

CARACTERIZACIÓN DE ZONAS CONTAMINADAS POR DERRAMES RECIENTES DE HIDROCARBUROS MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS

Fabiana Elizabeth Robledo^{1,2} e Hilda Patricia Martinelli^{1,3}

¹Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Universitaria, Pabellón 1, Dto. de Física. 1428, Buenos Aires, Argentina.

²Con beca de la Universidad de Buenos Aires, UBACyT.

³IFIBA (Instituto de Física de Buenos Aires), CONICET.

robledo@df.uba.ar, pmartine@df.uba.ar.

RESUMEN

Los sistemas de inducción electromagnética multifrecuencial, formados por dos pequeñas espiras coplanares separadas entre sí una distancia fija (EMI, del inglés electromagnetic induction, o SLEM, del inglés small loop electromagnetic induction), son de gran utilidad para la prospección de las primeras decenas de metros del subsuelo y permiten detectar de manera rápida y eficiente una gran variedad de estructuras enterradas. Una de las espiras genera un campo magnético inductor conocido y la otra registra las variaciones del campo inducido mientras el sistema se va desplazando sobre el área estudiada, a lo largo de líneas de adquisición, generalmente paralelas entre sí. Usualmente, la interpretación se basa en la visualización directa de los gráficos en planta de los datos medidos a cada frecuencia. Además, para obtener información cuantitativa se aplican métodos de inversión 1D y luego, combinando esos resultados se obtienen imágenes del subsuelo 2D y 3D. Sin embargo, debido a la falta de correlación entre las inversiones 1D correspondientes a puntos vecinos, estas imágenes suelen presentar numerosas variaciones laterales espurias que dificultan la visualización de las estructuras de interés e inclusive pueden llegar a impedir su detección. La importancia de este problema generalmente es mayor cuando lo que se busca caracterizar son anomalías resistivas y cuando la relación señal-ruido es pobre.

En este trabajo se presentan los resultados de dos estudios EMI realizados en un sitio contaminado por un derrame de hidrocarburos. El primero tuvo lugar dos semanas después del derrame y el segundo tres meses después del primero, una vez comenzadas las tareas de remediación. En la segunda ocasión se adquirieron además tres líneas geoeléctricas dipolo-dipolo, para comparar. A los datos EMI se les aplicó un método de inversión 1D convencional, en combinación con técnicas novedosas de filtrado lateral que permitieron reducir notablemente las variaciones laterales espurias antes mencionadas. Aquí se propone, además, un método para estimar la profundidad real de investigación alcanzada en las prospecciones EMI, a través del cálculo de un índice que determina el grado de bondad del valor de conductividad eléctrica obtenido para cada punto del subsuelo. La aplicación de este método permitió confirmar que las profundidades de investigación alcanzadas en ambos casos, efectivamente, resultaron suficientes respecto del interés de los estudios. Se obtuvieron muy buenas caracterizaciones de la pluma contaminante que se evidenció como una zona resistiva claramente delimitada, que comenzaba algo por encima de la zona freática y se extendía hacia el interior de la misma. A partir del segundo estudio se detectó además una dispersión del volumen más contaminado, en la dirección del flujo hidráulico. Los resultados son consistentes con la información obtenida a partir de pozos freáticos realizados in situ.

Palabras clave: electromagnético, contaminación, hidrocarburo, derrame, geoeléctrico.

ABSTRACT

Multifrequency electromagnetic induction systems, composed by two small coils separated by a fixed distance (EMI or SLEM, EMI stands for frequency-domain electromagnetic induction and SLEM stands for small-loop frequency-domain electromagnetic induction), are very useful for the prospection of the first tens of meters of the subsoil, and can be employed to detect quickly and efficiently a great variety of buried structures. One coil generates a known inductive magnetic field and another detects the variations of the induced field as the whole system is displaced over the ground, along acquisition lines which are generally parallel to each other. Usually, these data are interpreted by direct visualization of the plan-views of the responses measured at each frequency. Besides, to obtain quantitative information, 1D inversion methods are applied and then, their results are stitched together to generate 2D and 3D images. However, due to the lack of correlation between the 1D inversion results corresponding to neighboring points, these images usually present numerous undesirable lateral effects that deteriorate the visualization of the target structures and even can prevent their detection. The importance of this problem is higher for studies of resistive electrical anomalies and with poor signal-to-noise ratio.

In this work, we present the results of two EMI studies carried out in a site contaminated by a recent hydrocarbon spill. The first one was performed two weeks after the spill and the second three months later, once the remediation works had started. The second time, three dipole-dipole geoelectric lines were also acquired, for comparison. We applied to the EMI data a conventional 1D inversion method, in combination with novel lateral filtering techniques that allowed for strongly reducing the spurious lateral variations previously mentioned. Besides, in this work we propose a method to estimate the real investigation depth achieved in EMI surveys, through the calculation of an index that determines the reliability of the electrical conductivity values obtained for each point of the subsoil. The application of this method confirmed that the depth of investigation achieved in both cases was effectively enough for the aim of the studies. We obtained quite good characterizations of the contaminant plume, which appeared as a clearly delimited resistive zone that began somewhat above the phreatic zone and continued toward its interior. From the second study, we also detected a spreading of the most contaminated volume in the direction of the hydraulic flow. The results are consistent with the information obtained from the monitoring wells performed in the site.

Keywords: electromagnetic, contamination, hydrocarbon, spill, geoelectric.

INTRODUCCIÓN

Entre las numerosas fuentes artificiales de contaminación de suelos y aguas subterráneas existentes, tienen gran relevancia las relacionadas con la explotación y el transporte de hidrocarburos. Como ejemplo podemos mencionar las pérdidas en tanques y tuberías subterráneas en instalaciones fijas, que van desde refinerías de petróleo hasta estaciones de servicio, y los derrames producidos como consecuencia de los siniestros en las rutas de los camiones de transporte. En este último caso particular, los hidrocarburos se vierten directamente sobre el suelo, de manera relativamente rápida. Para proteger la calidad de las napas de agua, es importante poder delimitar la zona afectada de la manera más rápida y completa posible, y realizar cuanto antes las tareas de remediación adecuadas, ya que al transcurrir el tiempo el hidrocarburo puede alcanzar el nivel freático y comenzar a fluir junto con el agua subterránea extendiendo la contaminación. La seriedad del problema se incrementa cuanto mayor es la porosidad del suelo y/o la cantidad de hidrocarburo derramado. La manera usual de estudiar las áreas afectadas por esta clase de derrames es mediante la realización de pozos freáticos, de los cuales se extraen muestras de suelo y agua a las que luego se le practican diversos análisis físico-químicos para medir su grado de contaminación (p. ej., Khan *et al.*, 2004). Estos análisis brindan información directa, que es precisa y confiable, pero sólo comprende los puntos donde se han realizado los pozos.

Por otra parte, existen varios métodos geofísicos bien conocidos que se emplean para obtener información indirecta sobre distintos parámetros físicos de los medios presentes en el subsuelo, en toda un área de interés, a partir de mediciones realizadas en superficie. En particular, los sistemas de inducción electromagnética multifrecuenciales, formados por dos pequeñas espiras coplanares separadas entre sí una distancia fija (EMI o SLEM) (McNeill, 1980; McNeill y Bosnar, 1999; Won *et al.*, 1996; Won, 2003), permiten estudiar principalmente la conductividad eléctrica del subsuelo, y en menor medida su susceptibilidad magnética, hasta algunas decenas de metros de profundidad. Una de las espiras genera un campo magnético inductor conocido, que oscila a una o más frecuencias determinadas, y la otra determina las componentes en fase (IP) y en cuadratura (Q) del campo inducido, conforme el instrumento se va desplazando sobre el área de interés, a una altura constante, a lo largo de líneas de medición generalmente paralelas entre sí. Estos equipos están entre los más utilizados para detectar minas y otros objetos metálicos enterrados (Miller *et al.*, 2001; Won *et al.*, 2001; Butler, 2004; Martinelli y Osella, 2010), y además, tienen numerosas aplicaciones ambientales como la detección de zonas contaminadas, la exploración de rellenos sanitarios y el monitoreo de la calidad de aguas subterráneas (Sheard *et al.*, 2005; Auken *et al.*, 2006; Mitsuata *et al.*, 2006; Martinelli y Duplaá, 2008; Coria *et al.*, 2009). También se los ha empleado con éxito para explorar sitios arqueológicos (Witten *et al.*, 2003; Osella *et al.*, 2005; Lascano *et al.*, 2006; Bongiovanni *et al.*, 2008). Una de sus principales ventajas es que como no requieren contacto directo con el suelo, permiten investigar áreas extensas, adquiriendo gran cantidad de datos (típicamente 10 por metro) en tiempos relativamente breves. En particular, las mediciones son mucho más rápidas que con el método Geoeléctrico, que posiblemente es el más utilizado para estudiar la conductividad eléctrica subsuperficial en los tipos de aplicaciones mencionados.

Los datos geoeléctricos se interpretan generalmente empleando métodos de inversión 2D (Oldenburg y Li, 1994; Loke y Barker, 1996a), e inclusive se usan métodos de inversión 3D (Li y Oldenburg, 2000; Loke y Barker, 1996b), aunque esto último requiere realizar un trabajo de campo mucho más extenso. En cambio, los datos EMI suelen interpretarse por visualización directa de los gráficos en planta de las componentes IP y Q medidas a cada frecuencia, o bien aplicando métodos de inversión 1D (Huang y Won, 2000; Farquharson *et al.*, 2003). Si bien existen algunos métodos de modelado directo e inverso 2D y 3D (Martinelli *et al.*, 2006; Sasaki y Meju, 2006; Newman y Alumbaugh, 1997; Pérez-Flores *et al.*, 2001; Haber *et al.*, 2004), el gran tiempo de cálculo que aún hoy en día demanda su uso, hace que los mismos continúen resultando totalmente imprácticos. Eso se debe, por un lado, a que la cantidad de datos a invertir usualmente es muy grande y por otro, a la complejidad numérica que requiere calcular con precisión la respuesta de modelos de tierra 2D y 3D a dipolos magnéticos. Los métodos de inversión 1D, en cambio, permiten obtener modelos aproximados, en tiempos sumamente accesibles.

