Villa de Ayala, Acapetlahuaya y Amatepec, hacia el límite norte existen calizas y margas pertenecientes a la formación Tamabra del Albiano-Cenomaniano (que es un intervalo de tiempo de estabilidad tectónica que propició el depósito sedimentario así como carbonatación) con margas y lutitas subyaciendo de manera discordante a la Formación Soyatal, perteneciente a la Cuenca de Zimapán.

Por parte de la Cuenca Sierra Madre Oriental, afloran calizas y lutitas de la Formación Pimienta del Jurásico así como calizas de la Formación Morelos del Albiano-Cenomaniano. Cubriendo de manera discordante a las unidades del Mesozoico, se encuentran conglomerados y areniscas de la Formación Balsas. Por último, sobreyaciendo discordantemente a toda la secuencia, afloran rocas volcánicas con edades desde el Mioceno (caracterizado por su intensidad de actividad volcánica en ésta región, predominando una composición calcoalcalina) hasta ahora, de la actividad del Eje Neovolcánico.

Estructuralmente, en esta carta hay evidencia de tectonismo distensivo, generador de fallas normales con rumbos preferenciales E-W y N-W e inclinaciones que van de los 70° a los 85° , producido por la Revolución Laramide de principios del Terciario.

De manera particular para la Zona de Pruebas (figura 4.1), se encuentran lahares y tobas andesíticas de la Formación Zempoala que a su vez, cubren en algunas zonas, las andesitas y dacitas de la Formación Xochitepec (TmA-Da) perteneciente al Campo Volcánico Sierra Las Cruces.

A nivel superficial, el sitio se encuentra en una zona de relleno de pendiente suave, cubierto por aluvión formado durante el periodo Cuaternario, con depósitos de sedimentos de las secuencias vulcano-sedimentarias del Terreno de Guerrero (al occidente de la carta) y de las rocas sedimentarias de la Cuenca de Zimapán (al Norte).

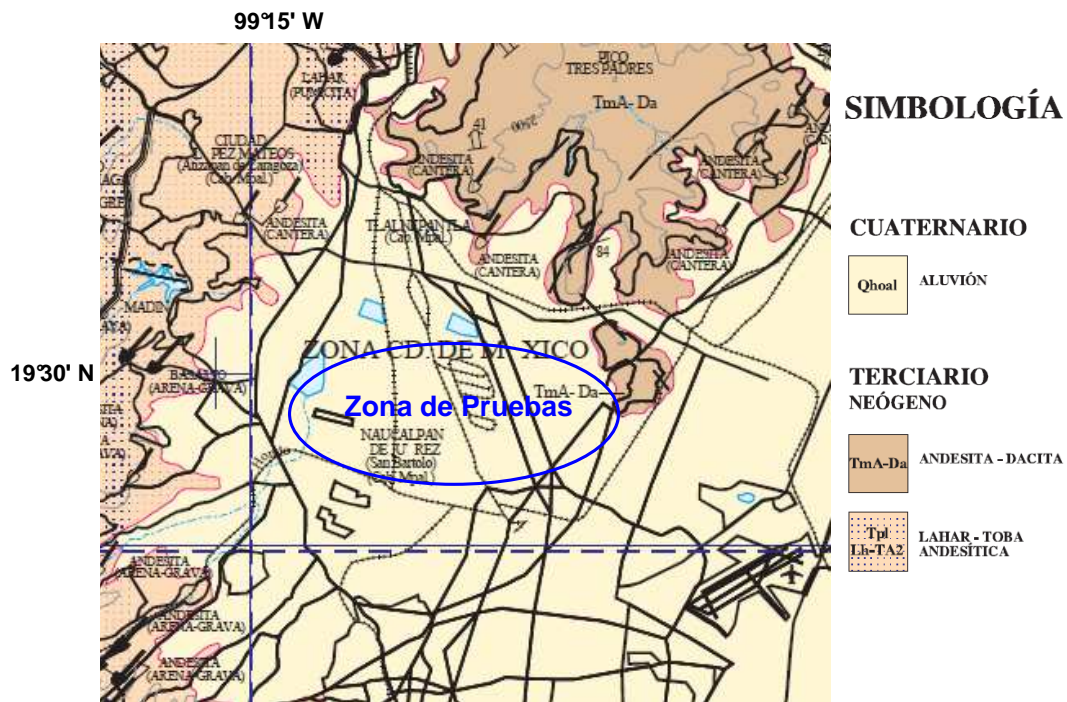


Figura 4.1. Corte de la carta geológica correspondiente para la zona de pruebas (Servicio Geológico Mexicano, 2002), en escala 1:250000.

IV.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA TOMA DE DATOS

Como se mencionó anteriormente, se llevaron a cabo dos adquisiciones de datos en diferentes medios químicos, para los que se consideraron condiciones específicas en los levantamientos, ya que como se mencionó en el Capítulo II, la toma de datos de cargabilidad es susceptible a contaminación por ruido procedente de diferentes fuentes.

El equipo empleado en la toma de datos de ambos casos fue un Syscal Pro, Standard & Switch (48 canales) de IRIS INSTRUMENTS, para mediciones de resistividad y polarización inducida. Es un equipo automatizado, esto significa que los parámetros ingresados en la consola para llevar a cabo las lecturas, son ajustados de manera automática por el sistema electrónico que considera el valor del potencial espontáneo y la resistividad de contacto, para aumentar o disminuir la intensidad de corriente eléctrica suministrada al subsuelo, así como para la diferencia de potencial en envío y recepción.

IV.2.1 CASO 1: Contaminación por cobre

En este lugar se llevó a cabo una tomografía eléctrica con 24 electrodos impolarizables equiespaciados a 2(m), así como 24 electrodos de cobre y una configuración dipolo-dipolo (Dahlin, 2002) programando el equipo en toma de lecturas de resistividad y polarización inducida para 4 segundos por lectura, distribuidos de manera aritmética; en cuanto a los parámetros de corriente se inyectaron 200 (mA), siendo el potencial de envío y de recepción de 800 y 200 respectivamente.

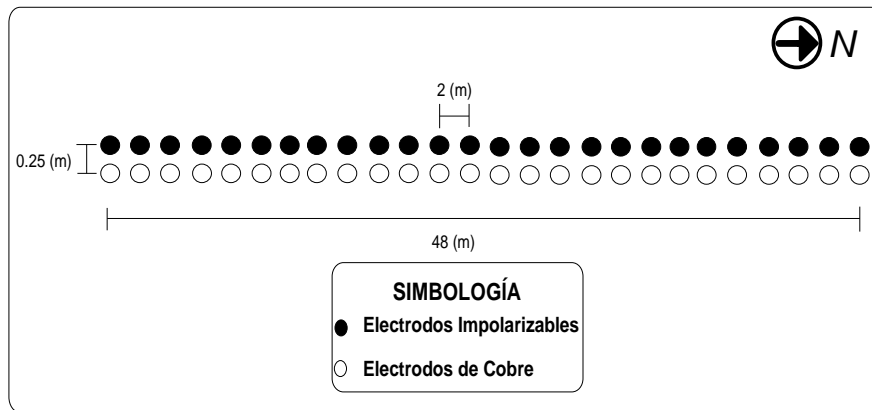


Figura 4.2. Esquema de la distribución de los electrodos para la toma de lecturas en el sitio contaminado por cobre.

El arreglo de electrodos insertados a tierra consistió en dos líneas paralelas espaciadas (Dahlin, 2002) a 22 (cm), una de ellas con electrodos impolarizables para la medición de la diferencia de potencial y la otra con electrodos de cobre que fungieron como electrodos de envío de corriente (figura 4.2).

