



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

**DETERMINACIÓN DE UNA PLUMA
CONTAMINANTE POR HIDROCARBURO
MEDIANTE TOMAGRAFÍA ELÉCTRICA EN EL
MUNICIPIO DE TEXIXTEPEC, VERACRUZ.**

INFORME ESCRITO

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

CARLOS ALBERTO LASTRA ZAPATA

AVAL

M.C. GERARDO CIFUENTES NAVA



MÉXICO, D.F. AGOSTO DE 2013

Agradecimientos

En primer lugar Gracias a Dios, por haberme permitido llegar hasta donde hoy estoy.

Gracias a mi familia, en especial a mis padres: Verónica Zapata y Carlos Lastra, por haberme enseñado los valores y mostrado el camino del bien, también, gracias a mi mamá Fanny y a mis tíos Amparo, Liz y Homero por haberme apoyado tanto en lo material como en lo espiritual y darme esos consejos de vida que me han formado.

Gracias a mi novia Fernanda Estradas por estar ahí en los momentos más complicados y mostrarme siempre su mano franca. Gracias por estar a mi lado.

Gracias a mi tutor y sinodales, M.C. Gerardo Cifuentes, Dra. Claudia Arango, Dr. José Hdz. Espriú, Ing. Martin Vidal e Ing. Alejandro García por su tiempo, apoyo y sus recomendaciones y consejos.

Gracias a mis compañeros y amigos de la Facultad con quienes conviví, con quienes sufrí y me divertí, con quienes compartimos grandes momentos.

Gracias a mis compañeros de trabajo, quienes ahora son grandes amigos, gracias por sus consejos y experiencias.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, por cobijarme durante 5 años de carrera y por dejarme ser parte de esta Institución.

Gracias a Gestión Integral Ambiental y Peritajes S.A, lugar en donde inicie mi vida profesional, por darme las facilidades de realizar este trabajo.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Contenido

Resumen	3
Abstract.....	4
1. Introducción.....	5
2. Marco Teórico.....	7
2.1. Conceptos Básicos de la Prospección Eléctrica	7
2.2. Propiedades Eléctricas de los Materiales del Subsuelo.....	14
2.3. Arreglo Polo-Dipolo.....	16
2.4. Comportamiento de Plumas Contaminantes por Hidrocarburo en el Subsuelo...	22
3. Características del Equipo	25
4. Reporte	26
4.1. Introducción.....	26
4.1.1. Generalidades.....	26
4.1.2. Objetivos.....	26
4.2. Antecedentes.....	27
4.2.1. Localización.....	27
4.2.2. Fisiografía.....	28
4.2.3. Geología.....	30
4.2.4. Hidrología	31
4.2.5. Edafología	33
4.3. Trabajos realizados	34
4.3.1. Planteamientos de los estudios.....	34
4.3.2. Desarrollo de los Trabajos	35
4.4. Resultados.....	37
4.4.1. Determinación de resistividades	37
4.4.2. Descripción de resultados.	41
4.5. Conclusiones y comentarios.	46
4.5.1. Estructura del subsuelo y características del contaminante.....	46
5. Conclusiones.....	50
Bibliografía.....	51

Resumen

En el siguiente informe se presenta un caso de estudio en donde se reitera la utilidad que tienen los métodos geofísicos, en especial la prospección geoeléctrica, en el área de la contaminación del subsuelo. Los resultados que se obtienen del análisis de las pseudosecciones de resistividad permiten dirigir los trabajos de perforación a puntos críticos dentro de la zona afectada por la contaminación y así reducir el tiempo y costo de la remediación.

Al realizar la interpretación de los resultados proporcionados por la tomografía eléctrica 2D, se concluye que el comportamiento geoeléctrico de los derrames de hidrocarburo en el subsuelo depende de la edad del mismo; manifestándose como anomalía resistiva cuando la contaminación es reciente pero después de algún tiempo de ocurrido el derrame, se comporta conductivamente. La causa principal de la anomalía conductiva es el aumento de conductividad superficial (más que electrolítica) en los poros generados por el proceso de biodegradación del suelo contaminado.

Abstract

In this report, is presented a study case where the usefulness of geophysical methods is reiterated, especially the geoelectrical prospecting in an area with hydrocarbon contamination. The obtained results through the analysis of the pseudosections of apparent resistivity allow to point out the best locations for drilling works inside the critical areas in the affected zone by contamination. Thus, it is possible to reduce time and costs in the remediation process.

During the interpretation of the results obtained from the 2D electric tomography, it can be concluded that the geoelectrical behavior of the hydrocarbon spills in the subsoil depends on residence time; it will be shown as a resistive anomaly when the contamination is recent but after some time has passed after the spill, it behaves conductively. The main cause of the conductive anomaly is the growth of superficial conductivity (more than electrolytic conductivity) in the pores generated by the biodegradation process of the contaminated soil.

1. Introducción

El propósito de los estudios geofísicos realizados a través de los métodos eléctricos de prospección, también llamados geoeléctricos, es determinar la distribución de la resistividad eléctrica [ρ] por medio de mediciones efectuadas en la superficie del terreno, los resultados proporcionados permiten en principio identificar los cuerpos situados en el subsuelo. (Orellana, 1982; Loke, 2010).

Este tipo de análisis ha sido usado por varias décadas en investigaciones hidrogeológicas, de minería y geotécnicos, y más recientemente, para estudios ambientales.

Probablemente, la técnica 2D como la tomografía eléctrica, es el método geofísico más versátil al momento de realizar análisis del subsuelo con fines relacionados con la contaminación del medio dado que permite trabajar profundidades variables y abordar múltiples objetivos, como: identificar vertederos, ubicar sus volúmenes, caracterizar antiguas balsas mineras e identificar plumas de contaminación, entre otras aplicaciones.

En este trabajo se ejemplifica el uso de la tomografía eléctrica para la identificación de plumas contaminantes por hidrocarburo. La contaminación por hidrocarburo es un tipo muy común de polución que se encuentra en todas las etapas de la industria petrolera: extracción, transportación, refinación y distribución de los hidrocarburos.

El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características físicas y químicas, además de las características del medio como la unidad del suelo, permeabilidad, tamaño de partículas y contenido de humedad, así como la profundidad del nivel freático. Otros factores atmosféricos, como la temperatura y la precipitación pluvial tienen gran influencia.

Todas las variables, anteriormente citadas, en su conjunto definen el tamaño y la distribución tridimensional de la contaminación en una zona específica. La extensión en el subsuelo de los materiales contaminantes no es posible conocerla, salvo excepciones, sin que se realice una prospección para delimitar su extensión y profundidad, prospección que puede realizarse a través de métodos directos (toma de muestras mediante perforaciones), indirectos (prospección geofísica) o mixtos.

En la práctica, se usan ambos métodos, después de analizar e interpretar las pseudosecciones eléctricas que arroja la tomografía eléctrica y tomando en consideración la información previa del sitio como: la geología, geohidrología y edafología; se obtiene una imagen para determinar localización y profundidad de las muestras que se tomará para corroborar la interpretación realizada y así dar un resultado con menor incertidumbre.

2. Marco Teórico

2.1. Conceptos Básicos de la Prospección Eléctrica

La resistividad es una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado y sus unidades son $[\Omega \cdot m]$; pero igualmente puede considerarse como la facultad de paso, resulta así el concepto de conductividad, que expresado matemáticamente es el inverso de la resistividad:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.1)$$

Considerando un subsuelo compuesto por un semiespacio de resistividad, ρ . El otro semiespacio de resistividad infinita, representará la atmósfera. Para establecer un campo eléctrico será necesario el uso de un generador de corriente, como una batería, que será conectado a un par de electrodos de cobre o acero, **A** y **B**, parcialmente clavados en el subsuelo. Como el tamaño de estos es relativamente pequeño, podemos considerar que los electrodos se reducen a puntos situados en el suelo.

La corriente de intensidad, I_A , penetrará por el subsuelo, y después de recorrerlo saldrá por **B** con intensidad I_B , volviendo al generador para cerrar el circuito (Figura 2.1). Es evidente que: $I_A + I_B = 0$. Si el régimen es estacionario (Orellana, 1982).

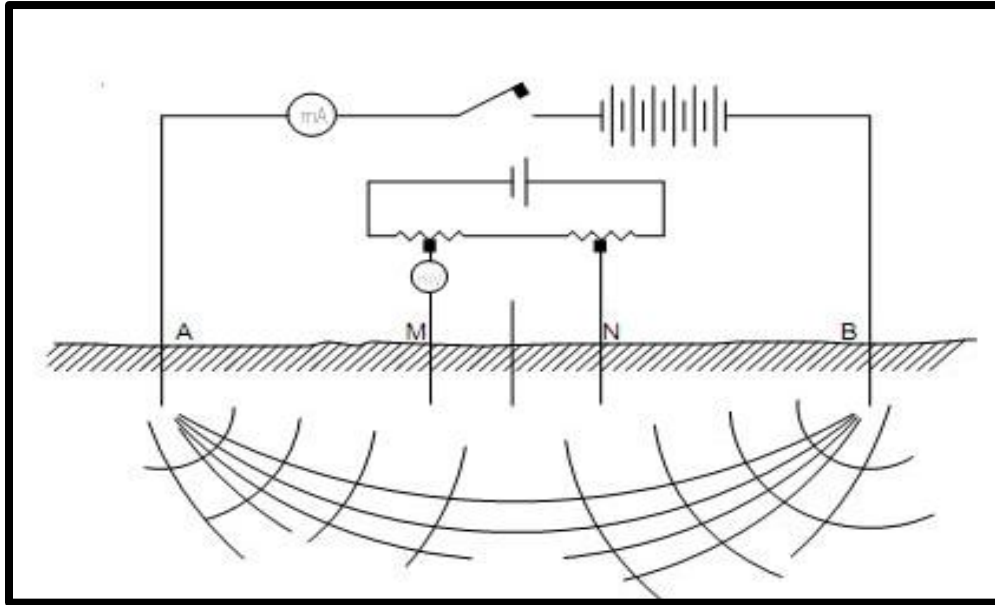


Figura 2.1. Diagrama de la inyección de corriente eléctrica al subsuelo a través de los electrodos de corriente (A y B) y la medición de la diferencia de potencial a través de los electrodos de potencial (M y N) (Iriarte, 2011).

Para establecer las leyes físicas del fenómeno considerado, se parte de las leyes de Maxwell, las cuales explican el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.3)$$

donde por tratarse de un medio estacionario, habrán de eliminarse las derivadas temporales y se tendrá:

$$\nabla \times E = 0 \quad (2.4)$$

$$\nabla \times H = J \quad (2.5)$$

Considerando la ecuación (2.4), la cual indica que el campo eléctrico es conservativo o irrotacional, por lo que se deriva de un potencial escalar ϕ . Entonces, se establece, la relación entre el potencial eléctrico y el campo de intensidad eléctrica (Orellana, 1982; Loke, 2010).

$$E = -\nabla\phi \quad (2.6)$$

La ley de física fundamental, que habrá que cumplirse, es la **Ley de Ohm**, que en su forma diferencial para medios isótropos, está dada por:

$$J = \sigma E \quad (2.7)$$

Donde σ es la conductividad del medio, J es la densidad de corriente eléctrica y E es el campo de intensidad eléctrica. La cual gobierna el flujo de la corriente en el suelo, interpretándose como la densidad de corriente J en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo de intensidad eléctrica E en el mismo punto, y es proporcional a él. El factor de proporcionalidad es σ . En la práctica, lo que se mide es el potencial del campo eléctrico (Orellana, 1972; Loke, 2010). En todos los puntos se cumplirá la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0 \quad (2.8)$$

Ya que, se está en un campo estacionario la ecuación (2.8) se reduce a:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2.9)$$

Que será válida en todo el semiespacio excepto en los electrodos. Combinando ésta ecuación con la ecuación (2.7), se tendrá que:

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma E) = 0 \quad (2.10)$$

Al desarrollar la ecuación y considerando la ecuación (2.6), tenemos:

$$\nabla \cdot (\sigma E) = \sigma \nabla \cdot E + E \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla \phi + E \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla^2 \phi + E \cdot \nabla \sigma = 0 \quad (2.11)$$

Dentro de cada zona homogénea e isotrópica, será:

$$\nabla^2 \phi = 0$$

Que es la ecuación de Laplace, la cual será válida en todo el semiespacio conductor, excepto en los electrodos.

Si se traza alrededor del electrodo **A** y dentro del semiespacio inferior una superficie semiesférica, en cualquier punto de ella, la densidad de corriente **J** tendrá el mismo valor y estará dirigida radialmente (Figura 2.2). La integral de la densidad de corriente, **J**, sobre la superficie semiesférica será igual a **I** por lo que si el radio es **r**, se tendrá:

$$2\pi r^2 J = I \quad (2.12)$$

Por tanto,

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.13)$$

De donde,

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (2.14)$$

Entonces el campo **E** de un electrodo puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia **r**.

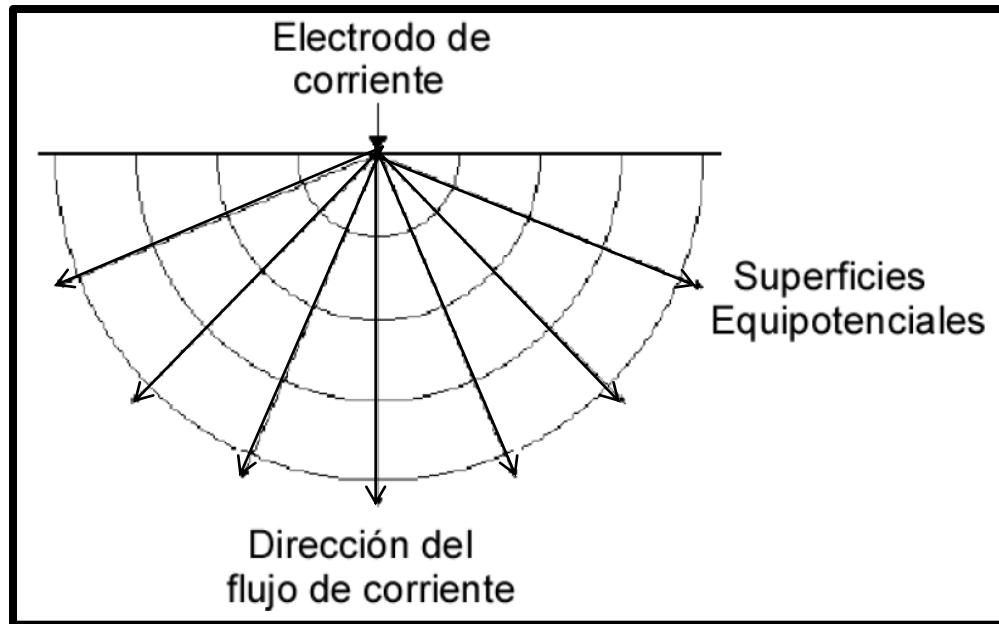


Figura 2.2. Flujo de la densidad de corriente de una fuente puntual en la superficie y la distribución del potencial (Loke, 2010).