Combinando los resultados de las inversiones 1D de los datos EMI, se generan imágenes 2D y 3D del subsuelo en las áreas prospectadas. En general, estas imágenes varían gradualmente con la profundidad, pero suelen presentar numerosas discontinuidades laterales debidas a efectos indeseados que impiden la correcta visualización de las estructuras de interés y, eventualmente pueden llegar a impedir su detección. Estas discontinuidades no representan cambios reales en las propiedades del suelo, sino que se deben a la falta de correlación entre las inversiones 1D correspondientes a puntos vecinos. La importancia del problema generalmente es mayor cuando lo que se busca caracterizar son anomalías resistivas

y/o cuando la relación señal-ruido es pobre. En 2008, Martinelli y Duplaá presentaron dos métodos de filtrado espacial 3D que permiten reducir dichas variaciones espurias en las imágenes del subsuelo, y los aplicaron a un estudio realizado en el terreno trasero de una industria agroquímica, con muy buenos resultados. Ambos filtros mejoraron fuertemente la calidad de las imágenes obtenidas, las cuales brindaron una excelente caracterización de una extensa anomalía conductora presente en uno de los sectores del terreno. Durante excavaciones posteriores realizadas en el marco de trabajos de remediación, se encontraron allí numerosos barriles metálicos que contenían restos de producción, enterrados a profundidades similares a las previstas (Martinelli y Duplaá, 2008). Asimismo, una adaptación 2D de esos filtros se empleó para mejorar la detección de anomalías conductoras más localizadas, producidas por tuberías y tanques metálicos enterrados (Martinelli y Osella, 2010).

Tanto los métodos mencionados (EMI y geoelectrónica), como otros métodos geofísicos eléctricos y electromagnéticos (polarización inducida, georadar), se han venido aplicando durante más de una década para estudiar sitios contaminados por hidrocarburos. Estos métodos brindan información que, si es combinada adecuadamente con la obtenida de las muestras tomadas en pozos y con información hidrogeológica, permite delimitar de manera bastante completa las plumas de contaminación y estimar su posible influencia sobre las aguas subterráneas. Sin embargo, uno de los principales problemas que se presentan a la hora de poder interpretar correctamente los resultados de los estudios geofísicos, es que la naturaleza de la respuesta del suelo frente a este tipo de contaminación es bastante compleja y además variable en el tiempo. Como los hidrocarburos son altamente resistivos, en zonas recientemente contaminadas, inicialmente, se espera encontrar anomalías resistivas, especialmente donde la contaminación alcanza el nivel freático. Luego de algún tiempo comienzan a aparecer anomalías conductoras y, finalmente, cuando la contaminación es madura (varios años), usualmente todas las anomalías asociadas a los volúmenes contaminados son conductoras. Esto último se comprobó en numerosos sitios, y las causas que llevan a este cambio en la tipología de las anomalías (básicamente relacionadas con distintos mecanismos de degradación de los hidrocarburos) están actualmente bastante bien identificadas (Cassidy *et al.*, 2001; Werkema *et al.*, 2003; Atekwana *et al.* 2004; Shevnin *et al.*, 2005; Atekwana y Atekwana, 2010).

Cabe señalar que el número de trabajos publicados presentando resultados de estudios geofísicos realizados en sitios con contaminación de origen reciente es notablemente menor que el correspondiente a casos de contaminación madura. Considerando esto, en este trabajo estudiamos una pluma contaminante ocasionada por el derrame de cerca de 16000 litros de nafta, producido luego del vuelco accidental de un camión cisterna. En el área realizamos dos prospecciones EMI, la primera dos semanas después del derrame y la segunda tres meses después de la primera, luego de comenzadas las tareas de remediación. Para adquirir los datos EMI utilizamos un equipo GEM-2 marca Geophex. La segunda vez también realizamos tres líneas geoelectrónicas dipolo-dipolo, empleando un equipo Saris 500 marca Scintrex. A los datos EMI se les aplicó un método de inversión 1D (Farquharson *et al.*, 2003) combinado con las técnicas de filtrado lateral 2D mencionadas previamente (Martinelli y Osella, 2010) que sirven para reducir las variaciones laterales espurias en las imágenes del subsuelo. Además, desarrollamos un método que permite estimar las profundidades reales de investigación alcanzadas en las prospecciones EMI, a través del cálculo de un índice que determina la confiabilidad del valor de conductividad eléctrica obtenido para cada punto del subsuelo, y lo

aplicamos para investigar si las profundidades de investigación alcanzadas en este caso resultaban suficientes respecto del interés de los estudios. Las líneas geoelectricas se invirtieron empleando un método de inversión 2D conocido (Loke y Barker, 1996a), y todos los resultados se compararon con la información obtenida a partir de varios freáticos instalados en el sitio. A continuación se realiza una breve descripción del lugar y luego se detallan la metodología empleada para los dos estudios geofísicos y los resultados obtenidos.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO Y DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Durante 2008, se produjo el vuelco de un camión cisterna que transportaba nafta en la Avenida de Circunvalación de Rosario. Por el impacto se rompieron dos de las cinco cisternas del camión, derramando alrededor de 16000 litros del hidrocarburo en la mano norte-sur de la avenida. Debido a la pendiente del terreno, la nafta derramada corrió por la cinta asfáltica aproximadamente 200m en dirección sur-norte, hasta encontrar un terreno plano donde comenzó a acumularse (Figura 1). En este lugar se encuentra una tapa de un conducto de desagüe pluvial subterráneo de 70cm de diámetro, que está enterrado a unos 4-5 metros de profundidad, cruza por debajo de la mano norte-sur de la avenida hasta llegar al cantero central de separación y por este alcanza, luego de recorrer dos kilómetros en dirección sur, un arroyo de la zona. Luego de unas horas del derrame, se cubrió la tapa mencionada para evitar que el hidrocarburo continuara ingresando al conducto de desagüe, y se succionó el hidrocarburo acumulado en el suelo. Posteriormente, se realizaron 12 pozos freáticos cuya ubicación se muestra en la Figura 1b.

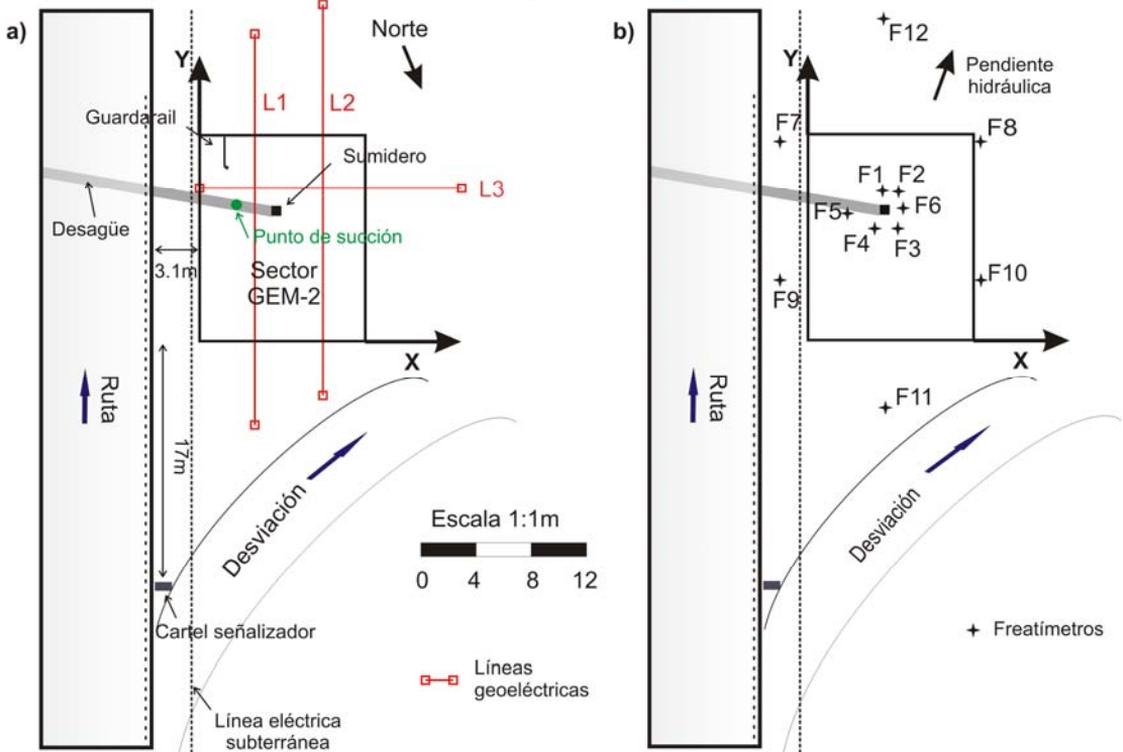


Figura 1. Plano esquemático del sitio donde muestran: a) el área de las prospecciones GEM-2 y la posición de las líneas geoelectricas; b) la ubicación de los freáticos.

Para estudiar el sitio se aplicó el método EMI; la segunda vez también se realizaron tres líneas geoelectricas. Los datos EMI se adquirieron utilizando un equipo GEM-2 marca Geophex y los geoelectricos empleando un equipo Saris 500 marca Scintrex. Con las prospecciones EMI se cubrió un área de 12mx15m, realizando líneas paralelas a la avenida, espaciadas 1m, con las espiras colocadas en posición horizontal y el eje del instrumento (línea que une los centros de las espiras) paralelo a la dirección de adquisición. Esta orientación del instrumento es la más usual. Las frecuencias de medición utilizadas: 47025, 30375, 20175, 13575, 8775 y 5825Hz, se seleccionaron teniendo en cuenta que las profundidades de interés en el estudio no superaban los 10m, ya que el nivel freático se encontraba a una profundidad estimada de entre 5 y 7m. Las líneas geoelectricas se realizaron empleando la configuración dipolo-dipolo. La distancia a entre los electrodos de corriente, y entre los de potencial, fue 1.5m para las líneas L1 y L2, y 1m para la L3. El valor máximo para la separación entre los electrodos B y M, na , fue $10a$.

RESULTADOS DEL PRIMER ESTUDIO GEOFISICO

Análisis de los Gráficos de los Datos EMI

Las figuras 2 y 3 muestran, respectivamente, las componentes IP y Q del campo inducido, medidas a cada frecuencia, durante el primer estudio. Como es usual, estos datos están dados en partes por millón (ppm) del campo primario. Puede apreciarse que el nivel de ruido electromagnético es relativamente elevado. Esto era esperable considerando que se trabajó en una zona urbana y que inclusive había tendidos eléctricos cercanos. La mala relación señal ruido se manifiesta en los gráficos mediante oscilaciones de corta escala en la dirección de adquisición de datos. Como se ve, el nivel de ruido en general aumenta al disminuir la frecuencia y es bastante mayor para la componente IP .