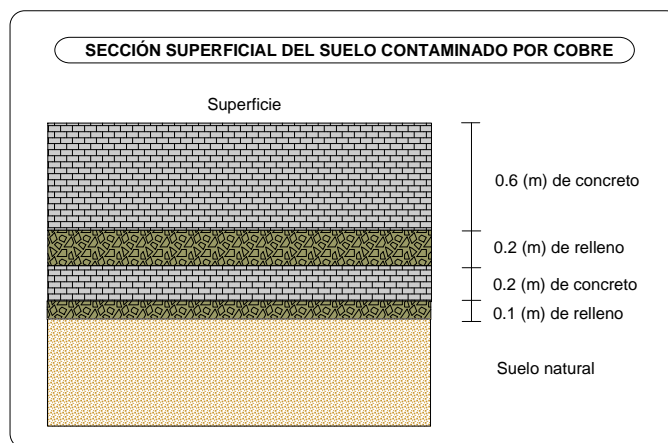


Figura 4.3. Componentes del suelo en el sitio contaminado por cobre.



Figura 4.4. Ejemplo de la posición de los electrodos en el suelo contaminado por cobre (Cortesía del M. C. Esteban Hernández).

En un corte vertical (figura 4.3), el suelo está constituido por 1.1 (m) de capas de concreto y relleno, las cuales se abrieron en una zanja para colocar al suelo natural los electrodos. Dicho suelo se presentaba condiciones visiblemente saturado de cobre, con alta humedad y cal que fue dispersada para evitar reacciones de los ácidos utilizados para los procedimientos industriales, de manera que entre las posiciones 10 y 12(m) se encontraba una zanja perpendicular a la línea de tendido con materiales en superficie muy finos, saturados en agua y cal además de poco consolidados; entre las coordenadas 20 y 24(m) también se observó material muy fino y poco consolidado; a partir de la posición 26(m) hasta la 48(m) se colocaron los electrodos en suelo bien consolidado y de granulometría fina a gruesa (en ese orden), encontrándose adicionalmente tonalidades amarillas sulfuros.

Lo anterior sugiere que las características del sitio presentaban una gran inestabilidad electroquímica, observación que se corroboró con los resultados de las mediciones de SP.

IV.2.2 CASO 2: Contaminación por hidrocarburos

Para este sitio se realizó una tomografía eléctrica con una línea de 24 electrodos de acero y otra de 24 electrodos impolarizables (Dahlin, 2002), todos equiespaciados a 3 (m) con arreglo dipolo-dipolo (figura 4.5). Al igual que para el caso 1, la programación se realizó para toma de lecturas de resistividad y cargabilidad con una corriente de 200 (mA), 800 en potencial de envío y 200 en recepción estándares.

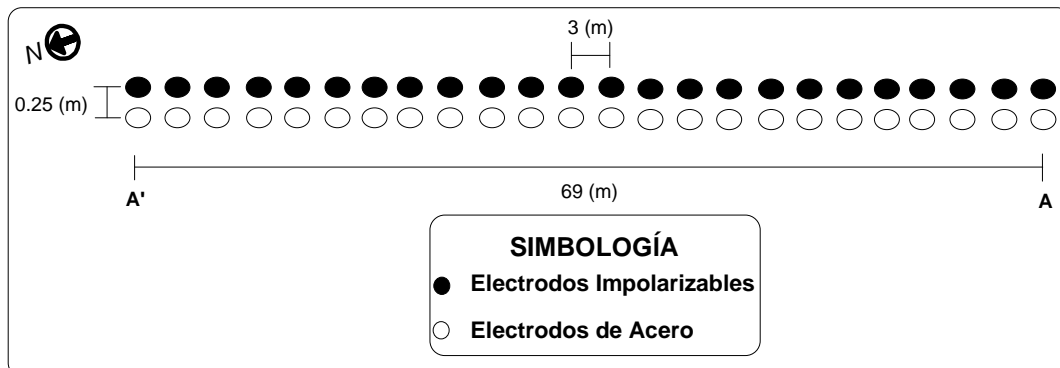


Figura 4.5. Esquema de la distribución de los electrodos para la toma de lecturas en el sitio contaminado por hidrocarburos.

El suelo en general del sitio se encontraba en condiciones de remediación, mediante el uso de mecanismos como: extracción de fase libre manual y automatizada, inyección de aire y extracción de vapores orgánicos, así como del movimiento de tierra para su tratamiento en calderas. Específicamente en la línea de tomografía, el contaminante se encontraba en las tres fases (gas, libre y disuelta), siendo visible la recuperación de la fase libre en las zanjas intercomunicadas 4 y 4a (figura 4.6) aproximadamente a 7 (m) de profundidad.

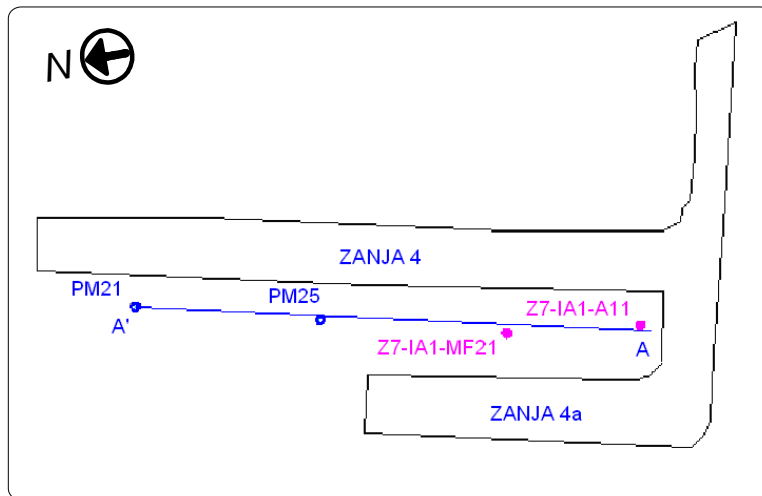


Figura 4.6. Sección A-A' de la tomografía eléctrica (resistividad y PI) del Caso 2.

IV.3 RESULTADOS

La paquetería del Syscal Pro, puede presentar la cargabilidad de manera total o por ventanas con valores de diferencia de potencial (V) medidos en los electrodos M y N . Como se muestra en la siguiente figura (4.7), las ventanas de cargabilidad ($M1$, $M2$, $M3$, ..., $M20$) están delimitadas por un intervalo de tiempo TM , cuyos valores son determinados por el fabricante y dependen del tiempo de inyección de corriente. Así, se pueden observar por separado hasta 20 ventanas de la misma curva de decaimiento. En las imágenes de cargabilidad invertida de este capítulo, sólo se consideró la cargabilidad total, que se calcula con la ecuación 2.38.

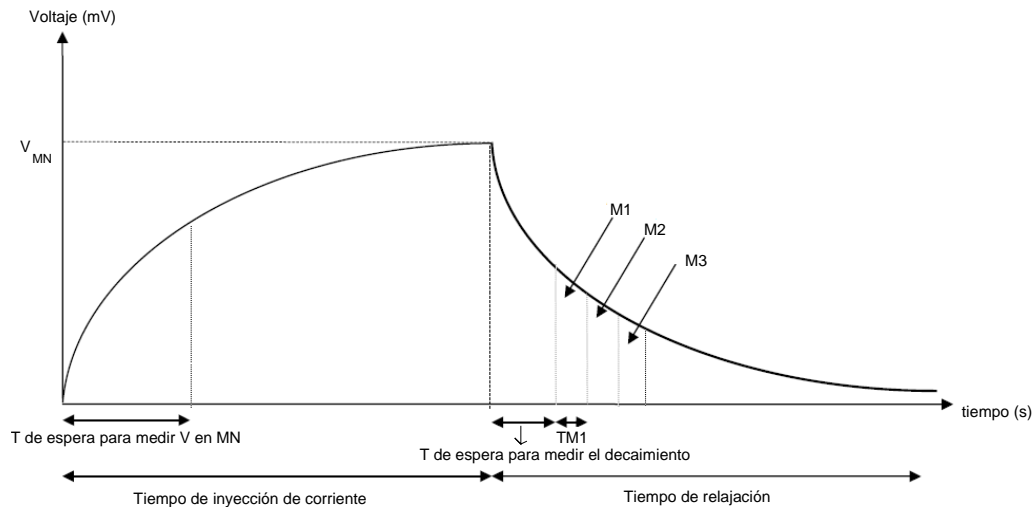


Figura 4.7. Representación esquemática de los parámetros de medición de la cargabilidad (Iris Instruments, 2005).