La diferencia de potencial entre los puntos **M** y **N**, se deduce a partir de la ecuación (2.6):

$$\varphi_N^M = - \int_N^M E \cdot dI \quad (2.15)$$

Dicha ecuación es la base para el estudio de las diferentes configuraciones geométricas utilizadas. Ya que el campo es conservativo, entonces, si son r_1 y r_2 las distancias respectivas de los puntos **M** y **N**, al electrodo **A**.

$$\varphi_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.16)$$

Si en vez de considerar diferencias de potencial, se consideran potenciales absolutos, habrá que atribuir a un punto determinado el potencial cero. Se asigna como origen del potencial a un punto situado a distancia infinita de la corriente, por lo que se encontrará

el potencial absoluto en el punto **M** calculando el límite de la ecuación (2.16) para $r_1 \rightarrow \infty$ (Orellana, 1982).

Utilizando el teorema de la superposición que describe Milsom (2003) de los campos eléctricos dará como resultado:

$$\varphi_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (2.17)$$

De la misma forma, se aplica en el punto **N** y se tendrá:

$$\varphi_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (2.18)$$

Y entonces la diferencia de potencial entre los puntos **M** y **N** dará:

$$\Delta\varphi = \varphi_M - \varphi_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (2.19)$$

La ecuación (2.19) muestra la diferencia de potencial típica para un arreglo de cuatro electrodos. Al despejar la resistividad ρ , tenemos:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \cdot \frac{\Delta\varphi}{I} = k \frac{\Delta\varphi}{I} \quad (2.20)$$

Donde, **k**, es la magnitud del factor geométrico. El cual, resulta ser una función dependiente de la geometría del arreglo de cuatro electrodos y viene dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \quad (2.21)$$

Si el medio no es homogéneo (Figura 2.3). Efectuando las mediciones pertinentes resultará una resistividad ficticia ρ_a que en general no será igual a ρ_1 que corresponde a

la zona del electrodo **A**, ni a la ρ_2 que se halla debajo de los electrodos **M** y **N**, sino que dependerá de ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 ; y de las distancias de **r** y **a**. Esta resistividad no depende de la intensidad de corriente (**I**) que se envía al terreno, ya que la variación de corriente origina otra variación proporcional a la diferencia de potencial ($\Delta\phi$). Tampoco puede considerarse como promedio ni como media ponderada de las tres resistividades, pues puede ocurrir que sea menor o mayor que todas ellas. Esta resistividad ficticia ρ_a que se obtiene aplicando a los datos obtenidos sobre un medio heterogéneo la expresión correspondiente a medio homogéneo (Ecuación 2.20), es la **resistividad aparente**. (Orellana, 1982; Jakubovskii y Liajov, 1980)

La resistividad aparente, ρ_a , es una medición individual que se asocia al punto inmediatamente debajo del centro del arreglo empleado y de la distribución real de la resistividad. Al calcular el factor geométrico (**k**) se obtiene la localización del punto al cual se le atribuye el valor de resistividad aparente, a éste se le conoce como punto de atribución.

Esta es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en la mayoría de los métodos geoelectrónicos y la que se toma como base para la interpretación. Las dimensiones de la resistividad aparente, en virtud de su definición son las mismas que para la resistividad, y su unidad será también [$\Omega \cdot m$] (Orellana, 1972).

La relación entre la resistividad aparente y la resistividad real es una relación compleja. Determinar la resistividad real del subsuelo a partir de los valores de la resistividad aparente es un problema de inversión (Loke, 2010).

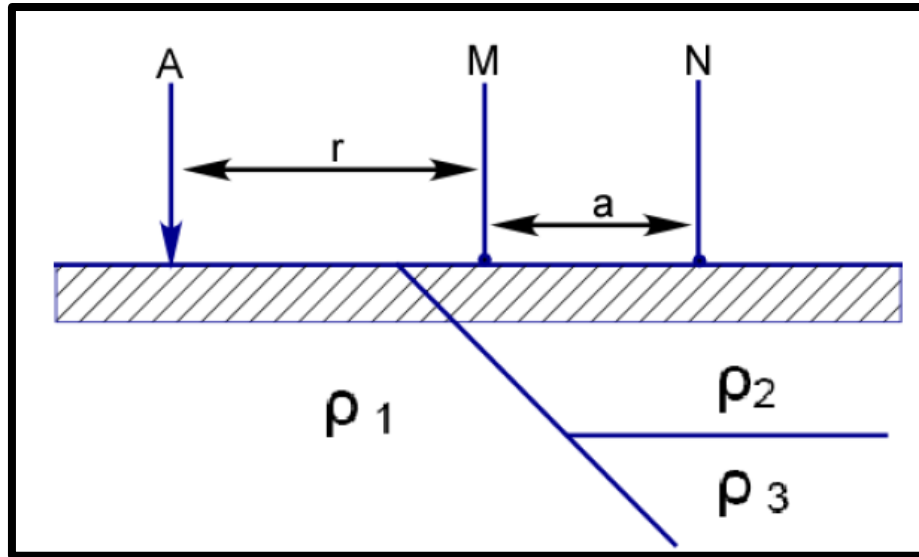


Figura 2.3. Ejemplo de suelo heterogéneo (Orellana, 1972).

2.2. Propiedades Eléctricas de los Materiales del Subsuelo

El flujo de la corriente eléctrica pasa a través de los materiales superficiales de la Tierra mediante dos mecanismos: conducción electrónica y conducción electrolítica. Siendo este probablemente el mecanismo más usado en ingeniería. En este mecanismo el flujo de la corriente viaja a través de los iones del subsuelo.

Como se ha mencionado anteriormente, los estudios de resistividad dan una imagen de la distribución de resistividad del subsuelo. Para convertir esa imagen en una estructura geológica, es muy importante y necesario conocer cómo varía este parámetro en los diferentes tipos de materiales que constituyen el subsuelo y en las estructuras geológicas del área bajo estudio, para ello, se describirá brevemente los valores de resistividad de las rocas y algunos materiales de suelo más comunes:

Las rocas ígneas y metamórficas presentan los valores de resistividad más altas, esto debido a los altos valores de presión al que están sometidas. El valor de la resistividad de estas rocas depende del grado de fracturamiento, y del porcentaje de las fracturas saturadas de agua subterránea. La resistividad varía entre 1,000 y 10 millones [$\Omega \cdot m$], dependiendo del contenido de agua.

Las rocas sedimentarias, son usualmente más porosas, y tienen un mayor contenido de agua. Normalmente tienen menores valores de resistividad comparado con las rocas ígneas y metamórficas. El rango de valores va de 10 a 1,000 [$\Omega \cdot m$]. El valor de la resistividad depende de la porosidad de la roca y la salinidad del agua contenida.

Los sedimentos no consolidados generalmente presentan, incluso valores de resistividad menores a los de las rocas sedimentarias, con valores de entre 10 y menores a los 1,000 [$\Omega \cdot m$], el valor de la resistividad depende de la porosidad (asumiendo que todo los poros están saturados) así como el contenido de arcilla.

Los suelos arcillosos tienen una menor resistividad que los suelos arenosos. Sin embargo, nótese, en la Figura 2.4, el traslape de los valores de resistividad entre las diferentes clases de rocas y suelos. Esto es debido a que la resistividad de una roca o suelo en particular depende de factores como: la porosidad, el grado de saturación y la concentración de sales disueltas.

Por otro lado, una de las sustancias que se encuentran en el subsuelo es el agua subterránea. La resistividad de ésta depende de la concentración de sal, y presenta variaciones de 10 a 100 [$\Omega \cdot m$].

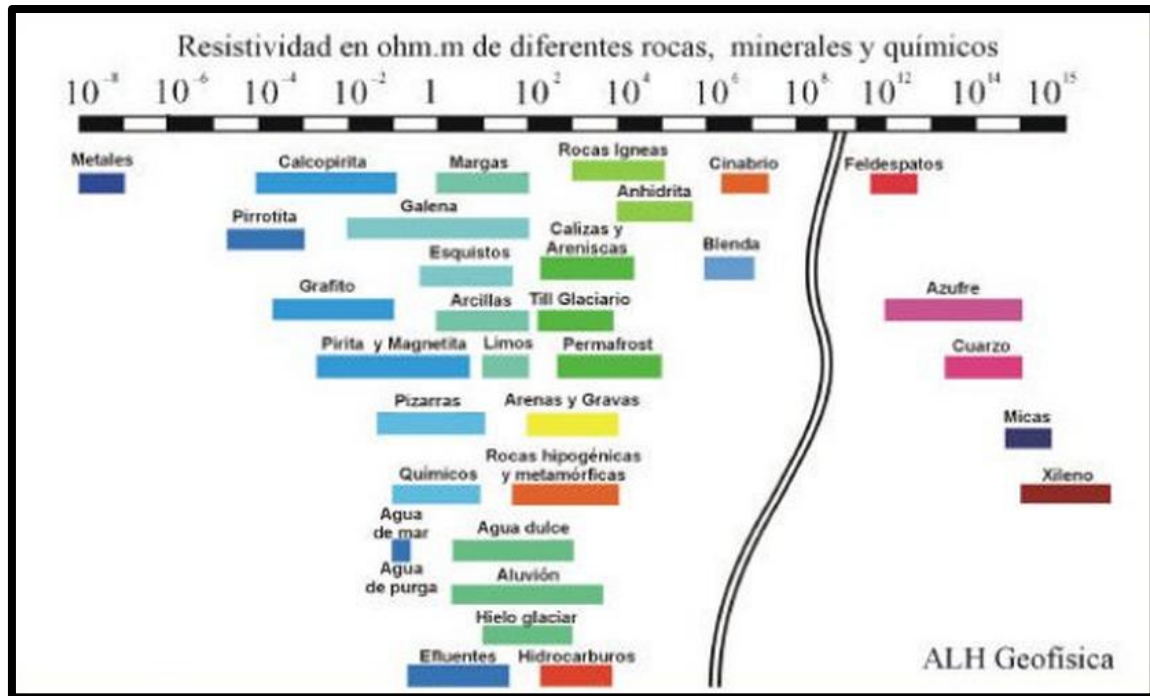


Figura 2.4. Resistividad de las rocas, minerales, suelos y químicos (López Hidalgo, 2004).

2.3. Arreglo Polo-Dipolo

En este trabajo, se aplica el método de la tomografía de resistividad eléctrica con la finalidad de localizar las plumas de contaminantes por hidrocarburo. Esta es una técnica de resistividad multielectrodo, que se basa en el modelado en dos dimensiones (2D) de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (Loke, 2010).

Este tipo de técnicas, logra obtener un modelo más exacto del subsuelo, donde los cambios en la resistividad no sólo son en dirección vertical, sino que también se abarcan los cambios en dirección horizontal a lo largo de la línea del estudio. En este caso se asume que la resistividad no cambia en dirección perpendicular de la línea del estudio.

El modelo que se obtiene a partir de la tomografía eléctrica se conoce como una pseudosección, la cual arroja una muy aproximada imagen de la distribución real de las resistividades del subsuelo. Esta es útil como un medio para presentar los valores medidos de la resistividad aparente en una forma gráfica.

En los estudios de tomografía se tienen varios tipos de arreglos, presentándose en distintos acomodos geométricos los cuales presentan diferentes características, que con base en ellas se puede escoger cuál es el mejor arreglo para satisfacer los objetivos del estudio.

Una de estas características que se toman en cuenta para realizar un estudio, es la profundidad de investigación. Para determinar esta característica de los dispositivos geoelectricos se han definido distintos procedimientos matemáticos basados generalmente en la función de sensibilidad de Frechet. Esta función valora el grado en el cual un cambio de resistividad de una sección del subsuelo provoca una variación en el potencial medido en los electrodos de la línea geoelectrica (Loke, 2010). A valores más altos de la función de sensibilidad, mayor es la influencia de la región del subsuelo sobre la medida.

La Figura 2.5 muestra un gráfico en donde se observa que la profundidad media de investigación para los diferentes conjuntos. Los valores de profundidad son determinados al integrar la función de sensibilidad con la profundidad. Lo cual da una idea de la profundidad a la que se puede sondear con un dispositivo geoelectrónico en particular para la planeación y verificación de los datos adquiridos en campo. No obstante la profundidad real de investigación puede variar drásticamente si en la parte superficial existen grandes contrastes de resistividad.

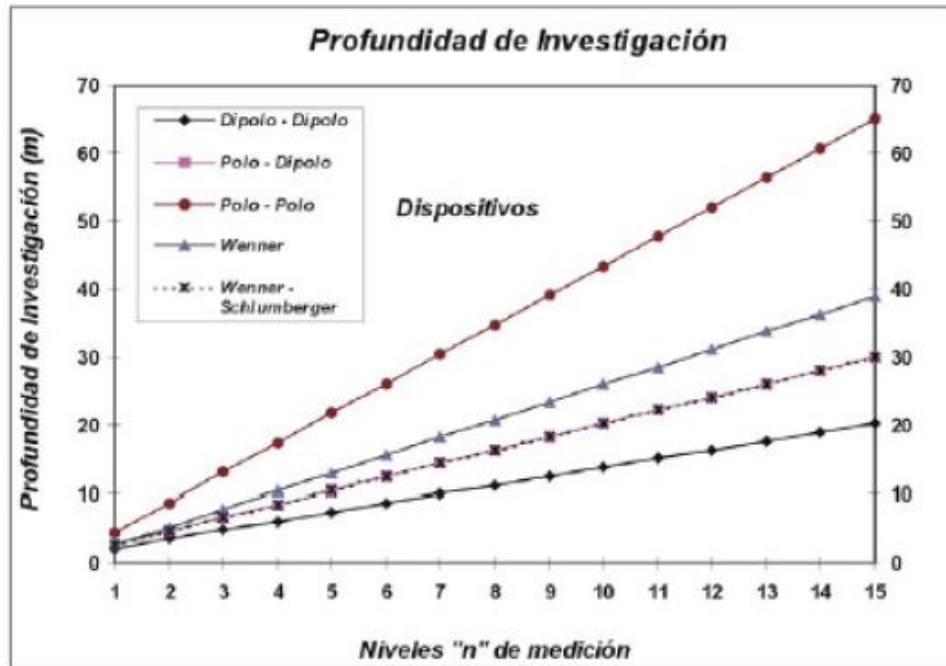


Figura 2.5. Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos obtenida para una distancia eléctrica de 5.0 m (Méndez y Torres, 2010).

