

# **“La Tomografía Eléctrica como Técnica de Diagnostico, Caracterización y Evaluación Previa e Imprescindible al Saneamiento Ambiental del Subsuelo en Situaciones de Pasivos Petroleros”**

**Lic. Andrés López Hidalgo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Consultor Geofísico. Investigador Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan.

## **Sinopsis**

Muy frecuentemente los procedimientos de diagnóstico, caracterización y evaluación para el saneamiento de pasivos petroleros no esta normalizado y menos aun estandarizado, con lo cual los procesos de remediación están desvinculados de algunas técnicas directas e indirectas de diagnostico.

Por otro lado, dentro del marco legal los métodos de exploración geofísica están contemplados y tenidos en cuenta como Herramientas de Diagnóstico para la Caracterización y Evaluación de pasivos petroleros y aplicables en los Estudios de Impacto Ambiental (E.I.A.), y como condición para la obtención de la Licencia Ambiental (LA), etapa previa necesario a cualquier proceso de remediación.

Nuestra experiencia en proyectos de Diagnostico, Caracterización y Evaluación Ambiental del subsuelo nos ha demostrado la capacidad resolutive del método de TE, la cual nos muestra a través de imágenes, el estado y la localización certera de los pasivos. Esta Técnica la hemos aplicado en distintas etapas del proceso de saneamiento, pudiendo comprobar que es de fundamental importancia efectuar un diagnostico previo a cualquier acción de remediación y así evitar un mayor deterioro y costes innecesarios.

En el presente artículo se expone un resumen de la metodología y se describen dos Casos Genéricos con resultados exitosos de aplicación de la Tomografía Eléctrica en dos situaciones reales de Diagnostico Ambiental antes y dentro del proceso de saneamiento de pasivos Petroleros.

## **Abstract**

It has been very frequent that the diagnostic, characterization and evaluation procedures to the sanitation of petroleum passives has not been regulated nor standardized for which reason the remediation procedures are unrelated to some direct or indirect diagnosis techniques.

Moreover, in the legal regulations the geophysics exploration methods are considered and kept in mind as Diagnostic Tools to the Characterization and Evaluation of petroleum passives and applicable to Studies of Environmental Impact (SEI) which is a prerequisite for the obtaining of the Environmental License (EL) previous stage necessary to attempting any remediation procedure.

Our experience in Subsurface Environmental Diagnosis, Characterization and Evaluation has shown the capacity of resolution of the ET (Electrical Tomography) Method, which shows the condition and exact location of the petroleum passive by means of imaging. We have applied this Technique in different stages of the sanitation process and, thus, could prove that it is of fundamental importance to make a Diagnosis before any remediation action. In this way can be avoided any further deteriorations and unnecessary costs.

In the present paper is summarized the methodology and described successful results obtained from the application of the Electrical Tomography in two actual generic situations of Environmental Diagnosis before and during the sanitation process of petroleum passives.

### **Introducción.**

El método de Tomografía Eléctrica en Dos, Tres y Cuatro Dimensiones (TE\_R2D, TE\_R3D y TE\_R4D) es una técnica de investigación de Resistividad de áreas con anomalías complejas (resistivas o conductivas), donde el empleo de otras técnicas NO PERMITEN obtener información de detalle en 2D, 3D y 4D a profundidades someras y moderadamente profundas.

La TE consiste en obtener una serie de medidas de resistividad aparente con un micro dispositivo tetraelectrónico determinado y con una separación constante entre electrodos denominada “a”, e ir variando (aumentando) las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado “n”, de tal forma que el resultado final será una sección de resistividades aparentes a varios niveles “n” en profundidad; Estos datos necesariamente deben ser tratados por algoritmos matemáticos de Inversión para llegar a obtener una Imagen de Resistividad-Profundidad Verdadera.

La Inversión arroja como resultado una “**Imagen de Resistividades y Profundidades Verdaderas**” que debe ser correlacionada con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc. para obtener una interpretación coherente. A través de la Interpretación se llega a las conclusiones del Diagnostico Ambiental, que puede ser constatada con las observaciones de campo y datos de perforaciones y/o calicatas mecánicas.

### **Características**

Las siguientes características son de fundamental importancia en aplicaciones de Diagnostico Ambiental Subsuperficial:

- ✓ Imágenes de elevada resolución para profundidades someras a medias.
- ✓ La cobertura en dos y tres dimensiones es mayor que la lograda con los métodos tradicionales, tales como perforación, sondeos y calicatas mecánicas, otros.
- ✓ Las mediciones en 4D permiten observar, caracterizar y evaluar tanto aspectos dinámicos como las variaciones del estado de un pasivo con el tiempo.
- ✓ Los resultados se presentan en forma que posibilitan una fácil comprensión por parte de Geólogos, Hidrogeólogos, Ingenieros, u otros especialistas.-
- ✓ Los tiempos y costos comparativos son menores a los de las técnicas directas de muestreo para una misma superficie de estudio.

### **Tomografía Eléctrica (TE). Generalidades:**

#### **Resistividad Aparente: Definición.**

Es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en TE y la que se toma como base para la inversión y posterior interpretación.

Esta está definida por la ecuación (Ley de Ohm):

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

donde K es la constante de normalización de cada dispositivo o factor geométrico,  $\Delta V$  es la diferencia de potencial medido sobre el terreno, e I la corriente inyectada al mismo.

#### **Resistividad. Su relación con los elementos del Subsuelo.**

La TE da una Imagen de la distribución de la resistividad real del subsuelo; Para la interpretación de esta Imagen es muy importante y necesario conocer las resistividades de los diferentes tipos de materiales del subsuelo y de la geología del área bajo estudio y así convertir esta Imagen de Resistividad en una estructura geológica y/o ambiental.

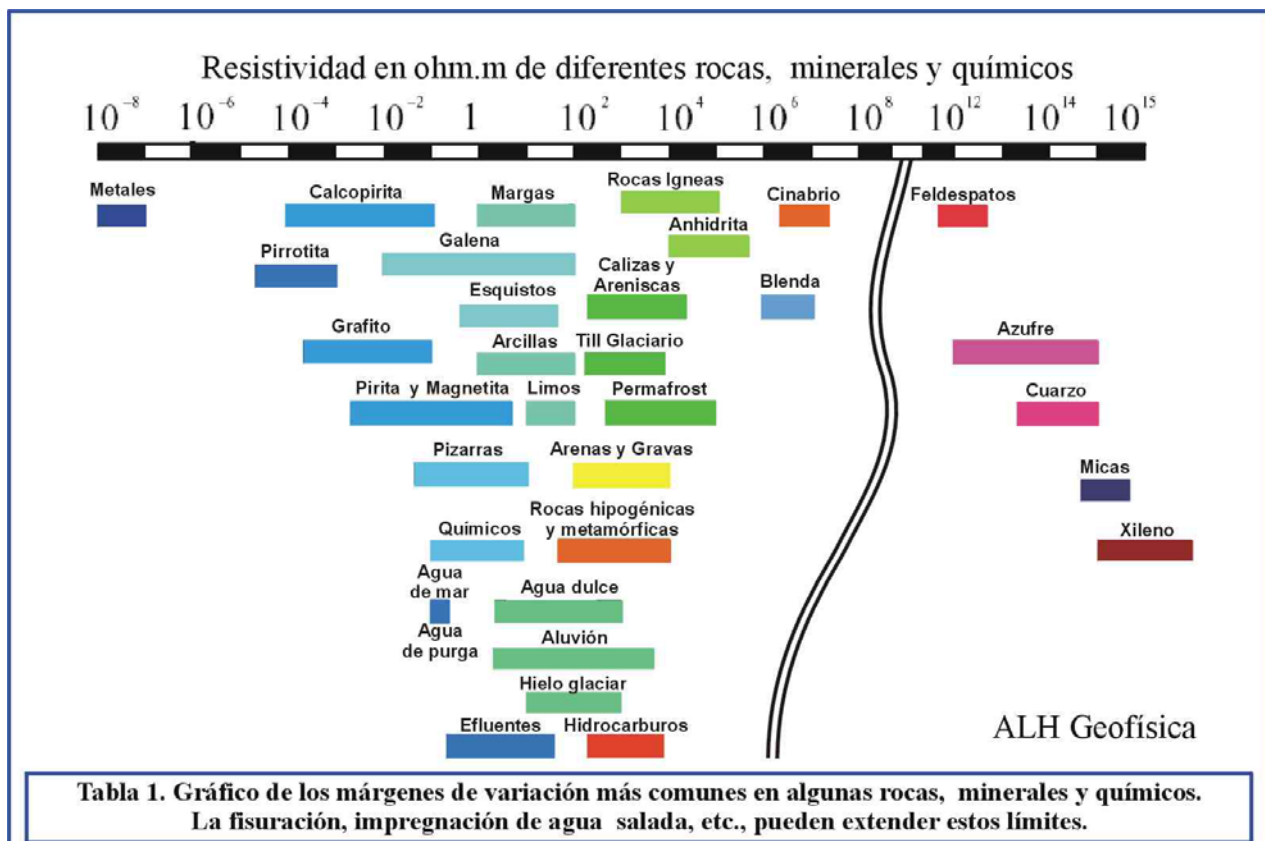
En la tabla 1, se observan los valores de resistividad de las rocas más comunes, materiales de suelo y algunas sustancias químicas (Keller y Frischknecht 1966, Daniels y Alberty 1966, Orellana 1982). Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen altos valores de resistividad. La resistividad de estas rocas depende mucho del grado de fracturación que posee, y el porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno.

Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad.

Los suelos mojados y el agua fresca del terreno tienen aun más bajos valores de resistividad. Los suelos arcillosos normalmente tienen valores de resistividad más bajos que el suelo arenoso. Sin embargo, se destaca que existe una superposición en los valores de resistividad de las diferentes clases de rocas y suelos. Esto es debido a que la resistividad de un muestreo particular del suelo o roca depende de un número de factores tales como la porosidad, el grado de saturación de agua y la concentración de sales disueltas.

La resistividad del agua del terreno varía desde 10 a 100 ohm.m. dependiendo de la concentración de sales disueltas. Note que el bajo valor de la resistividad (alrededor de los 0.1 ohm.m) en el agua de mar o agua Coproducida se debe al alto contenido de sal, esto hace que el método de TE sea una técnica ideal para la delimitación de la infiltración en profundidad de piletas filtrantes.

En la Tabla 1 también se muestra el valor de la resistividad de varios contaminantes industriales. Los metales, tal como hierro, tienen valores de resistividad sumamente bajos. Los químicos, tal como sodio y cloruro de potasio, pueden reducir mucho el valor de resistividad del agua del terreno a menos de 1 ohm.m con moderadas concentraciones. El efecto de electrolitos, tal como el ácido acético, es comparativamente menor. Los compuestos de hidrocarburos sin degradar típicamente tienen valores muy altos de resistividad, entre 100 a 10000 ohm.m, o como el xylene con un valor superior a los 100.000 ohm.m, generando anomalías notables en el medio receptor.



Se destaca que el proceso de biodegradación (natural o inducido) de los HCs. genera una cantidad considerable de ácidos y sales orgánicas que aumenta extensamente la ionización y por lo tanto la conductividad de la zona vadoza (debajo del vertido), la que oscila en valores de 0.1 a no mas de 100 ohm.m encuadrándose en la Tabla 1 como efluentes; con lo cual hace que la TE sea una técnica perfecta para su identificación; (Leer Anexo A).

Los valores de resistividad tienen un gran rango comparado a otras cantidades físicas obtenidos por otros métodos Geofísicos. La resistividad de las rocas y el suelo en un área de estudio pueden variar por varios ordenes de magnitud. En comparación, la densidad usada en investigaciones gravimétricas usualmente cambia pero por debajo de un factor de 2, las velocidades sísmicas normalmente no cambian por mas de un factor de 10. Esto hace que el método de la TE sea una técnica geofísica muy versátil.

