

## RECONSTRUCCIONES ICÓNICAS TOMOGRÁFICAS DEL SUBSUELO

José R. Arce Alleva

Av. Petit Thouars 4380  
Miraflores, Lima

Desde que se inició el desarrollo acelerado de las computadoras se viene mejorando la resolución de los resultados en los métodos geofísicos. La principal fuente de investigación y avance en dichas aplicaciones son las empresas petroleras, las que por contar con grandes recursos realizan estudios constantes para la mejora de las técnicas geofísicas de exploración. En la década de los 70, se desarrollaron los primeros programas geofísicos para calculadoras programables y en la década siguiente, para las primeras computadoras personales. A finales de los años 90, fueron desarrolladas las técnicas matemáticas para el procesamiento de datos en 2 y en 3 dimensiones y recién en los últimos 2 a 3 años venimos contando con modelado analítico suficientemente potente como para tomar en cuenta cálculos volumétricos de propiedades físicas.

Este trabajo busca mostrar la variedad de consideraciones necesarias para obtener resultados satisfactorios en el modelado geofísico de anomalías, con el fin de optimizar los resultados de los estudios en proyectos de exploración.

Los métodos geofísicos tomográficos discutidos en este artículo son la Refracción Sísmica y la Polarización Inducida. Antes de analizar cada uno de éstos hay que entender algunos conceptos básicos.

### TOMOGRAFÍA

El término tomografía se ha generalizado durante los últimos años por su creciente uso en aplicaciones médicas. El fundamento está en que si ubicamos un objeto determinado y le aplicamos un campo de energía en 360°, midiendo luego sus efectos en muchos puntos a lo largo de la misma circunferencia, obtendremos una gran cantidad de información, mucha de ella redundante, con la que podremos construir un modelo matemático de dicho objeto con un elevado grado de precisión.

Utilizando este mismo concepto, para reconstruir una sección específica del subsuelo con algún campo de energía generado (eléctrico, electromagnético, sísmico, magnético), podremos obtener un gran detalle en los resultados geofísicos. El principal problema que encontraremos para esta tarea está en que no podemos generar y medir señales alrededor de toda la sección que queremos estudiar, ya que para ello necesitaríamos un túnel paralelo a la superficie y dos perforaciones (¿verticales?) para aplicar y medir en todas direcciones. Por esto, se ha puesto énfasis en la investigación de técnicas alternativas que permitan la reconstrucción tomográfica utilizando principalmente campos de energía en la superficie del terreno.

En todo método tomográfico de procesamiento de datos hay que tener en cuenta que la calidad del modelo resultante depende fundamentalmente de la precisión de la información entregada al proceso de inversión de datos. Por esto, si las lecturas o señales fueran ruidosas el modelo resultante sería poco aceptable. Es de gran importancia que los geofísicos a cargo de un levantamiento se aseguren de obtener la mejor calidad de lecturas posible para el área que se estudia.

### REFRACCIÓN SÍSMICA

Desde hace ya una veintena de años se vienen perfeccionando las técnicas tomográficas de Reflexión Sísmica en aplicaciones de exploración petrolera. Recién en los últimos tiempos se han desarrollado estas técnicas para la Refracción Sísmica, método de gran utilidad en aplicaciones de ingeniería y geotecnia. A principios de los años 90, se prepararon los primeros programas para la reconstrucción de secciones de velocidad de onda P entre perforaciones diamantinas existentes. A pesar que las primeras rutinas iterativas de modelado tomográfico para estos casos eran bastante rudimentarias, proveían

resultados con un nivel de detalle que no se podía obtener con perfiles desde la superficie. Arce, J.E. (1994) y Arce J.R. (1994) demostraron la aplicabilidad de estas técnicas en el Perú bajo condiciones geológicas locales.

## CONSIDERACIONES

Como en todo método tomográfico, hay que tener en cuenta que la resolución horizontal y vertical de la técnica está en directa relación con la separación entre geófonos receptores y con la cantidad de puntos desde los cuales se generan señales para un mismo tendido. Por esto, los mejores modelos obtenidos con tomografía de refracción son para aquellos casos en que la separación de geófonos es pequeña, pero con menor alcance vertical. Es claro que si uno pretende llegar a grandes profundidades con tomografía sísmica, debiera esperar menor precisión de las, por lo que la decisión debe tomarse de acuerdo con el objetivo geológico que se pretende estudiar.