El arreglo usado, para estos estudios, con el fin de determinar plumas contaminantes por hidrocarburo en el subsuelo es el Polo – Dipolo. Diferente a las otras configuraciones comunes, este conjunto, es un dispositivo asimétrico. Debido a su buena cobertura horizontal, este tipo de arreglo es atractivo para medir resistividades con un sistema multielectrodo que posea un número relativamente pequeño de electrodos.

Este levantamiento se realiza colocando un electrodo de corriente sobre la superficie del terreno y los electrodos de potencial a separaciones múltiples de la distancia bipolar (Figura 2.6) se inyecta corriente al terreno a través del electrodo que va sobre la línea cerrando el circuito con otro electrodo que se coloca a una distancia suficientemente lejana de la línea del sondeo para que no influya sobre los dipolos de potencial, la corriente inyectada es controlada. En los dipolos de potencial se recibe la señal eléctrica que viaja por el subsuelo midiéndose la respuesta del terreno, las variaciones de resistividad lateralmente y en profundidad son traducidas en términos de los materiales

detectados. La profundidad de investigación es proporcional a la separación de los electrodos.

Según Loke (2010) este arreglo presenta una intensidad de señal significativamente mayor en comparación con el arreglo Dipolo – Dipolo y no es sensible a ruido telúrico como el Polo – Polo. El área con la mayor sensibilidad a las variaciones de la resistividad se encuentra entre los electrodos de potencial (P_1 y P_2) particularmente para grandes valores del factor n ; para valores de n mayores a 4 la sensibilidad presenta un comportamiento más vertical entre los electrodos de potencial lo que probablemente lo hace más sensible a estructuras verticales (Figura 2.7).

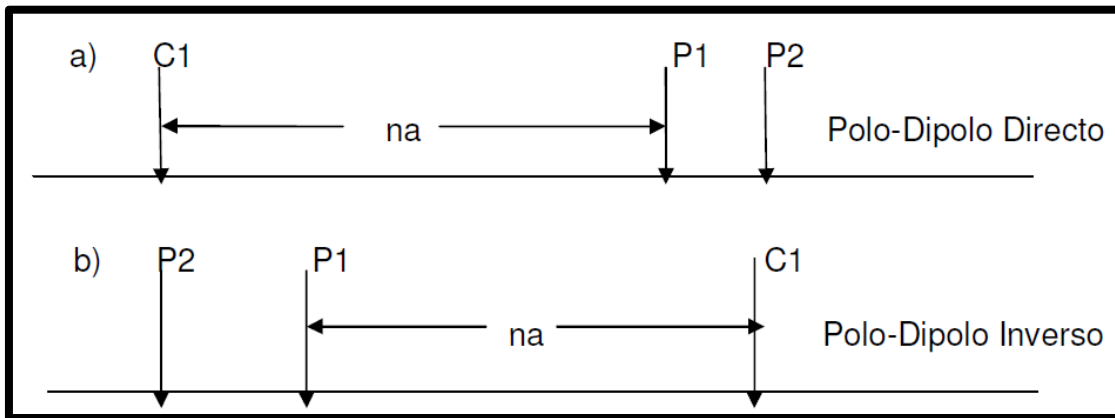


Figura 2.6. a) Arreglo Polo-Dipolo directo b) Arreglo Polo-Dipolo inverso

A continuación se presentan algunas características y comparaciones con los arreglos más comúnmente usados (Loke, 2010):

POLO - DIPOLO	WENNER	WENNER - SCHLUMBERGER	DIPOLO - DIPOLO
	Apropiado para resolver cambios verticales (Estructuras Horizontales).	Moderadamente para estructuras horizontales ("n" valores menores)	Deficiente para detectar cambios verticales (Estructuras Horizontales).
Altamente sensitivo a los cambios horizontales (Estructuras Verticales).	Deficiente para detectar cambios horizontales (Estructuras Verticales).	Moderadamente para estructuras verticales ("n" valores mayores).	Altamente sensitivo a los cambios horizontales (Estructuras Verticales).
La intensidad de la señal decrece con el cuadrado del factor n, es aconsejable no usar valores de n mayores a 8 o 10. Más allá de este valor, el espaciamiento de a, entre los electodos de potencial (M y N) debe incrementarse para obtener una intensidad de señal más fuerte.		La intensidad de la señal es, aproximadamente, inversamente proporcional al cuadrado del factor "n".	Baja intensidad de señal para valores grandes del factor "n". El voltaje es inversamente proporcional al cubo del factor "n".
La relación entre la profundidad de investigación y la longitud del arreglo no se incrementa significativamente para valores de n mayores de 4 o 5. Así para incrementar la profundidad de investigación es mejor incrementar el espaciamiento a más que mantener el incremento de n cuando este alcanza 5.	Profundidad media de investigación es aproximadamente 0.5 veces el espaciamiento de "a" (Loke, 2010).	Profundidad media de investigación es aproximadamente 10% más que la alcanzada por el arreglo Wenner	La profundidad media de investigación depende del espaciamiento "a" y el factor "n"

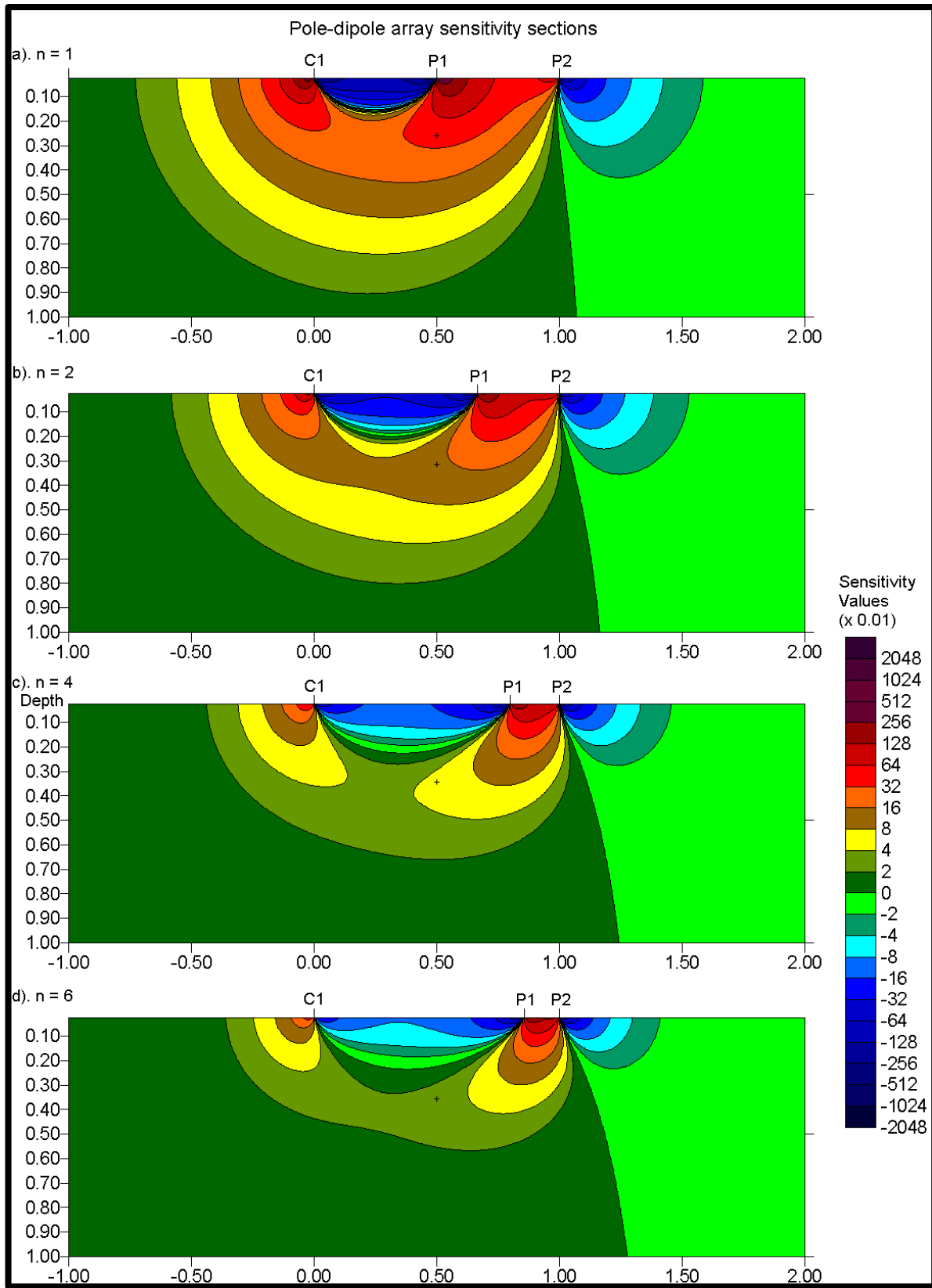


Figura 2.7. Secciones de sensibilidad para el arreglo Polo-Dipolo (Loke, 2010)

2.4.Comportamiento de Plumas Contaminantes por Hidrocarburo en el Subsuelo.

Actualmente a nivel internacional existe una tendencia al uso de métodos geofísicos, especialmente los métodos eléctricos y electromagnéticos, para la caracterización de la contaminación en sitios afectados (López B, 2005. Shevvin *et al*, 2003).

La contaminación por hidrocarburos es un tipo muy común de polución que se encuentra en todas las etapas de la industria petrolera: extracción, transportación, refinación y distribución de los hidrocarburos.

El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características físicas y químicas, como su densidad, solubilidad, polaridad, entre otras. Sin embargo, las características del suelo toman un papel importante en la manera en la que el hidrocarburo viaja a través del mismo. La permeabilidad, el tamaño de grano de los materiales que componen el suelo y el contenido de humedad, así como la profundidad del nivel freático, son algunas de estas características. Así también, la resistividad del hidrocarburo depende de la litología que lo circunda, pudiendo reducir los valores establecidos de las rocas.

Aunado a estos, existen factores atmosféricos que lo afectan como la temperatura y la precipitación pluvial. Y así, en conjunto, todas estas variables definen el tamaño y la distribución tridimensional de la pluma contaminante en una zona específica.

Se ha sugerido que muchas plumas contaminantes de hidrocarburos y sustancias químicas orgánicas cambian con el tiempo dada la variedad de procesos activos. A su vez, se han propuesto hipótesis en donde se dice que el hidrocarburo derramado en el medio físico cambia con el tiempo las propiedades eléctricas del mismo.

Según Shevnin *et al* (2003, 2006), Delgado Rodríguez *et al* (2006) y López B (2005), el contraste de la resistividad entre las áreas contaminadas y la roca circundante depende de la edad del derrame. Estas anomalías se han descrito como dos modelos eléctricos para identificar la contaminación por hidrocarburos, conocidos, como un modelo bajo resistivo y alto resistivo.

Las anomalías que presentan alta resistividad en el subsuelo afectado, son aquellas en donde el derrame se ha producido recientemente. Mientras que, los valores anómalos de baja resistividad en áreas contaminadas aparecen de tres a cuatro meses después del derrame, considerándose como un derrame maduro, como ejemplo se presenta dos perfiles (Figura 2.8) de los trabajos realizados por Shevnin (2005) en Cárdenas, Tabasco en donde se interpreta que la pluma contaminante se encuentra en zonas en donde la resistividad es baja, este es un caso en el que el hidrocarburo derramado es maduro.

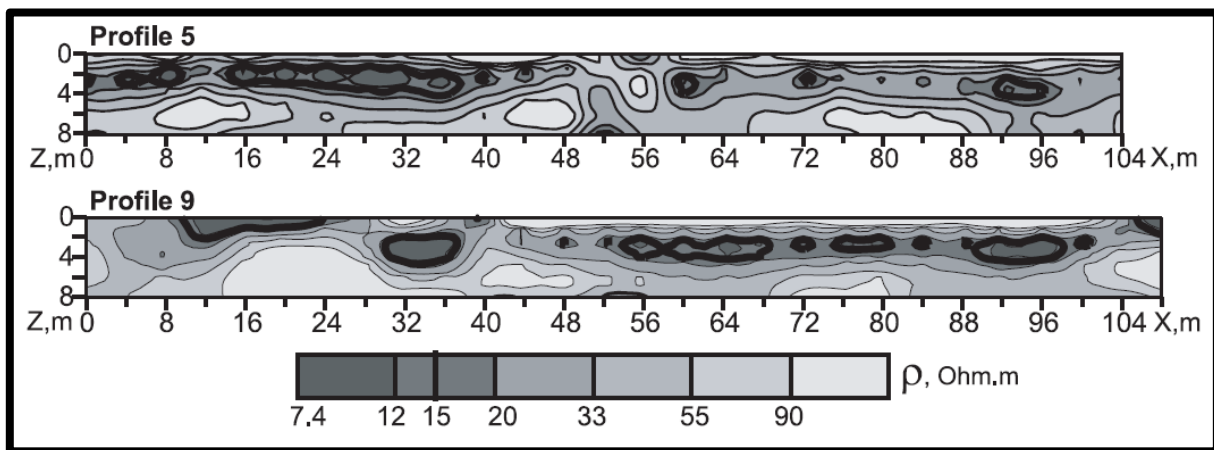


Figura 2.8. Ejemplo de la interpretación de dos perfiles en los trabajos realizados por Shevnin (2005) en donde se muestra una capa baja resistiva ubicada encima del nivel freático de la zona, siendo una zona favorable para la contaminación del hidrocarburo.

De acuerdo a la literatura (Shevnin *et al* 2003, 2005, 2006; Delgado Rodríguez *et al*, 2006; López B. 2005 y López Hidalgo 2004, 2006), las bajas resistividades, halladas en las zonas contaminadas, se deben a la lixiviación de un ambiente ácido, creado por una intensa actividad bacteriana en los residuos del hidrocarburo cerca de la base de la zona vadosa (espacio comprendido entre el nivel freático y la superficie). Esta zona de baja resistividad es producida por el alto índice del total de sólidos disueltos en la zona donde la biodegradación es máxima. El lixiviado es el resultado de reacciones químicas entre ácidos orgánicos, CO₂ y granos minerales y sus recubrimientos.

Por otro lado, la contaminación por hidrocarburo es más fácilmente reconocible en suelos areno-limosos que en suelos con alto contenido de arcillas. En la primera etapa de la contaminación, el hidrocarburo y los lixiviados son concentrados en las arenas pero eventualmente estos son absorbidos por los suelos arcillosos.