### Dispositivos

Un dispositivo es un arreglo de electrodos formado con dos pares de electrodos, dos emisores y dos receptores. A través de los electrodos emisores C1C2 se inyecta la corriente continua al terreno midiendo su intensidad con un miliamperímetro en serie, y a través del segundo par se mide la diferencia de potencial entre los electrodos P1P2 con un Milivoltímetro. Se tienen arreglos donde uno o dos electrodos se conectan a una distancia lo suficientemente grande, denominados remotos o infinitos, a la cual no producen perturbaciones en la zona de estudio.

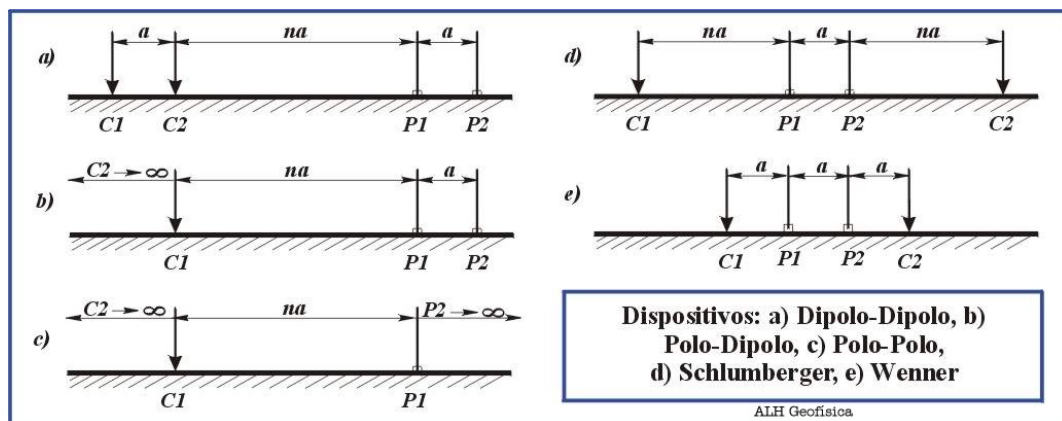


Figura 1. Diferentes Dispositivos usados en Tomografía Eléctrica para relevamientos 2D y 3D

Los Dispositivos más usados comúnmente para determinaciones de resistividad se muestran en la Figura 1. La elección de la "mejor" configuración para un sondeo de campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, profundidad, la sensibilidad del resistivímetro y el nivel de ruido de fondo de la zona de estudio.

En la práctica, los conjuntos más usados para la obtención de Imágenes de Resistividad Eléctrica en 2-D y 3-D son: a) Dipolo-Dipolo, b) Wenner-Schlumberger, c) Wenner, d) Polo-Polo y d) Polo-Dipolo. De entre las características de un determinado arreglo debe considerarse: i) la profundidad de investigación, ii) la sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales de la resistividad subterránea, iii) la cobertura horizontal de datos y la relación señal ruido.

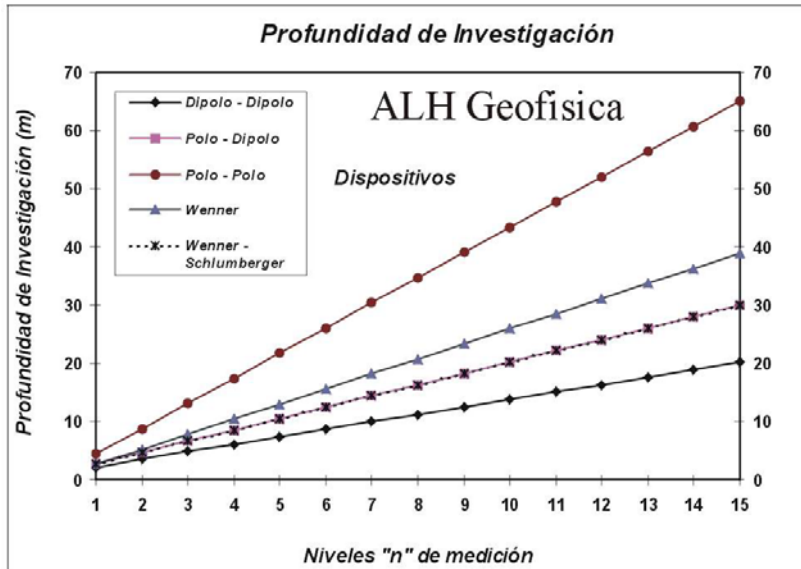
### Resolución vs. Separación entre Electrodos "a"

La profundidad de investigación y la resolución buscada determinan la separación interelectródica "a", la que puede variar por lo general desde fracciones de metros a 50 metros (o aún más en casos excepcionales). En aplicaciones someras se toman distancias interelectródica "a" igual a fracciones de metro hasta 5 metros y los perfiles se conforman con niveles "n" que van de 10 a 25 en casos excepcionales y con superposición de "n" = 4 para obtener un perfil de alta resolución en la parte profunda del perfil.

## Profundidad de Investigación

El Grafico 1 da la profundidad media de investigación para los diferentes Dispositivos, este da una idea de la profundidad a la que nosotros podemos sondear con un arreglo de electrodos en particular. Los valores de profundidad son determinados al integrar la función de sensibilidad con la profundidad (Edwards, 1977).

Hay que destacar que las profundidades son estrictamente válidas para un modelo homogéneo de tierra. Si hay grandes contrastes de resistividad cerca de la superficie, la profundidad real de investigación podría ser algo diferente.

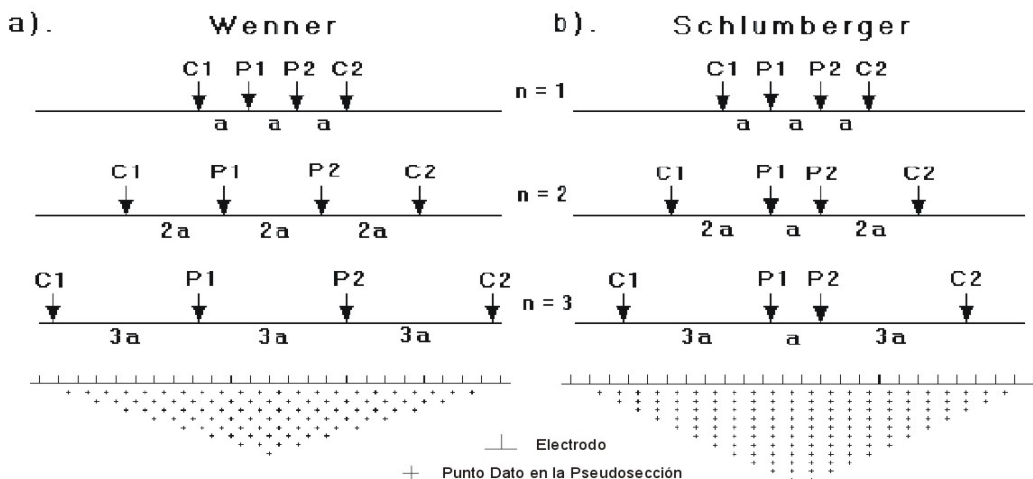


**Gráfico 1:** Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos Dipolo-Dipolo; Polo-Dipolo; Polo-Polo; Wenner y Wenner-Schlumberger obtenidas para una distancia Interelectrónica "a" de 5 metros y 15 niveles "n" de medición (Edwards 1977). Nótese valores idénticos para los dispositivos Polo-Dipolo y Wenner-Schlumberger.

## Adquisición de Datos. Configuración de Perfiles de TE. Protocolos.

La adquisición de datos es tal vez la parte mas significativa de un estudio geofísico de campo con TE. Previo a esto se debe configurar el perfil de medida, es decir preparar la distribución y conexión de los pares de electrodos emisor-receptor, a este proceso se le denomina Protocolo e involucra el conocimiento detallado de la profundidad a investigar, la resolución y cobertura vertical y horizontal buscada y la extensión de las anomalías (horizontalmente y en profundidad) lo que definirá el o los dispositivos a emplear y el numero de datos. Ver ejemplo en Figura 2.

Se destaca que para el desarrollo de los protocolos como la programación y medición de los datos de campo, procesos que requieren de un conocimiento profundo de Geofísica y del método de TE, solo son posibles de llevar a cabo responsablemente por profesionales experimentados y por personal debidamente entrenado, no permitiéndose que la vanidad sustituya al conocimiento experto.



**Figura 2.** Comparación de Cobertura y Resolución para los Dispositivos de electrodos y red de datos (pseudosección) para las configuraciones a) Wenner y b) Wenner-Schlumberger.

### **Pseudo sección.**

Los resultados se vuelcan en pseudosecciones de resistividades aparentes conformando de este modo una malla o red en dos dimensiones, Figura 2. Sobre esta red de datos en dos dimensiones se puede construir una pseudosección la que constituye una sección con curvas de iso-resistividad que reflejan cualitativamente la variación espacial (2D) de resistividad aparente en el perfil investigado.

### **Procesamiento, Inversión e Interpretación**

El resultado obtenido de la medición de un perfil de TE es un conjunto de 200 a 500 datos (o aún más), dispuestos en forma de pseudosección de resistividad aparente, a partir de los cuales se efectúa la interpretación cualitativa de los datos, permitiendo inferir la existencia de Sectores subterráneos anómalos.

Posteriormente y una vez identificados los mismos, se lleva a cabo un post-procesamiento efectuando un modelado 2D introduciendo los datos en un algoritmo matemático que transforma, a través de rutinas de inversión aplicando el método numérico de cálculo por elementos finitos y diferencias finitas y aproximación por el método rapid least-squares (Loke and Barker 1996), la pseudosección de resistividades aparentes 2D en una sección de resistividades y profundidades verdaderas 2D, proceso denominado Inversión.

El procesamiento de datos no es realizado solo por la computadora sin intervención humana, sino que se trata de la interacción hombre maquina debido a que es necesario configurar un programa de calculo de acuerdo a los valores de profundidad y resistividad que puedan obtenerse, del conocimiento general del área y de la naturaleza de las anomalías investigadas, además de la experiencia propia de quien ejecuta la tarea de interpretación; y por último la interpretación es una delicada tarea que requiere coherencia y sobre todo experiencia.

La Inversión de los datos arroja como resultado una **“Imagen de Resistividades y Profundidades Verdaderas”** la que se correlaciona con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc., a fin de delimitar, cualificar y cuantificar las anomalías detectadas en profundidad con objeto de lograr una Interpretación coherente en el Diagnostico.

### **Resultados de la TE.**

El resultado obtenido mediante la Técnica de TE es una Imagen Geoeléctrica o Sección de Resistividad de Alta Resolución con una muy buena aproximación del modelo de resistividades y profundidades verdaderas del subsuelo, resultado que puede ser, en la mayoría de los casos, correlacionado y constatado con las observaciones de campo, información geológica, perforaciones, calicatas mecánicas, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc.; resultados con cuya Interpretación se llega a las conclusiones del Diagnostico Ambiental.

Cabe destacar que resulta improbable mediante las técnicas convencionales de resistividad (Sondeo Eléctrico Vertical, GeoRadar, etc.) la detección de cuerpos de pequeñas dimensiones, especialmente en el caso de ser las mismas delgadas y de somera a media profundidad.

### **Aplicaciones y Ventajas del Método**

En años recientes, se ha producido una tendencia manifiesta hacia el empleo de métodos de resistividad eléctrica en estudios de zonas de geología y anomalías complejas, medio ambiente y proyectos de infraestructura, aplicaciones que están jugando un rol significativamente importante en el mundo moderno.

Las siguientes características son de fundamental importancia en aplicaciones de Diagnostico Ambiental Subsuperficial:

- ✓ Imágenes de elevada resolución para profundidades someras a medias.