Cabe mencionar que al momento en que se corta la corriente, se induce una corriente electromagnética secundaria en la tierra, por lo que, las lecturas de V_{MN} se toman un tiempo posterior al corte de I . En el caso del equipo empleado, los tiempos de espacio entre el corte de I y la lectura de V , guardan cierta proporción respecto al tiempo de inyección de dicha corriente, establecidos de manera empírica por el fabricante.

De los parámetros de polarización inducida (τ , μ y el *RMS* del modelo Cole-Cole estándar) obtenidos con el software del equipo Syscal Pro, Standard & Switch, sólo el parámetro τ se elaboró la gráfica para el Caso 1 y 2, en Surfer V 8.0 mediante la función de interpolación de Kriging. Estos parámetros son aparentes, no son invertidos.

El procesamiento de la información se llevó a cabo con el software de interpretación (inversión) llamado *Earth Imager* versión 2.4.0, de *Resistivity and IP Inversion Software de Advanced Geosciences, Inc.* (AGI), cuya teoría de inversión en PI está basada en los trabajos de Oldenburg y Li (1994).

IV.3.1 CASO 1: Contaminación por cobre

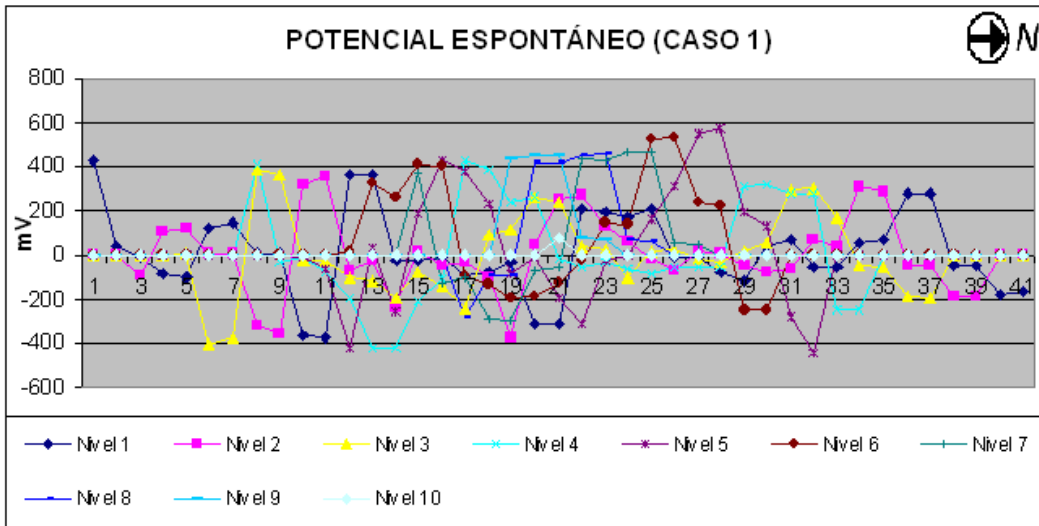
Las secciones representadas en las figuras 4.8 y 4.9 muestran la pseudosección aparente y la imagen de resistividad con cargabilidad respectivamente, ambas asociadas al sitio contaminado por cobre como resultado de 209 lecturas adquiridas el día 12 de febrero del año 2010.

La primera imagen de la figura 4.9 presenta la distribución de la resistividad en el subsuelo con valores que van desde 1 hasta 87 (Ohm*m) siendo mayoritariamente conductor, presentando resistividades por debajo de los 10 (Ohm*m).

El comportamiento del potencial V_{MN} durante las mediciones tuvieron valores que van de -133.172 a 236.4 (mV), observándose que los valores mayores corresponden a lo primeros niveles de adquisición.

Algunas zonas superficiales muestran valores altos de resistividad en las posiciones de 20, 28, 32, 40 y 44 (m), que de acuerdo con las observaciones de campo, éstas posiciones corresponden a un suelo más compacto de composición limo arcillosa y material de relleno.

Cabe mencionar los valores del potencial espontáneo que tuvieron como máximo y mínimo, 571.6 y -472.7 (mV) respectivamente; ya que es necesario considerarlo en la interpretación para comprender el comportamiento del error cuadrático medio de 101.18 (ms) obtenido en la última iteración del modelo de inversión. Como se observa en la gráfica 4.1, donde las series representan el nivel de investigación, el *SP* tuvo saltos de hasta 800 (mV) en un metro de separación.



Gráfica 4.1. Potencial espontáneo obtenido en los datos del sitio contaminado por cobre.

En la imagen de cargabilidad de la figura 4.9 se aprecia un rango de 1 a 459 (ms), con valores medios de 230 (ms) en tonos verdes. Las únicas zonas que guardan una relación inversa respecto a la cargabilidad son aquellas en las posiciones superficiales en 20, 28, 32, 40 y 44 (m).

Se puede observar además, una estructura casi vertical a la posición 36 (m), que de acuerdo a la información oral proporcionada por el personal de la industria, corresponde a un muro de soporte que separa dos zonas de diferente cargabilidad asociada a diferentes concentraciones de muestras extraídas de los pozos de monitoreo de agua.

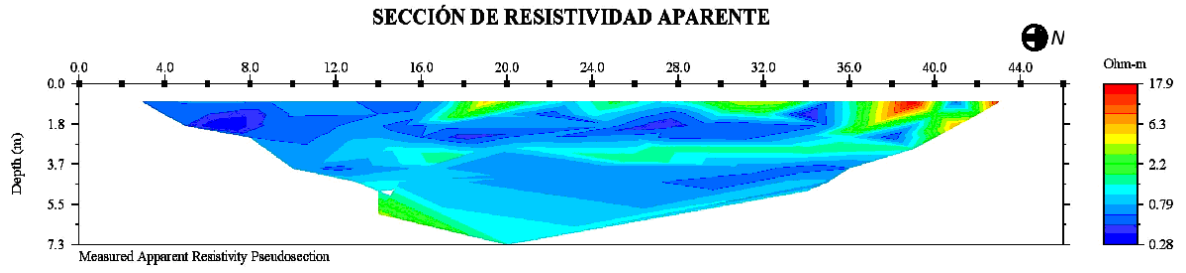


Figura 4.8. Pseudo-sección de resistividad aparente para el sitio contaminado por cobre.