La penetración del método depende de diversos factores. El principal es el contraste de velocidades de onda en el medio que se pretende estudiar. Conforme las ondas que viajan en el subsuelo encuentran contactos con cambios significativos en velocidad de onda P, continúan refractándose. Por otro lado, si las velocidades de onda P son relativamente uniformes, la señal tiende a disiparse y pierde penetración. Otro factor determinante en el alcance vertical del método es la topografía del terreno. Si bien la deformación topográfica es tomada en cuenta en el proceso de modelado, hay que entender que grandes desniveles en la superficie limitan la capacidad de penetración de las ondas ya que una cantidad significativa de energía se disipa en los vacíos entre tales irregularidades de la superficie.

Como mencionamos anteriormente, la calidad de las señales y, por consiguiente, la selección de primeras llegadas de onda P es muy importante para obtener un modelo confiable. Es preferible no entregar al procesamiento tomográfico aquellas lecturas que tengan un nivel de ruido mediano a alto. El resultado será siempre mejor con menos lecturas que con información inicial errática.

## MÉTODO

El método que en la actualidad obtiene los mejores resultados en tomografías de refracción es el conocido como Tomografía Icónica de Trayectorias, o WET (Schuster y Askel-Quintus, 1993) por sus siglas en inglés. Adicionalmente a la técnica de procesamiento, es conveniente utilizar un análisis de ondas que permita englobar volúmenes de material en lugar de áreas; es decir, teniendo en cuenta que cuando una onda acústica atraviesa un medio determinado, está midiendo efectos de un espacio tridimensional que afecta los alrededores del trazo de propagación de ésta. Para este propósito es apropiado el método volumétrico de haz de luces de Fresnel (Watanabe, 1999). Estas mejoras significativas en el procesamiento de información han permitido también una mayor penetración calculable en los modelos invertidos, tal como se muestra en la Figura 1.

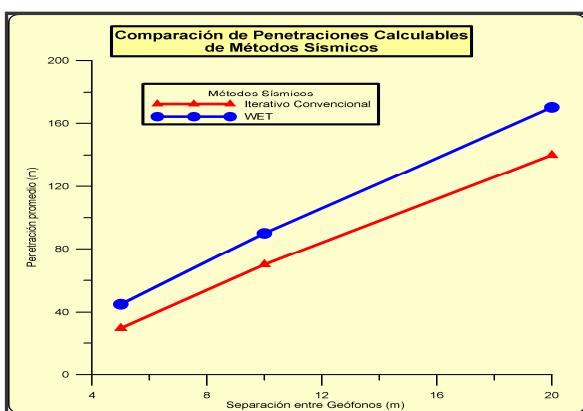


Figura 1. Comparación de penetraciones promedio entre procesamientos iterativos convencionales y tomografía icónica de trayectorias (WET). Las comparaciones han sido hechas para tendidos fundamentales de 24 geófonos utilizando cables de 5m, 10m y 20m de separación entre geófonos.

La imagen mostrada a continuación en la figura 2 muestra una inversión tomográfica realizada para detectar socavones enterrados en la quebrada Lalaquia, Atacocha, que por ser tan antiguos, no

contaban con planos de ubicaciones. La separación de geófonos fue de 5m, y esto permitió un análisis de objetivos tan pequeños como 1m de diámetro. La inversión de esta línea tomó casi 45 minutos.