- ✓ La cobertura en dos y tres dimensiones es mayor que la lograda con los métodos tradicionales, tales como perforación, sondeos y calicatas mecánicas, otros.
- ✓ Las mediciones en 4D permiten observar, caracterizar y evaluar tanto aspectos dinámicos como las variaciones del estado de un pasivo con el tiempo.
- ✓ Los resultados se presentan en forma que posibilitan una fácil comprensión por parte de Geólogos, Hidrogeólogos, Ingenieros, u otros especialistas.-
- ✓ Los tiempos y costos comparativos son menores a los de las técnicas directas de muestreo para una misma superficie de estudio.

Para cumplir con tales requerimientos todo el proceso de manejo de datos debió ser sistematizado tanto en las etapas de adquisición, procesamiento, interpretación y presentación de resultados, a fin de coleccionar la mayor cantidad de información posible en el menor tiempo, a bajo costo y con la menor probabilidad de error.

### **CASOS HISTÓRICOS GENERICOS DE DIAGNOSTICO, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACION AMBIENTAL DEL SUBSUELO APLICANDO TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA**

En adelante se presentan dos Casos Genéricos de Diagnostico, Caracterización y Evaluación Ambiental y sus correspondientes resultados. El objetivo de los mismos fue comprobar la eficacia del Método Geofísica de TE en la modalidad R2D y determinar, mediante esta técnica, la distribución, forma, extensión, volumen y estado de pasivos petroleros (zonas anómalas).

- ✓ **Caso 1: “Diagnostico Ambiental, Caracterización y Evaluación del Estado de un Pasivo Petrolero Superficial y Subsuperficial (Derrames y Piletas) Aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica antes de la Remediación”**

Este primer caso se refiere a la Caracterización, Evaluación y Diagnóstico del estado de un pasivo de grandes dimensiones, donde además se calcularon volúmenes. Esta Investigación fue presentada como un Estudio de Impacto Ambiental (E.I.A.) o Informe Ambiental (I.A.) necesario para la obtención de la Licencia Ambiental (L.A), acto administrativo emitido por la Autoridad de Aplicación realizada como etapa previa al proceso de saneamiento del suelo y subsuelo.

- ✓ **Caso 2: “Diagnostico y Evaluación del Estado de una Pluma de HCs. Causada por la Pérdida Subterránea en un Ducto, Aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica al final del proceso de Remediación”**

El segundo caso corresponde al Diagnóstico y Evaluación realizado en las etapas finales del proceso de remediación de una vertido subterráneo de HCs. proveniente de la perdida de un ducto. Se realizo con la finalidad de cotejar el efecto de las labores de saneamiento realizadas sobre la pluma por medio de bombeo y excavación de trincheras para coleccionar el HCs. derramado subterráneamente.

## **CASO 1: “Diagnostico Ambiental, Caracterización y Evaluación del Estado de un Pasivo Petrolero Superficial y Subsuperficial (Derrames y Piletas) Aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica antes de la Remediación”**

### **Descripción General del Área - Geología**

Los datos recabados de geología y el perfil litológico corresponde a tres capas generales; La primer capa se relaciona con las arenas eólicas sueltas hasta los 1.5 metros de espesor y las arenas limosas o franco arenosas de 1 metro de espesor, conformando un horizonte de 2.5 metros de espesor, esta capa es la más afectada por la contaminación de HCs.

La segunda capa corresponde a sedimentos cuaternarios compuesto por aluvión reciente y actual, gravas, gravilla, arena, limo y arcilla, en parte conformando capas de conglomerado Aluvional cementado (Gravas cementadas) de 2 metros de potencia y de escasa permeabilidad y porosidad primaria baja o nula, esta capa de un espesor entre 10 y 15 metros, está un poco afectada por la contaminación de HCs. Esta capa es denominada generalmente como la zona vadosa, es decir es una zona no saturada.

Finalmente el perfil investigado concluye en las areniscas de grano fino a grueso con intercalaciones de limolitas y arcilitas por debajo de los 10 a 15 metros de profundidad, esta roca presenta una porosidad primaria muy reducida y algo de porosidad secundaria por fracturación. Esta última capa Investigada es No Acuífera o Acuífero Pobre, en cuyo caso correspondería al cuerpo receptor de agua subterránea más superficial, denominado por otros autores como basamento conductivo por su baja resistividad natural (10-55 ohm.m); El nivel freático en el área se encontraría en esta roca a más de 15 metros de profundidad.

### **Observaciones desde superficie**

Para la correlación más acertada de las imágenes de TE con la Geología como con los datos ambientales y antrópicos, se procedió a relevar todos los perfiles obteniendo una serie de datos superficiales con una descripción cualitativa de lo observado, representado estas características cualitativas con una barra sobre cada Imagen de TE.

De este modo se han podido identificar siete características distintivas superficiales a saber:

1.  Arena limpia, arena eólica que en ciertos sectores conforma montículos tapando antiguos trabajos de remediación y zonas con contaminación.
2.  Arena y arena con gravas, se presenta también como material de relleno sobre antiguas piletas donde se encuentra nivelado por maquinaria.
3.  Suelo Natural, con vegetación original y vegetación regenerada sobre áreas contaminadas.
4.  Suelo empetrolado degradado, fuerte olor a HCs., color marrón producto de la degradación de suelos empetrolados - Landfarming.
5.  HCs. sólidos, costra asfáltica de HCs mezclado con arena y grava, generalmente es una capa de no más de 20 cm.
6.  Montículos de suelo mezclado con HCs. Se presentan acopiados sobre superficie y también nivelados por maquinaria
7.  Petróleo en superficie, Petróleo con arena y grava, pequeños “volcanes” de hidrocarburos líquidos, muy licuefactos a temperaturas elevadas (>25°C).

### **Resultados de la Tomografía Eléctrica Caso 1.**

A partir de las Imágenes Geoeléctricas obtenidas con TE y los datos de las observaciones en campo y del Perfil Litológico definido se han elaborado una serie de Láminas para toda el área, solo se presenta en este Artículo un detalle sobre una piletta de pequeñas dimensiones Lámina N°1 y cuatro

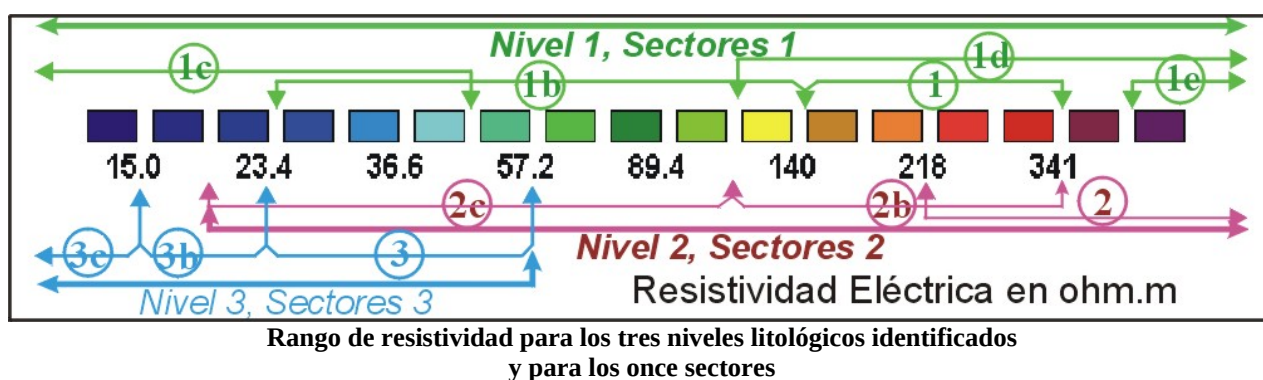


Imágenes en las Láminas N° 2 y 3 con perfiles que alcanzaron una profundidad de 12 metros. Los perfiles largos (550 a 750 m) y con profundidades de hasta 45 m no se presentan dada las grandes dimensiones de sus imágenes.

La correlación entre las Características Físicas (ambientales) y su atribución litológica/geológica con los valores de resistividad, es lo que da como resultado la interpretación y Caracterización Geofísica de las Imágenes de Resistividad por Tomografía Eléctrica.

En general y en todas las Imágenes del Subsuelo se observa un amplio rango de los valores de resistividad que va desde valores inferiores a los 15 ohm.m a valores superiores a 300 ohm.m.

Para la interpretación de todas estas Imágenes se ha subdividido cualitativamente el perfil Geofísico en tres “niveles”: “1”, “2” y “3”; dentro de cada uno de estos niveles se han identificado distintos “sectores” con una denominación particular “a”, “b”, “c”, “d”, ó “e” según se corresponda el valor de resistividad con alguna característica física distintiva. Esta calificación es general y también cualitativa para todos los perfiles.



De esta manera se tiene:

- El primer **nivel** superficial denominado “1” corresponde a arenas eólicas sueltas hasta los 1.5m de espesor, luego se tienen arenas limosas o franco arenosas de 1 a 1.5 metros de espesor conformando un horizonte de 3 metros de espesor cuyo resistividad abarca todo rango medido y va de valores inferiores a **15 ohm.m** a superiores a los **341 ohm.m**. Este nivel es el más afectado por la contaminación por HCs.
- El Segundo nivel denominado “2”, que va desde los sedimentos cuaternarios compuesto por: aluvión reciente y actual, gravas, gravilla, arena, limo y arcilla, en parte conformando capas de conglomerado Aluvional cementado (Gravas cementadas) de escasa permeabilidad y porosidad primaria baja o nula, hasta las areniscas y limolitas; esta capa de un espesor entre 10 y 15 metros y un rango que va de 20 ohm.m a valores superiores de 341 ohm.m., está un poco afectada por la contaminación de HCs.
- El tercer nivel denominado “3” que se encuentra por debajo de los 10 a 15 metros de profundidad conformado por las areniscas y limolitas, cuyo rango de resistividad va de los 55 ohm.m a valores inferiores a los 15 ohm.m. (no presentado en el Artículo).

Dentro de estos niveles, y de acuerdo a los valores de resistividad observados se han encuadrado cualitativamente once sectores aproximados, cada sector en particular tiene una característica que lo distingue del resto tanto en su valor de resistividad como el estado físico en que se encuentra, el que esta íntimamente “vinculado” con el grado y tipo de contaminación sea esta por HCs como modificado por la ionización derivada de los productos de desecho de la biodegradación, estos sectores son:

nivel 1, primer capa: arenas eólicas sueltas y arenas limosas o franco arenosas, horizonte de 2.5 metros de espesor.

- Sector **1**: Arenas, arena limosa, superficiales en estado natural con valores entre **140** ohm.m a **341** ohm.m
- Sector **1b**: Arenas, arena limosa, superficiales algo ionizadas, conductivas con valores entre **23** ohm.m a **140** ohm.m
- Sector **1c**: Arenas, arena limosa, muy conductivas por biodegradación con resistividad inferior a **45** ohm.m
- Sector **1d**: Material residual de HCs mezclado con suelo enterrado, antiguas piletas tapadas con arena y gravas; muy resistivo, superior a los **350** ohm.m.
- Sector **1e**: Petróleo, petróleo con arenas, o aflorante en forma de “volcanes” de HCs con arena con valores de resistividad superiores a los **450** ohm.m.

nivel 2 (segunda capa): Sedimentos Cuaternarios, Conglomerados Aluvionales cementados (Gravas cementadas) de hasta 15 metros de potencia

- Sector 2: Conglomerados Aluvionales, gravas cementadas en estado natural con valores de resistividad superiores a los 218 ohm.m
- Sector 2b: Conglomerados Aluvionales, gravas cementadas, algo conductivas con valores entre 100 ohm.m y 341 ohm.m
- Sector 2c: Conglomerados Aluvionales, gravas cementadas, muy conductivas por biodegradación con valores entre 20 ohm.m y 100 ohm.m

nivel 3 (tercer capa): Areniscas y limolitas, profundidad superior a 15 metros.