La anomalía observada en la parte superior izquierda en todos los gráficos es una distorsión producida por el guardarail metálico. Asimismo, en los gráficos correspondientes a las frecuencias mayores se aprecia una anomalía prácticamente paralela a la desviación de salida de la avenida y que podría estar relacionada, por ejemplo, con alguna tubería o cableado subterráneo. A lo largo de $x=3m$, aproximadamente, hay otra anomalía recta que también podría deberse a algún tendido subterráneo, en este caso paralelo a la avenida. Por otra parte, sobre la cámara de desagüe que mayormente contenía aire, efectivamente, se observa una disminución de los valores de Q e IP . El efecto es más extendido para la componente IP . Más allá de todas estas distorsiones, debidas al carácter urbano del sitio, la zona del subsuelo posiblemente contaminada se aprecia claramente en los gráficos de la componente Q (no así en los de IP), mediante un aumento de esta componente que se da desde $x=0m$ hasta valores de x que oscilan entre 5 y 8m, aproximadamente, dependiendo de y . La región más contaminada sería la que rodea a la boca de desagüe.

Filtrado Lateral de los Datos EMI

En la introducción se mencionaron los métodos de filtrado espacial 2D y 3D (Martinelli y Osella, 2010; Martinelli y Duplaá, 2008, respectivamente) diseñados para reducir las variaciones laterales espurias en las imágenes del subsuelo obtenidas al aplicar métodos de inversión 1D. En cada caso, se implementaron dos filtros, uno que se aplica a los datos antes de invertirlos y otro análogo, pero que se aplica directamente a los modelos inversos

obtenidos de los datos sin filtrar. Si bien ambos procedimientos brindan resultados similares respecto del nivel de mejora obtenido en la calidad de las imágenes, el primero permite

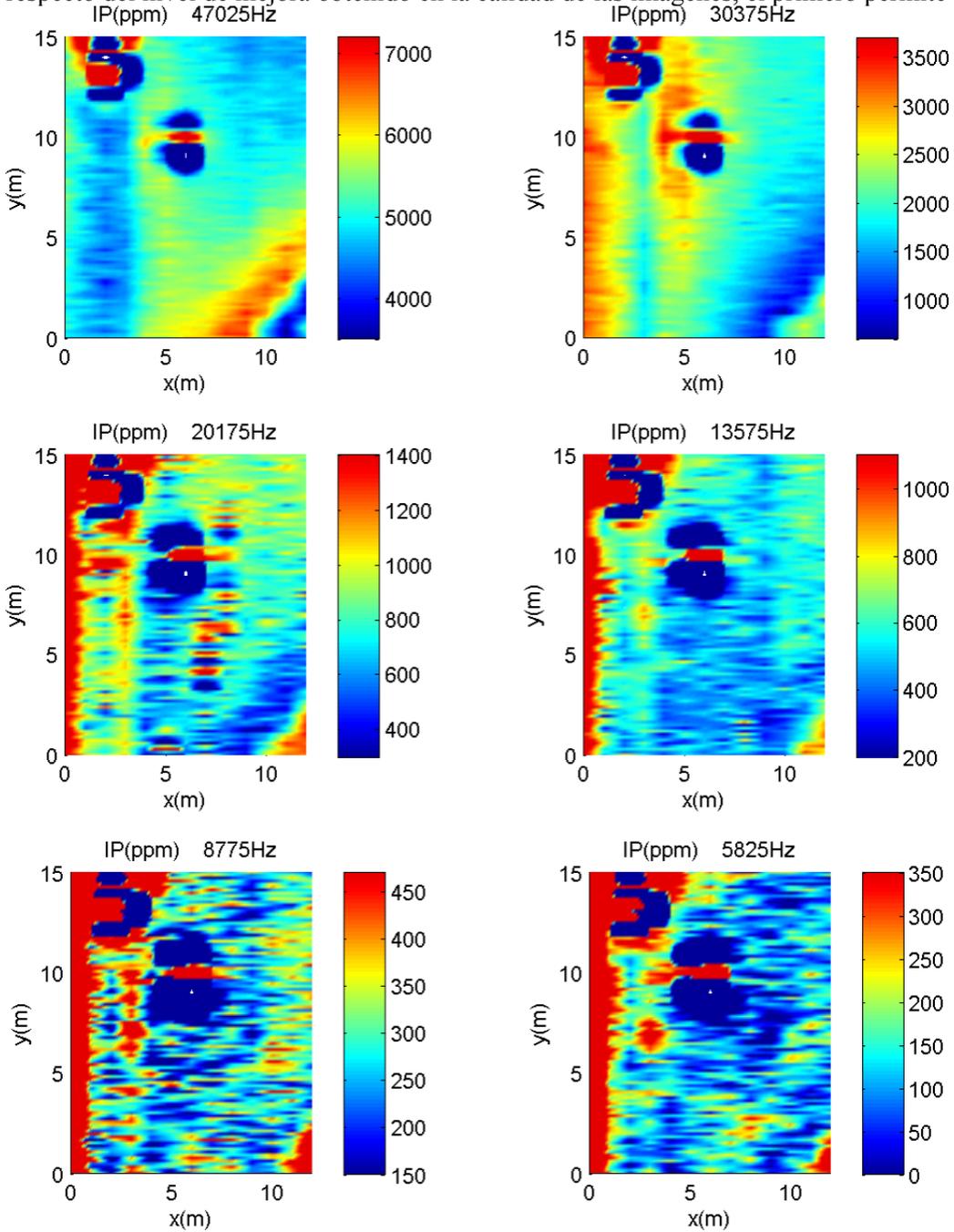


Figura 2. Gráficos de las componentes en fase medidas a cada frecuencia, durante el primer estudio, en partes por millón del campo primario.

además reducir el efecto del ruido en los gráficos de los datos y mejorar la visualización de las anomalías asociadas a cambios reales en las propiedades del subsuelo. Debe tenerse en cuenta que el método 3D es aplicable cuando se tiene una malla de puntos de medición equiespaciados en las direcciones x e y . En cambio, el método 2D sirve para prospecciones realizadas de la manera usual, es decir con el instrumento funcionando en su modo continuo de adquisición. En estos casos, que incluyen los presentados aquí, la distancia entre los puntos de medición a la largo de cada línea (típicamente 10cm) suele ser bastante menor que la distancia entre las líneas.

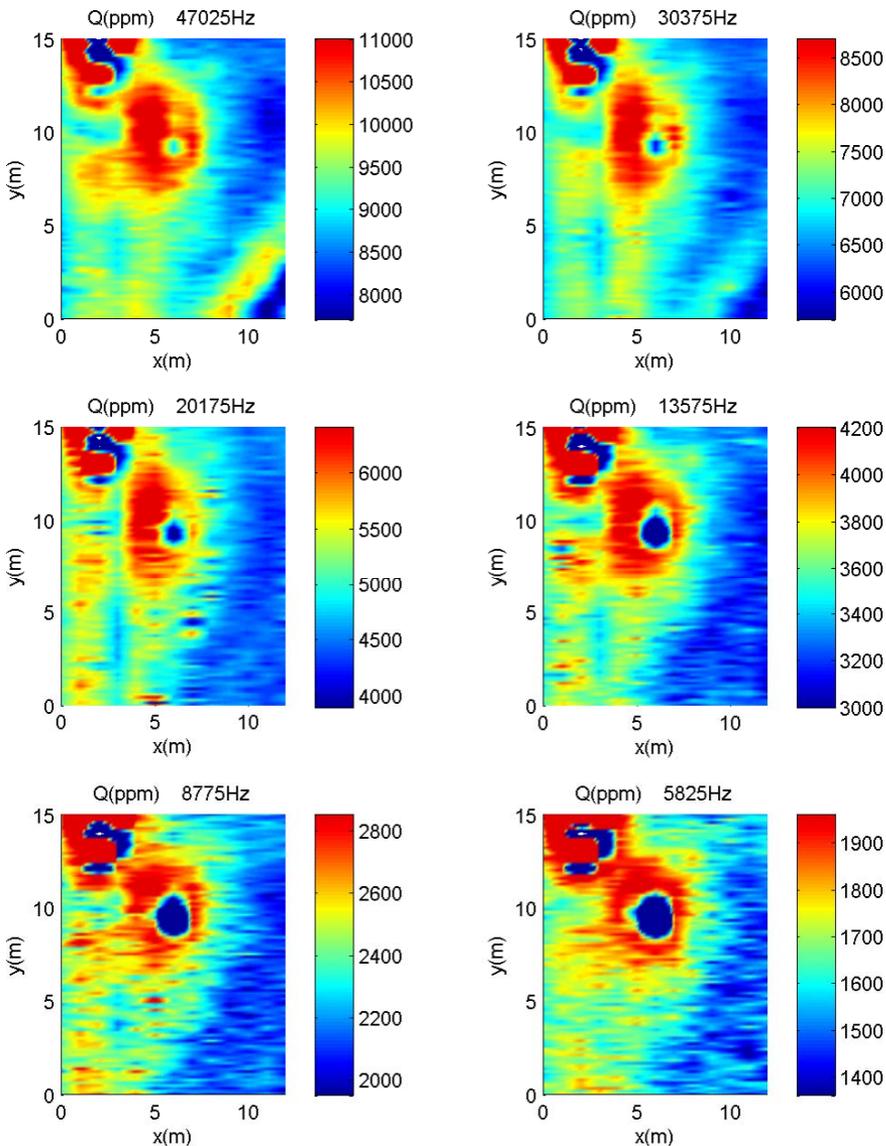


Figura 3. Gráficos de las componentes en cuadratura medidas a cada frecuencia, durante el primer estudio, en partes por millón del campo primario.

A los datos se le aplicó entonces el método de filtrado 2D definido por la ecuación (1) en Martinelli y Osella (2010), el cual se describe brevemente a continuación.

Si $C_{i,j,k}^{(0)}$ es la componente IP o Q medida en el punto i de la línea j , a la frecuencia f_k , entonces, esa misma componente luego de l aplicaciones sucesivas del filtro, $C_{i,j,k}^{(l)}$, estará dada por el siguiente promedio ponderado:

$$C_{i,j,k}^{(l+1)} = \left[\sum_{0 \leq n \leq N} \frac{(C_{i-n,j,k}^{(l)} + C_{i+n,j,k}^{(l)})}{2\alpha^n} \right] \left[\sum_{0 \leq n \leq N} \alpha^{-n} \right]^{-1} \quad (1)$$

Donde n es un número natural o 0, α es un número real mayor que 1 que controla como decrece el peso relativo de los vecinos cuando n aumenta, y N determina el número de vecinos considerados. α , N y el número de aplicaciones sucesivas del filtro pueden variarse hasta obtener resultados satisfactorios. Los mejores valores para estos parámetros dependerán de cada caso particular, pero la idea general es reducir tanto como sea posible las variaciones de pequeña escala asociadas al ruido, sin producir una pérdida apreciable de resolución lateral.

