

Tomografía sísmica en el área de Cazonos, Veracruz (México)

Gerardo F. Ronquillo

Universidad Estatal de Moscú, M. V. Lomonosov, Rusia

Recibido: 30 abril, 1989; aceptado: 3 septiembre, 1991.

RESUMEN

Se aplica una técnica numérica de tomografía sísmica para determinar la distribución de la velocidad de las ondas sísmicas en el subsuelo. Este estudio fue desarrollado en el área de Cazonos, Veracruz (México), y es parte de una serie de trabajos encaminados a determinar la viabilidad del terreno para instalar una central eléctrica. El objetivo del estudio fue contribuir a caracterizar con parámetros petrofísicos, en combinación con otras técnicas geológicas y geofísicas, las estructuras geológicas que subyacen una porción del área total en consideración. Se empleó el Método de Reconstrucción Iterativa Simultánea (MRIS). Los resultados se correlacionan muy bien con la información geológica y de registros geofísicos de pozo.

PALABRAS CLAVE: Tomografía sísmica, distribución de velocidad, Método de Reconstrucción Iterativa Simultánea.

ABSTRACT

This paper reports an application of one of the numerical techniques of seismic tomography to reconstruct the seismic wave velocity distribution in the sub-surface. This study was conducted in the area of Cazonos, Veracruz State (Mexico), to determine the suitability of the area for siting a power plant. The Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT) was used. Results obtained correlate very well with geologic and geophysical well logging information.

KEY WORDS: Seismic tomography, velocity distribution, Simultaneous Iterative Reconstruction Technique.

INTRODUCCION

En geofísica, los métodos sísmicos de pozo son ampliamente utilizados en estudios sismológicos y en sismología de reflexión (Fawcett and Clayton, 1984), estudios de propiedades mecánicas de rocas para delimitar zonas débiles, fenómenos de asentamiento relacionados con la existencia de cavernas naturales (Karst) o bien de origen artificial, socavón olvidado (Efimova y Piup, 1982), gasificación del carbón (Radcliff *et al.*, 1981), y problemas relacionados con minas de sal y cementerios de desechos radiactivos (Peterson *et al.*, 1985).

Partiendo de la información obtenida en los estudios sísmicos de pozo (tiempo de viaje) correspondiente a las diferentes trayectorias de las ondas sísmicas, el problema que se plantea es encontrar la distribución de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas que caracteriza las propiedades de las rocas que conforman el subsuelo. Para ello se utilizan ampliamente las técnicas numéricas de reconstrucción de la tomografía, las cuales emplean simultáneamente todo el conjunto de datos obtenidos, referentes al tiempo de viaje de la señal o a su atenuación a lo largo de las diferentes trayectorias. Tales técnicas se aplican también en diagnóstico médico (Gordon, 1974; Herman *et al.*, 1973; Sochurek, 1987), y biológicos (Gordon *et al.*, 1970; Gilbert, 1972).

En general, todos los algoritmos de reconstrucción se basan en la transformada de Radon (Natter, 1986), quien

fue el primero en resolver el problema de la función de reconstrucción mediante su proyección.

Los métodos tomográficos pueden clasificarse en tomografía de rayos (basada en la ecuación de rayos) y en tomografía de difracción (basada en la ecuación de onda). En la primera se manejan comúnmente cuatro categorías de algoritmos de reconstrucción: 1) los algoritmos de expansión en series; 2) métodos de Fourier; 3) métodos de convolución; y 4) métodos de retroproyección filtrada. La tomografía de rayos da buenos resultados cuando la interacción entre las ondas sísmicas y las estructuras en estudio pueden ser descritas con suficiente exactitud por la ecuación de rayos. Cuando las dimensiones de las estructuras geológicas son comparables a la longitud de onda de las ondas sísmicas, la dispersión llega a ser muy importante. En tal caso, se usa la tomografía de difracción. Los algoritmos de reconstrucción son similares. El Método de Reconstrucción Algebraica (MRA) puede ser incluido en el primer grupo de algoritmos. El método de Reconstrucción Iterativa Simultánea (MRIS) es similar al MRA, excepto en que en cada iteración se usan simultáneamente todos los datos (Gilbert, 1972).