- Sector 3: Areniscas y limolitas, basamento conductivo con resistividad entre 23 ohm.m y 55 ohm.m en estado Natural.
- Sector 3b: Areniscas y limolitas, algo conductivas con resistividad entre 15 ohm.m a 55 ohm.m
- Sector 3c: Areniscas y limolitas, zona muy conductiva con resistividad inferior a 15 ohm.m.

Dado que todas las Imágenes en el área son similares, se utilizan las mismas denominaciones para todos los perfiles (“1”, “1b”, “1c”, “1d”, “1e”, “2”, “2b”, “2c”, “3”, “3b” y “3c”) y para la descripción de todos los perfiles haciendo alusión solo al “sector”.

Antes de introducirnos en la interpretación en general de las imágenes, se debe dejar claro que la profundidad de Investigación del método de Tomografía Eléctrica está en función de la separación entre electrodos y del Dispositivo elegido, de esa manera se tiene que la profundidad de investigación y por lo tanto la información que vemos en las imágenes tiene determinados límites horizontales y verticales, así vemos que la profundidad en todas las imágenes comienza a partir de un metro de profundidad dejando una “zona ciega” o sin información que puede ser de interés. Para cubrir este vacío se complementa la información con los datos de superficie que están estrechamente ligados a las anomalías en profundidad y que se presentan en todos los perfiles como **“Observaciones desde superficie”** y descrito anteriormente.

De la observación general de todos los datos logrados, sean estos de Geofísica, Topografía y Ambientales se destaca una estrecha vinculación entre la topografía y las áreas contaminadas con los derrames históricos, es decir que los derrames se dispersaron o circularon en los “bajos” topográficos o “depresiones”; esta conclusión se desprende de la observación de las Imágenes donde se ve claramente que las áreas contaminadas por HCs se encuentran en las cotas más bajas de cada perfil.

En general es notable un alto grado de degradación de los HCs. que dieron paso a la generación de ácidos y sales orgánicas de carácter conductivo que se infiltraron en el subsuelo en la denominada zona vadosa, generando “halos” conductivos (azules) con profundidades variables según el grado y concentración original de HC en el perfil investigado, presentando en general un perfil descendente con sectores 1c, 2c y 3c.

En algunos perfiles solo se observa una delgada capa (sector 1b) que estaría vinculada principalmente al escurrimiento superficial de agua coproducida, ya que la misma nunca alcanza profundidades superiores a los 3 metros.

De la observación de todas las imágenes se puede observar que el sector de mayor interés desde el punto de vista de la Remediación Ambiental del Subsuelo lo representa el Sector 1d (Material residual de HCs mezclado con suelo enterrado, antiguas piletas tapadas con arena y gravas). Este sector (1d) se ha identificado en seis sitios; en el centro del área y dentro de las imágenes de los perfiles 12, 13, 14, 15 y 16 y entre los perfiles 2, 3 y 4, hay dos piletas donde la profundidad o espesor del relleno varía desde 1 y 2 m para la pileta al este, y de 3 a casi 4 metros en el centro de la pileta que se encuentra en la intersección del Perfil 3 y 13; el resto de la misma tiene una profundidad de 1 a 2 metros (Caracterización en planta). Otra pileta identificada se encuentra en la intersección de los Perfiles 8 y 9 junto al perfil 4 con unos 3 a 4 metros de profundidad. El resto de los sectores encontrados corresponden a montículos de suelo empetrolado enterrado con profundidades inferiores a los dos metros.

Otro fenómeno a tener en cuenta en la superficie de los sectores 1d, es el de los “volcanes” de HCs. con arena, estos se producen debido a la generación de gases por la descomposición por biodegradación anaeróbica lo que juntamente con las elevadas temperaturas de verano generan una licuefacción de la mezcla, lo que permite que los sólidos como arena y grava descendan por gravedad al fondo de la pileta y se eleven los HCs. líquidos generando un sistema dinámico pulsante que genera “coladas volcánicas” líquidas que al contacto con la arena móvil se convierte en una “costra” asfáltica de unos pocos centímetros; (Leer Anexo A).

Se destaca que las profundidades identificadas en las imágenes de los sectores 1d, como la extensión mapeada representados en la Caracterización en planta, son coherentes con los datos obtenidos por perforaciones.

Los sectores 1c y 2c están dentro de la zona vadosa con profundidades variables desde 2 y 3 metros a más de 10 metros en la capa de conglomerados. El sector 3c representaría la cola de la Pluma conductiva profunda inserta en las areniscas y limolitas.

**Lámina N° 1: Detalle Imagen de Tomografía Eléctrica sobre una pileta con HCs. tapada con arena. Se ha incorporado una Interpretación Geofísica con la Caracterización en planta donde se destacan el sector 1e, (Petróleo con arena), la zona vadoza debajo y a los costados de la misma (1c) y las costras asfálticas 1d. Las observaciones desde superficie destacan características cualitativas.**





## Imágenes Tomografía Eléctrica\_Perfiles\_13 y 14

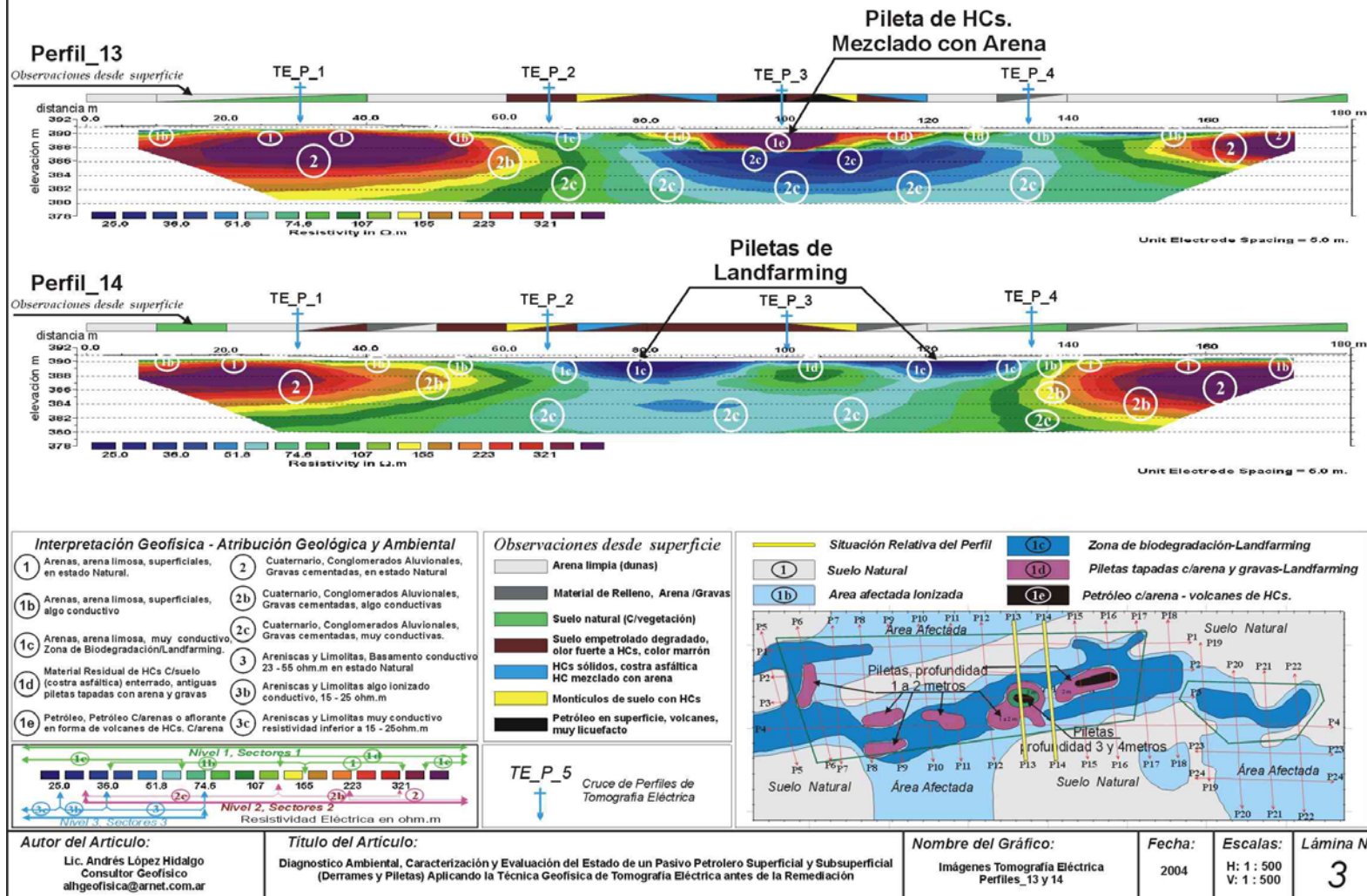


Lámina N° 3: Imágenes de Tomografía Eléctrica sobre piletas con HCs y con Landfarming tapadas con arena. Los sectores 1 y 2 representan áreas en estado natural (de control) NO afectados por cambios Antrópicos. Se ha incorporado una Interpretación Geofísica con la Caracterización en planta donde se destacan el sector 1e, (Petróleo con arena), la zona vadoza debajo y a los costados de la misma (1c) y las costras asfálticas 1d. Las observaciones desde superficie destacan características cualitativas.



## **Conclusiones Caso 1**

Del análisis de toda la información disponible se concluye que la contaminación por HCs. promedia los dos metros de profundidad, y excepcionalmente podría llegar hasta los 4 metros, destacándose que NO existe contacto de HCs. con el acuífero.

Los sectores 1, 2 y 3 representan áreas en estado natural (de control) NO afectados por cambios Antrópicos.

Las piletas de mayor extensión se encuentran en el centro del área dentro de las imágenes de los perfiles 12, 13, 14, 15, 16 y entre los perfiles 2, 3 y 4.

Otra pileta identificada de importancia se encuentra en la intersección de los Perfiles 8 y 9 junto al perfil 4 con unos 3 a 4 metros de profundidad. Estos serían los sectores de mayor interés desde el punto de vista de la Remediación Ambiental del Subsuelo representado como Sector 1d (Material residual de HCs. mezclado con suelo enterrado, antiguas piletas tapadas con arena y gravas).

Las profundidades identificadas en las imágenes de los sectores 1d, como la extensión mapeada representados en la Caracterización en planta, son coherentes con los datos obtenidos por perforaciones y la cartografía de superficie.

Los sectores 1c y 2c están dentro de la zona vadosa con profundidades variables desde 2 y 3 metros a más de 10 metros en la capa de conglomerados.

La superficie total afectada por piletas tapadas que se pudo medir a partir de las Imágenes de Tomografía Eléctrica (Caracterización en planta) es de 8368 metros cuadrados, con un volumen medio de 22722 metros cúbicos de HCs. mezclado con los sedimentos del área.

## **✓ CASO 2: “Diagnostico y Evaluación del Estado de una Pluma de HCs. Causada por la Pérdida Subterránea en un Ducto, Aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica al final del proceso de Remediación”**

### **Descripción General del Área – Geología e Hidrogeología.**

La misma describe lo siguiente: el material superficial es de color castaño claro, de consistencia suelta y de textura areno limo-arcillosa, con presencia de material grueso (mayor a 2 mm y hasta 4-6 cm de diámetro mayor) en porcentajes entre 30 y 50 %, a profundidades menores al metro y entre 50 y 70% por debajo del metro de profundidad.

De acuerdo a datos de excavaciones efectuadas en zonas cercanas al sector del derrame, se concluye que las guijas y guijarros se encuentran dispersos en todo el perfil pero se presentan concentrados en un nivel desde los 0,60 y 0,90 metros de profundidad hasta los 4 o 5 metros. Por debajo de este nivel, el porcentaje de material grueso disminuye y el material dominante es de textura arena o material aluvional fino y de consistencia suelta.