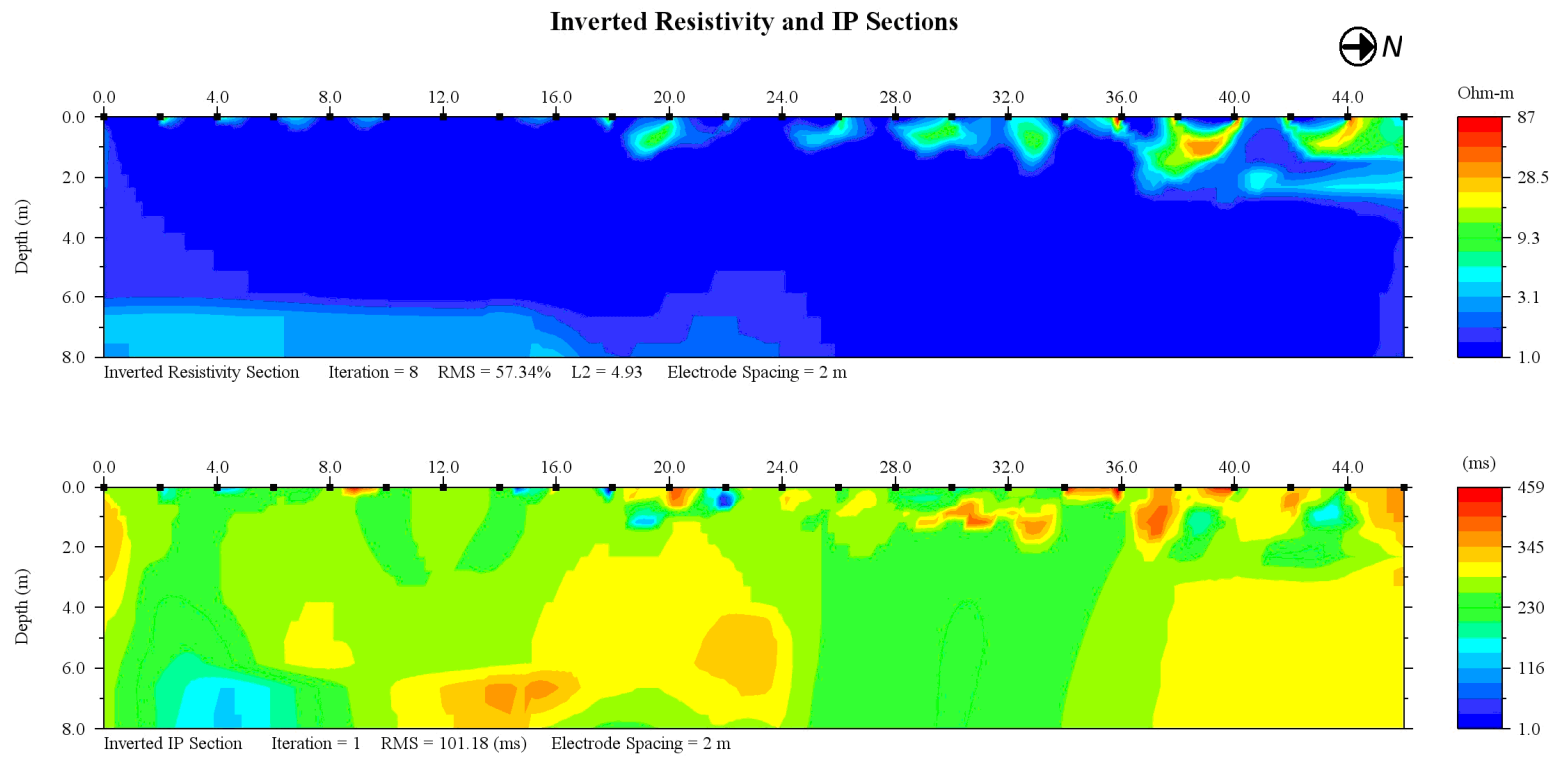


Figura 4.9. Secciones de resistividad y cargabilidad invertidas de la línea en suelo contaminado por cobre.

Como información adicional se presenta a continuación la figura 4.10, con la distribución del parámetro τ correspondiente al Caso 1. Se observa que entre 3 y 4 (m) de profundidad y 36 en horizontal hasta el extremo derecho, una zona aproximadamente uniforme en tamaño de grano, es concordante con la figura 4.9 donde se encuentra el muro de soporte. Los valores mostrados en la escala gráfica tienen por valor máximo de 56,000 y mínimo de 0 que, de acuerdo a la teoría, los materiales gruesos se encuentran en colores rojos y los de grano fino en azules. Lamentablemente no se cuenta con la información litológica a profundidad para corroborar ésta información, aunque a nivel superficial, se correlaciona con las observaciones de campo descritas en el apartado IV.2.1.

Sección del parámetro Tau del modelo Cole-Cole, Caso 1

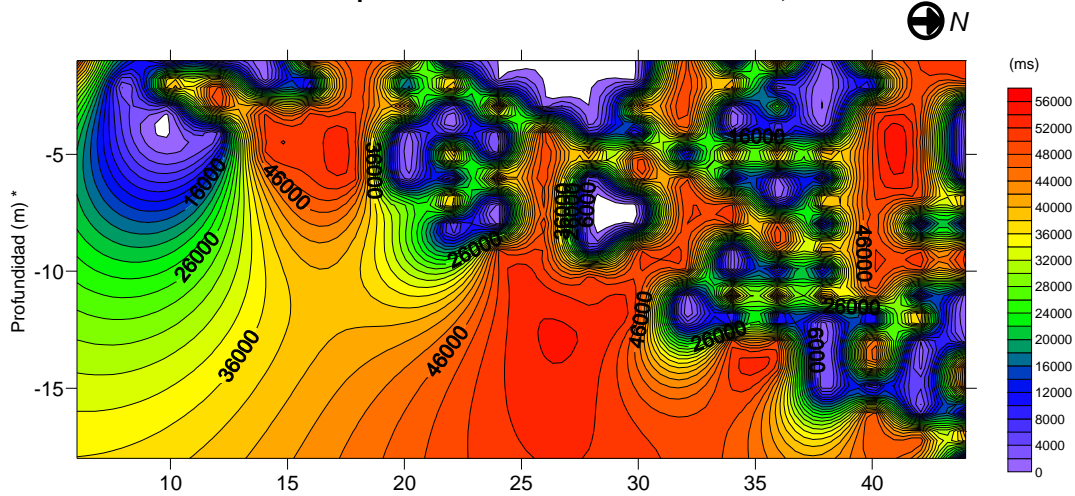
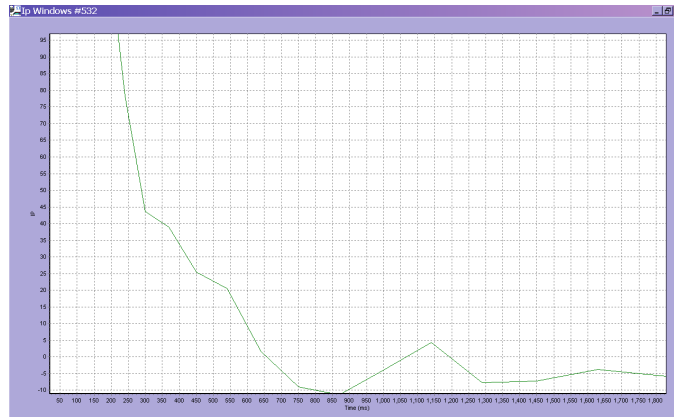
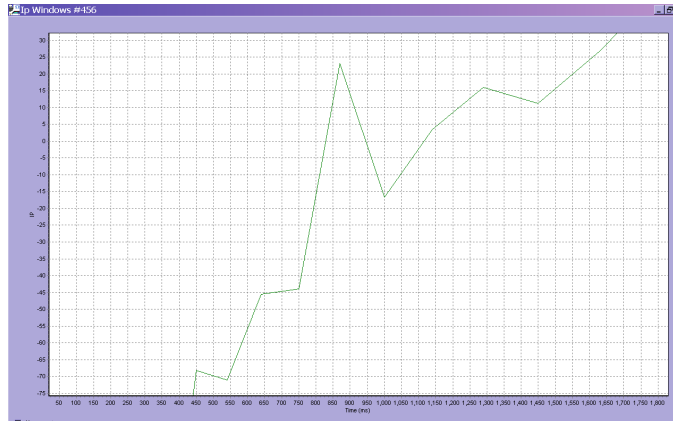


Figura 4.10. Distribución del parámetro τ aparentes de la sección del Caso 1. Profundidades calculadas con los parámetros de Edwards (1977)

Las curvas de decaimiento del potencial de cada lectura tuvieron un comportamiento mayoritariamente, semejante al de la gráfica 4.2, que muestra una tendencia exponencial negativa con algunos momentos de ruido expresados en picos ascendentes. Sin embargo, también hubo curvas con comportamientos que no concuerdan con la teoría y que pueden interpretarse como si el sistema estuviera cargándose como se muestra en la gráfica 4.3. Puede observarse, que aunque el valor absoluto del SP es enorme al igual que la desviación estándar, la curva tiene comportamientos diferentes en el cambio de polaridad del SP.