GEOLOGIA

El área en estudio se localiza en Cazonos, Veracruz. Está limitada por los paralelos 20°46' y 20°48' de Latitud

Norte y por los meridianos 97°15' y 97°17' de Longitud Oeste (Figura 1).

La geología regional de esta zona ha sido bien estudiada (Santiago, *et al.*, 1984; Carrillo, 1972). El área se encuentra dentro del Atolón Faja de Oro (estructura arrecifal de edad Cretácica), asociado a la antigua Isla de Tuxpan, actualmente comprendida en la Cuenca Tampico-Tuxpan, que tiene forma de arco semielíptico, abierto hacia el Golfo de México. El carácter de cuenca de esta región obedece al hundimiento del área ocupada por el Archipiélago Tamaulipas, provocado en gran parte por los esfuerzos que plegaron y fallaron la Sierra Madre Oriental a principios del Terciario.

La Cuenca Tampico-Tuxpan está constituida por rocas ígneas y metamórficas de edad Paleozoica, que sobrepasan los 4000 m de espesor, y está fuertemente deformada. Durante el Triásico Temprano y Medio, la región permaneció emergida, prevaleciendo un ambiente continental, el cual favoreció el depósito de sedimentos arcillo-arenosos rojos.

La cuenca se originó en el Paleoceno; al principiar los levantamientos de la Sierra Madre Oriental fue afectada en su margen occidental y suroccidental por la Depresión de Chicontec, depositándose un gran volumen de sedimentos arcillo-arenosos. Durante el Eoceno Temprano se depositaron facies arenosas y arcillosas. En el Eoceno Tardío presenta dos facies, una arcillosa de aguas profundas y otra areno-conglomerática de origen deltaico. En el Oligoceno y el Mioceno el área fue sometida a frecuentes transgresiones y regresiones, depositándose sedimentos arenos-arcillosos y en ocasiones conglomeráticos.

El área en estudio (Figura 2) presenta principalmente una distribución uniforme de aluvión constituido por arenas arcillosas con incrustaciones de pedernal y arenisca calcárea del período Cuaternario, así como areniscas calcáreas con incrustaciones de caliza y pedernal. Se observa en general una depositación horizontal de las rocas, mostrando en algunas partes una inclinación no muy grande en dirección al mar. El relieve está constituido por formas elípticas y circulares, con elevaciones que varían entre 10 y 30 metros.

DATOS

Los datos usados en este trabajo (C.F.E., 1984) forman parte de una campaña de estudios enfocados a determinar la viabilidad del área en estudio para instalar una central productora de energía eléctrica. Los datos sísmicos fueron obtenidos en dos etapas: en la primera etapa se utilizó conjuntamente el método sísmico pozo-pozo así como el método sísmico pozo-superficie; para ello se emplearon tres pozos de 60 metros de profundidad. Los pozos detectores 2 y 3 se ubican a 6 y 10 metros del pozo-fuente 1. En cada observación, la fuente y los geófonos de tres componentes fueron ascendidos un metro y se emplearon 6 detectores en superficie (Figura 3a). En esta primera etapa

se obtuvieron datos de excelente calidad, relativos a tiempos de primeros arribos.

En la segunda etapa únicamente se aplicó el método sísmico pozo-superficie (Figura 3b), utilizando el pozo 3 como fuente, y 12 geófonos en la superficie. La distancia del primer detector al pozo fuente fue de un metro, al segundo 2 metros y entre los restantes una separación de 5 metros (longitud del tendido, 53 m), las fuentes fueron colocadas a intervalos de un metro de profundidad, habiéndose obtenido también datos de excelente calidad relativos a tiempos de primeros arribos.