Lo dicho en los párrafos anteriores coincidiría con lo observado en los perfiles de geofísica, en ellos se puede apreciar que el espesor de la capa aluvional es mayor a los 2 m, pudiendo llegar en algunos sectores a los 4 ó 5 m.

En cuanto a la Hidrogeología, los datos que se tienen son los siguientes:

- Se han efectuado 6 pozos de monitoreo del agua subterránea y se instalaron piezómetros con el objeto de medir el nivel freático.

- Las lecturas del nivel freático fueron relacionadas con la nivelación de las bocas de pozos realizada durante un relevamiento planialtimétrico posterior, obteniéndose de esta manera una cota absoluta de cada una de las interfases presentes (líquido-aire, agua-hidrocarburo libre). En los pozos donde se detectó la presencia de sobrenadante se corrigieron las cotas obtenidas en estos puntos para

poder determinar el sentido de escurrimiento del agua subterránea el que se determinó es paralelo a la topografía.

- Los resultados obtenidos se exponen en la siguiente tabla:

| Pozo de monitoreo | Lectura interfase (mbbp) |                 | Cota boca de pozo (mbbp) | Cota de nivel m |                 | Espesor aparente cm | Cota freática corregida m |
|-------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------------|
|                   | Aire-líquido             | Líquido-líquido |                          | Aire-líquido    | Líquido-líquido |                     |                           |
| F1                | 1.358                    | 1.358           | 98.218                   | 96.860          | 96.860          | 0.0                 | 96.860                    |
| F2                | Pozo tapado con arena    |                 |                          |                 |                 |                     |                           |
| F3                | 1.260                    | -               | 98.252                   | 96.992          | -               | 36.0                | -                         |
| F4                | 1.195                    | -               | 98.128                   | 96.933          | -               | 30.5                | -                         |
| F5                | 1.035                    | 1.173           | 97.948                   | 96.913          | 96.775          | 13.8                | 96.881                    |
| F6                | 0.816                    | 0.816           | 97.618                   | 96.802          | 96.802          | 0.0                 | 96.802                    |

- En una zona cercana al tramo del oleoducto donde se produjo la pérdida ubicada a 1.2 Km se midió el nivel freático el que se encuentra a 1.2 m de profundidad.

- No existen cursos o cuerpos de agua dentro de los 500 m del sitio de la pérdida. Se ha establecido que el agua subterránea es la principal vía de migración de la contaminación asociada al oleoducto en cuestión.

### Resultados de la Tomografía Eléctrica Caso 2.

A partir de las Imágenes Geoelectricas obtenidas y los datos de las observaciones en campo y de Geología e Hidrogeología, se han elaborado dos Láminas con fragmento de las Imágenes de Resistividad obtenidos para cada Perfil de Tomografía Eléctrica.

En general y en los dos Perfiles de Resistividad Verdadera del Subsuelo se observa un rango amplio de los valores de resistividad, que va desde valores de 15 ohm.m a valores superiores a 200 ohm.m. Dentro de este rango se encuentran las anomalías de interés que se describen más adelante.

La correlación entre las Características Físicas (ambientales) y su atribución litológica y/o geológica e hidrogeológica con los valores de resistividad es lo que da como resultado la evaluación e interpretación Geofísica de las Imágenes de Resistividad por Tomografía Eléctrica.

### Fragmento Imagen Tomografía Eléctrica Perfil 1

Este Perfil está configurado por cuatro tramos solapados y concatenados de 74 electrodos cada uno, conformando un total de 185 electrodos con una distancia interelectrónica de 1m, alcanzando una longitud de 184 m obteniéndose 1730 lecturas de Resistividad Aparente y una profundidad de 4 a 5 m.

En el fragmento de la imagen del Perfil 1 Lámina N°1, se puede observar la existencia de sectores bien definidos dadas sus características resistivas y conductivas, como así también la imagen resistiva de la situación de la base de hormigón del amojonamiento del poste para protección catódica e indicador del Pkm del Oleoducto.

Resaltan en esta imagen diversas zonas de interés, a saber:

Por encima del nivel freático ubicado a una profundidad de 1.75 m aproximadamente, dentro de la capa de arena limo-arcillosa, se pueden ver distintos sectores resistivos y conductivos. Entre los 48 y 68 m, se observa una anomalía conductiva que conforma una pluma, producto de procesos de biodegradación de HCs. (Leer Anexo A). Esta anomalía se profundiza entrando en la zona aluvional.

A partir de los 72 m y hasta los 124 m aproximadamente se observa una anomalía bastante amplia, cuyos mayores valores de resistividad se ubican entre los 87 y 104 m. Esta anomalía se debe a la presencia del sobrenadante de HCs..

Se destaca que el proceso de bombeo intermitente con el cual se intento extraer el HC. sobrenadante, produjo una fuerte fluctuación del nivel freático movilizándolo verticalmente y por lo tanto al sobrenadante en esa zona del perfil, este fenómeno dinámico se observa claramente en la imagen con la forma de un bolsón de HCs. Nótese que la aureola de dispersión de HCs. alrededor del bolsón que forma la pluma contaminante responde al mismo patrón de movilización vertical observado a los lados del bolsón.

Otro aspecto Dinámico de la Pluma de HCs. es la movilización horizontal que se destaca por la asimetría de la anomalía resistiva, indicando que la misma se desarrolla hacia la izquierda de la imagen siguiendo la topografía, esto además estaría corroborado por los datos de hidrogeología y que pudo ser comprobado a través de las excavaciones; Nuevamente esta anomalía se profundiza alcanzando la capa aluvional a más de cuatro metros.

Sobre el extremo oeste del perfil a los 144 m se observa una anomalía que corresponde, según las excavaciones realizadas posteriormente, a la presencia de un pequeño bolsón de HCs.

Entre los 110 y los 130 m se observa una serie de anomalías resistivas que corresponden a una zona de trincheras excavadas y vueltas a tapar.

#### **Fragmento Imagen Tomografía Eléctrica Perfil 4**

Este Perfil está conformado por un solo tramo de 74 electrodos, con distancia interelectródica de 2m, alcanzando una longitud total de 146 m. Se tomaron 620 lecturas de Resistividad Aparente y se alcanzó una profundidad de 8 a 9 m. La diferencia con el Perfil 1, donde se adoptó una distancia interelectródica de 1m es la resolución y la profundidad de investigación, lo primero es muy notable en la parte mas superficial de la Imagen del Perfil 1, y lo segundo permite verificar que la pluma alcanzo una profundidad de mas de 8m.

En este Perfil se observan 3 capas o niveles a diferencia del Perfil 1, en el cual se aprecian solamente 2 capas (la de arena limo-arcillosa y la de aluvión). La tercera capa corresponde a arenas o material aluvional fino por debajo de los 5 metros; esto tendría su correlación con el angostamiento de la pluma a esa profundidad lo que indicaría que la misma se ha desplazado diferencialmente en cada capa debido a un contraste de los valores de transmisibilidad, dado que cada una de estas capas posee un valor de permeabilidad distinto.

Entre los 24 y 58 m se presenta una gran anomalía resistiva que se profundiza, alcanzando la tercer capa de material más fino; los mayores valores de esta anomalía, correspondientes a HCs. adsorbidos, se concentran entre los 32 y 52 m y a una profundidad máxima de 5 m. Esta se pudo comprobar al igual que en el perfil 1 por medio de las excavaciones en el centro del área.

Luego, entre los 72 y 80 m se observa una anomalía resistiva relativamente pequeña la cual está relacionada a un bolsón de HCs. adsorbidos. A continuación de esta y a partir de los 82 m se aprecia una anomalía de características conductivas producto de la salinización por el acopio de agua en superficie.

Se destaca que los fenómenos Dinámicos descriptos para el fragmento del perfil 1 se repiten igualmente en este; nótese que en esta imagen el flujo subterráneo horizontal esta mas acentuado sobre todo en la capa de aluvión.

**Anomalías Interpretadas**

En estas dos Láminas (4 y 5) se ha representado esquemáticamente la situación relativa de cada perfil de Tomografía Eléctrica. Se representan además las trazas del oleoducto, como así también la ubicación de las Anomalías Interpretadas (indicadas con diferentes colores) en la zona de estudio.

En la parte central del área de estudio se ha podido detectar una serie de anomalías; las mismas son debidas a la presencia de HCs. adsorbidos en el aluvión y / o arenas. Se puede observar que la anomalía ubicada aproximadamente en el centro del Perfil 1, y que también abarca los tramos inicial y medio del Perfil 4, muestra un área de color diferente; este cambio de color denota un aumento de la resistividad asociada a la concentración de HCs.

La presencia de esta anomalía fue comprobada mediante la excavación efectuada recientemente en la que se recuperó material aluvional impregnado de HCs

# Fragmento Imágen Tomografía Eléctrica\_P1

Escalas: H : 1 : 500; V : 1 : 100

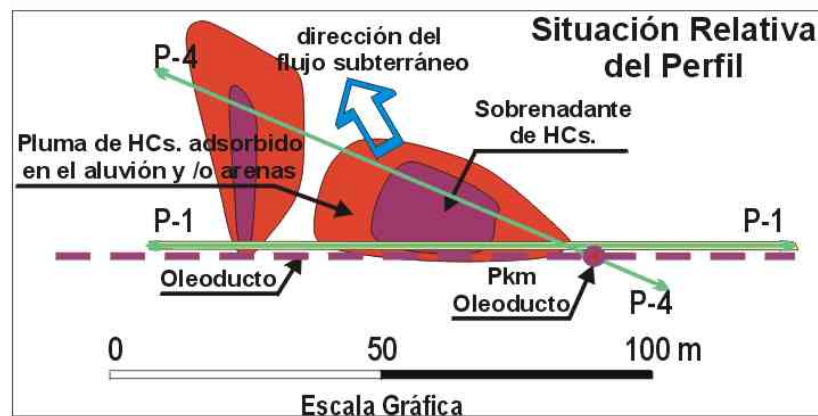
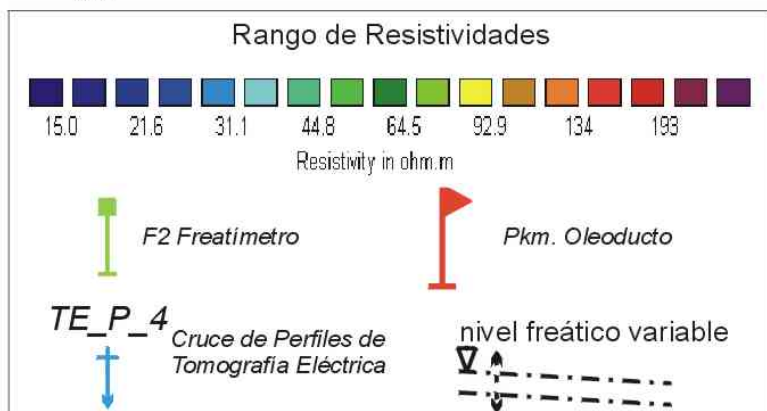
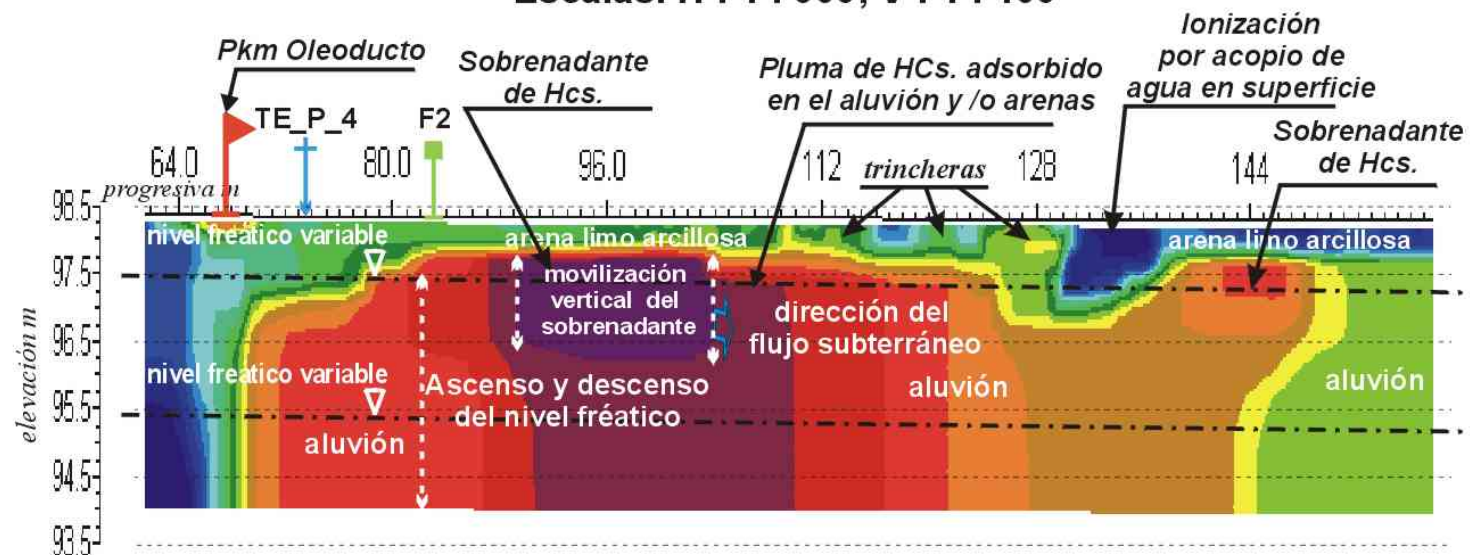