Como ejemplo, mostramos los resultados obtenidos para la componente Q , que es la más sensible a la presencia del contaminante. Con $\alpha=2$ y $N=5$, aplicando el filtro 3 veces ya se obtienen muy buenos resultados, según puede verse en la Figura 4.

Luego de aplicar el filtro 6 veces, también con $\alpha=2$ y $N=5$ (Figura 5), las anomalías asociadas al contaminante continúan siendo evidentes, mientras que las oscilaciones de corta escala atribuibles al ruido han sido eliminadas casi en su totalidad. Finalmente, comparando las Figuras 5 y 6 puede apreciarse como dependen los resultados del número de vecinos considerados.

Inversión 1D de los Datos EMI

Para las inversiones utilizamos el método EM1DFM desarrollado por la “Geophysical Inversion Facility” de la “University of British Columbia” (UBC-GIF), basado en el trabajo de Farquharson et al. (2003), y para combinar esos resultados y generar imágenes del subsuelo 3D usamos un software de desarrollo propio. Invertimos las componentes IP y Q medidas, y las filtradas 3 y 6 veces, juntas y por separado. El mejor resultado se obtuvo de la inversión de la componente Q filtrada 6 veces, por separado. Esto es lógico, considerando que dicha componente es la más sensible al contaminante y que luego de filtrada 6 veces prácticamente no presenta oscilaciones espurias de corta escala. En la Figura 7 se muestran los cortes de este modelo a lo largo de las líneas de prospección y en la Figura 8 los cortes del mismo a distintas profundidades. La Figura 9 muestra el error porcentual del ajuste, que se calculó de la manera usual, empleando la fórmula:

$$Error_{i,j} = 100 \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} \left(\frac{Q_{i,j,k} - Q_{i,j,k}^P}{Q_{i,j,k}} \right)^2} \quad (2)$$

Donde $Q_{i,j,k}$ y $Q_{i,j,k}^P$ son las componentes en cuadratura medidas y predichas por el modelado, respectivamente, en el punto de medición i , de la línea j , a la frecuencia f_k . N_f es el número total de frecuencias, en este caso 6. Como puede apreciarse, el ajuste fue en su

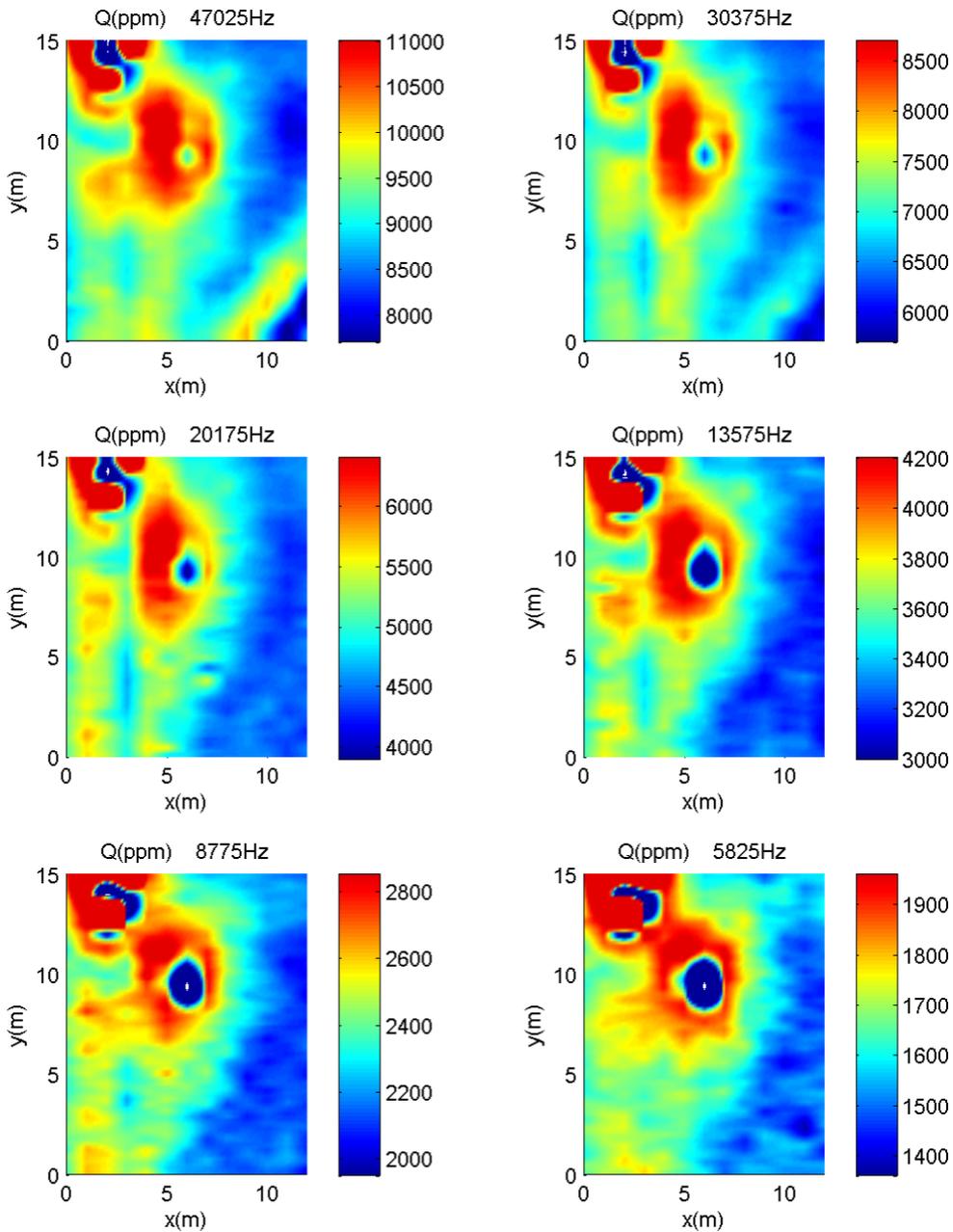


Figura 4. Componentes Q obtenidas luego de aplicar a las componentes Q medidas (Figura 3) el filtro espacial propuesto en Martinelli y Osella (2010), tres veces, con $\alpha=2$ y $N=5$.

mayoría bastante bueno, salvo en la zona donde los datos estaban distorsionados por la presencia del guardrail y sobre la boca de desagüe, posiblemente debido a que la misma era una estructura 3D muy localizada y de alto contraste con el medio circundante.

En general, se observa una capa superficial resistiva de 1.5-2m de espesor, debajo de ella una capa más conductora que llega aproximadamente hasta 5-5.5m de profundidad y finalmente, un nuevo incremento de la resistividad para profundidades mayores. De acuerdo

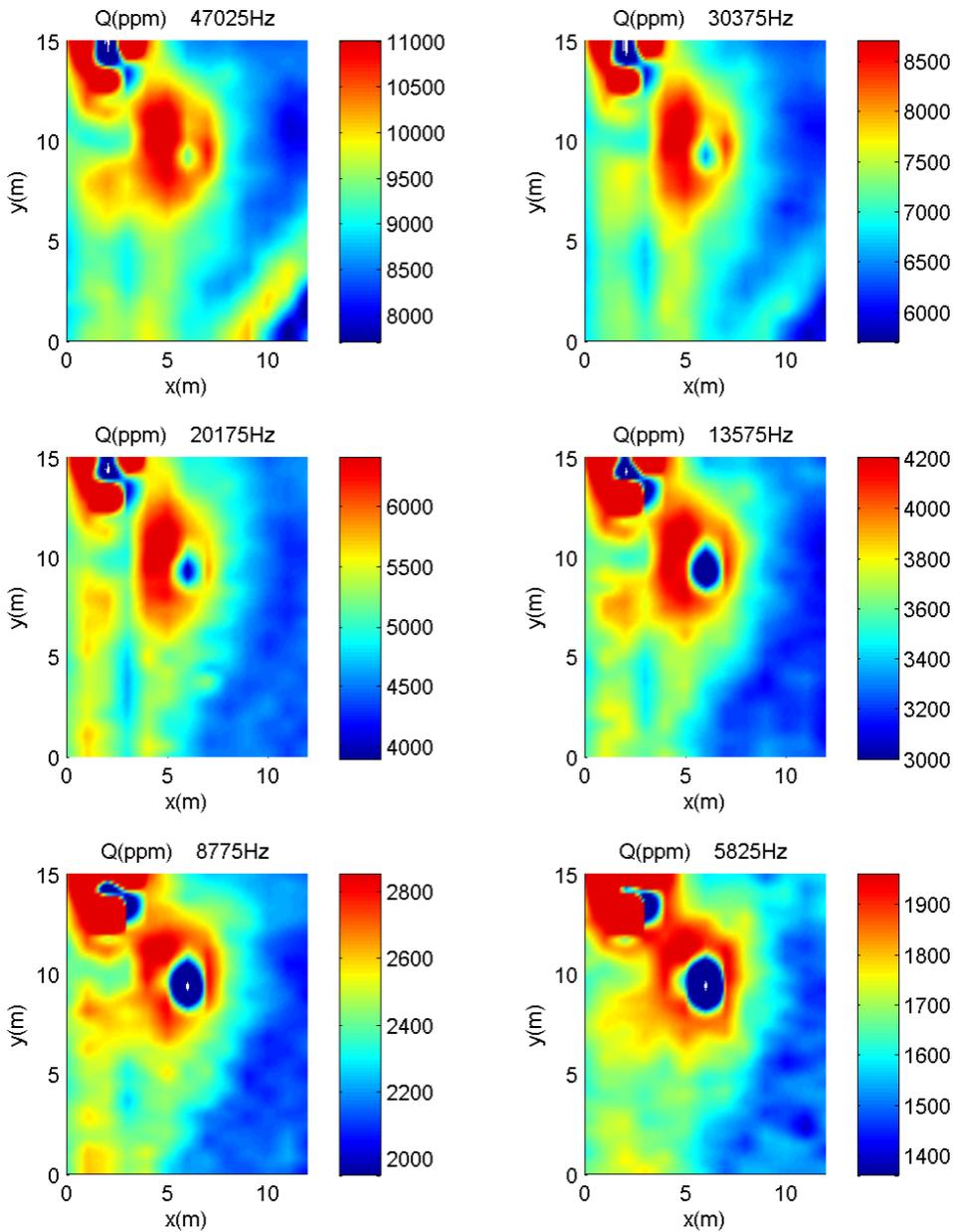


Figura 5. Componentes Q obtenidas luego de aplicar a las componentes Q medidas (Figura 3) el mismo filtro que en la Figura 4, seis veces, con $\alpha=2$ y $N=5$.