Con objeto de mejorar la información anterior, se efectuaron correcciones por efecto de desviación de pozo y por efecto de la zona de baja velocidad (capa de intemperismo). Además, se emplearon los datos de registros geofísicos (temperatura, densidad, potencial natural y resistividad) obtenidos en los pozos 1, 2 y 3 (C.F.E., 1984). (Figs. 5 y 6).

METODO TOMOGRAFICO

En el problema de reconstrucción de la distribución de velocidad a partir de observaciones del tiempo de viaje de las ondas sísmicas entre la fuente y los geófonos, ubicados en diferentes posiciones con respecto a la estructura geológica estudiada, se utilizaron los métodos iterativos simultáneos de solución del sistema de ecuaciones lineales. Los procedimientos más adecuados para la solución de estos problemas fueron realizados por Herman *et al.* (1973), Gordon y Herman (1974), Efimova y Piup (1982), Gustavsson *et al.* (1986), Roberts *et al.* (1989), Vasco (1991) y Stork y Clayton (1991).

Con los métodos sísmicos pozo-pozo y pozo-superficie es posible estudiar una sección bidimensional heterogénea del subsuelo, la cual está representada por una retícula en la Figura 4. En cada celda, se asigna un valor constante a la función de distribución de la velocidad $V(x, z)$. Se suponen rayos rectos.

Para el k -ésimo rayo ($k = 1, 2, 3 \dots n$), se puede escribir la ecuación que relaciona la función de velocidad y el tiempo de viaje de las ondas sísmicas como:

$$T_k = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J V_{ij}^{-1} \Delta S_{ijk}$$

donde: V_{ij} es el valor de $V(x, z)$ en el sector ij , ΔS_{ijk} es la longitud de la trayectoria del k -ésimo rayo que pasa por el sector i, j ; por lo que $\Delta S_{ijk} = 0$ para sectores por los cuales el k -ésimo rayo no viaja.

Para un conjunto de K rayos, se obtiene un sistema de k ecuaciones, donde V_{ij} representa las incógnitas.

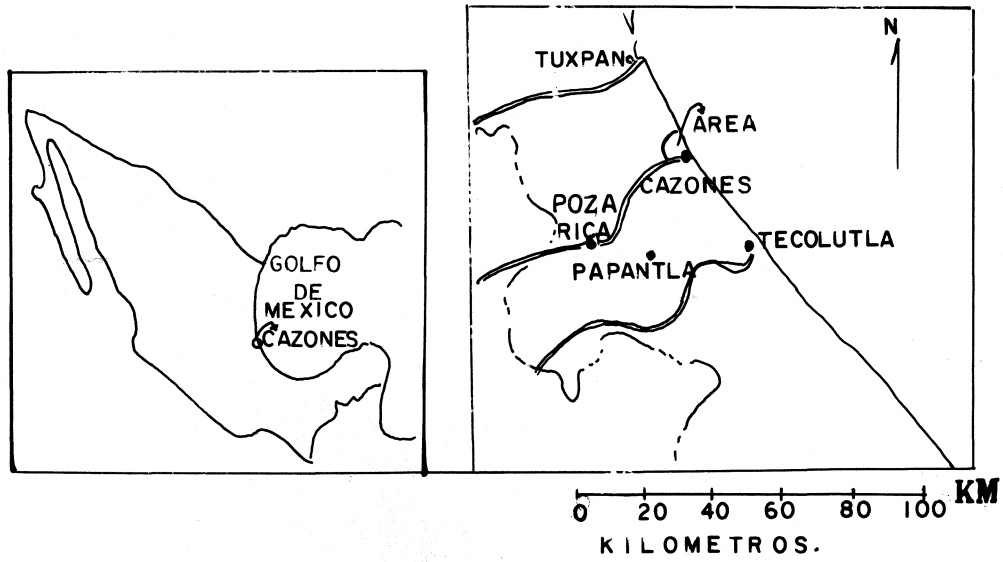


Fig. 1. Localización del área en estudio.