En conclusión, la caracterización de un área contaminada por hidrocarburos, es complicada. Requiere una correcta aplicación de los sondeos resistivos, así como, un apropiado procesamiento de los datos e interpretación.

3. Características del Equipo

Para realizar los estudios geofísicos de un derrame se lleva a cabo una primera visita en donde se va a conocer el terreno y en donde se colocaran las líneas geoeléctricas. Así como, la recopilación de información geológica, geohidrológica y edafológica de la zona.

En el presente estudio se usó un equipo que consiste en un transmisor de corriente eléctrica de 2 Kw de potencia capaz de inyectar al terreno pulsos rectangulares de 2 o 4 segundos de duración (dominio del tiempo), con una salida de 10 Amp. como máximo, 100 a 1000 VDC (Unidad de Voltaje en CC) con un moto generador; como receptor de potencial fue empleado un multímetro digital (Figura 3.1); así como también los accesorios concernientes al equipo de trabajo como 13 electrodos de cobre para la inyección de corriente en el subsuelo y la recepción de potencial, 2 carretes de cables de corriente de 500 m que se conectan al par de electrodos de corriente y un cable de potencial que se conecta a los electrodos de potencial.



Figura 3.1. Transmisor de corriente eléctrica de 2 Kw de potencia y multímetro digital para medir el potencial.

4. Reporte

4.1. Introducción Generalidades

Petróleos Mexicanos utiliza durante su proceso de distribución de hidrocarburos poliductos; los cuales pueden estar colocados de forma subterránea o superficial; además se toman las consideraciones respectivas y el mantenimiento necesario; sin embargo, debido a los efectos del paso del tiempo, del clima, de eventos geológicos y a tomas clandestinas, la infraestructura sufre daños que generan derrames y por ende causar contaminación al terreno circundante.

4.1.2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es detectar el estado actual del terreno en lo referente a efectos de contaminación por el derrame de hidrocarburo procedente del ducto perteneciente a PEMEX. Para ejecutar una correcta evaluación de la zona, se plantea la realización de diversos estudios que permitan conocer las condiciones del subsuelo; entre éstos se encuentra el estudio geofísico por medio de la tecnología geoelectrica resistiva; la cual permite conocer parámetros indicativos a detalle en forma cualitativa, y posteriormente, efectuar un muestreo del subsuelo para obtener cuantificaciones de las concentraciones del material derramado y por consiguiente, obtener los lineamientos necesarios para su remediación.

4.2. Antecedentes

4.2.1. Localización

La zona del siniestro se localiza en el estado de Veracruz, en el municipio de Texistepec. El punto de fuga se ubica a 11 km al SE de la ciudad de Acayucan, a 12 km al SW de Jáltipan de Morelos y a 2 km al norte de Texistepec. Mientras que los caminos más importantes son la Carretera Federal 180 Acayucan – Minatitlán y la Autopista 145D, como se ve en la Figura 4.1 y Figura 4.2.

El punto de fuga se ubica en las coordenadas geográficas $17^{\circ} 54' 39.63''$ latitud Norte y $94^{\circ} 48' 58.94''$ longitud Oeste. Mientras que en el sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) la zona se ubica en la cuadrícula UTM 15Q X= 307 591.54 m E y Y= 1 981 278.06 m N.

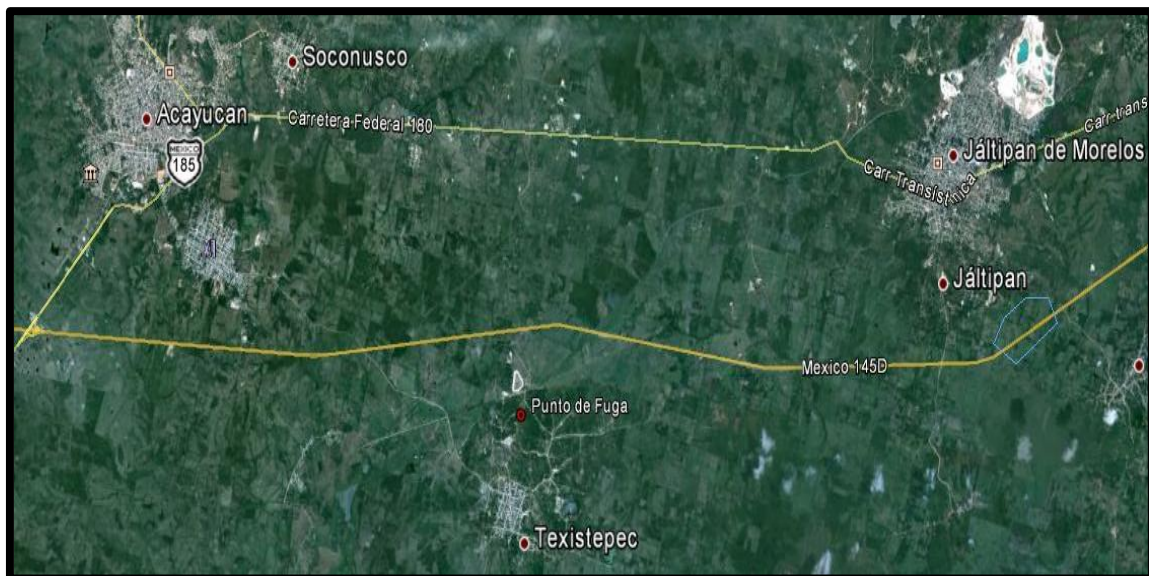


Figura 4.1. Colindancia con ciudades cercanas dentro del estado de Veracruz. Área de estudio definido por el punto de fuga en color rojo. Fuente: Google Earth.



Figura 4.2. Ubicación de la zona del derrame (punto rojo).

Fuente: Google Earth

4.2.2. Fisiografía

Acorde a la clasificación empleada por INEGI, el punto de fuga se localiza en la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur. Esta provincia es una llanura de fuerte aporte de material aluvial por parte de los ríos, los más caudalosos del país, que la atraviesan para desembocar en el sector sur del Golfo de México. La mayor parte de su superficie, a excepción de la discontinuidad fisiográfica de los Tuxtlas y algunos lomeríos bajos, está muy próxima al nivel del mar y cubierta de material aluvial. Los lomeríos ubicados en cadena en dirección Noreste-Suroeste, presentan pendientes que varían de suaves a fuertes y elevaciones que alcanzan los 330 msnm.

Por esta llanura escurren los ríos Blanco, Jamapa, Papaloapan, Coatzacoalcos y Usumacinta, entre otros. Esta llanura abarca la parte media y sur de Veracruz, el norte de Oaxaca, Tabasco y parte de Chiapas y Campeche. Las regiones que comprenden los estados de Veracruz y Tabasco abundan suelos aluviales profundos, ya que en esta zona tienen su desembocadura al Golfo de México algunos de los mayores ríos de México, como son el sistema Grijalva-Usumacinta, el Coatzacoalcos y el Papaloapan. En Veracruz el terreno se escalona hacia la costa formando cuevas, pero al sur de este estado y en Tabasco se torna cada vez más plano. Al oriente de Tabasco se tiene una gran zona inundable con abundancia de pantanos permanentes hasta cerca de la Laguna de Términos; esta última se encuentra semi aislada del mar por una gran barra de arena.

Entre las subdivisiones de esta provincia fisiográfica se encuentra la Subprovincia de la Llanura Costera Veracruzana, misma donde ocurrió el siniestro. Esta subprovincia se describe como una cuenca que recibe aportaciones de los ríos Papaloapan, Santo Domingo y afluentes de las Sierras Orientales, además de los ríos Blanco, Tonto, Tesehocán y San Juan. De manera general, esta subprovincia se divide en tres grandes regiones: los sistemas de lomeríos del Oeste, la llanura aluvial propiamente y los sistemas de lomeríos del Sur y Sureste.

La parte del Istmo entre el río Coatzacoalcos y el Tonalá, es de una topografía muy suave pues gran parte se encuentra bajo los 100 m de altura y buena parte bajo los 50 m, aunque a unos 10 km de la costa se encuentran elevaciones de más de 100 m, así como otras cuatro elevaciones aisladas. En general las rocas que afloran son lutitas y areniscas poco consolidadas del Mioceno y Oligoceno Superior y Medio. Hacia el norte la topografía es baja y pantanosa.

4.2.3. Geología

Según la Carta Geológica-Minera Minatitlán E15-7 del Servicio Geológico Mexicano. Cubriendo indistintamente a las secuencias de la Sierra de Chiapas y la Depresión Ístmica discordantemente se deposita la Formación Sierra Madre de edad Albiano–Turoniano, con calizas y dolomitas, sobreyaciéndola en forma discordante se encuentra la Form. Méndez de edad Campaniano–Maestrichtiano conformado por areniscas, lutitas y margas y localmente por filitas y pizarras.

Cubriendo parcialmente tanto a las secuencias de la Cuenca de Zongolica; como la Sierra de Chiapas se tiene la Cuenca Terciaria del Golfo cuyas unidades basales están constituidas por conglomerados polimícticos y lutitas de la Form. Conglomerado Uxpanapa y por lutitas y conglomerados de la Formación Lutitas Nanchital, ambas unidades de edad Eoceno; cubriendo a estas unidades se tiene la Form. La Laja de edad Oligoceno, formada por lutitas y areniscas.

A partir del Mioceno se tiene una sedimentación continua que inicia con la Form. Depósito del Mioceno inferior conformada de lutitas micacíferas con intercalaciones de tobas y cenizas volcánicas (TmLu-TR) sobre la que descansa la Form. Encanto de edad Mioceno medio, formada por lutitas y arenas (TmLu-Ar), en la cual se ubica la zona de interés (Figura 4.3), sobreyacida por la Form. Concepción de edad Mioceno superior constituida por areniscas y lutitas, la que a su vez es cubierta por la Form. Filisola del Mioceno superior, constituida por arenas con delgadas intercalaciones de lutita.

Representando al Plioceno se encuentran las Forms. Jaltepec y Paraje Sólo y del Plioceno–Pleistoceno la Form. Cedral, las dos primeras están formadas por conglomerados y areniscas (TplCgp-Ar); y la última formada de areniscas, lutitas y conglomerados. El Pleistoceno está representado por arenas y limos (Qptar-Im) y depósitos aluviales.

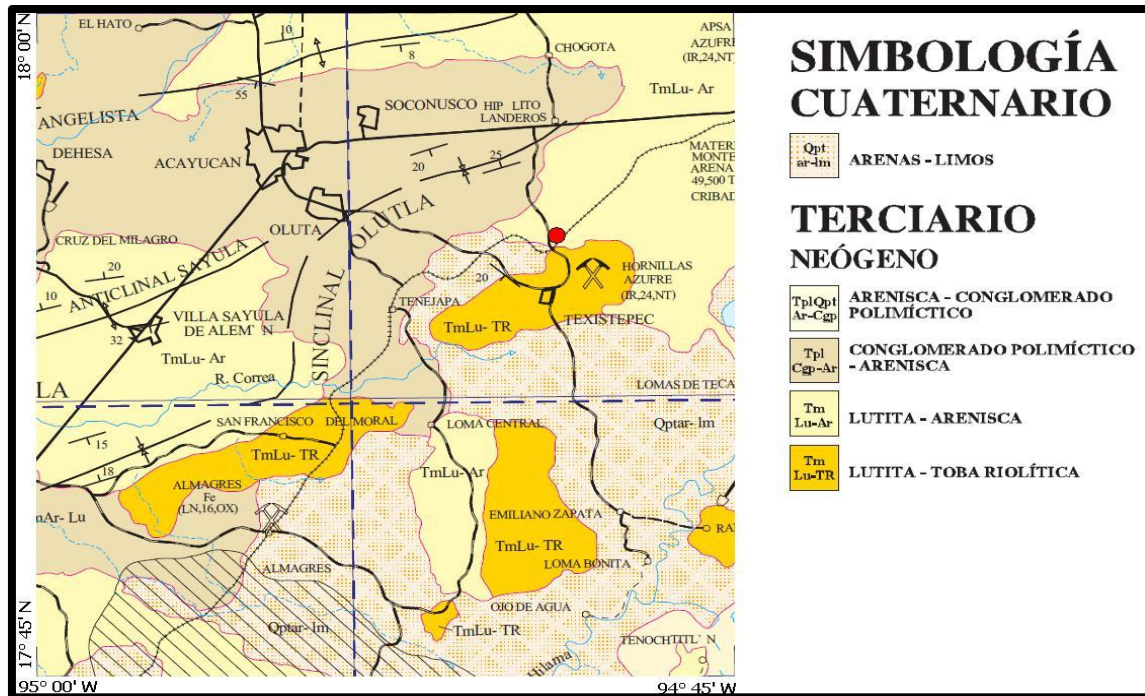


Figura 4.3. Tomado de la carta Geológica 1:250 000 Minatitlán E15-7. Zona de estudio identificada en color rojo. Fuente: Servicio Geológico Mexicano 2000.

4.2.4. Hidrología

4.2.4.1. Hidrogeología

La zona de estudio se localiza en el acuífero 3012 (CONAGUA, 2009) llamado Costera de Coatzacoalcos, del Organismo de Cuenca X Golfo de México.

Como se menciona en el apartado 4.2.3 Geología, la unidad en la cual se ubica el punto de fuga está compuesta por lutitas y arenas, la cual forma lomas suaves y redondeadas. Desde el punto de vista geohidrológico esta unidad puede clasificarse con una baja permeabilidad.

Los acuíferos someros constituidos por depósitos aluviales presentan espesores de 40 a 50 metros y funcionan como acuíferos libres, recibiendo una alimentación vertical por la infiltración del agua de lluvia, que posiblemente sea la componente más importante de la recarga total. En la porción occidental, los acuíferos están constituidos en la unidad identificada como sedimentos arenosos cubiertos en la mayor parte del área por formaciones aluviales. En estos sedimentos arcillosos los acuíferos funcionan como confinados y semiconfinados donde el confinamiento superior está constituido por depósitos aluviales y el confinamiento inferior está constituido por las formaciones arcillosas del Terciario.

La zona de estudio se ubica sobre una unidad geohidrológica de material consolidado con posibilidades bajas, constituida principalmente por uno o varios tipos de roca que por su origen y formación presentan baja permeabilidad, tanto primaria como secundaria y las condiciones geohidrológicas resultan desfavorables, por lo que no son susceptibles de contener agua económicamente explotable.

4.2.4.2. Hidrografía

La zona de estudio se ubica en la Subcuenca del Río Coatzacoalcos con clave RH29Ba, a su vez pertenece a la Cuenca y Región Hidrológica del mismo nombre. La Subcuenca es de tipo exorreica y presenta patrones de drenaje de tipo paralelo.