Lámina N° 4:  
 Detalle Imagen de Tomografía Eléctrica sobre una Pluma de HCs. Se ha incorporado una Interpretación Geofísica con la Caracterización en planta donde se destacan en diferente color el bolsón de HCs. y la aureola o halo de dispersión. Nótese la movilización vertical del sobrenadante causado por las variaciones del nivel freático.

**Autor del Artículo:**  
 Lic. Andrés López Hidalgo  
 Consultor Geofísico  
 alhgeofisica@amet.com.ar

**Título del Artículo:**  
 Diagnostico y Evaluación del Estado de una Pluma de HCs.  
 Causada por la Pérdida Subterránea en un Ducto,  
 Aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica  
 al final del proceso de Remediación

**Nombre del Gráfico:**  
 Fragmento Imágen  
 Tomografía Eléctrica\_P\_1

**Fecha:**  
 2004

**Lámina N°:**  
 4



# Fragmento Imágen Tomografía Eléctrica\_P\_4

Escalas: H : 1 : 500; V : 1 : 100

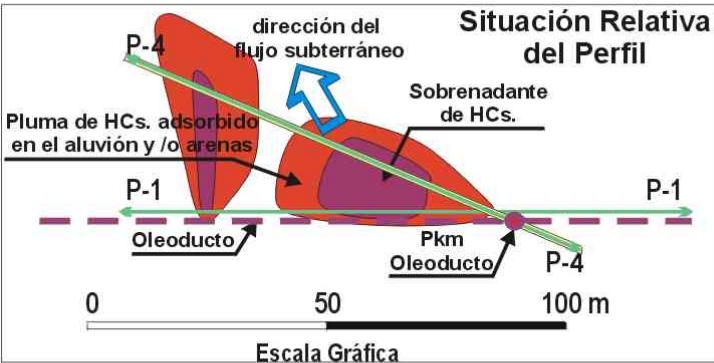
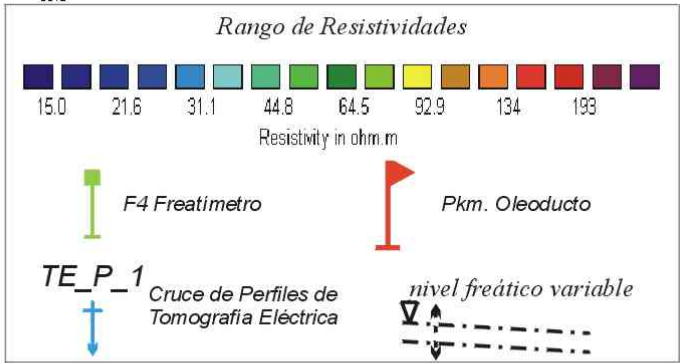
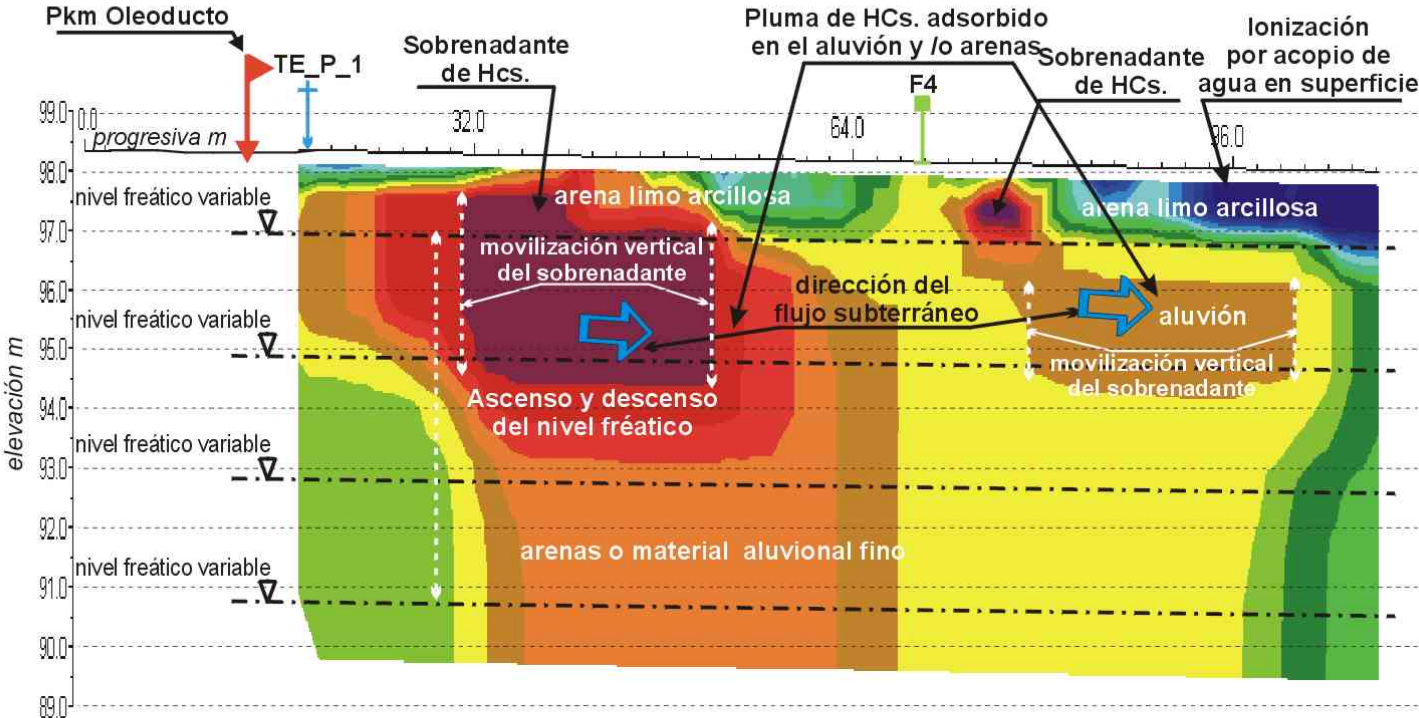


Lámina N° 5: Detalle Imagen de Tomografía Eléctrica sobre una Pluma de HCs. Se ha incorporado una Interpretación Geofísica con la Caracterización en planta donde se destacan en diferente color el bolsón de HCs. y la aureola o halo de dispersión. Nótese la movilización vertical del sobrenadante causado por las variaciones del nivel freático y el desplazamiento horizontal diferenciado de la pluma en los diferentes niveles litológicos.

|                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                            |                       |                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Autor del Artículo:</b><br>Lic. Andrés López Hidalgo<br>Consultor Geofísico<br>alhgeofisica@arnet.com.ar | <b>Título del Artículo:</b><br>Diagnostico y Evaluación del Estado de una Pluma de HCs.<br>Causada por la Pérdida Subterránea en un Ducto,<br>Aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica<br>al final del proceso de Remediación | <b>Nombre del Gráfico:</b><br>Fragmento Imágen<br>Tomografía Eléctrica_P_4 | <b>Fecha:</b><br>2004 | <b>Lámina N°:</b><br>5 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|

## **Conclusiones Caso 2**

Podemos decir que la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica es una eficaz y poderosa herramienta para la detección, delimitación y evaluación de la dinámica de Plumas sobrenadantes provocadas por la infiltración de Hidrocarburos, a través de la misma se ha podido identificar en todo el área sectores anómalos vinculados a la infiltración subterránea de HCs. y a la acumulación de agua en superficie. Estas son las siguientes:

- En el centro del área de estudio se ha delimitado una gran Pluma de HCs. adsorbidos en el aluvión y / o arenas. Se puede observar que la anomalía ubicada aproximadamente en el centro del Perfil 1, y que también abarca los tramos inicial y medio del Perfil 4, muestra un área de color diferente que denota un aumento de la resistividad asociada a la concentración de HCs. La presencia de esta anomalía fue comprobada mediante la excavación efectuada en la que se recupero material impregnado de HCs., la misma se profundiza alcanzando la capa aluvional a más de cuatro metros.
- Se destaca que el proceso de bombeo intermitente con el cual se intento extraer el HC. sobrenadante, produjo una fuerte fluctuación del nivel freático movilizándolo verticalmente y por lo tanto al sobrenadante en esa zona del perfil, este fenómeno dinámico se observa claramente en la imagen con la forma de un bolsón de HCs. Nótese que la aureola de dispersión de HCs. alrededor del bolsón que forma la pluma contaminante responde al mismo patrón de movilización vertical observado a los lados del bolsón.
- Otro aspecto Dinámico de la Pluma de HCs. es la movilización horizontal que se destaca por la asimetría de la anomalía resistiva, indicando que la misma se desarrolla hacia la izquierda de la imagen siguiendo la topografía, esto además estaría corroborado por los datos de hidrogeología y que pudo ser comprobado a través de las excavaciones; Nuevamente esta anomalía se profundiza alcanzando la capa aluvional a más de cuatro metros.
- Hacia la izquierda de Perfil 1 se observa una anomalía conductiva que conforma una pluma, producto de procesos de biodegradación de HCs. la que se profundiza entrando en la zona aluvional, (Leer Anexo A).
- Sobre el extremo derecho del perfil 1 a los 144 m se observó una anomalía que corresponde, según las excavaciones realizadas posteriormente, a la presencia de un pequeño bolsón de HCs.
- Se ha observado a la derecha de ambos perfiles, una serie de anomalías conductivas que corresponden a la salinización de los primeros metros de suelo y arenas limo-arcillosas debido a la acumulación en superficie de agua de lluvia.

## **Conclusiones Generales**

Del análisis y observación de los resultados obtenidos con Tomografía Eléctrica en estos dos Casos podemos aseverar que la Técnica Geofísica de TE\_R2D es una eficaz y poderosa herramienta para la Observación, Caracterización, Diagnostico y Evaluación Ambiental de Anomalías del Subsuelo a través de su Resistividad, parámetro físico indicativo de cualidades asociadas mayoritariamente a fenómenos Antrópicos tales como Plumas de Hidrocarburo, Filtraciones de Agua Coproducida, Biodegradación de HCs, Efluentes, etc., además de poder observar estructuras de Geología compleja.