con esto, el nivel freático estaría a una profundidad de entre 5.5 y 6m. De la Figura 7 se ve que en todas las líneas correspondientes a $x \leq 7m$, la zona freática presenta anomalías resistivas que pueden asociarse a la presencia de contaminación. Las más importantes corresponden a valores de $x=4$ y $5m$. Para $x > 7m$, prácticamente no se detecta contaminación. Las anomalías resistivas observadas en estas líneas para valores de y entre 0 y 4m están asociadas al posible tendido subterráneo paralelo a la desviación de salida de la

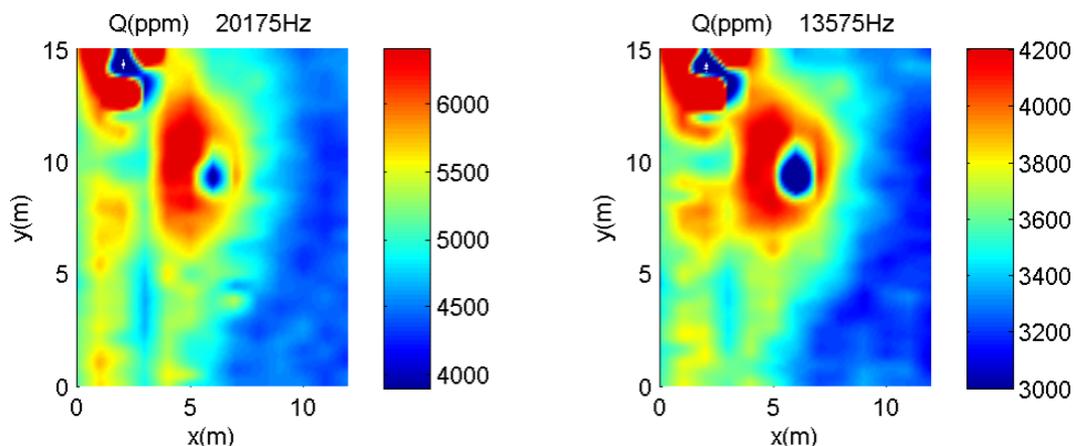


Figura 6. Lo mismo que en la Figura 5 pero tomando $N=3$ para el filtrado, a las frecuencias 20175Hz y 13575Hz.

avenida, mencionado previamente. Según puede observarse en las Figuras 8 (a), (b) y (c), el contaminante no produjo anomalías demasiado importantes en la capa resistiva superior. Esto era esperable, considerando que allí la nafta simplemente reemplazó parte del aire contenido en los poros de los sedimentos y ambos elementos tienen muy alta resistividad. Desde la Figura 8 (d) en adelante, en la zona contigua a la cámara de desagüe se detecta una marcada anomalía resistiva. Por último, al igual que en la Figura 7, el incremento en la resistividad de la napa freática hasta $x=6-7$ m resulta evidente. Todo esto es consistente con lo obtenido de los freatómetros. F1-F4 y F6 presentaron los más altos niveles de contaminación, tanto en las muestras de suelo como en las de agua, con presencia de una capa sobrenadante; F5 y F7 presentaron niveles de contaminación menores, y en el resto no hubo contaminación detectable.

En la figura 10 mostramos, a manera de ejemplo, tres cortes del modelo obtenido al invertir la componente Q sin filtrar. Anteriormente habíamos mostrado las mejoras introducidas por el filtrado en los gráficos de la componente Q ; comparando la Figura 10 con la 7 se aprecian las mejoras que introduce en las imágenes del subsuelo.

Método Para Estimar la Profundidad de Investigación de las Prospecciones EMI

Este método se desarrolló en base a lo propuesto por Oldenburg y Li (1999) para geoeléctrica y polarización inducida. La idea es relativamente sencilla. En general, las partes más fiables de los modelos obtenidos al aplicar cualquier método de inversión son aquellas que menos dependen de los parámetros iniciales seleccionados. En el caso de métodos que modelan la resistividad (o conductividad) eléctrica del subsuelo, entre sus parámetros se encuentran las resistividades de los modelos de referencia iniciales. Supongamos que ρ_1 y ρ_2 son las resistividades obtenidas para un punto del subsuelo al realizar dos inversiones partiendo de dos modelos de referencia iniciales uniformes, distintos, de resistividades ρ_{ref1} y ρ_{ref2} respectivamente, sin cambiar el resto de los parámetros iniciales. Entonces, el índice DOI (del inglés, Depth of Investigation) se define de la siguiente manera (Oldenburg y Li, 1999, ec. 2):

$$DOI = \left| \frac{\log(\rho_1) - \log(\rho_2)}{\log(\rho_{ref1}) - \log(\rho_{ref2})} \right| \quad (3)$$

Mediante este índice se puede medir de manera concreta el grado de bondad de los modelos en cada punto del subsuelo. La confiabilidad es mayor cuanto menor es el DOI. En general, el valor de este índice varía entre 0 y 1, y aumenta con la profundidad.

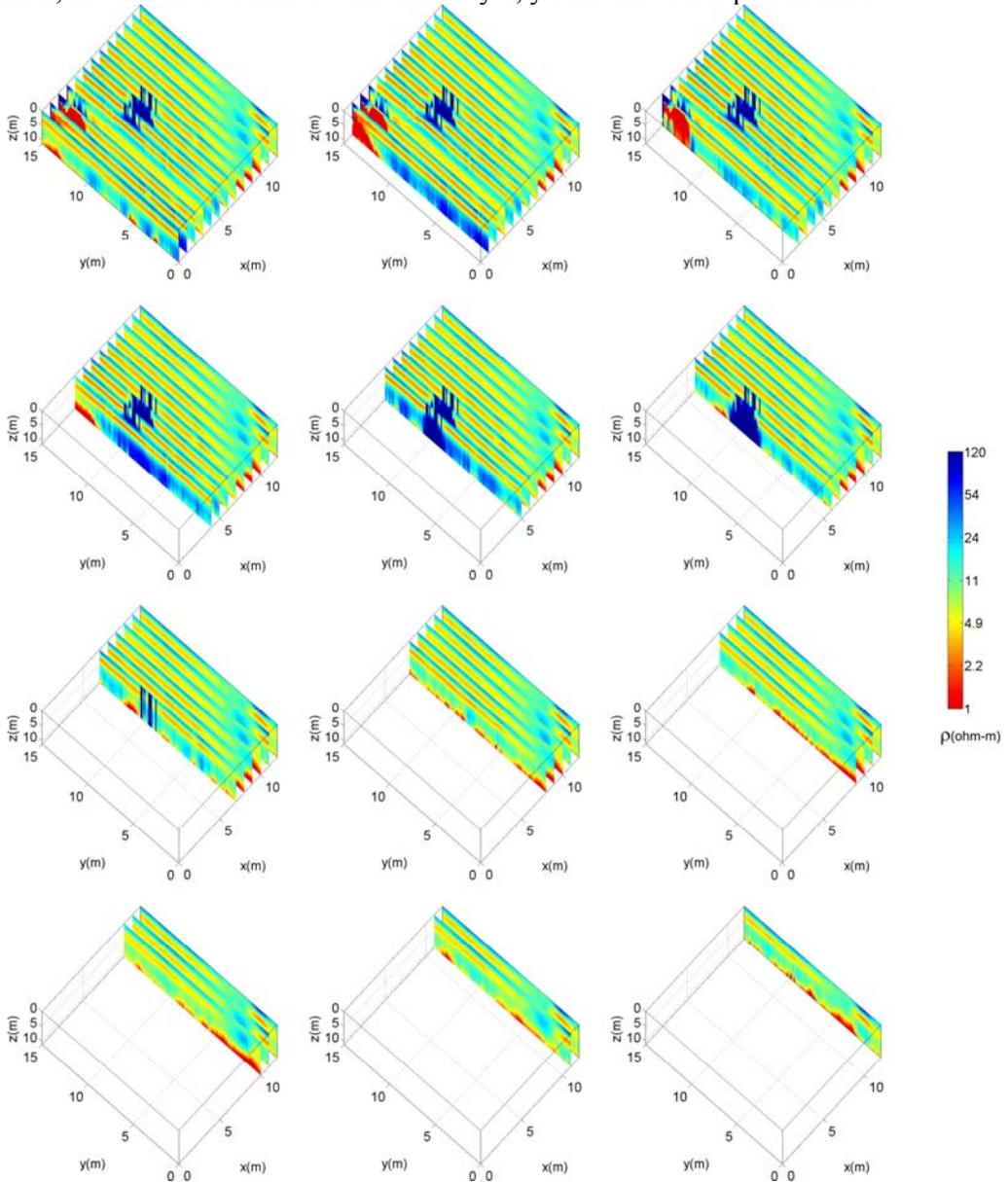


Figura 7. Vistas a lo largo de las líneas de adquisición del modelo obtenido de la inversión 1D de la componente Q filtrada 6 veces (Figura 5), realizada utilizando el método EM1DFM (Farquharson et al., 2003).

Los resultados se consideran fiables sólo para aquellas profundidades en las que el DOI no supera un valor máximo definido a priori. La profundidad de investigación alcanzada en cada punto de medición se define entonces como la profundidad a la cual el DOI llega a ese valor máximo. En el caso de geoelectrónica, los valores máximos del DOI comúnmente aceptados están entre 0.3 y 0.4. Para profundidades grandes, que justamente superan la profundidad de penetración alcanzada con los equipos, los resultados de las inversiones se van acercando al valor elegido para el modelo de referencia inicial, y por lo tanto el DOI tiende a 1.