El punto de fuga se ubica muy cercano a un arroyo, como se observa en la Figura 4.4, que vierte sus aguas al Río Estero Boquiapan que se une al Río Chiquito que posteriormente fluye al Río Coatzacoalcos y finalmente desemboca en el Golfo de México. Presenta un coeficiente de escurrimiento del 20 – 30 %, (SIATL V. 2.1, INEGI).



Figura 4.4. Hidrografía en el área de estudio (punto rojo).

Fuente: SIATL V. 2.1, INEGI.

4.2.5. Edafología

Según la información proporcionada por la bibliografía tomada del INEGI (IRIS), el área de estudio, se localiza sobre tipo de suelo "*Cambisol*" (B), el cual es un tipo de suelo joven, poco desarrollado y se puede encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en las zonas áridas. Son suelos con un subsuelo muy diferente a simple vista en color y textura a la capa superficial. La capa superficial puede ser oscura, con más de 25 cm de espesor pero pobre en nutrientes y en ocasiones no existe.

Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. También pertenecen a esta unidad algunos suelos muy delgados que están colocados directamente encima de un tepetate.

Son muy abundantes, se destinan a muchos usos y sus rendimientos son variables ya que dependen del clima donde se encuentre el suelo. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión.

4.3.Trabajos realizados

4.3.1. Planteamientos de los estudios

Debido al derrame de hidrocarburo propiedad de PEMEX, ubicado en el Municipio de Texistepec, Estado de Veracruz; la estrategia de investigación consistió en la caracterización de la zona contaminada por medio de dos métodos para conocer las condiciones del subsuelo: uno indirecto y otro directo.

El primero, de carácter geofísico, consiste en la aplicación del método geoelectrico resistivo. Dicha metodología se basa en la determinación de las variaciones de diversas propiedades eléctricas del suelo y las rocas del subsuelo; específicamente de la resistividad, y por ende la conductividad de éstos. El método consiste en la inyección de corriente continua en el terreno mediante un par de electrodos de inyección o de corriente (A y B), y la determinación de la diferencia de potencial, mediante una serie de electrodos, que depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada. En este estudio se implantaron en el terreno 4 grupos o líneas de 11 electrodos cada uno.

El método directo se refiere a la extracción de muestras del terreno para su posterior análisis químico. Para este caso se realizaron 6 muestras de suelo, ubicadas como se aprecia en la Figura 4.5.

4.3.2. Desarrollo de los Trabajos

Tomando en cuenta las características del área de donde ocurrió la fuga de hidrocarburo en la localidad antes mencionada; se consideró el estudio de prospección geoelectrica resistiva con una configuración de 4 líneas geoelectricas (D1 al D4); donde las líneas tienen una longitud de 30 m, una distancia entre cada uno de los electrodos de 3 m y una profundidad de investigación de 12 m.

Dichas líneas geoelectricas se colocaron en forma estratégica sobre el terreno afectado a fin de conocer la concentración de hidrocarburo, geometría y desplazamiento de la pluma contaminante derivada del siniestro.

Los dispositivos fueron distribuidos con una orientación NE– SW, E - W, NE – SW y N - S, como se muestra en la Figura 4.5. La profundidad de investigación alcanzada fue de 12 m, tal como se aprecia en los perfiles litoeléctricos de la Figura 4.10 a Figura 4.17.

Las condiciones meteorológicas de la zona de estudio durante la visita geofísica fueron de cielos mayormente nublados a nublados con precipitación intermitente y temperaturas de templadas a calurosas.

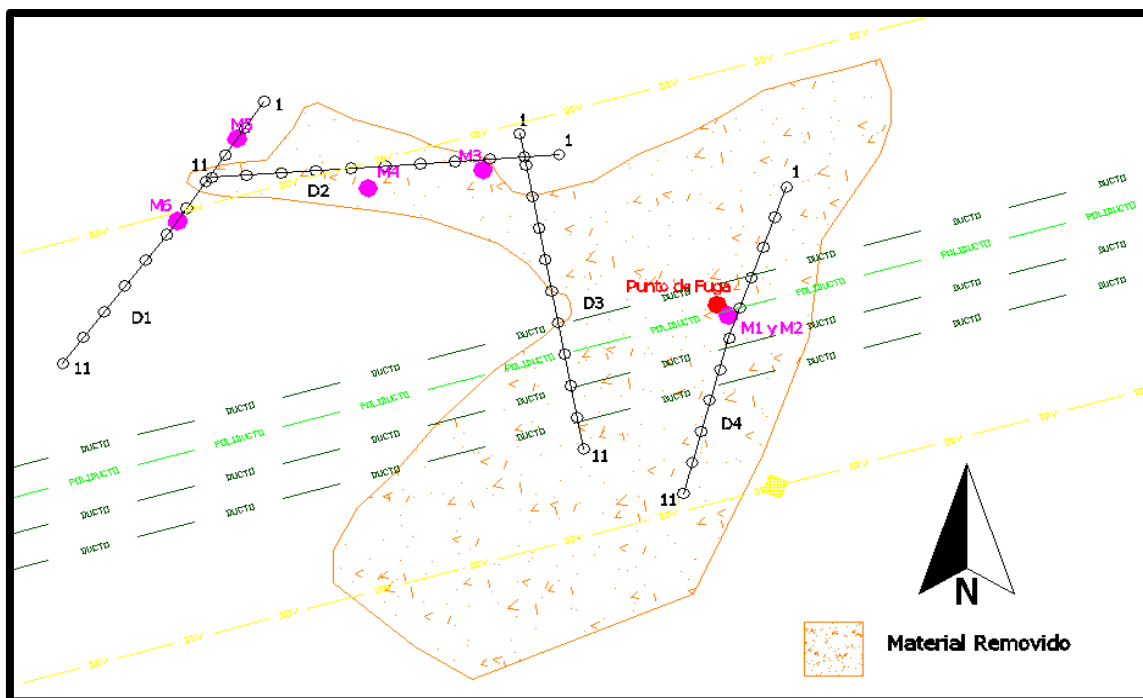


Figura 4.5. Ubicación del Punto de Fuga, disposición geométrica de los dispositivos y puntos de muestreo de suelo.



Figura 4.6. Características del terreno.

4.4.Resultados

4.4.1. Determinación de resistividades



Figura 4.7. Localización de la zona del derrame de hidrocarburo.

Con las determinaciones de resistividad (ρ) en ohm metro ($\Omega \cdot m$) obtenidas a las diferentes profundidades de penetración eléctrica y con el apoyo de información geológica previa, se dedujeron los contactos litoeléctricos que delimitan las diferentes capas o estratos litológicos, los cuales constituyen la estructura del subsuelo estudiado.

Los horizontes concertados se etiquetaron con las letras **A**, **B** y **C**; así mismo, se llevó a cabo la interpretación fundamentada en el análisis de espectros isorresistivos obtenidos en forma continua o de barrido, considerando las diversas propiedades de conductividad del terreno en dirección transversal y longitudinal. Conjuntamente se analizaron las anomalías eléctrico-resistivas en dos caracterizaciones: por alta conductividad y por baja

conductividad; las cuales se armonizan con diversos fenómenos que pueden relacionarse a fallamientos en la estructura, fracturas, fisuras y algunas otras alteraciones por efectos de la contaminación, así como por cambios contrastantes en la litología.

La geofísica de detalle empleada para la presente investigación, muestra una electro-tomografía del suelo y subsuelo, cuyas curvas de isorresistividad se interpretan y correlacionan con los resultados de los análisis de las muestras tomadas por el laboratorio, con lo que dichas curvas se transforman a su vez en curvas de isoconcentración. Esta prospección geofísica de detalle y su arreglo geométrico, permite hacer lecturas cada 3 m de manera horizontal a lo largo de cada dispositivo y permite penetrar hasta la profundidad de la investigación que en este caso fue de 12 m habiendo hecho cortes verticales iniciando en 1.5 m y después cada 3m hasta llegar a 12 m con lo que se obtiene una cuadrícula de datos que delimita perfectamente la geometría del derrame tal y como se muestra en los dibujos siguientes (ver Figura 4.8 y Figura 4.9).

En el caso que nos ocupa se interpretaron un total de 4 líneas geoeléctricas, compuestas de 11 electrodos, los cuales tienen una longitud unitaria de 30 m y abarcan una profundidad de 12 m. Se tomaron lecturas de isorresistividad a cada 3 m de longitud y a cada 3 m de profundidad, tomando un total de 80 lecturas por dispositivo. En total se tienen 320 lecturas de resistividad aparente, que una vez interpretadas se correlacionaron con los resultados de las muestras de laboratorio, lo que permite conocer con detalle la distribución físico – espacial de la pluma contaminante, con sus respectivas curvas de isoconcentración.

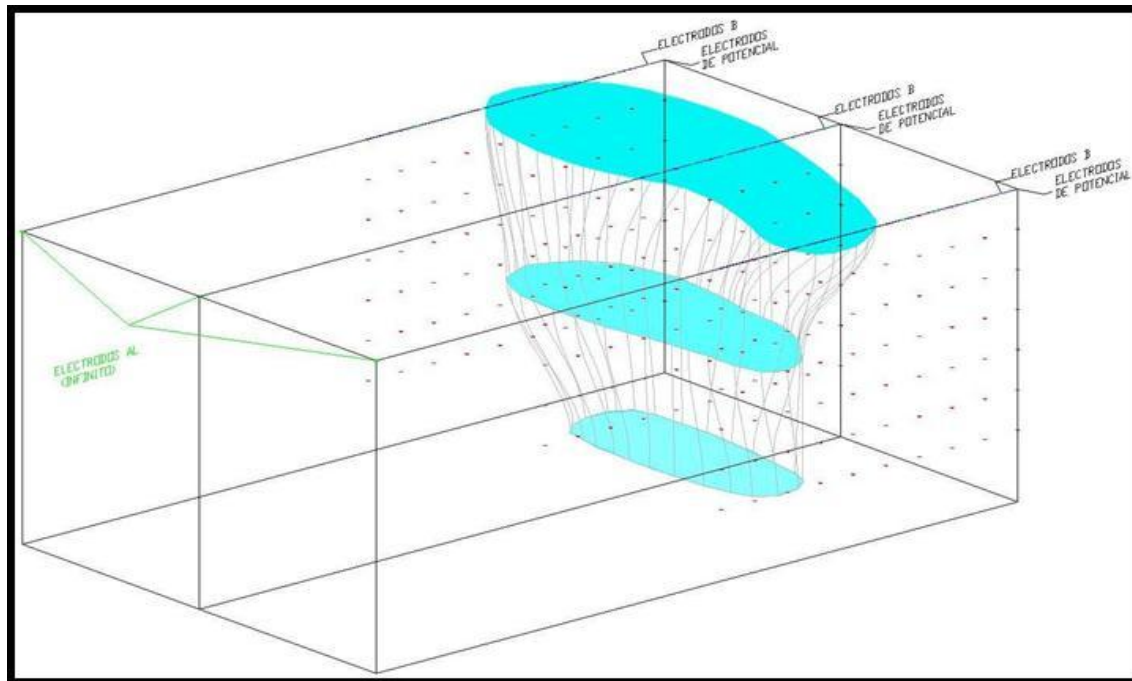


Figura 4.8. Flujo de la mancha contaminante.

El método consiste en implantar o colocar en el terreno en forma lineal un grupo o arreglo de 11 electrodos separados 3 m entre ellos, así como dos electrodos de corriente, uno a una distancia que puede considerarse como infinita y el otro que se ira moviendo entre cada uno de los 11 electrodos (se coloca entre 1 y 2, posteriormente entre 2 y 3 y así sucesivamente), logrando una profundidad de investigación mayor conforme se va avanzando y obteniendo una malla de datos como la que se observa en la Figura 4.8 (lecturas representadas por los puntos rojos). De esta forma se va obteniendo la representación de las estructuras en el subsuelo, así como de la mancha contaminante.

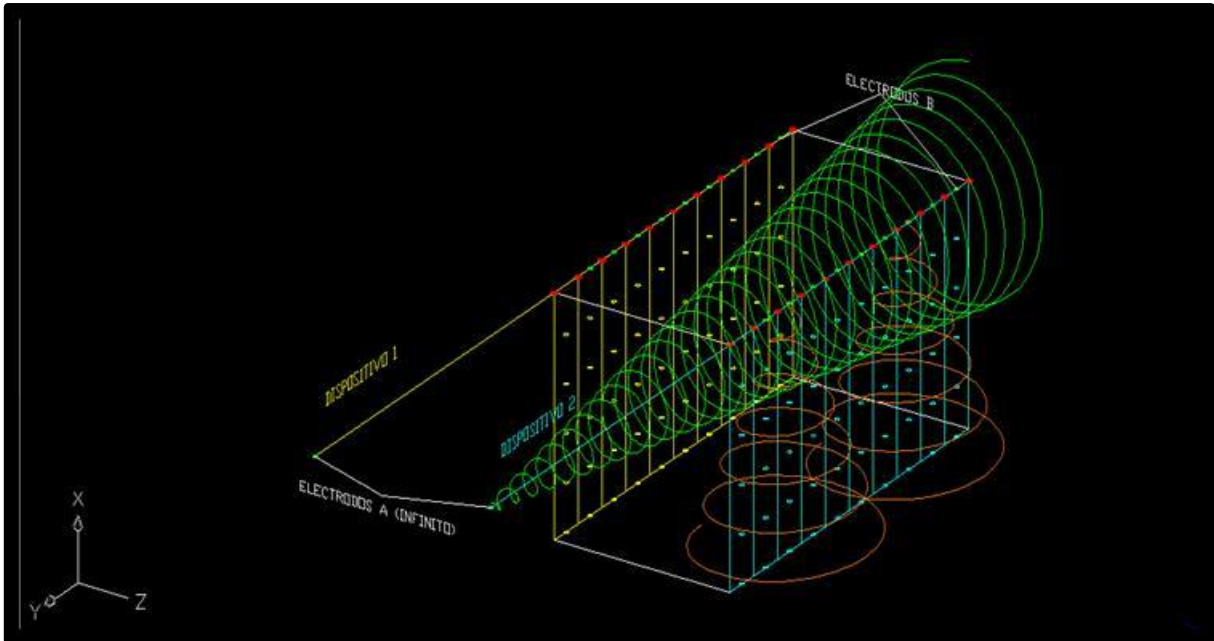


Figura 4.9. Inyección de corriente al subsuelo.