Las siguientes características son de fundamental importancia en aplicaciones de Diagnostico Ambiental Subsuperficial:

- ✓ Imágenes de elevada resolución para profundidades someras a medias.
- ✓ La cobertura en dos y tres dimensiones es mayor que la lograda con los métodos tradicionales, tales como perforación, sondeos y calicatas mecánicas, otros.
- ✓ Las mediciones en 4D permiten observar, caracterizar y evaluar tanto aspectos dinámicos como las variaciones del estado de un pasivo con el tiempo.
- ✓ Los resultados se presentan en forma que posibilitan una fácil comprensión por parte de Geólogos, Hidrogeólogos, Ingenieros, u otros especialistas.-
- ✓ Los tiempos y costos comparativos son menores a los de las técnicas directas de muestreo para una misma superficie de estudio.

## Glosario.

1. **Antrópico:** Son los cambios directos o indirectos provocados en el ambiente por las actividades humanas.
2. **Caracterizar:** Determinar los atributos peculiares de una cosa, de modo que claramente se distinga de las demás.
3. **Contaminación ambiental:** Es el agregado de materiales y de energías residuales al entorno o cuando estos, por su sola presencia o actividad, provocan directa o indirectamente una pérdida reversible o irreversible de la condición normal de los ecosistemas y de sus componentes en general, traducida en consecuencias sanitarias, estéticas, recreacionales y ecológicas negativas e indeseables;
4. **Cuerpo receptor:** Es el sitio en el ecosistema donde tienen o pueden tener destino final residuos peligrosos ya tratados como resultado de operaciones de eliminación. Son cuerpos receptores las aguas dulces superficiales, la atmósfera, los suelos, las estructuras geológicas estables y confinadas no considerándose tales a las plantas de tratamiento ni de disposición final.
5. **Cuerpo receptor sujeto a saneamiento y recuperación:** Es aquel cuerpo receptor cuyas condiciones naturales han sido modificadas, haciéndolo inepto para la preservación y desarrollo de los organismos, debido a la contaminación antropogenética para el cual se ha establecido o se prevé establecer programas de saneamiento y recuperación.
6. **Declaración de Impacto Ambiental (D.I.A.):** Es la declaración unilateral efectuada por el proponente de un proyecto sometido a los alcances de la Ley mediante la cual manifiesta de manera explícita ante la Autoridad de Aplicación, en base a un previo Estudio de Impacto Ambiental (E.I.A.) o un Informe Ambiental (I.A.) que ha presentado ante ésta para su evaluación, la naturaleza, extensión y demás características de las afectaciones que la ejecución de su proyecto, obra o emprendimiento ocasionará al medio ambiente involucrado.
7. **Encapsulación:** Técnica para aislar una masa de residuos. Implica el completo revestimiento o instalación de una partícula tóxica o aglomerado de residuos mediante el empleo de sustancias distintas como el aditivo o ligante utilizado en la solidificación y estabilización.
8. **Enterramiento sanitario:** Es la técnica que consiste en colocar los residuos sólidos en una excavación, aislándolos posteriormente con tierra u otro material de cobertura.
9. **Estándar de calidad ambiental:** Designa al valor numérico o enunciado narrativo que determina los límites a los vertidos y emisiones a un cuerpo receptor en un lugar determinado, calculado en función de los objetivos de calidad ambiental y las características particulares del cuerpo receptor en el referido lugar.
10. **Estudio de Impacto Ambiental (E.I.A.) :** Es el documento requerido para las actividades enumeradas en el Anexo V del Decreto y formulado de acuerdo a las pautas brindadas en el Anexo III del Decreto, que describe un proyecto, el medio donde se desarrolla, el impacto ambiental que producirá y las medidas de protección del ambiente que se proponen adoptar.

11. **Evaluación de Impacto Ambiental:** Es el procedimiento administrativo a cargo de la Autoridad de Aplicación que en base a estudios técnicos y legales determina si el impacto ambiental de una actividad o proyecto será considerado admisible a los fines de la emisión de la Licencia Ambiental (L.A.).
12. **Fuga, escape, derrame:** Indica situaciones accidentales en las cuales una sustancia o un residuo peligroso o no, tiene posibilidad de ingresar directamente al ambiente.
13. **Impacto ambiental:** Es toda modificación del ambiente, benéfica o perjudicial, directa o indirecta, temporal o permanente, reversible o irreversible, causada por una actividad humana en el área de influencia del proyecto de que se trate.
14. **Licencia Ambiental (L.I.):** Es el acto administrativo emitido por la Autoridad de Aplicación que implica la aprobación de un Estudio de Impacto Ambiental (E.I.A.) o Informe Ambiental (I.A.), la admisión de los impactos ambientales declarados por el proponente, y mediante el cual se establecen las condiciones específicas a las que debe ajustarse éste durante todas las etapas del proyecto o actividad de que se trate.
15. **Lixiviados:** Se refiere a cualquier líquido y sus componentes en suspensión, que ha percolado o drenado a través de la masa de residuos. Es migración de materiales del suelo en disolución o en suspensión coloidal, arrastrado por las aguas de percolación.
16. **Coloide:** Dícese del cuerpo que al disgregarse en un líquido aparece como disuelto por la extremada pequeñez de las partículas en que se divide; pero que se diferencia del verdaderamente disuelto en que no se difunde con su disolvente si tiene que atravesar ciertas superficies o laminas porosas
17. **Vertido, volcado:** Indica situaciones intencionales en las cuales sustancias o residuos son puestos directamente en contacto con el medio, pudiendo derivar esto en una afectación a la salud y/o al ambiente.

## Referencias

- APPLIED GEOPHYSICS, Journal of Applied Geophysics 44 (2000) 167-180, Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site: Estella A. Atekwana, William A. Sauck, Douglas D. Werkema Jr. \* Departmen of Geosciences, Western Michigan University, Kalamazoo, MI 49008, USA.
- Atekwana, E. A., Sauck, W.A., Abdel Aal, Z .G., and Werkema, D. D., 2002, Geophysical investigation of vadose zone conductivity anomalies at a hydrocarbon contaminated site: Implications for the assessment of intrinsic bioremediation, J. Environ. Eng. Geophys., 7, 103-110.
- Atekwana, E. A., Atekwana, E., and Rowe, R. S., 2003, Relationship between total dissolved solids and bulk conductivity at a hydrocarbon-contaminated aquifer: Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 227-237.
- Bermejo, J. L., Sauck, W. A., and , Atekwana, E. A., 1997, Geophysical discovery of a new LNAPL plume at the former Wurtsmith AFB, Oscoda, Michigan: Ground Water Monitoring & Remediation, XVII, 131-137.
- Electrical Properties of Oil – Polluted Grounds Laboratory Measurements; Sergey I. Volkov, Aleksandr A. Gorbunov, Vladimir A. Shevnin. Moscow State University, Geological Faculty, Dept. of Geophysics, 119899 Moscow, Russia.
- Loke, M.H., 1999. Time-lapse resistivity imaging inversion. Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Eml.
- López Hidalgo, Andrés A., 2003: “La Tomografía Eléctrica como Herramienta de Diagnostico Ambiental Subsuperficial en la Industria del Petróleo y del Gas”, 5ª Jornadas de Preservación de Agua, Aire y Suelo en la Industria del Petróleo y del Gas, IAPG, Mendoza - Argentina.

- NEAR SURFACE GEOPHYSICS, 2003 , 157 – 160. Cone penetration logging for direct detection of LNAPLs contamination: Jiri Kvapil and Stanislav Mares. Charles University, Dept. of Applied Geophysics, Albertov 6,CZ – 1243, Pradia 2, Czeck Republic.
- Orellana, Ernesto(1972). Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid. España.
- Ramirez, A; Daily, W et al; “Detection of Leaks in Underground Storage Tanks Using Electrical Resistance Methods”; Journal of Environmental & Engineering Geophysics (JEEG); Vol 1; Nro3 (1996).
- S.A. Al Hagrey and Johannes Michaelson; “Resistivity and percolation study of preferential flow in vadose zone at Bokhorst, Germany”. Geophysics, Vol 64; NO. 3 (May-June 1999);P. 746-753, Figs., 3 Tables.
- Sauck, W. A., 2000, A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments: J. Appl. Geophys. 44, 151-165.
- Sauck, W. A., Atekwana, E. A., and Nash, M. S., 1998, High conductivities associated with an LNAPL plume imaged by Integrated geophysical techniques: J. Environ. Eng. Geophys., 2, 203-212.



## ANEXO A

### “Modelo de Resistividad para una Pluma Generada a partir de Derrames de HCs. (NLAPL)”

Para ilustrar desde el punto de vista “Geofísico” el fenómeno ocurrido debajo y dentro de un vertido de HCs., se incluye la traducción al castellano de un Artículo Científico vinculado estrechamente a la Investigación y Caracterización llevada a cabo con Geofísica en este trabajo.

**Journal of Applied Geophysics 44 (2000) 151-165**

#### **A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments**

(Un modelo de la estructura resistiva de plumas LNAPL y su entorno en sedimentos arenosos)

**William a. Sauck\***

**\*Institute for Water Sciences, Western Michigan University, Kalamazoo, MI 49008, USA**

#### **Resumen**

La caracterización Geofísica de una zona bajo investigación en áreas de derrame de petróleo han sido generalmente guiados por trabajos hipotéticos los cuales asumen que la Fase Líquida No Acuosa de Baja Densidad (Light non-aqueous Phase Liquids - LNAPL), es una fase totalmente saturada con una intrínsecamente muy alta resistividad eléctrica. Utilizando las observaciones de otras ciencias relacionadas, y contrarias a las observaciones geofísicas, se desarrolla un modelo diferente el cual trata esos derrames como dinámicos, cambiando el sistema y dominado por resistividades sorprendentemente bajas. La mayor respuesta Geofísica de un derrame “maduro” o establecido de este tipo, se debe a una zona anómala de resistividad baja en la parte inferior de la zona vadosa y la porción superior del acuífero. Esta zona es producida por una gran infiltración de los sólidos totalmente disueltos (TSD) los cuales son percolados en forma no periódica que fluyen hacia abajo desde el volumen de la mezcla íntima de hidrocarburos, agua, oxígeno y suelo cerca de la base de la Zona Vadosa donde la actividad microbiana es máxima.

Esta infiltración o precolación es el resultado de “acidificación” por ácidos orgánicos y ácidos carbónicos dentro de los capilares rellenos de agua en zonas heterogéneas mezcladas en niveles de productos residuales/libres, y es producido por la infiltración y desprendimiento de iones (sales) desde los granos de mineral nativo y el recubrimiento de los granos.

Esta pluma inorgánica conductiva es generalmente coincidente con la parte superior de la pluma de hidrocarburos anaeróbicos disueltos como los definidos por estudios hidroquímicos, pero es delgada y más concentrada en el techo del acuífero.

Esto ha sido detectado y mapeado en virtud de la amplitud amortiguada (ensombrecida) causada en los perfiles de Georadar y más recientemente por el uso de mediciones directas de perfilajes eléctricos de pozo con resistividad con lecturas cada 5.08 cm desde la superficie a más de 7.5 m de profundidad. Otros métodos geofísicos eléctricos de superficie (Tomografía Eléctrica, SEV, y Electromagnéticos) pueden definir esta zona sólo si las condiciones son óptimas. La zona conductiva ha sido conocida desde algunos años por hidroquímicos e hidrogeólogos, especialmente en lugares donde las muestras de agua son recolectadas por rejillas cortas (filtros) en pozos multinivel.