Gráfica 4.2. Curva de decaimiento de la cargabilidad 51.09 (ms) desviación estándar de 137.9, SP 460.8 (mV); V_p de 3.614 (mV), ρ_a de 0.48 (Ohm*m).



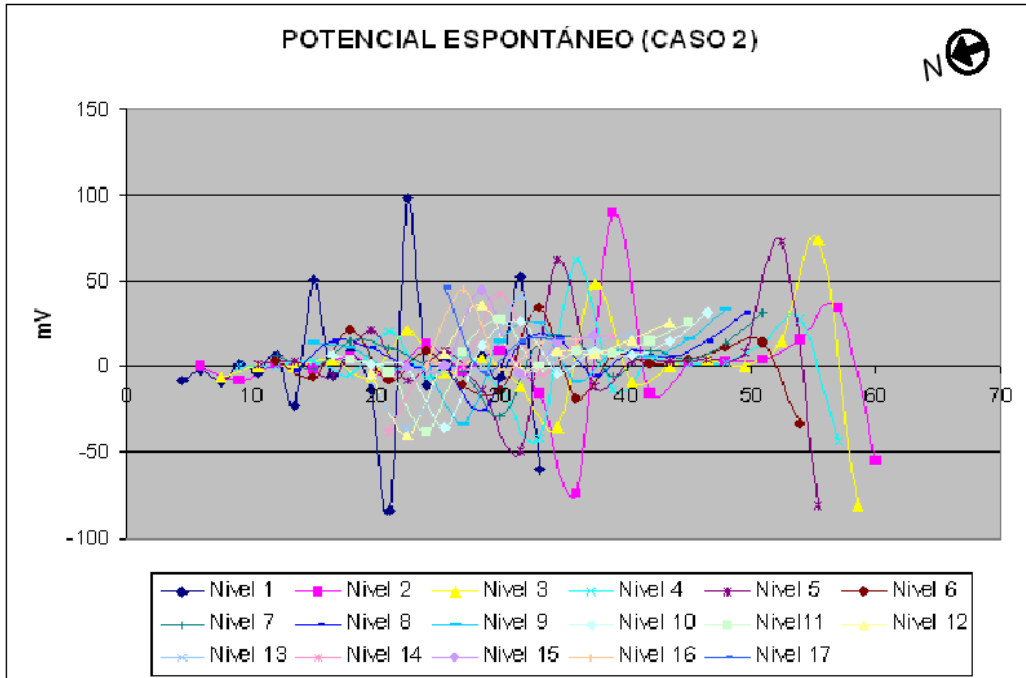
Gráfica 4.3. Curva de decaimiento de la cargabilidad -34.37 (ms), desviación estándar de 161.3, SP -390.3 (mV); V_p de 0.79 (mV), ρ_a de 0.43 (Ohm*m).

La información de datos con comportamientos semejantes a los de la curva de la gráfica 4.3, se elimina en el proceso del cálculo de los parámetros del modelo Cole-Cole, por lo que, es necesario tener datos de buena calidad para evitar perder información.

IV.3.2 CASO 2: Contaminación por hidrocarburos

Las figuras 4.11 y 4.12 muestran las respuestas de resistividad aparente y resistividad y cargabilidad invertidas, obtenidas al procesar los 208 datos tomados el día 8 de abril de 2010, mostrando en la parte inferior, la sección A-A' de la línea del tendido con la posición de los pozos cercanos de los cuales se extrajo muestras de agua y de suelo para su análisis en laboratorio con lo que se obtuvieron las concentraciones de benceno.

Estos datos, presentaron un SP máximo de 98.3 (mV) y mínimo de -90.4 (mV), mucho menor al comportamiento del caso 1 (gráfica 4.4); una desviación estándar promedio de 21.7 de resistividades aparentes que van desde -4.7 a 42.43 (ohm*m). La cargabilidad aparente, por su parte, se encuentra en un rango que va entre -299.9 y 513.2 (ms), mientras que para la interpretación se obtuvo de 1 a 73 (ms).



Gráfica 4.4. . Potencial espontáneo obtenido en los datos del sitio contaminado por hidrocarburos.

La distribución de la resistividad invertida muestra a una profundidad promedio de 3.5 (m), un horizonte de forma tabular con valores bajo-resistivos de alrededor de los 10 (ohm*m), que de acuerdo con la información proporcionada vía comunicación oral, corresponde a una formación geológica de almacenamiento de agua somera. Se observa además una zona alto-resistiva en la vertical bajo las posiciones de 18 a 38 (m).

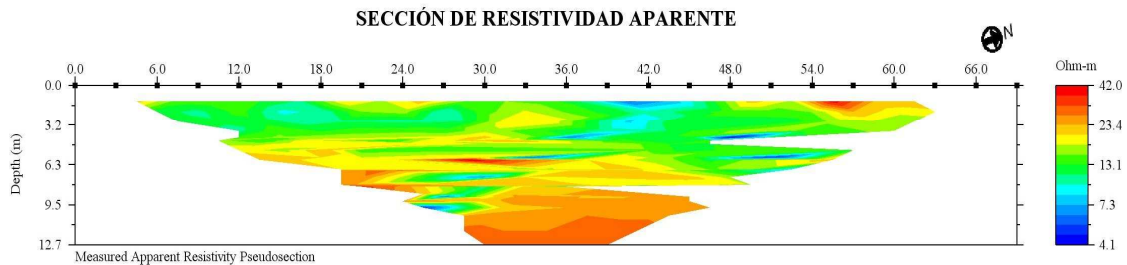


Figura 4.11. Pseudo-sección de resistividad aparente del sitio contaminado por hidrocarburos.