El concepto teórico de los métodos geoelectrónicos se fundamentan en la conductividad de la corriente eléctrica, ya sea a través de un conductor eléctrico, o bien por un medio donde la corriente eléctrica se propaga iónica o electrolíticamente a través del subsuelo. En el método se inyecta corriente por medio de dos electrodos de corriente, uno que se encuentra en la zona de estudio (electrodos B de la Figura 4.9) y el segundo, que cierra el circuito, se encuentra a una distancia que puede considerarse como infinita (electrodo A de la Figura 4.9). Una de las ventajas del método es el arreglo electródico que se utiliza, pues las líneas de corriente penetran más comparado con otras configuraciones, gracias a que el fenómeno físico presente en cada toma de lectura se asemeja a una fuente puntual en un dispersor perfecto (las líneas del campo eléctrico debido a una fuente puntual tiende a penetrar más que las líneas de corriente de un dipolo). Otro aspecto importante es que la corriente introducida es radial, continua y de bajo voltaje y amperaje (espirales en verde y anaranjado de la Figura 4.9).

4.4.2. Descripción de resultados.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de la medición de las propiedades eléctrico-resistivas del subsuelo.

A – Con valores de resistividad de $\rho = 2 - 12 \Omega \cdot m$, el cual corresponde con un horizonte compuesto de arenas con alto contenido de materiales finos saturados y azufre. Dicho material se correlaciona con el tipo de suelo “Cambisol” en los primeros 80 cm. Toda la capa varía entre los 3.5 m y 6 m de espesor.

B – Con valores de resistividad de $\rho = 12 - 28 \Omega \cdot m$ se determina un horizonte compuesto por arena limosa. El espesor de este material varía desde los 5 m hasta los 12 m en las líneas D1 y D2; mientras que en las líneas D3 y D4 varía entre los 3.5 m y los 8 m de profundidad.

C – Con valores resistivos de $\rho = 28 - 36 \Omega \cdot m$, se delimita un tercer horizonte, el cual se constituye por arenas y gravas. Esta capa solo aparece en los perfiles isorresistivos y litoeléctricos de las líneas D3 y D4. Siendo su límite superior variable entre los 6.5 y 8.5 m de profundidad.

Se detectaron anomalías eléctrico - resistivas con valores de $2 - 6 \Omega \cdot m$ que se correlacionaron con la presencia de hidrocarburo en la unidad **A**. Estos resultados se muestran en la Figura 4.10 a Figura 4.17.

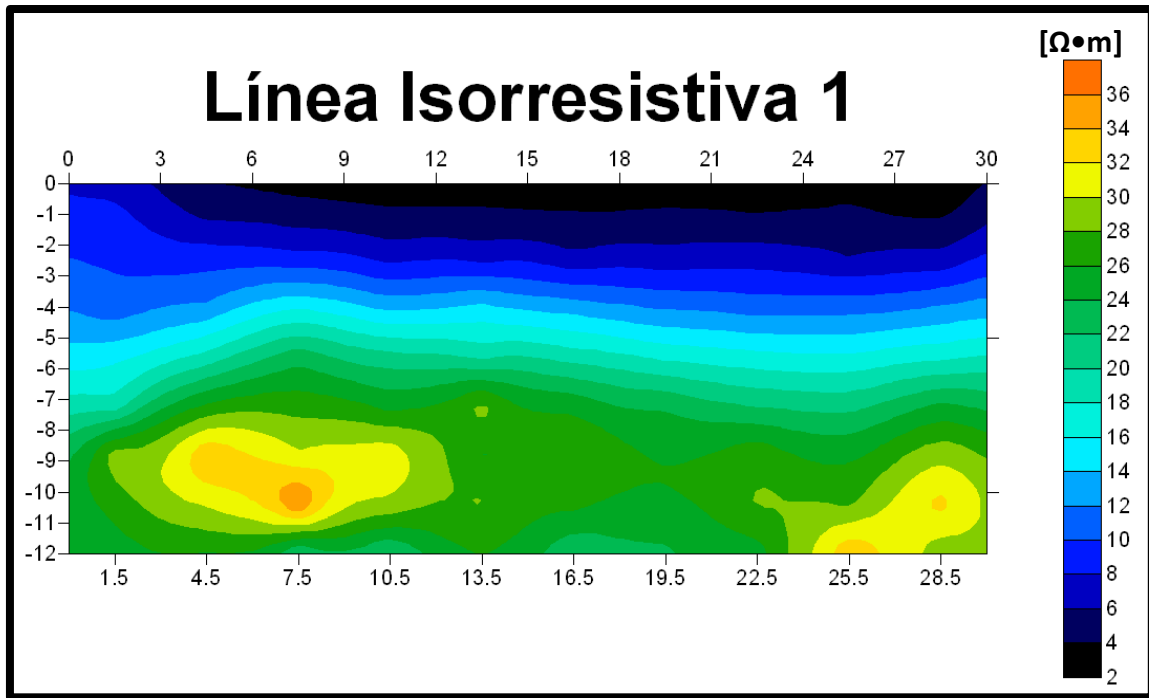


Figura 4.10. Pseudosección de la Línea 1.

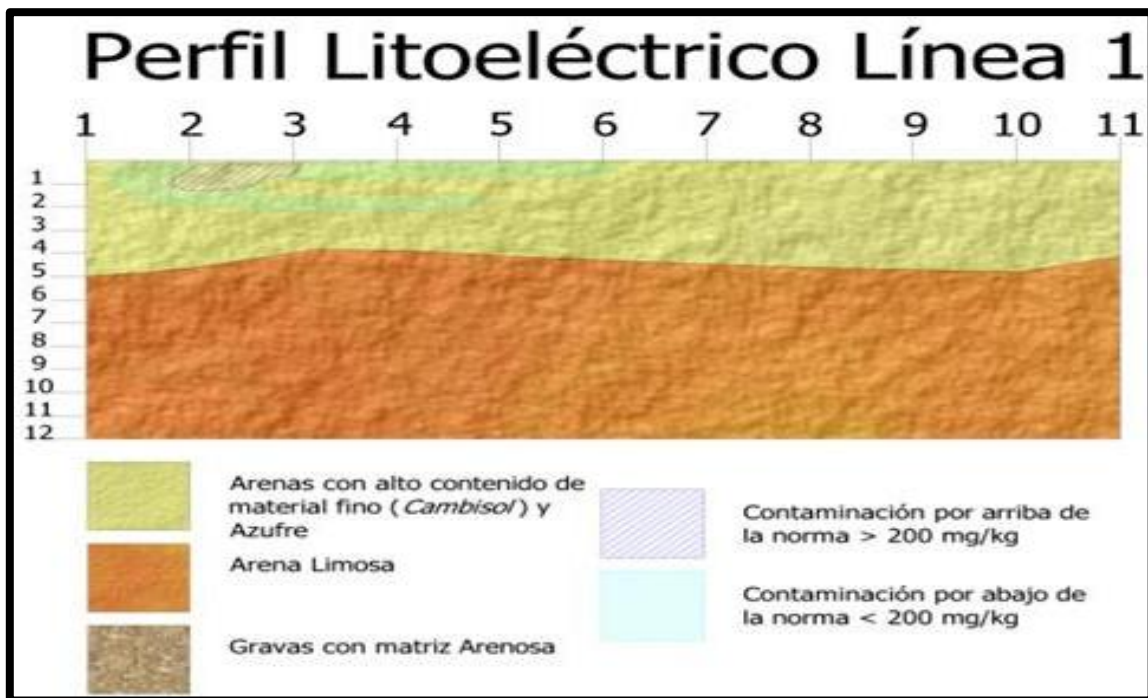


Figura 4.11. Perfil Litoeléctrico de la Línea 1

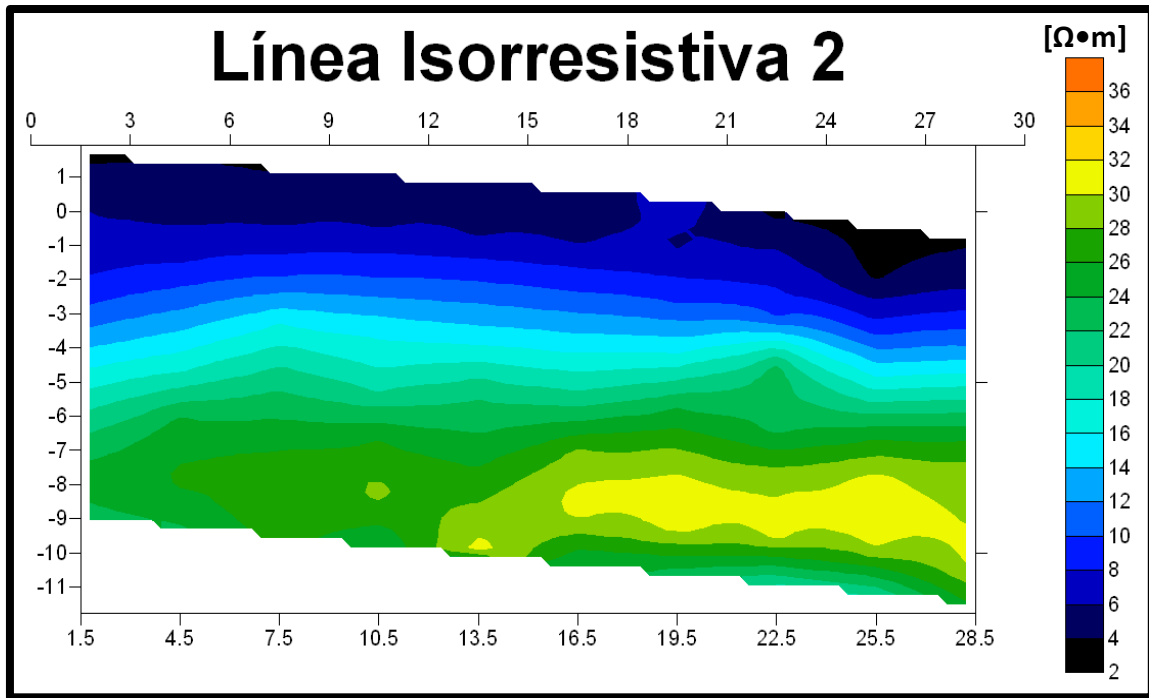


Figura 4.12. Pseudosección de la Línea 2.

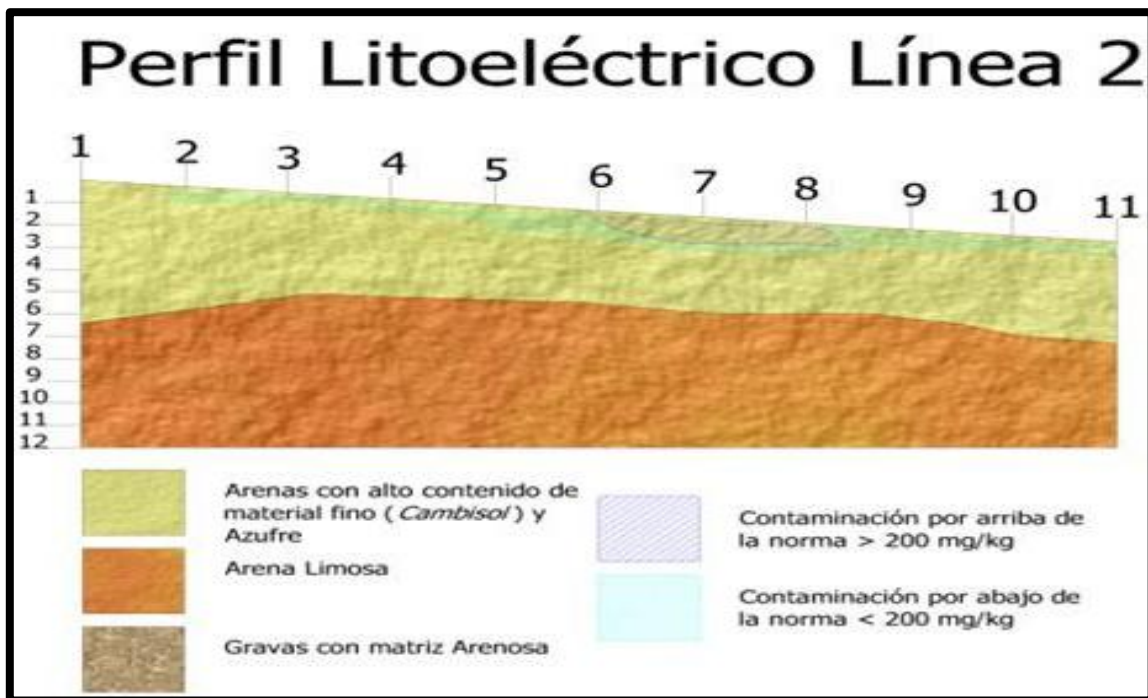


Figura 4.13. Perfil Litoeléctrico de la Línea 2

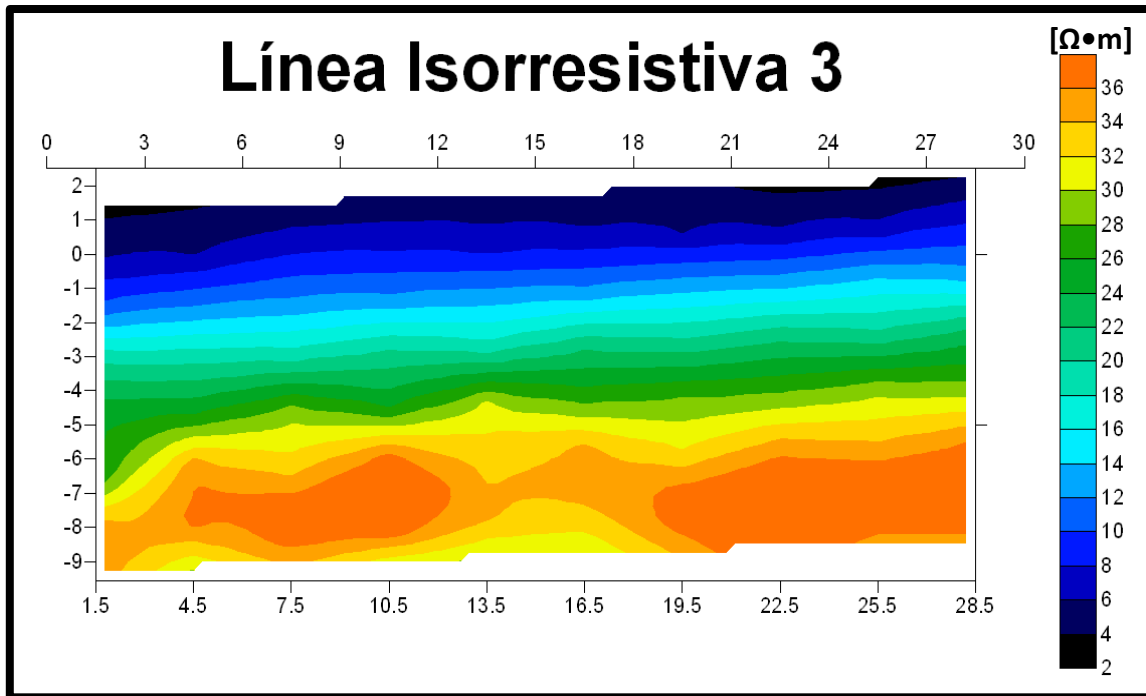


Figura 4.14. Pseudosección de la Línea 3.