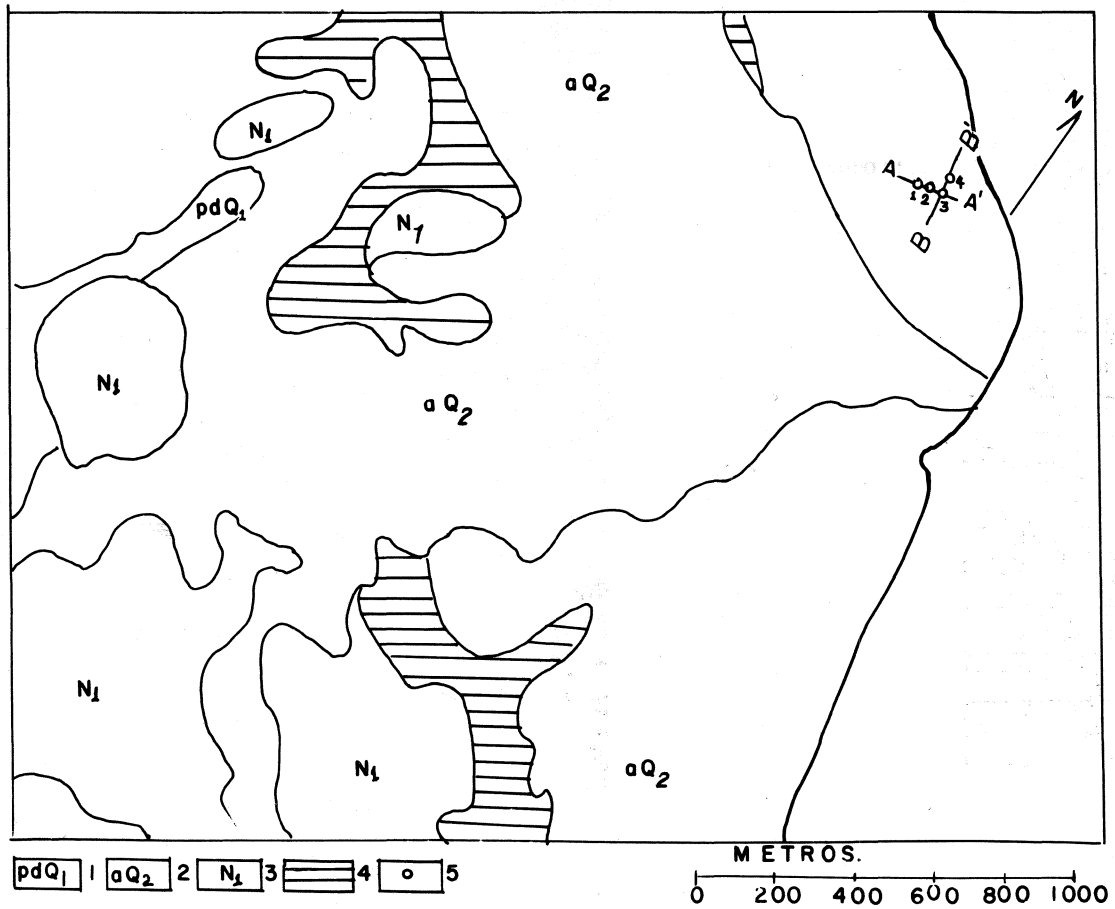


Fig. 2. Plano geológico simplificado.
 1. suelo (Cuaternario); 2. aluvión (Cuaternario); 3. arenisca calcárea (Mioceno); 4. zona de pantano;
 5. pozos (ver Figuras 5, 6 y 7). A'-A y B-B', perfiles de estudio sísmico.