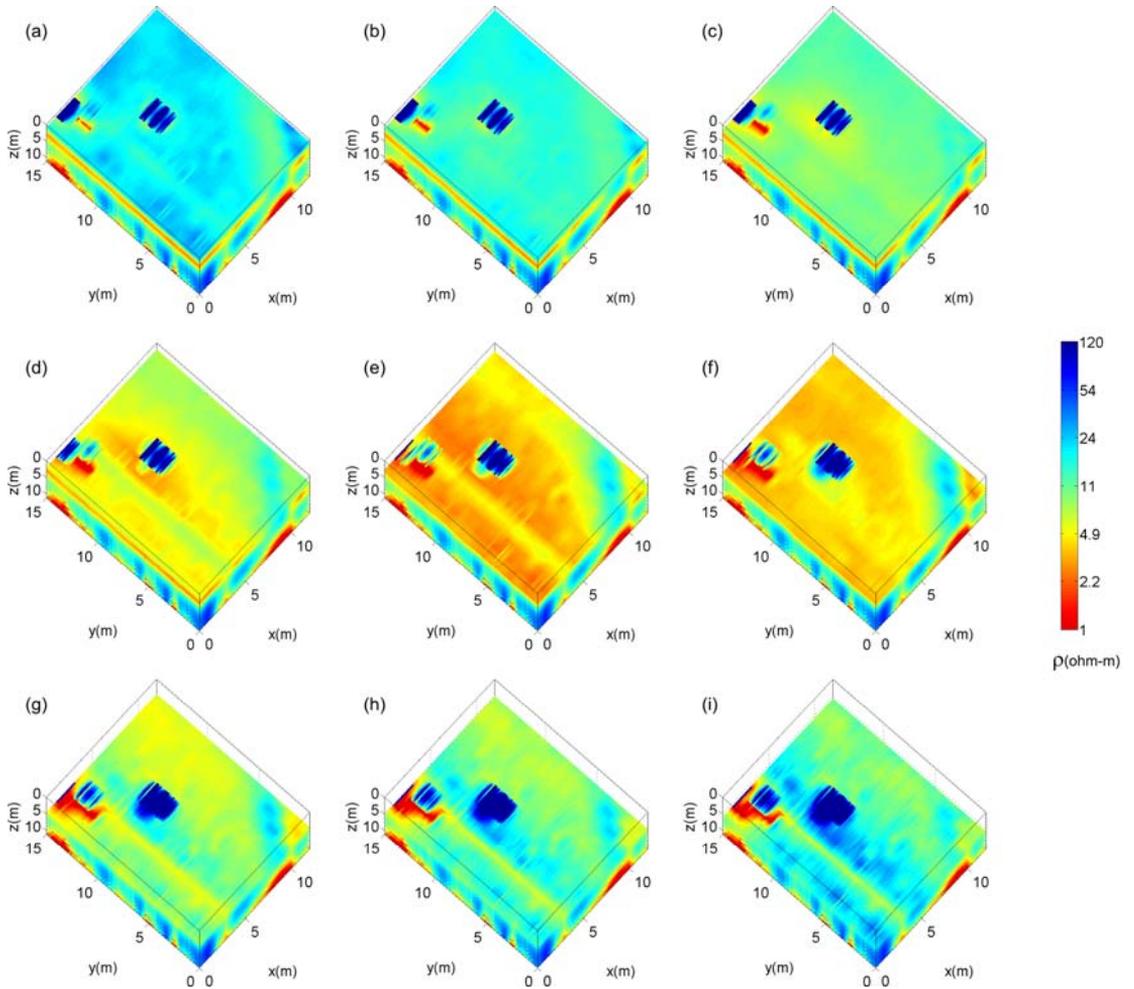


Figura 8. Cortes a distintas profundidades del modelo mostrado en la Figura 7.

El modelo mostrado en las Figuras 7 y 8 se obtuvo considerando una resistividad de referencia inicial $\rho_{ref1}=20\text{ohm-m}$. El DOI correspondiente a este modelo se calculó empleando la metodología descrita recién. La resistividad de referencia inicial seleccionada para la segunda inversión fue $\rho_{ref2}=10\text{ohm-m}$. El resultado obtenido se muestra en la Figura 11. La profundidad de investigación alcanzada, en promedio, fue cercana a los 8m.

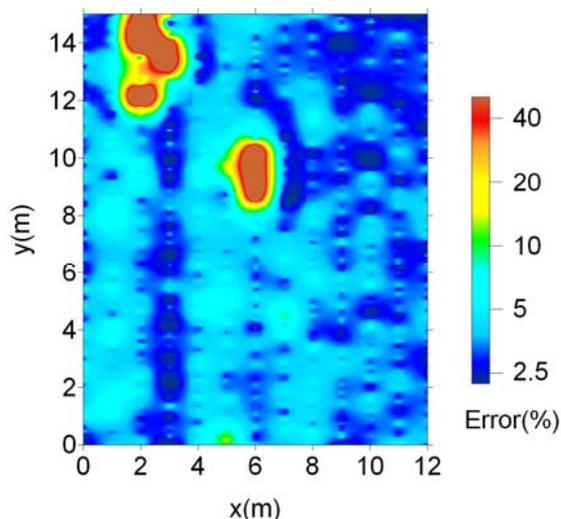


Figura 9. Error del ajuste para el modelo mostrado en las Figuras 7 y 8, definido por la ecuación 2.

RESULTADOS DEL SEGUNDO ESTUDIO GEOFISICO

Como se indico anteriormente, tres meses y medio después del derrame realizamos en el lugar una segunda prospección EMI, junto con algunas líneas geoelectricas dipolo-dipolo. Dos meses antes se habían realizado en el sector contaminado tareas preliminares de remediación que comprendieron el movimiento manual del suelo para su tratamiento de estabilización-oxidación con la incorporación de óxido de calcio calidad industrial y peróxido de hidrógeno, la nivelación del pH con la incorporación de material orgánico Sphag Team, y la bioestimulación mediante riego enzimático con el producto Fyrezyme.

En la Figura 12 mostramos los gráficos obtenidos luego de filtrar 6 veces la componente Q medida, empleando los mismos valores de α y N que la primera vez. Como era de esperarse a consecuencia del procedimiento de remediación, en general, se observan anomalías bastante más irregulares que la vez anterior (Figura 5). Sin embargo, lo más importante es que el método permitió detectar claramente que se había producido una migración del área más contaminada (la contigua a la cámara de desagüe) en la dirección del flujo hidráulico (indicada en la Figura 1b).

En la Figura 13 se muestra la imagen del subsuelo obtenida de la inversión de esa componente. Si bien este modelo también presenta un carácter más irregular que el obtenido la primera vez (Figura 8), el mismo permite apreciar la migración del volumen más contaminado en la dirección del flujo hidráulico. Además, observando los tres gráficos inferiores se ve que, en promedio, las diferencias entre los valores de resistividad de la zona de saturación obtenidos para $x \leq 3\text{m}$ y $x \geq 6-7\text{m}$ se redujeron, posiblemente debido a las tareas de remediación realizadas. Las líneas que en general continúan presentando más anomalías resistivas en la zona de saturación siguen siendo las correspondientes a $x=4$ y 5m . Tanto el error del ajuste como las profundidades de investigación alcanzadas resultaron similares a las del primer estudio.

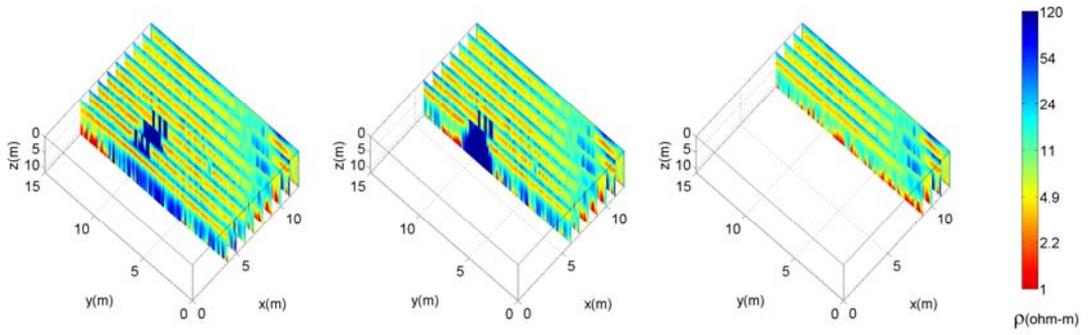


Figura 10. Vistas a lo largo de algunas líneas de adquisición del modelo obtenido aplicando el mismo método de inversión, pero a las componentes Q medidas (Figura 3).

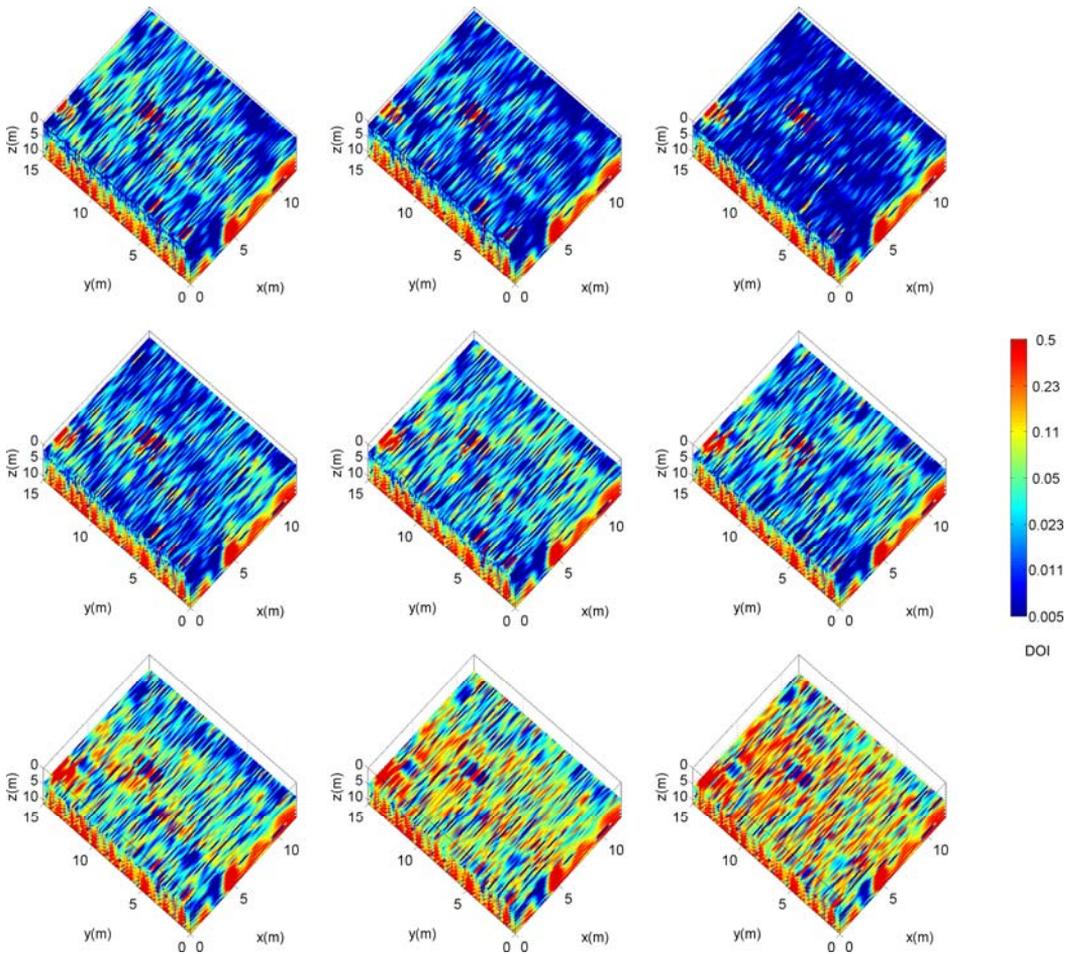


Figura 11. Valores del parámetro DOI correspondientes a las secciones mostradas en la Figura 8.