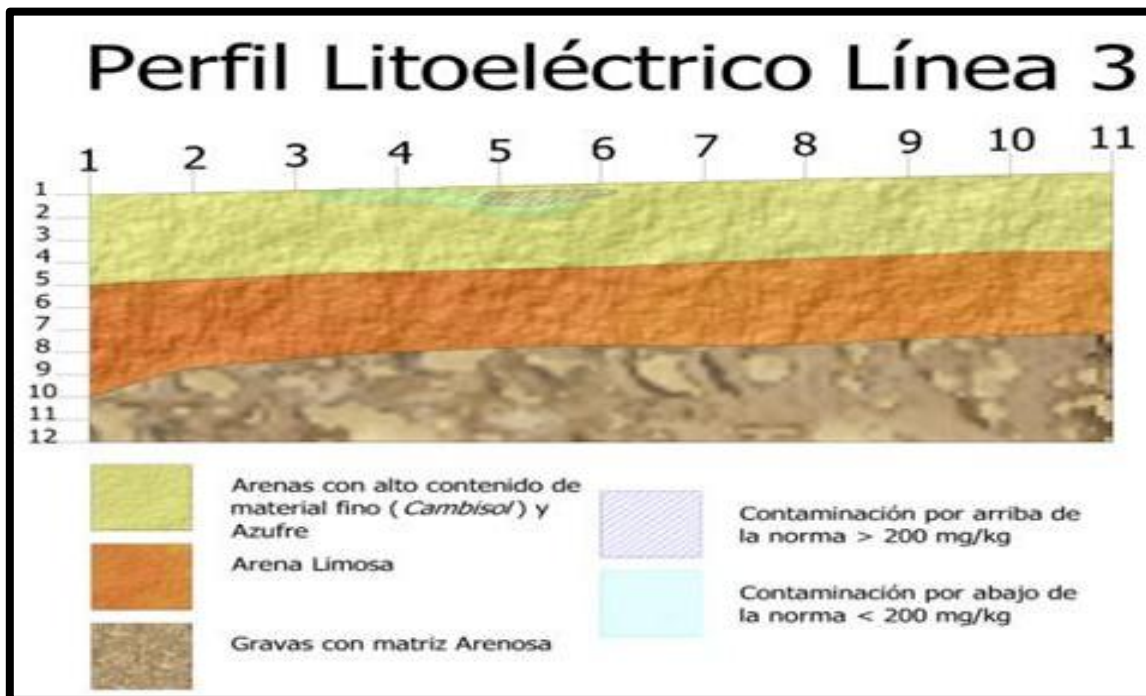


Figura 4.15. Perfil Litoeléctrico de la Línea 3.

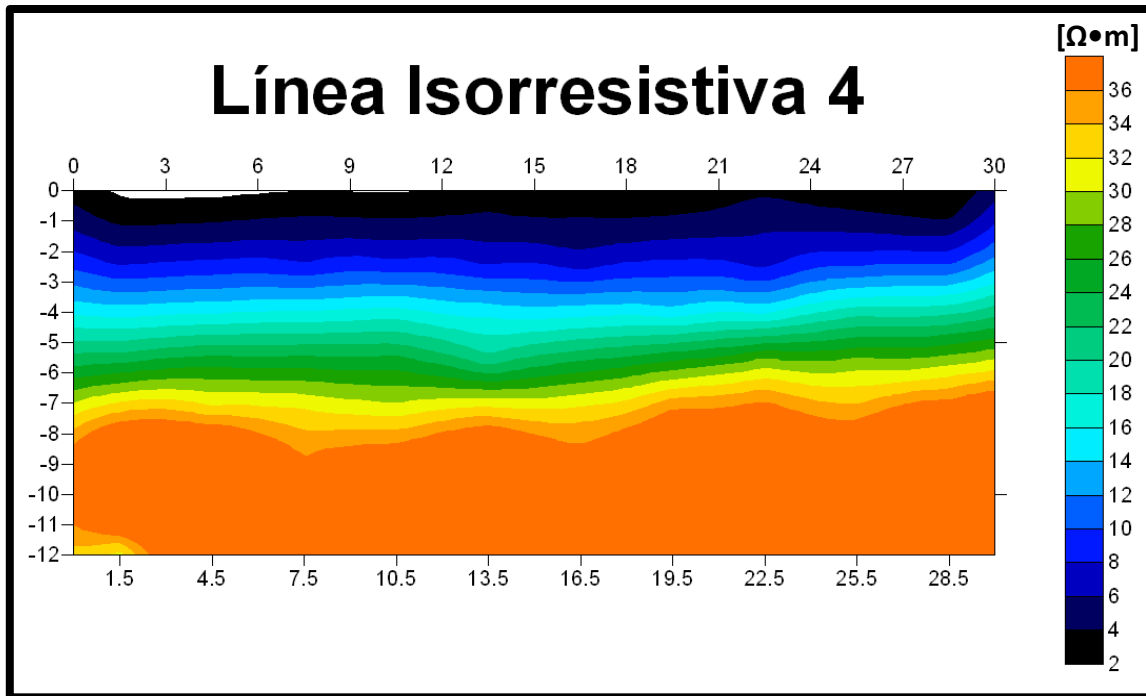


Figura 4.16. Pseudosección de la Línea 4.

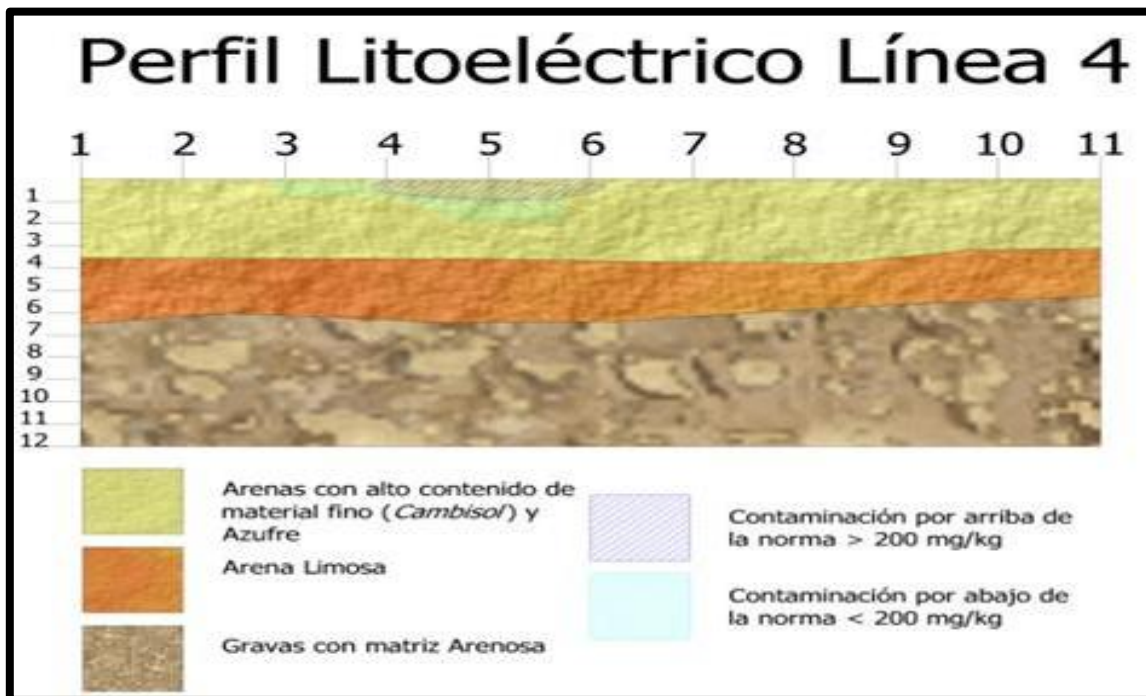


Figura 4.17. Perfil Litoeléctrico de la Línea 4.

4.5. Conclusiones y comentarios.

4.5.1. Estructura del subsuelo y características del contaminante.

De acuerdo al análisis de información del estudio geofísico, además de la correlación y la adecuada visualización geológica y geohidrológica, se interpretaron y definieron características del subsuelo, las cuales se clasificaron como paquetes de roca con propiedades particulares. A continuación se describen tales clasificaciones:

“A” corresponde a la capa compuesta por el suelo de tipo “Cambisol” y material arenoso con alto contenido de finos y azufre. Presenta parámetros cualitativos de permeabilidad baja.

“B” este horizonte está compuesto por arena limosa con parámetros de permeabilidad baja.

“C” capa que se constituye por arenas y gravas con parámetros cualitativos de permeabilidad media.

Debido a que el material que se encuentra en la zona más somera del terreno presenta alto contenido de arcillas y limos saturados, el contaminante se encajonó en los primeros 2 m, reflejándose en las plantas de la Figura 4.18 a Figura 4.22.

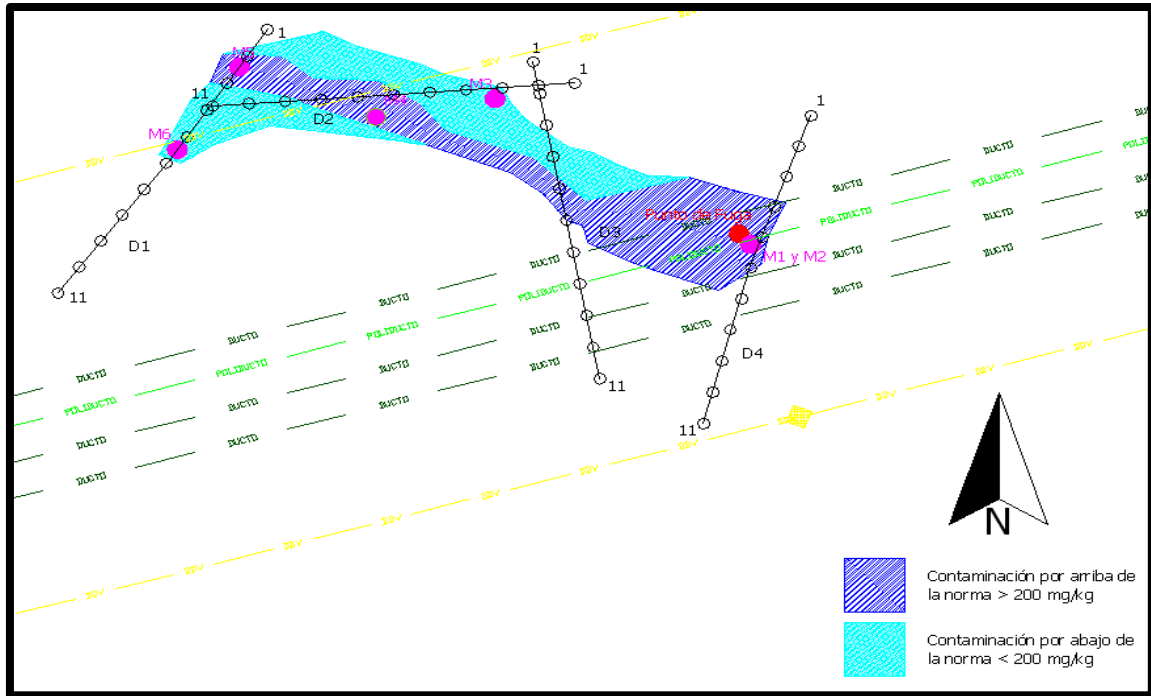


Figura 4.18. Mancha de contaminación en planta a 0.50 m.

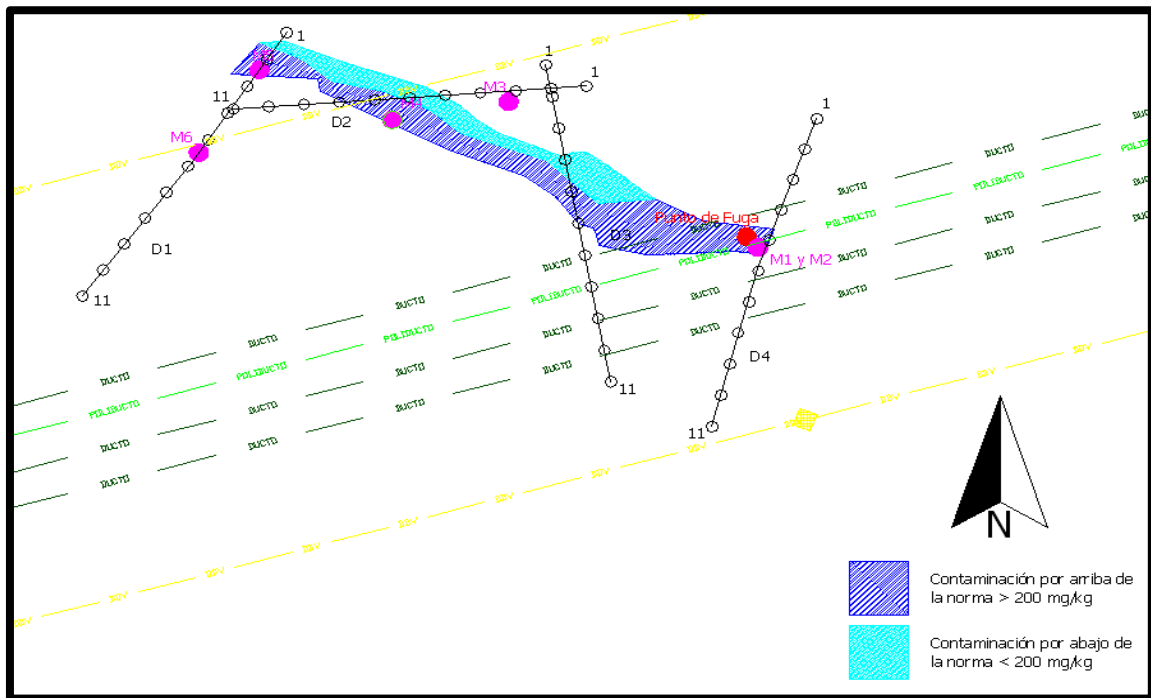


Figura 4.19. Mancha de contaminación en planta a 0.80 m.