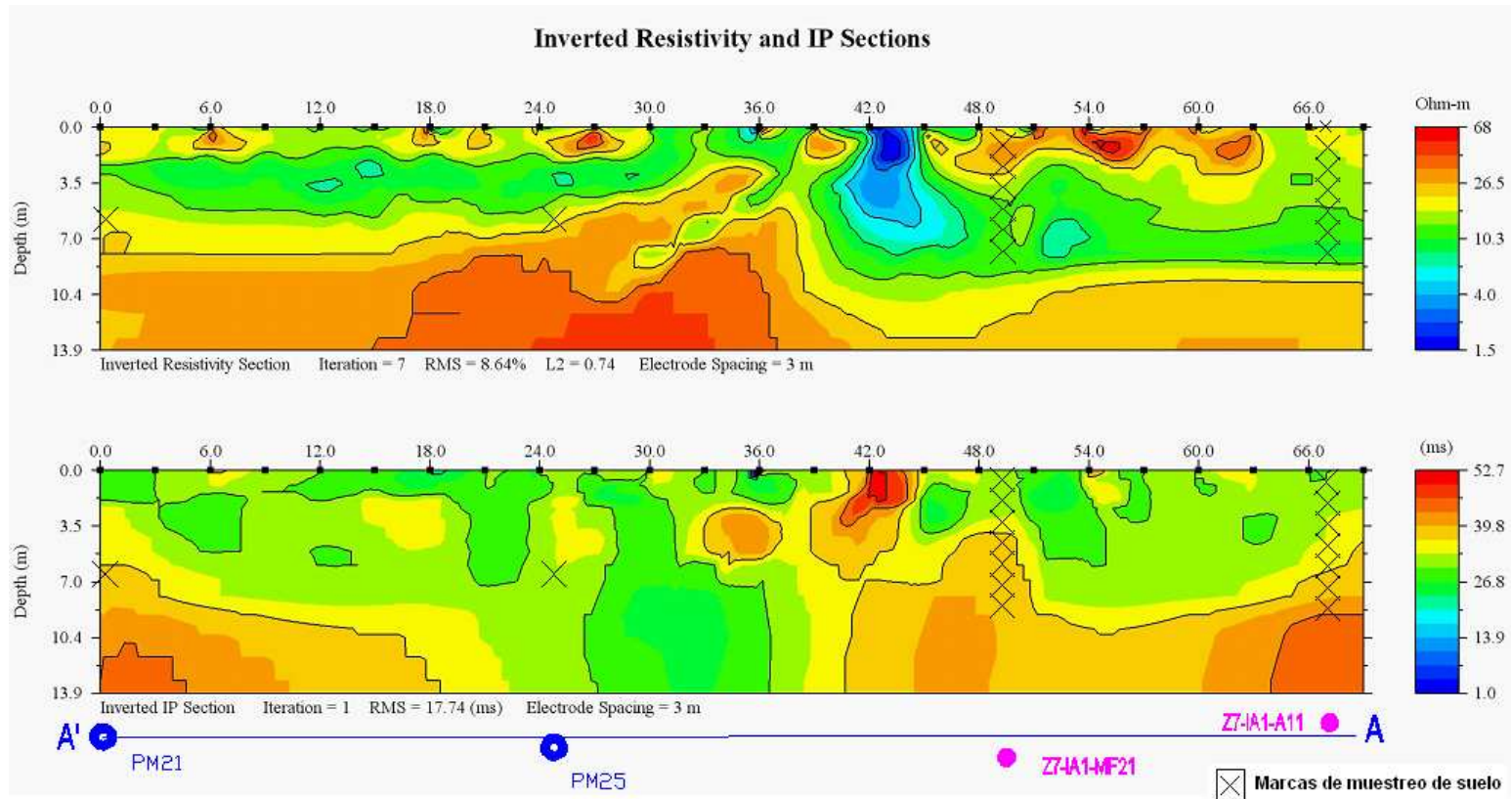
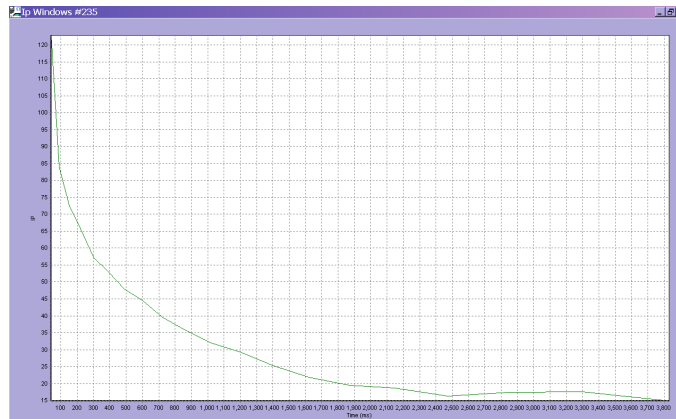


Figura 4.12. Secciones de resistividad y cargabilidad invertidas de la sección A'-A y los pozos de muestreo.

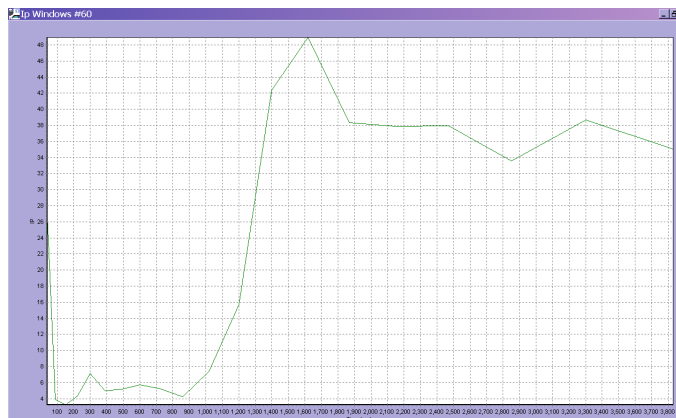
Como se observa de la figura 4.12, el comportamiento de la cargabilidad y la resistividad coincide bajo el electrodo de posición 42 (m), donde hay baja resistividad y alta cargabilidad, aunque en su mayoría no es así. Además se presentan en ambas secciones, unas “X” que corresponden a las profundidades en las que se tomaron muestras de agua y suelo, conforme se describe en las tablas 4.1 y 4.2.

Así mismo, se observa que la muestra del pozo PM-21 corresponde a una zona de resistividad media-baja y cargabilidad media-alta a 7 [m] de profundidad. En cuanto al pozo PM25, a esa misma profundidad se observa una zona de transición entre resistividades bajas y altas, mientras que en la sección de PI se aprecian cargabilidades medias, alrededor de los 26 (ms).

Para proporcionar información de la calidad de los datos, se presenta a continuación las siguientes gráficas que muestran el comportamiento de las curvas de decaimiento del potencial, para una caída típica (gráfica 4.5) y una no convencional (gráfica 4.6), las cuales tuvieron valores de SP y desviación estándar relativamente bajos pero, en el caso de la segunda, una caída de potencial ruidosa probablemente debido al SP negativo.



Gráfica 4.5. Curva de decaimiento de la cargabilidad 29.8 (ms), desviación estándar de 0.3, SP 14.1 (mV); Vp de 9.775 (mV), ρ_a de 4.06 (Ohm*m).



Gráfica 4.6. Curva de decaimiento de la cargabilidad 29.8 (ms), desviación estándar 29.8; SP de -74 (mV); Vp de 13.061 (mV), ρ_a de 19.97 (Ohm*m).

En la figura 4.13, se muestra una pseudo-sección de la distribución del benceno tomando los datos proporcionados por los muestreos de suelo, con el método de interpolación de Kriging. Al comparar con la figura 4.12, no se encuentra concordancia

geométrica con la imagen resistiva ni con la de cargabilidad, excepto, que en ésta aumenta la cargabilidad al aumentar la profundidad y la concentración, lo que demuestra la dificultad para modelar la distribución de los contaminantes sólo con muestreo en estratigrafías complicadas.

CONCENTRACIONES DE BENCENO EN SUELO (Pozos Z7-IA1-A11 y Z7-IA1-MF21)

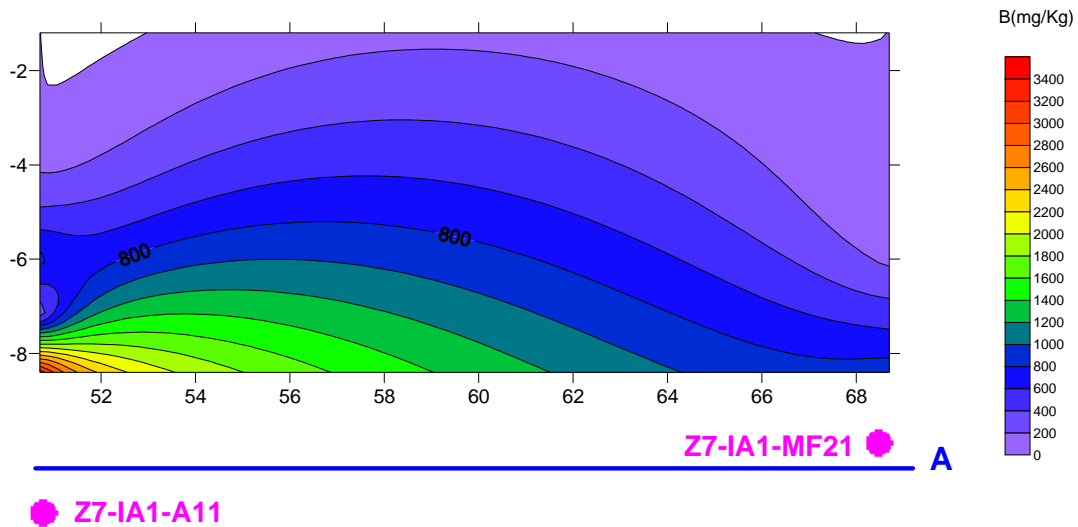


Figura 4.13. Distribución de concentración de benceno en suelo y agua correspondiente al perfil eléctrico del Caso 2. Profundidades calculadas con los parámetros de Edwards (1977):