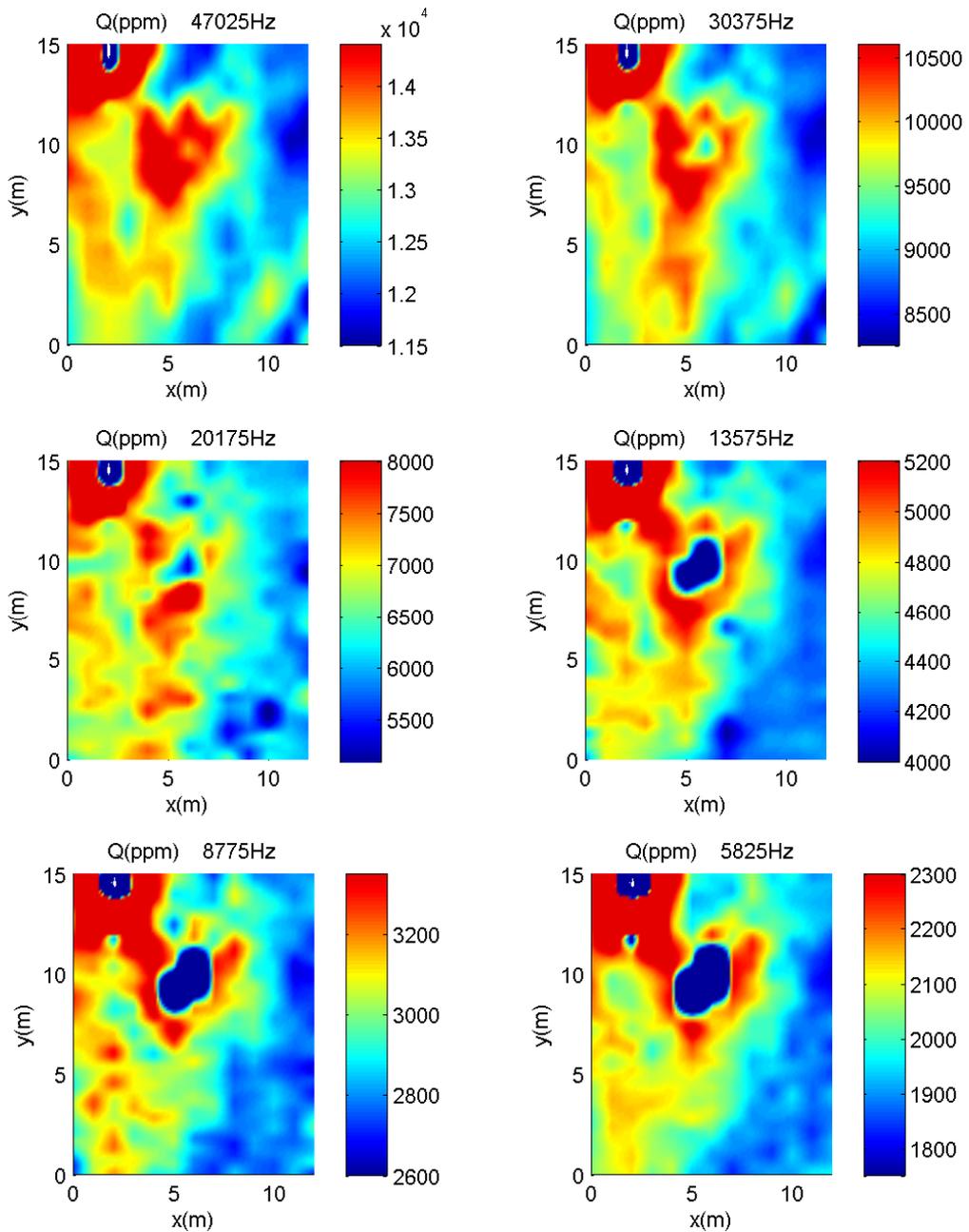


Figura 12. Componentes Q obtenidas luego de filtrar las componentes Q medidas durante el segundo estudio, 6 veces, con $\alpha=2$ y $N=5$.

Por último, en la Figura 14 se muestran las imágenes obtenidas de las inversiones 2D de las líneas dipolo-dipolo, realizadas con el método RES2DINV (Loke y Barker, 1996a). Los resultados son consistentes con lo obtenido por el método EMI. En todas las líneas se observan bastantes inhomogeneidades, tanto laterales como en profundidad, relacionadas con

las tareas de remediación realizadas. Las más importantes corresponden a la línea L1, que justamente está localizada dentro del área contaminada. Entre $z=2$ y 4m , aproximadamente, esta línea presenta una conductividad bastante mayor que L2, aunque con interrupciones. Este incremento de conductividad tendría su origen en los procesos disparados por la actividad de los materiales incorporados. Además, para $z>4\text{m}$, en L1 se observa una anomalía resistiva que no está presente en L2.

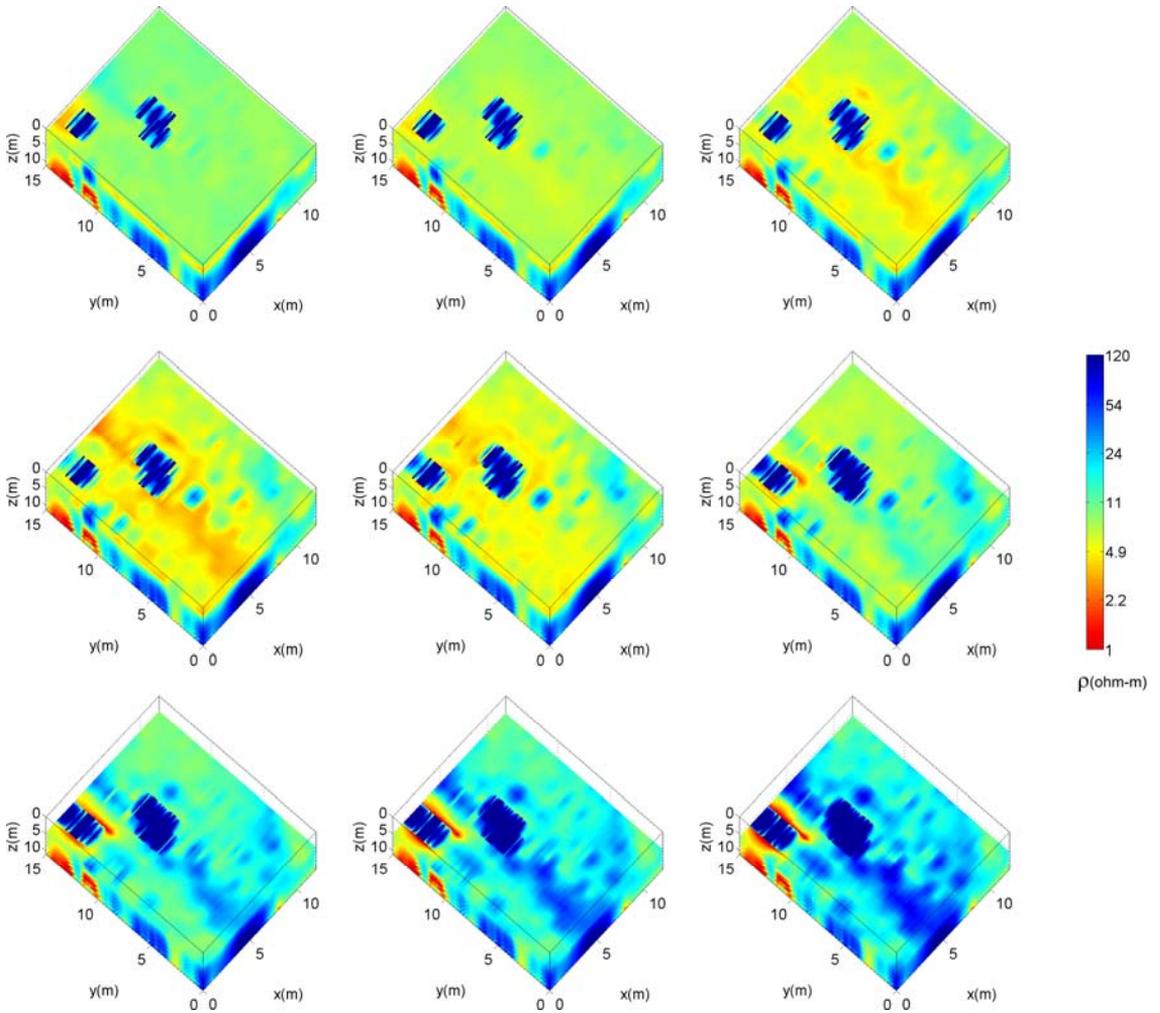


Figura 13. Cortes a distintas profundidades de la imagen del subsuelo obtenida de la inversión 1D de las componentes Q mostradas en la Figura 12.

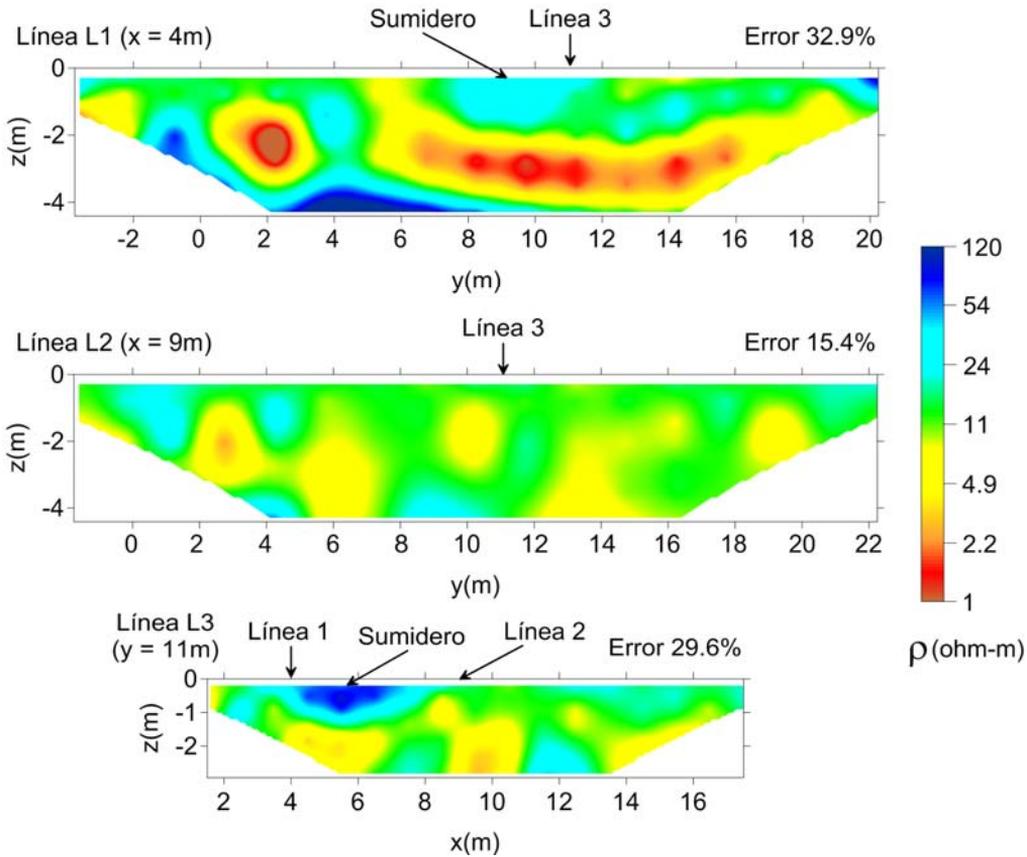


Figura 14. Imágenes obtenidas de las inversiones 2D de las líneas geoelectricas dipolo-dipolo realizadas empleando el método RES2DINV (Loke y Barker, 1996a).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los resultados de dos estudios EMI realizados en un sitio con contaminación reciente por hidrocarburos, producida por un derrame de nafta que tuvo lugar dos semanas antes del primer estudio. El segundo estudio se realizó tres meses después del primero, una vez comenzadas las tareas de remediación, e incluyó además algunas líneas geoelectricas dipolo-dipolo para comparación.