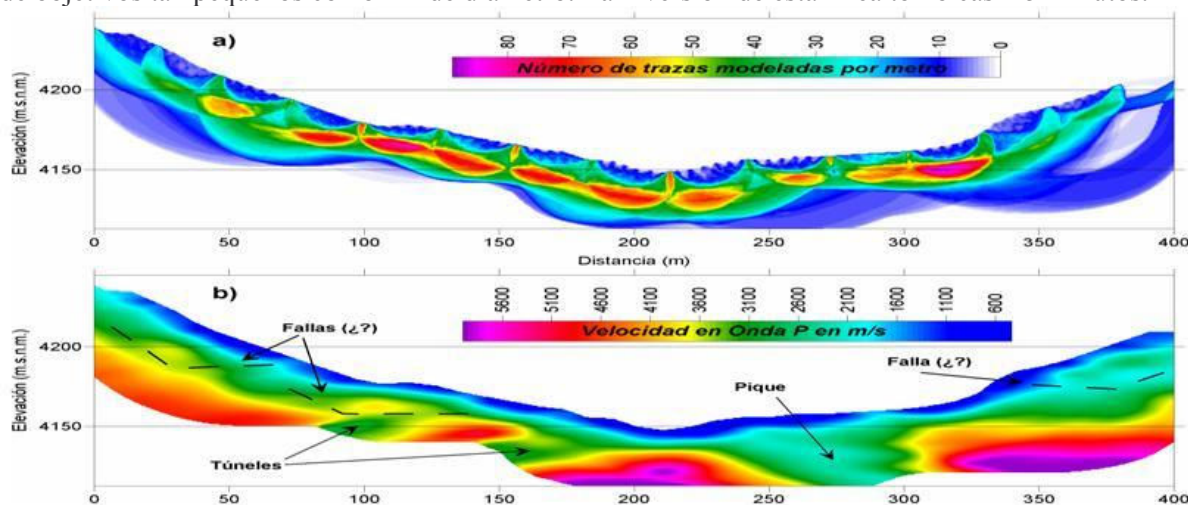


Figura 2. Ejemplo de Tomografía Icónica de Trayectorias (WET). En a) se puede ver la densidad de trazas del modelo convergente en la décima iteración. En b) se ve el modelo de velocidad de onda P correspondiente a la reconstrucción a), donde el color azul representa el material coluvial de las laderas y aluvial de la quebrada, mientras que el verde es roca fracturada; la roca compacta se puede ver coloreada en rojo y morado. De ésta línea se pudieron interpretar dos posibles túneles y un pique, así como desplazamiento de bloques por fallas en ambas márgenes de la quebrada.

## POLARIZACIÓN INDUCIDA

A pesar que la polarización inducida (IP) es utilizada en todo el mundo, poco es realmente entendido sobre la aplicabilidad del método en situaciones geológicas complejas. Al igual que la refracción sísmica, la inversión tomográfica de IP depende de una alta calidad en las lecturas de campo para poder generar un modelo acorde con la geología.

Los instrumentos modernos geofísicos son capaces de mostrar lecturas aparentemente válidas en casi todas las condiciones, pero es necesario analizar la aplicabilidad de una configuración de electrodos determinada antes de realizar un levantamiento. La figura 3, muestra una comparación en requerimientos de corriente (amperios) necesarios para una cantidad de penetraciones y en un medio de resistividad uniforme. Es claro que la configuración con mayor entrada de señal (cociente señal/ruido) es la Polo-Polo, que permite tomar lecturas en todas las penetraciones, mientras que la capacidad de Dipolo-Dipolo es la menor. La calidad de la información obtenida con una configuración de electrodos específica está relacionada con la sensibilidad de la misma.

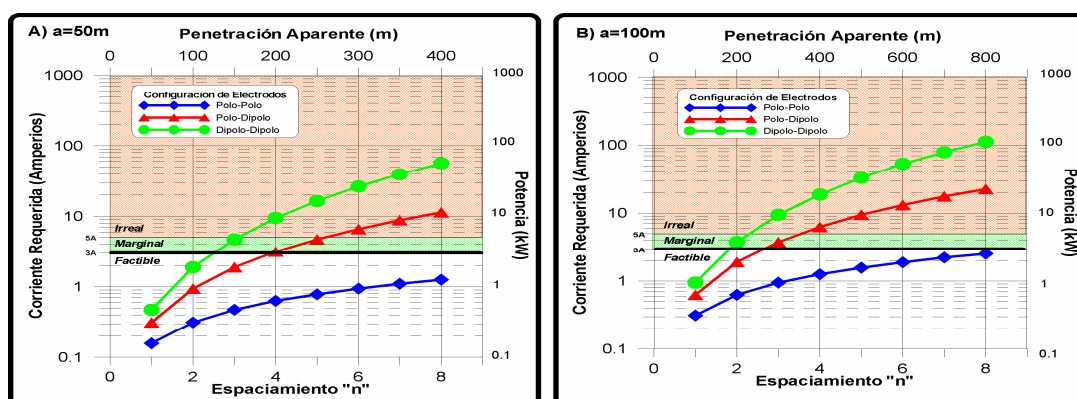


Figura 3. Energización requerida para operar con "n" penetraciones en diferentes configuraciones de electrodos y con resistividad ( $\rho$ ) promedio de 100 ohmiómetros, resistencia de contacto (R) de 1000 ohmios y voltaje de entrada ( $V_p$ ) de 5mV. En A) se ven los requerimientos de corriente para una separación de electrodos (a) de 50m, mientras que en B) para a=100m.

En la Figura 4 podemos apreciar la sensibilidad de las tres configuraciones comunes para una misma penetración aparente (n=5). Como se puede ver, en Dipolo-Dipolo, la mayor sensibilidad está cerca de

los dipolos de corriente y de potencial, mientras que la influencia del material entre estos es relativamente baja. Polo-Dipolo muestra una mejor sensibilidad entre el polo de corriente y el dipolo de potencial, pero la deformación asimétrica del campo es clara y puede tan solo ser compensada repitiendo las líneas de esta configuración utilizando avances de electrodos opuestos. Tal como mostró Loke (1996), Polo-Polo es claramente la que penetra más y la que tiene alta sensibilidad entre los electrodos de corriente y potencial, aunque con menor resolución horizontal, la que puede ser fácilmente compensada con inversiones tomográficas modernas o mayor detalle de avance horizontal.