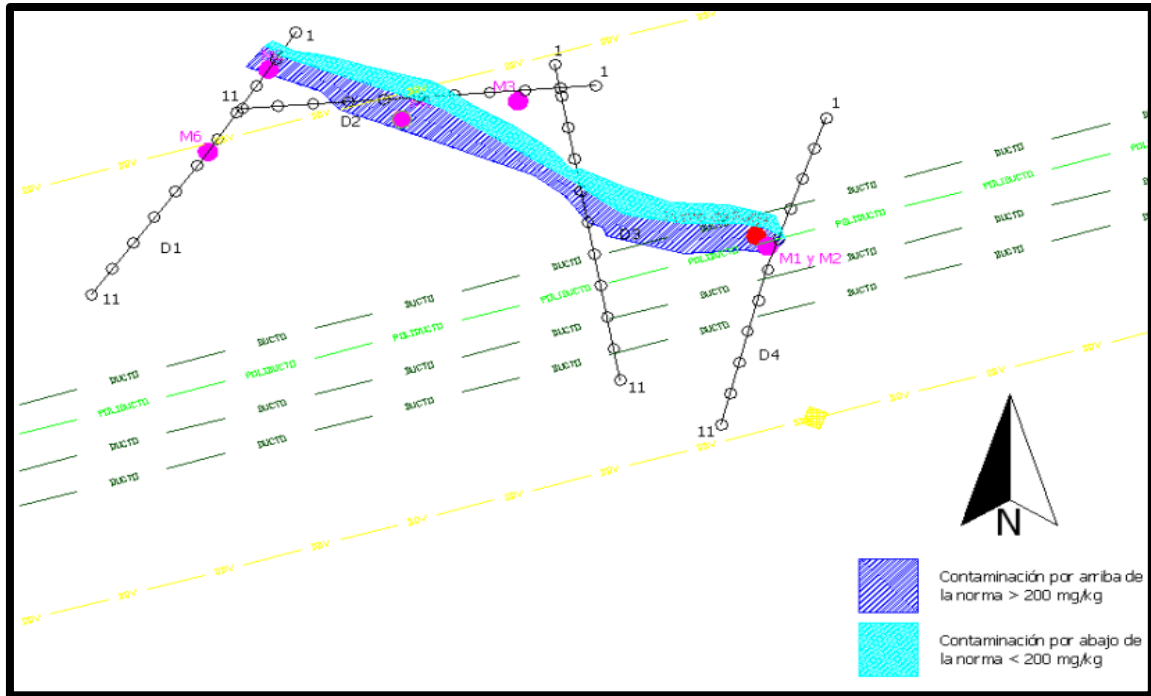


Figura 4.20. Mancha de contaminación en planta a 1.00 m.

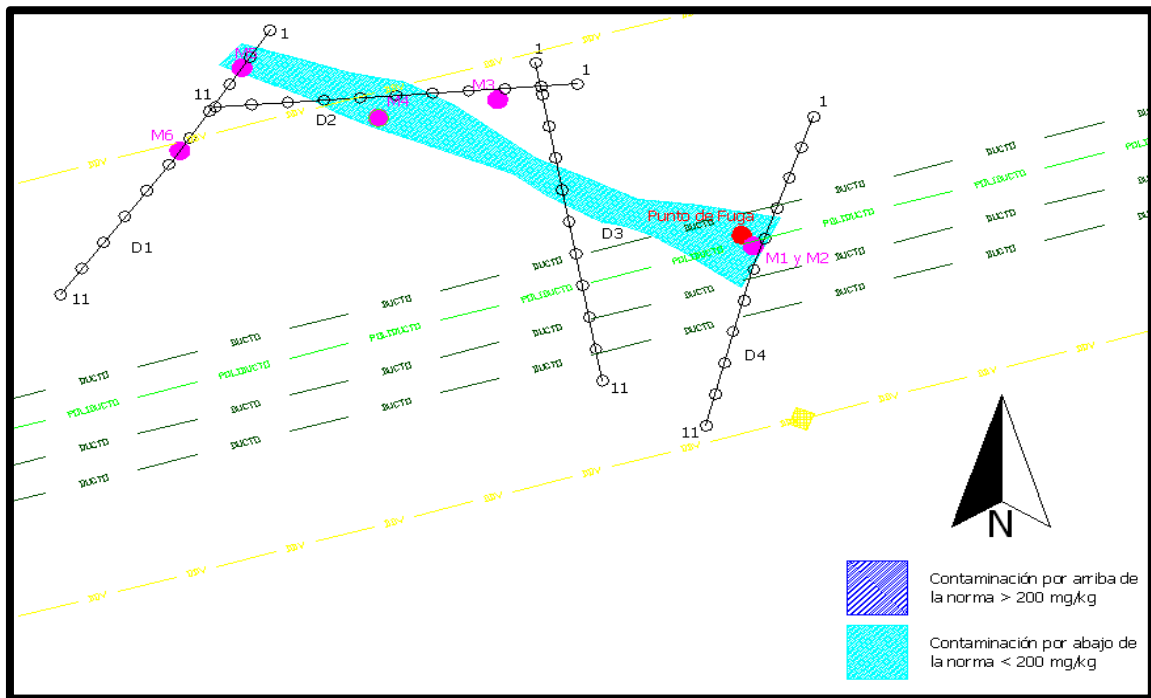


Figura 4.21. Mancha de contaminación en planta a 2.00 m.

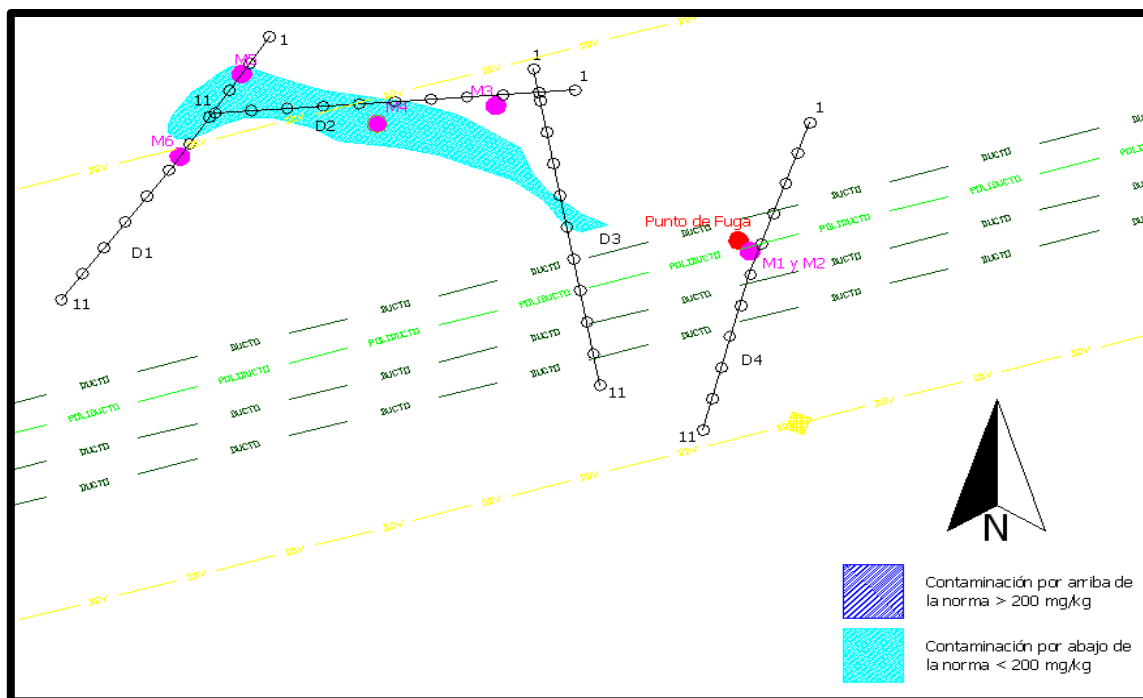


Figura 4.22 Mancha de contaminación en planta a 2.50 m.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha constatado que el método geofísico eléctrico junto con información geológica, proporciona resultados que permiten dirigir los trabajos de perforación a puntos críticos dentro de la zona afectada por la contaminación y el muestreo de suelo en profundidad, reduciendo el tiempo y costo del estudio.

La decisión de dónde se debe de perforar, es el resultado del análisis de la pseudosección de resistividades aparentes. Las zonas críticas corresponden, casi siempre, a anomalías de baja resistividad comprobándose mediante la correlación existente entre la resistividad eléctrica y la concentración de contaminantes.

Con los casos que se han presentado en la práctica, se puede corroborar la información que la literatura nos ha proporcionado respecto al comportamiento eléctrico resistivo de los derrames de hidrocarburo. Sin embargo, el tiempo en el que se considera un derrame como maduro, y por ende se presente con anomalías bajas resistivas, es variable.

En la práctica, casi la totalidad de los siniestros que se atienden presentan anomalía bajas resistivas en lapsos de tiempo menores al mes de ocurrido el derrame. Por otro lado, se ha observado que el material que compone el subsuelo en las zonas afectadas es un elemento importante para determinar la resistividad del hidrocarburo. Cuando el derrame ha ocurrido en un suelo con alto contenido de arcillas, el rango de resistividades de la pluma contaminante es muy bajo y muy complicado de identificar en las pseudosecciones. Mientras que, en el caso de suelos arenosos, las resistividades del contaminantes se presentan con una disminución en los parámetros resistivos del material que compone el subsuelo, pero siempre con la tendencia de ser un bajo resistivo.

Bibliografía

Aizebeokhai, P. A. 2010. 2D and 3D Geoelectrical Resistivity Imaging: Theory and Field Design. *Scientific Research and Essays* Vol. 5(23), pp. 3592-3605.

Aracil, E., Maruri, U., Vallés, J., Martínez, P., Porres, J. Evaluación de Problemas Medioambientales Mediante Tomografía Eléctrica. *Geofísica*.

Bouman, P. 2005. 2D Resistivity Surveying for Hydrocarbons-A Primer. Komex International Ltd. Calgary, Alberta. Canadá. Focus Article. 27-32.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. 2009. Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea. Acuífero (3012) Costera de Coatzacoalcos, Estado de Veracruz. *Diario Oficial de la Federación*. 26 pp.

Delgado Rodríguez, O., Shevnin, V., Ochoa Valdés, J. y Ryjov, A. 2006. Using Electrical Techniques for Planning the Remediation Process in a Hydrocarbon Contaminated Site. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 22 (4) 157-163.

Iakubovskii, V., Liajov, L. 1980. *Exploración eléctrica*. Ed. Reverté, 3era. Ed. Barcelona, España. 412 pp.

Loke, M.H. 2010. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. *Course Notes*, 156 pp.

López Blanco, M.E. 2005. Estudio de Contaminación por Hidrocarburos Volátiles (BTEX) en un Sitio de Derrame de Gasolina, Colonia Unidad de Propósito, Managua, Nicaragua.

Tesis de Maestría. Centro para la Investigación de Recursos Acuáticos de Nicaragua. UNAN. Managua, Nicaragua. 290 pp.

López Hidalgo, A.A., Loke, M. H. y Fanton, G.O. Técnicas Prácticas para Investigación de Resistividad en 2D y 3D (Tomografía Eléctrica 2D y 3D). 36 pp.

López Hidalgo, A.A. 2004. La Tomografía Geoeléctrica como Herramienta de Diagnóstico Ambiental del Subsuelo.

<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?idarticulo=904>

López Hidalgo, A.A. 2006. La Tomografía Eléctrica como Técnica de Diagnóstico Caracterización y Evaluación Previa e Imprescindible al Saneamiento Ambiental del Subsuelo en Situaciones de Pasivos Petroleros. Petrotecnia, Abril 2006. 6° Jornada de Preservación de Agua, Aire y Suelo.

Iriarte Sierra, L. 2011. Estudio de Tomografía Eléctrica de Resistividad 3D en la Zona Arqueológica de Pahñú. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F. 59 pp.

Méndez Rivero, F., Torres López, E. J. 2010. Exploración Geoeléctrica, Gravimétrica y Magnetométrica en la Región de la Ceiba y la Ceiba-Poza Rica, Estados de Puebla y Veracruz. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F. 100 pp.

Milsom, J. 2003. Field Geophysics, The Geological Fields Guide Series. Ed. John Wiley & Sons. 3era ed. California, E.U.A, 232 pp.

Orellana, E. 1982. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continúa. Ed. Paraninfo. 2da. Ed. Madrid, España. 579 pp.

Rahim Samsudin, A., Bahaa-eldin Elwali A., Rahim, Wan Yaacob, W.Z y Hamazah, Umar. 2006. Mapping of Contamination Plumes at Municipal Solid Waste Disposal Sites Using Geoelectric Imaging Technique: Case Studies in Malaysia. *Journal of Spatial Hydrology*. Vol. 6 No. 2

Sánchez Reynoso, R. 2011. Análisis Comparativo entre Diferentes Arreglos de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D.F. 54 pp.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2000. Carta Geológico-Minera Minatitlán E15-7, Veracruz, Oaxaca y Tabasco.

Shevnin, V., Delgado Rodríguez, O., Mousatov, A., Nakamura-Labastida y Mejía-Aguilar, A. 2003. Oil Pollution Detection Using Resistivity Sounding. *Geofísica Internacional* Vol. 42 Núm. 4, pp. 613-622.

Shevnin, V., Delgado Rodríguez, O., Ochoa Valdés, J., Flores Hernández, D., Mousatov, A. y Ryjov, A. 2005. Tecnología de Estudio de la Contaminación por Productos Petroleros Utilizando Métodos Eléctricos y Electromagnéticos. *Geos (UGM)* Vol. 25 Núm. 1. Noviembre 2005.

Shevnin, V., Delgado Rodríguez, O., Fernández Linares, L., Zegarra Martínez, H., Mousatov, A. y Ryjov, A. 2005. Geoelectrical Characterization of an Oil-Contaminated Site in Tabasco, Mexico. *Geofísica Internacional* Julio –Septiembre, Vol. 44 Núm. 3. UNAM, D.F. pp. 613-622.

Zúñiga Lara, Rocío. 2011. Detección de Zonas de Riesgo a lo Largo del Colector de Drenaje Poniente de la Ciudad de Guatemala. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F. 102 pp.

SOFTWARE USADO

Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas V. 2.1 (SIATL), INEGI
http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#

Información Referenciada Geoespacialmente Integrada en un Sistema (IRIS), INEGI,
<http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?c=1362&s=geo>