## Introducción

El trabajo descrito en este artículo comenzó en 1991, cuando este aparente “cambio” en varios sitios en el campo, donde los modelos geofísicos actuales para la respuesta Geoeléctrica eran defectuosos en Plumas de Petróleo crudo y productos refinados y sus alrededores.

Los trabajos de campo han sido hechos con Nuevos Métodos Geoeléctricos de superficie y nuevas sondas de resistividad del subsuelo sobre 2 plumas de hidrocarburos en una refinería abandonada ubicada al NW de Lansing y sobre 3 plumas de la ex base de la fuerza aérea de Wurtsmith al NE de Michigan.

## Previas Investigaciones Geofísicas de laboratorio

Se han hecho un número de excelentes experimentos controlados en escala de campo y de laboratorio. La mayoría de ellos apoyan el modelo intuitivo de una fase libre de alta resistividad (eg. Olhoeft, 1992; De Ryck y otros, 1993; Schneider y otros, 1993; Redman y otros, 1994; Endes y Greenhouse, 1996; Grumman y Daniels, 1996).

Sin embargo, Gajdos y Kral (1995) dieron a conocer un decrecimiento de la resistividad en un 20% con la adición de aproximadamente un 1% de petróleo crudo o un 1% de gasolina a la arena, y más de un 40% de decrecimiento para una cantidad similar de aceite lubricante. El decaimiento de la resistividad disminuía con el agregado de más HC y la resistividad retornaba a los valores iniciales después del 10% por el peso de HC que había sido agregado. Similarmente, Vanhala (1997) se notó que la resistividad decrecía en casi todas las muestras de arena y limos humedecidos con cualquier nuevo aceite lubricante o petróleo alterado. Sin embargo, él notó que el decrecimiento fue inicialmente máximo después de agregar el petróleo, pero que el efecto persistió hasta que alcanzó una cantidad de petróleo del 10 % por volumen.

El experimento sin HC usando sólo el agregado y drenaje de agua en columnas de laboratorio, Knigh (1991) descubrió un gran efecto de histéresis resistiva en las areniscas. La resistividad durante el remojo fue considerablemente mucho menor que durante el drenaje, alcanzando una diferencia máxima entre 60% y 70% de saturación, entonces repentinamente creció hasta igualar la curva de drenaje alrededor del 75% de saturación, y continuando hasta el 100%. Ese diferencial fue mas que un factor de dos. Así el significado del cambio en el contenido de agua de la zona vadosa, también pareció ser un mayor factor en la regulación de su resistividad absoluta.

## Previas observaciones Geofísicas de campo

La mayoría de las observaciones de campo usando los métodos de Georadar, Resistividad Eléctrica y Electromagnetismo, dan a conocer resultados que son contrarios a la mayoría de los resultados de los derrames controlados o de laboratorio (resistividad incrementada) los cuales usaron productos de hidrocarburo frescos en el contenido del medio ambiente. Las bajas resistividades observadas en el campo pueden inferirse a partir de los informes de una magnitud de reflexión de Georadar marcadamente reducida (Maxwell and Achmok, 1995).

Monier-Williams (1995) reportó una medición de resistividad más baja por inducción electromagnética próxima a los pozos con espesores de productos medibles. Interesantemente, él también elaboró 4 mecanismos por los cuales la resistividad del volumen decrecía y otros 4 por los cuales la resistividad de la masa se incrementaría en una zona LNAPL, pero ninguno de esos mecanismos involucraba la actividad microbiana. Sauck y Mc Neil (1994) notaron una caída en un orden de magnitudes en la resistividad aparente cuando el perfil de resistividad pasa sobre una pluma de productos libres de petróleo crudo.

En Wurtsmith AFB en el NE de Michigan, varios métodos eléctricos especialmente Georadar, mostraron anomalías de baja resistividad coincidentes con las plumas de productos combustibles residuales (Bermejo et al., 1997; Sauck et al., 1998a).

Más trabajos han sido hechos describiendo el comportamiento conductivo cerca de las plumas LNAPL en una refinería de Carson City, MI, refinery site (Atekwana et al., 1998) and at Wurtsmith (Sauck et al., 1998b).

## Observaciones biológicas, geoquímicas e hidrológicas

Los tres factores fundamentales o procesos relacionados a las propiedades y comportamientos de los productos de hidrocarburos en varias zonas del subsuelo parecen haber sido examinadas por varios geofísicos y practicantes de geofísica en estudios pasados sobre derrames de HC ligeros. Estos son en verdad a partir de otras disciplinas, pero la falta de diálogo multidisciplinario (MDD) ha disminuido claramente en el desempeño de los geofísicos en esta área. Estos tres factores claves, los cuales no se encuentran en la literatura geofísica, son estudiados de nuevo como sigue.

Productos de ácidos carbónico y orgánico durante la biodegradación.

Organismos capaces de degradar HC se presentan en gran número en suelos naturales y roca. Ridgeway y otros, (1990) identificaron más de 300 clases de bacterias degradantes de gasolina (combustible) de un acuífero costero contaminado superficialmente. Tales bacterias han sido encontradas en todos los niveles, desde la superficie a más de 300 m de profundidad en Carolina del Norte (Jones et al., 1989).

Los microorganismos en ambientes aeróbicos tienden a descomponer los HC más eficientemente, pero las bacterias anaerobias pueden también utilizar otros electrones “aceptadores”, principalmente nitrato, hierro férrico o sulfato (Borden, 1994). Los resultados de tales reacciones son CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, la forma reducida de los electrones “aceptadores”, energía de los microorganismos, calor y lo más importante para los geofísicos, ácidos orgánicos. Algunos de esos ácidos identificados en un estudio de un derrame de petróleo crudo cerca de Bemidji, MN, incluían ácidos benzoico, metilbenzoico, trimetilbenzoico, toluoico, ciclohexanoico y dimetilciclohexanoico (Baedecker y otros, 1987). Los ácidos orgánicos no son componentes originales del petróleo y no son detectados en aguas subterráneas oxigenadas fuera de la pluma (Cozzarelli y otros, 1990). El CO<sub>2</sub> se produce como un producto metabólico de los organismos combinados con el agua (H<sub>2</sub>O) y finalmente forma ácido carbónico. Nótese que la concentración de CO<sub>2</sub> en el suelo encima de un LNAPL experimenta una biodegradación que puede ser lejos más grande que la debida a la difusión normal de este gas desde la atmósfera. La presencia de los ácidos, con una reducción concomitante en el PH del suelo húmedo, conduce a los siguientes procesos químicos importantes.

#### **Disolución de sales de suelos nativos**

La reducción en el PH en soluciones acuosas en microlocalidades de biodegradación causa la infiltración de las sales solubles del recubrimiento de los granos en los sedimentos, así como también la infiltración agresiva en los mismos granos minerales. Las aguas de formación en la zona inmediata a la producción de ácidos se enriquece en sólidos disueltos. McMahon y otros (1995) dieron a conocer que las concentraciones de Calcio, Magnesio y Hierro fueron uno a dos ordenes de magnitud más grande que el valor de fondo en un lugar contaminado por HC cercano a Hanahan, SC.

Ellos también presentaron imágenes de microscopio electrónico de cuarzo altamente corroído y granos de ortoclasa. Cozzarelli y otros (1990) muestrearon una serie de pozos monitoreados a lo largo del eje longitudinal de la pluma derramada del oleoducto Bemidji, y fue posible mostrar la presencia de varios ácidos orgánicos en el agua subterránea, así como también un descenso en la concentración contaminante con el gradiente de distancia bajo la pluma disuelta. McMahon y Chapelle (1991) notaron la producción de ácidos orgánicos en arcillas y esquistos ricos en materia orgánica (pero no expuestos a derrames de HC) y corrosión vinculada a ácidos orgánicos que mejoran la porosidad secundaria, a menudo vistas en los contactos de arena/pizarras por los geólogos petroleros.

Benett y otros (1988) mostraron en el laboratorio la disolución de cuarzo enormemente enriquecida por ácidos orgánicos simples en sistemas acuosos. Hiebert y Benett (1992) bajaron cilindros de polietileno porosos (“microcosmos”) rellenos con fragmentos de cristal fresco de una mezcla de feldespato y cuarzo dentro de los pozos en el lugar del derrame de Bemidji. Ellos dejaron en la zona de filtro del pozo alrededor de 10cm debajo de la capa de petróleo durante 14 meses.

El resultado fue colonización bacterial y una “agresión” intensa de los feldespatos y una “agresión” ligera del cuarzo. Benett y otros (1993) incluyeron tablas de datos de conductancia específica de muestras de aguas subterránea de pozos multinivel bajo el derrame de Bemidji. Esos datos indican que las conductividades del agua aumentan en un factor de tres hacia arriba de la napa freática (base de la zona de productos libres). Ellos también proveen un corte transversal de la disolución total de sólidos (TDS) los cuales muestran claramente la pluma de infiltración inorgánica emanada de la zona de la zona de productos libres 8 años después del derrame.

El efecto inmediato de la disolución de los granos de mineral, es un incremento en la conductividad eléctrica del agua de los poros dentro y por debajo de la zona de biodegradación. Banaszak y Fenelon (1988) reportaron conductancias específicas anómalamente altas del agua de pozos contaminados con petróleo en la zona del acuífero de Calumet (IN), con muestras de tres de esos pozos excediendo los 2380 micro-siemens/cm (238 s/m).

En los años 1993-1994, la comunidad geoquímica ha trabajado en un modelo de los cambios químicos asociados con bioremediación intrínseca, y fue posible testear esto en varios lugares. Por ejemplo, Borden (1994) usó la reducción drástica de electrones aceptores (oxígeno, nitrato, sulfato y hierro férrico), así como también la producción de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y otros productos de la reacción como indicadores de bioremediación intrínseca activa en Rocky Point, NC.

Varios modelos geoquímicos incluyen diferencias específicas del lugar así también como diferencias de contaminación específica, pero en general incluyen frentes de reacción muy activa donde el agua rica en oxígeno (y otros electrones aceptores) se encuentran con la contaminación de hidrocarburos. Este es mas intenso en la proximidad o final del gradiente superior de la pluma disuelta, donde el agua del subsuelo oxigenada es entregada, así como también la superficie superior completa de la pluma disuelta donde el agua de lluvia infiltrada y oxigenada penetra al sistema.

Los costados, y hasta en la mas pequeña extensión, el fondo de la pluma disuelta está también en contacto con el agua subterránea oxigenada. La reacción en los límites laterales ha sido usada para explicar la observación de que tales plumas de hidrocarburos disueltos a menudo no parecen extenderse o difundirse lateralmente, pero permanecen como largas plumas estrechas.

Dentro de la pluma disuelta el oxígeno es rápidamente consumido, así el núcleo completo de la pluma disuelta de hidrocarburos queda en un estado anóxico, donde los procesos bacteriales anaeróbicos debería usar un poco menos eficientemente la reacción de nitratos, sulfatos y hierro férrico.

Lo significativo del Modelo Geoeléctrico es la coincidencia de la pluma de precolación inorgánica derivada de la reacción “con” el suelo nativo de los bioproductos ácidos orgánicos de la biodegradación. La geometría exacta de esa zona de alta conductividad no ha sido bien definida para la mayoría de las plumas y ello debería diferir ciertamente de un lugar a otro. Algunos hidroquímicos describen esto como un “halo” alrededor de la pluma disuelta mientras otros lo ven como una parte integral de la pluma de hidrocarburos disueltos. Sin embargo su presencia no tiene dudas.

Hasta este punto la discusión ha girado casi totalmente alrededor de la pluma de hidrocarburos disueltos ubicados por debajo de la pluma de productos de hidrocarburos libres. Sin embargo la LNAPL móvil y residual, sobre la napa freática es también una parte importante del sistema.

***Traducción: Lic. Andrés López Hidalgo<sup>1</sup>***