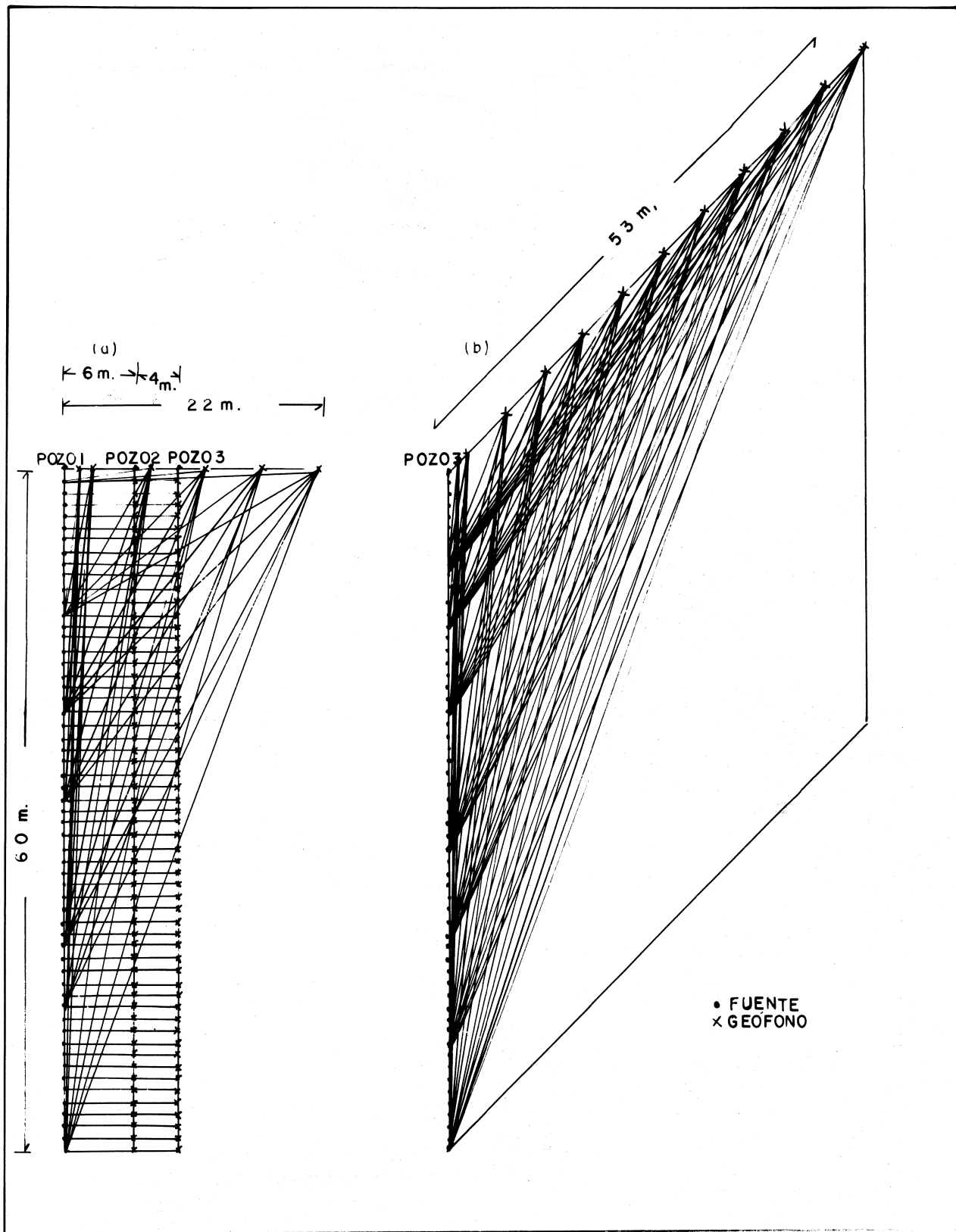


Fig. 3. Trayectoria de rayos, señalando zona muestreada. a. tendido del estudio sísmico pozo-pozo y pozo-superficie; b. tendido del estudio sísmico pozo-superficie. Ver ubicación en Figura. 2.