Tabla 4.1. Concentraciones de benceno en agua.	
Pozo de muestreo	B [mg/L]
PM-21	40.891
PM-25	399.753

Tabla 4.2. Concentraciones de benceno en suelo.							
Resultados de Benceno en Suelo [mg/kg]							
ID	B 1.20 [m]	B 2.40 [m]	B 3.60 [m]	B 4.80 [m]	B 6.00 [m]	B 7.20 [m]	B 8.40 [m]
Z7-IAI-IA11	0.80	0.82	19.17	21.90	157.06	507.23	896.92
Z7-IAI-MF21	0.78	3.46	57.77	362.79	860.55	265.85	3329.74

En la tabla 4.2 de los pozos Z7-IAI-IA11 y Z7-IAI-MF21, se observa que al aumentar la profundidad aumenta la concentración del benceno obteniendo para Z7-IAI-IA11, el de menores proporciones con respecto a Z7-IAI-MF21. Obsérvese que para el primero, en

la sección de resistividad invertida se tiene una respuesta entre 10 y 26($\text{ohm}\cdot\text{m}$) mientras que para el segundo llega hasta valores límites superiores.

De los pozos PM21 y Z7-IAI-IA11 y Z7-IAI-MF21 a 7 (m) se tiene una respuesta en cargabilidad semejante con valores alrededor de 37 (ms) en tonos naranja y la concentración para el primero es de 40.891 (mg/L), para el segundo de 507.23 (mg/kg) y para el tercero de 265.85 (mg/kg).

Para PM 25 que se encuentra alrededor de 29(ms), le corresponden el color verde claro con concentración de 399.753 (mg/L).

De acuerdo con los datos de laboratorio y las secciones de resistividad y cargabilidad, se tiene entonces que la cargabilidad es directamente proporcional a las concentraciones, como lo establece la teoría (Pelton, 1978; Wong, 1979), al menos como se muestra para los pozos Z7-IAI-MF21 y Z7-IAI-IA1, ya que para PM 25 y PM 21 no se observa esa relación.

La información adicional de este estudio corresponde a la probable distribución de los diferentes tamaños de grano, que se muestra en la siguiente figura (4.14) mediante el parámetro τ , donde los valores bajos (colores azules a verdes en la escala gráfica) ubicados en la parte superficial hasta los 5 (m) de profundidad y a lo largo de toda la sección, corresponden a las zonas bajo-resistivas de la figura 4.11 donde se encuentra una formación geológica horizontal donde se almacena agua, el cual puede estar contenido en materiales de granulometría de tipo arenosa (de acuerdo con las observaciones en campo y comunicación oral). También parece haber correlación entre las zonas alto-resistivas de la figura 4.12 con las zonas de valores altos de τ , sobre todo en la zona central y el extremo inferior derecho.

En cuanto a la relación con la cargabilidad, se observa una concordancia geométrica entre las zonas de τ con valores de 50,000 (ms, en tonos naranjas) con los valores de cargabilidad media (entre los 28 y 32 ms en tono verde claro de la base de la sección de la figura 4.12).

En la zona central de la sección de resistividad invertida (fig. 4.12), parece haber un cambio en el tamaño granulométrico, de acuerdo con la distribución de τ de la figura 4.14, de manera que se tienen materiales de grano fino (tiempos pequeños, mostrados en tonos azules) en la superficie y va aumentando en los extremos laterales (zona verde a la izquierda y roja a la derecha). Esto es importante tomarlo en consideración ya que se sabe que las altas concentraciones de benceno se dan en zonas de profundidad media (8.4 m) donde todavía se aprecian materiales finos (pueden producir una respuesta capacitiva alta) y van aumentando en tamaño al profundizar (pozos Z7-IAI-MF21 y Z7-IAI-IA11). Esto es importante de considerar, ya que los materiales de grano fino también pueden producir una respuesta capacitiva alta, lo cual puede descartarse, ya que no hay una correlación directa entre las respuestas de cargabilidad invertida con la distribución de τ .

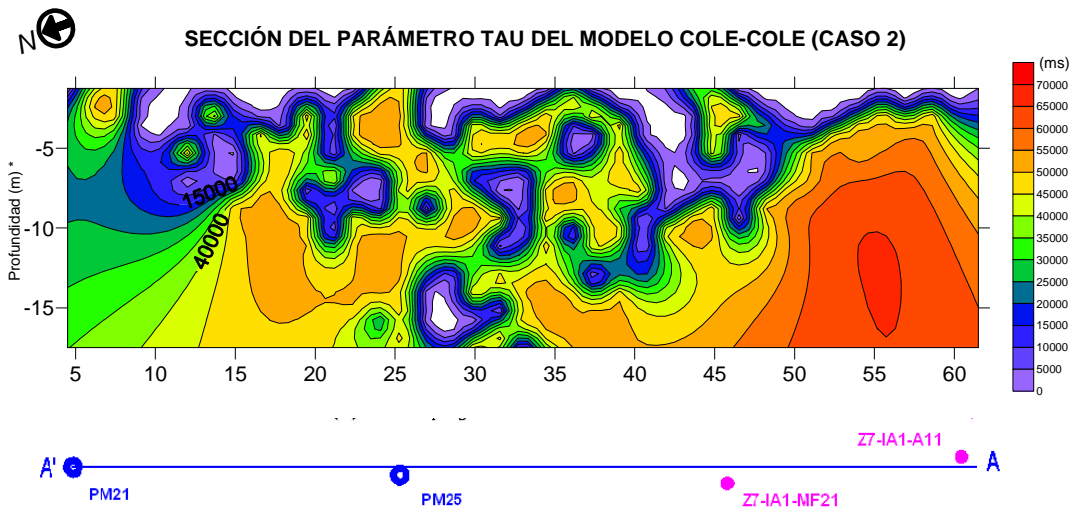


Figura 4.14. Sección de la distribución del parámetro τ aparentes del modelo Cole-Cole estándar para el Caso 2. Profundidades calculadas con los parámetros de Edwards (1977).

Las secciones del parámetro τ tienen un gran potencial de desarrollo ya que, junto con las pruebas pertinentes, se tendría una mejor idea de la distribución de materiales finos y gruesos en el medio, que conlleva a entender el comportamiento del contaminante en tiempo y espacio, que es lo que se busca en una caracterización ambiental por ejemplo.

Desafortunadamente, en ésta tesis no se pudo adquirir la información litológica de los dos casos de campo para correlacionarlos con los valores de la c

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La PI produce un efecto de disminución de la conductividad efectiva del medio, como se deduce de la ecuación que define el concepto de cargabilidad (Seigel, 1959).

Las respuestas de PI en el dominio del tiempo aportan más información que sólo la resistividad, siendo más precisas, inclusive, que las pseudo-secciones de muestreos de suelo y/o agua con programas de interpolación.

En condiciones conductoras (minerales diseminados en medios saturados), la respuesta de resistividad no ayuda a discriminar las zonas de interés. Sin embargo, para casos geológicamente resistivos, por ejemplo los medios porosos y no saturados, sí se puede obtener imágenes con anomalías claras de interés (Zogala, 2009).

De los modelos Cole-Cole y sus variantes, se puede obtener información de tipo granulométrico (con τ) y la homogeneidad del medio (con c), de manera que se puedan correlacionar con la respuesta de cargabilidad y resistividad a priori que pueden ser de gran utilidad en el muestreo direccionado para la caracterización de sitios contaminados.