En general, se han publicado numerosos trabajos en los que se aplican métodos eléctricos y electromagnéticos para estudiar sitios contaminados por hidrocarburos, pero la mayoría de ellos corresponden a casos donde la contaminación es madura (data de varios años o inclusive décadas). En estos casos, la aplicación de esos métodos geofísicos suele dar muy buenos resultados, ya que las anomalías a detectar son en su mayoría conductoras. El caso presentado aquí era más complejo porque, como la contaminación era reciente, las anomalías a investigar no eran conductoras sino principalmente resistivas, y además, como se trataba de un sitio urbano, los datos presentaban un nivel de ruido relativamente elevado, especialmente la componente en fase. Sin embargo, mediante la aplicación de una técnica de filtrado lateral que hemos desarrollado recientemente, pudimos atenuar en gran medida los efectos del ruido

en los gráficos de las componentes en fase y en cuadratura, a todas las frecuencias. Un hecho interesante, comprobado en ambas ocasiones, fue que la componente IP prácticamente no tenía sensibilidad a la presencia del contaminante, mientras que la componente Q detectaba claramente el área contaminada, más aún luego del filtrado.

Como se indicó, para invertir los datos EMI se aplican métodos 1D y luego, empalmado esos resultados se generan imágenes del subsuelo 2D o 3D. Debido a este procedimiento, estas imágenes suelen presentar numerosas discontinuidades laterales espurias que no se corresponden con cambios reales en la conductividad del subsuelo, y que justamente son más importantes cuanto mayor es el nivel de ruido. El filtrado de los datos previo a las inversiones también permite reducir fuertemente estas variaciones espurias en los modelos y consecuentemente mejora la visualización de las anomalías de interés. En nuestro caso, a partir de la inversión de la componente Q filtrada adecuadamente, las dos veces, obtuvimos muy buenas caracterizaciones de la pluma contaminante, que se evidenciaba como una zona resistiva claramente delimitada, que comenzaba algo por encima de la zona freática y se extendía hacia el interior de la misma.

Comparando los resultados de ambos estudios, inclusive pudimos detectar una migración del volumen más contaminado en la dirección del flujo hidráulico. Los resultados fueron consistentes con la información obtenida a partir de pozos freáticos realizados en sitio. En este trabajo además se presentó un método para estimar la profundidad real de investigación alcanzada en las prospecciones EMI, a través del cálculo de un índice que determina la confiabilidad del valor de conductividad eléctrica obtenido para cada punto del subsuelo. Su aplicación nos permitió confirmar que las profundidades de investigación alcanzadas resultaban suficientes en ambos estudios. En síntesis, los resultados obtenidos son realmente positivos respecto de la utilidad del método EMI para el estudio de sitios con contaminación reciente por hidrocarburos, y demuestran que si se emplean las técnicas numéricas adecuadas para procesar y modelar los datos, pueden obtenerse caracterizaciones relativamente rápidas y muy fiables de las plumas resistivas asociadas a este tipo de contaminación.

Agradecimientos: Este trabajo fue parcialmente financiado por CONICET, ANPCYT y UBA. Agradecemos a Colin Farquharson, Douglas Oldenburg y Parta Routh, por proveernos una copia gratis del programa EM1DFM.

REFERENCIAS

- Atekwana, E. A., E. A. Atekwana, R. S. Rowe, D. D. Werkema Jr. and F. D. Legall, 2004. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*, 56(4), 281-294.
- Atekwana, E. A. and E. A. Atekwana, 2010. Geophysical Signatures of Microbial Activity at Hydrocarbon Contaminated Sites: A Review. *Surveys in Geophysics*, 31, 247–283.
- Auken, E., L. Pellerin, N. Christensen and K. Sorensen, 2006. A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods. *Geophysics*, 71(5), G249–G260.
- Bongiovanni, M. V., N. Bonomo, M. de la Vega, L. Martino and A. Osella, 2008. Rapid evaluation of multifrequency EMI data to characterize buried structures at a historical Jesuit mission in Argentina. *Journal of Applied Geophysics*, 64(1-2), 37-46.
- Butler, D., 2004. Report on a workshop on electromagnetic induction methods for UXO detection and discrimination. *The Leading Edge*, 23, 766-770.

- Cassidy, D., D. Werkema Jr., W. Sauck, , E. Atekwana, S. Rossbach and J. Duris, 2001. The effects of LNAPL biodegradation products on electrical conductivity measurements. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 6(1), 47-52.
- Coria D., M. V. Bongiovanni, N. Bonomo, M. de la Vega, and M. T. Garea, 2009. Hydrocarbon Contaminated Soil: Geophysical - Chemical Methods for Designing Remediation Strategies. *Near Surface Geophysics*, 7 (3), 227-236.
- Farquharson, C. G., D. W. Oldenburg and P. S. Routh, 2003. Simultaneous 1D inversion of loop-loop electromagnetic data for magnetic susceptibility and electrical conductivity. *Geophysics*, 68(6), 1857-1869.
- Haber, E., U. Ascher and D. Oldenburg, 2004. Inversion of 3D electromagnetic data in frequency and time domain using an inexact all-at-once approach. *Geophysics*, 69, 1216-1228.
- Huang, H. and I. Won, 2000. Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensors, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 5 (4), 31-41.
- Khan, F. I., T. Husain and R. Hejazi, 2004. An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, 71, 95-122.
- Lascano, E., H. P. Martinelli and A. Osella, 2006. EMI data from an archaeological resistive target revisited. *Near Surface Geophysics*, 4(6), 395-400.
- Li, Y., and D. W. Oldenburg, 2000. 3D inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 65(6), 1931 – 1945.
- Loke, M. and R. D. Barker, 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Loke, M. and R. D. Barker, 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.
- Martinelli, H. P., A. Osella and E. Lascano, 2006. Modeling broadband electromagnetic induction responses of 2-D multilayered structures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44 (9), 2454-2460.
- Martinelli, H. P. and M. C. Duplaá, 2008. Laterally filtered 1D inversions of small-loop frequency-domain EMI data from a chemical waste site. *Geophysics*, 73(4), F143-F149.
- Martinelli, H. P. and A. Osella, 2010. Small-loop electromagnetic induction for environmental studies at industrial plants. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7, 91-104.
- McNeill, J., 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers. Geonics Limited Technical Note TN-6.
- McNeill, J. and M. Bosnar, 1999. Application of dipole-dipole electromagnetic systems for geological depth sounding. Geonics Limited, Technical Note TN-31.
- Miller, J., T. Bell, J. Soukup and D. Keiswetter, 2001. Simple phenomenological models for wideband frequency-domain electromagnetic induction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 39(6), 1294 – 1298.
- Mitsuhata, Y., U. Toshihiro, K. Matsuo, A. Marui and K. Kusunose, 2006. Various-scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain. *Geophysics*, 71, 167-173.
- Newman, G. and D. Alumbaugh, 1997. Three-dimensional massively parallel electromagnetic inversion-I: Theory. *Geophysical Journal International*, 128, 345-354.

- Oldenburg, D. and Y. Li, 1994. Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 59(9), 1327-1341.
- Oldenburg, D. and Y. Li, 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, 64(2), 403-416.
- Osella, A., M. de la Vega and E. Lascano, 2005. 3D electrical imaging of an archaeological site using electrical and electromagnetic methods. *Geophysics*, 70(4), G101-G107.
- Pérez-Flores, M. A., S. Méndez-Delgado and E. Gómez-Treviño, 2001. Imaging low-frequency and dc electromagnetic fields using a simple linear approximation. *Geophysics*, 66 (4), 1067-1081.
- Sasaki, Y. and M. A. Meju, 2006. A multidimensional horizontal-loop controlled-source electromagnetic inversion method and its use to characterize heterogeneity in aquiferous fractured crystalline rocks. *Geophysical Journal International*, 166, 59-66.
- Sheard, S. N., T.J. Ritchie, K. Christopherson and E. Brand, 2005. Mining, petroleum and engineering industry applications of electromagnetic techniques in Geophysics. *Surveys in Geophysics*, 26, 653-669.
- Shevlin, V., O. Delgado-Rodríguez, L. Fernández-Linares, H. Zegarra Martínez, A. Mousatov and A. Ryjov, 2005. Geoelectrical Characterization of an Oil-Contaminated Site in Tabasco, Mexico. *Geofísica Internacional*, 44(3), 251-263.
- Werkema Jr., D. D., E. A. Atekwana, A. L. Endres, W. A. Sauck and D. P. Cassidy, 2003. Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. *Geophysical Research Letters*, 30(12), 49-1.
- Witten, A. J., G. Calbert, B. Witten and T. Levy, 2003. Magnetic and electromagnetic induction studies at archaeological sites in southwestern Jordan. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 8(3), 209-215.
- Won, I. J., D. A. Keiswetter, G. R. A. Fields and L. C. Sutton, 1996. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1, 129-138.
- Won, I. J., D. A. Keiswetter and Bell, T. H., 2001. Electromagnetic induction spectroscopy for clearing landmines: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(4), 703-709.
- Won, I. J., 2003. Small frequency-domain electromagnetic induction sensors. *The Leading Edge*, 22, 320-322.

Recibido: 10 de junio de 2011

Aceptado: 12 de octubre de 2011