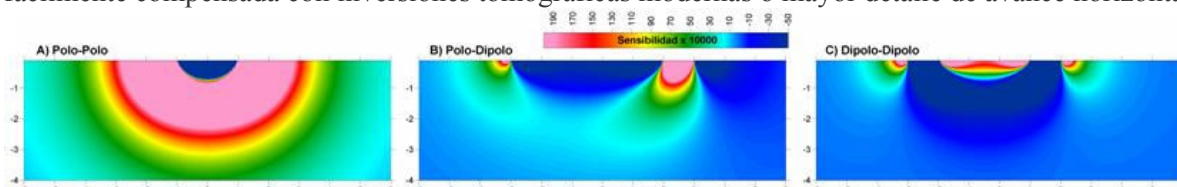


Figura 4. Sensibilidad de distintas configuraciones de electrodos para una penetración aparente  $n=5$ , en un medio uniforme con resistividad ( $\rho$ ) de 100 ohmímetros, una corriente aplicada ( $I$ ) de 1 amperio y un voltaje de entrada ( $V_p$ ) de 5mV. La separación de electrodos es de 1m.

La Figura 5 muestra un ejemplo de inversión tomográfica en 2D de una línea obtenida en la mina Poderosa, Batolito de Pataz, con una separación de electrodos de 50m y 7 penetraciones. La configuración utilizada fue Polo-Polo y la profundidad calculable fue alrededor de los 302m. En la resistividad se puede ver claramente la posible estructura silicificada, mientras que la cargabilidad muestra las zonas que contienen sulfuros.

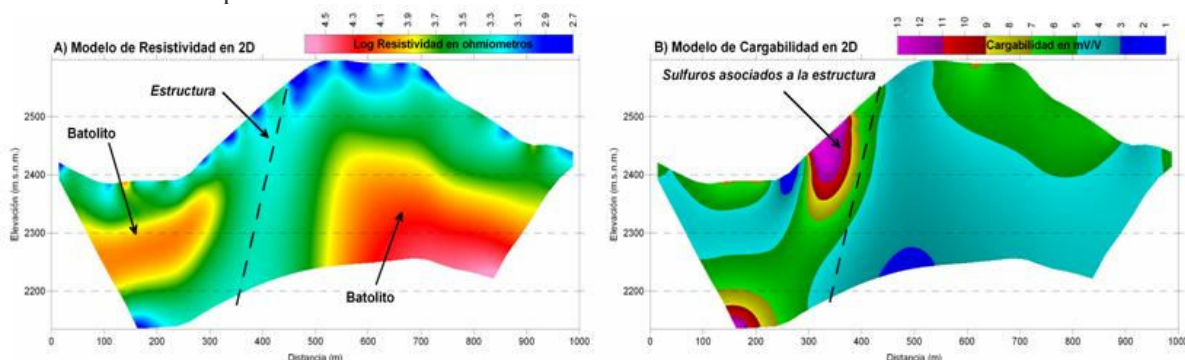


Figura 5. Inversión tomográfica en 2D de resistividad-cargabilidad. La deformación topográfica fue hecha con el método bidimensional de Schwarz-Cristoffel. La posible estructura mineralizada se muestra con un trazo continuo. Esta línea tiene una orientación Oeste-Este.

## REFERENCIAS

- ARCE, J.R. Y GLASS, C.E. 1994. Geotomografía genética: Una aplicación de algoritmos genéticos a tomografía electromagnética. Resúmenes extendidos del VIII Congreso Peruano de Geología, pp 105-107. Lima.
- ARCE H., J. E., 1994. Tomografía sísmica en obras de ingeniería. Resúmenes extendidos del VIII Congreso Peruano de Geología, pp 110-112. Lima
- EDWARDS, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, pp 1020-1036. SEG. EEUU.
- LI Y. Y OLDENBURG D.W. 1992. Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International* 109, pp 343-362. Inglaterra.
- LOKE, M.H. Y BARKER, R.D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, pp 1682-1690. SEG. EEUU
- LOKE, M.H. Y BARKER R.D., 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, pp 131-152. EAGE. Holanda
- OLDENBURG, D.W. Y LI, Y., 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, 64, pp 403-416. SEG. EEUU.
- SCHUSTER, G.T. Y QUINTUZ-BOSZ, AKSEL, 1993. Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. *Geophysics*, 58, pp 1314-1323. SEG. EEUU.
- WATANABE, T., TOSHIFUMI, M. Y ASHIDA, Y., 1999. Seismic travelttime tomography using Fresnel volume approach. Resúmenes: Convención de la Society of Exploration Geophysicists (SEG) en Houston. EEUU.