Como se mostró en las curvas de decaimiento del potencial (o gráficas de cargabilidad), los valores de SP negativos pueden ser los generadores de curvas muy ruidosas; sin embargo, el empleo del dispositivo electródico, la secuencia en las lecturas, la elección de electrodos y los cuidados en campo siguen siendo de suma importancia, ya que como se mencionó anteriormente, los datos de PI son muy susceptibles al ruido ambiental, el cual debe reducirse lo más posible para disminuir el tiempo de procesamiento en gabinete. Algunas formas de disminuirlo en campo son mediante el uso de electrodos impolarizables como tazas porosas.

La aplicación de la PI en dos zonas contaminadas por diferentes causas ha tenido éxito en la determinación de las zonas de mayor contaminación. En el Caso 1 (contaminación por cobre), se pudo detectar una zona anómala casi invisible para la resistividad, aunque el ruido al ser muy grande, causa cierta incertidumbre en la interpretación, sin embargo, la información proporcionada, vía oral, concuerda con la imagen obtenida de cargabilidad.

Para el Caso 2, que corresponde al sitio contaminado por hidrocarburos, se cuenta con mayor información, en este sentido con la concentración de benceno en suelo y agua, de manera que las secciones de cargabilidad son congruentes con dicha información. Además, el ruido en ésta sección fue mucho menor que para el Caso 1.

Es conveniente que en futuros trabajos de investigación se interpreten los parámetros intrínsecos τ y c , ya que existen problemas de tipo ambiental y minero en los que la geología es muy complicada como para inferirla sólo a partir de cartas geológicas o algunos cortes litológicos. Lo anterior podría ayudar en la interpretación geológica-

geofísica debido a que, como se mencionó en el Capítulo II, la respuesta de cargabilidad está influenciada por el contenido de arcilla (en el caso de tener mayoritariamente polarización de membrana) o por la concentración de contaminante, entonces, si se cuenta con las imágenes de la distribución de τ , se puede apreciar si se tienen cargabilidades altas por presencia de arcillas o por altas concentraciones de contaminante.

Los mapas de isoconcentraciones que dependen de la profundidad a la cual fue tomada la muestra, pueden ser mejorados con la información proporcionada por la PI Espectral, que es función del contexto geológico.

El trabajo de tesis presente pretende incursionar la aplicabilidad de la polarización inducida en materia ambiental como una opción en la exploración, no sólo para medios contaminados por minerales sino también para hidrocarburos o materia orgánica, de manera que complemente la información de estudios resistivos. Sin embargo, es necesario hacer más investigación en este campo ya que en el resto del mundo se está llevando a cabo con gran celeridad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Advanced Geosciences, Inc., 2009. *Instruction Manual for Earth Imager 2D Version 2.4.0 Resistivity and IP Inversion Software.* 139 p.p.

Al'pin, L. M., Berdichevskii, M. N., Vedrintsev, G. A. y Zagarmistr, A. M., 1966. Dipole methods for measuring earth conductivity. Seleccionado y traducido por Keller, V.: New York, Consultants Bureau, Segunda impresión. 302 p.p.

Bleil, D. F., 1953 Induced Polarization, a method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18: 636-661.

Dahlin, T., Leroux, V. & Nissen, J., 2002. Measuring techniques in induced polarisation Imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 50: 279-298.

Edwards, L. S., 1977 A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42: 1020-1036.

Gasperikova, E. and Morrison, F., 2001. Mapping of induced polarization using natural fields. *Geophysics*, 66: 137-147.

Hallof, P., 1964. A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method. *Geophysics*, 3: 425-433.

Hernández, A., 2009-1. Apuntes de Geología Ambiental.

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.

Johnson, M., 1984. Spectral induced polarization parameters as determined through time-domain measurements. *Geophysics*, 49: 1993-2003.

Kaufman, A. A., 1992. Geophysical field theory and methods Part A: gravitational, electric and magnetic field. Academic Press. 581p.p.

LaBreque, D., Daily, W., 2008. Assessment of measurement errors for galvanic-resistivity electrodes of different composition. *Geophysics*, 73: F55-F64.

Loke, M. H., 2010. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*, www.geoelectrical.com.

Lottermoser, B.G., 2007. *Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental Impacts.* Berlin, Springer, Second Edition. 304 p.p.

Luo, Y and Zhang, G., 1998. *Theory and Application of Spectral Induced Polarization.* SEG Geophysics Reprint Series N° 8, 171 p.p.

Matthews, P., Zonge, K., 2003. *State of the art in IP and Complex Resistivity*, KEGS 50th Anniversary Symposium, Menning and Environmental Geophysics, March 8, Toronto, Ontario. 18 p.p.

- Nordsiek, S.; Weller, A., 2008.** *A new approach to fitting induced-polarization spectra.* Geophysics, 73: F235-F245.
- Oldenburg, Douglas y Li, Yaoguo, 1994.** *Inversion of induced polarization data:* Geophysics, 59: 1327-1341.
- Orellana, E., 1974.** *Prospección Geoeléctrica por campos variables:* Madrid, Paraninfo.571 p.p.
- Parasnis, D. S., 1973.** *Mining Geophysics. Methods in Geochemistry and Geophysics:* Países Bajos, Elsevier, Second revised edition, Fourth impression.570 p.p.
- 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.
- Seigel, Harold O., 1959,** Mathematical Formulation and type curves for Induced Polarization. Geophysics, 24: 547-565.
- Seigel, H., Hill, H. y Baird, J., 1968.** Discovery case history of the pyramid ore bodies Pine Point, Northwest Territories, Canada. Geophysics, 4: 645-656.
- Seigel, H., Nabighian, M., Parasnis, D., Vozzof, K., 2007.** The early history of the induced polarization method. The Leading Edge.312-321 p.p.
- Seigel, H., Vanhala, H., Sheard, N., 1997.** Some case histories of source discrimination using time-domain spectral IP. Geophysics, 62: 1394-1408.
- SEMARNAT, 2003.** *NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación.*
- Servicio Geológico Mexicano, 2002** Carta Geológico-Minera, Ciudad de México, E14-2, Edo. de Méx., Tlax., D.F., Pue.,Hgo. y Mor. Primera Edición.
- Sherif, Robert E., 1989.** *Geophysical Methods.* New Jersey, USA, Prentice Hall. 605 p.p.
- Sherif, Robert E., 2002.** *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics:* Society of Exploration Geophysicist, Fourth Edition, CD-ROM.
- Slater, Lee y Lesmes, David, 2002.** IP interpretation in environmental investigations. Geophysics, 67: 77-88.
- 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.

Van Blaricom, Richard, 1992. *Practical Geophysics II for the Exploration Geologist*: U.S.A., Northwest Mining Association, Second Edition. 570 p.p.

van der Perk, M., 2006. *Soil and Water Contamination from molecular to catchment scale*: London, UK, Taylor & Francis. 389 p.p.

Vanhala, H. and Peltoniemi, M., 1992. Spectral IP Studies of Finnish ore prospects. *Geophysics*, 57: 1545-1555.

Vanhala, H., Soininen, H., Kukkonen, I., 1992. Detecting organic Chemicals contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment. *Geophysics*, 57: 1014-1017.

Vacquier, Holmes, C. R., Kintzinger, P. R. and Lavergne, M., 1957. Prospecting for ground water by induced electrical polarization. *Geophysics*, 22: 660-687.

Wait, James R., 1982. *Geo-Electromagnetism*: U.S.A., Academic Press. 268 p.p.

Wong, J., 1979. An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores. *Geophysics*, 44: 1245-1265.

Zogala, B., Robak, M., Dubiel, R., Zuberek, W. M., Steininger, M. and Wzientek, K., 2009. Geoelectrical method for detection of oil contamination in soils and bioremediation process monitoring. *SAGEEP*, 22: 348-362.

Zonge, K., Hughes, L., 1980, *The complex resistivity method*. <http://www.zonge.com/FieldCR.html>. 32 p.p.