RESULTADOS

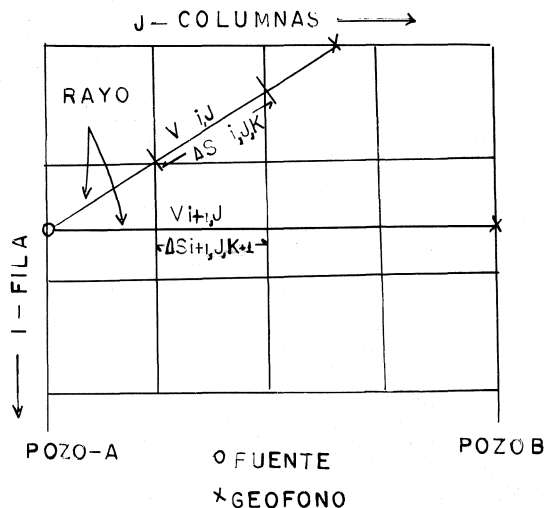


Fig. 4. Ejemplo de la discretización sísmica.
1. fuente; 2. geófono.

Para resolver aproximadamente este sistema de ecuaciones cuando k es muy grande, se puede utilizar el Método de Reconstrucción Algebraica 'MRA' (Gordon, 1974), o el Método de Reconstrucción Iterativa Simultánea 'MRIS' (Gilbert, 1972). Los métodos iterativos de reconstrucción simultánea se basan en alguna distribución inicial de velocidad. En cada iteración se aplica a la determinación previa del campo de velocidad un sistema de correcciones, cuyo cálculo se basa en los tiempos de arribo t_k y en los tiempos calculados \hat{t}_k . Las correcciones Δf_{ij} , que se aplican durante la q-ésima iteración, se determinan con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta f_{ij}^q = \frac{1}{M_{ij}} \sum_{K=1}^{M_{ij}} \Delta f_{ijk}^q$$

para $M_{ij} \neq 0$

$$\Delta f_{ijk}^q = \frac{\Delta S_{ijk} \Delta t_k}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta S_{ijk}}$$

donde $\Delta t_k = t_k - \hat{t}_k$ y M_{ij} es el número de rayos que pasan a través del sector ij. El cálculo iterativo se detiene cuando se satisface un criterio de exactitud representado por:

$$r \leq \frac{1}{M} \sum_{k=1}^K \sqrt{\Delta t_k^2}$$

donde r representa un parámetro de precisión experimental.

En general, para llevar a cabo el cálculo, además de los tiempos de primeros arribos t_k obtenidos de los sismogramas correspondientes, es necesario conocer las coordenadas de los detectores y de las fuentes de energía sísmica X_{d1}, Z_{d1} y X_f, Z_f (condiciones iniciales para la solución del problema directo). Para el algoritmo de reconstrucción numérica MRIS (Gilbert, 1972) se utilizó el Fortran 77 (Ronquillo, 1985).

A continuación se resumen los parámetros que definen las discretizaciones usadas en este estudio.

Línea A-A' (Figura 5): dimensión del área estudiada, 10 x 52 metros; dimensión de las celdas, 1 x 1 metro; número de celdas, 10 x 52; k = 224; el campo inicial de velocidad se consideró homogéneamente igual a 2000 m/seg. La reconstrucción final del campo de velocidad se representa en las Figuras 5 y 6. El parámetro de precisión se fijó en 0.3 milisegundos.

Línea B-B' (Figura 5): dimensión del área estudiada, 53 x 52 metros; dimensión de las celdas, 3 x 3 metros; número de celdas, 10 x 52; k = 216; el campo inicial de velocidad se consideró homogéneamente igual a 2000 m/seg. La reconstrucción final del campo de velocidad se representa en las figuras 5 y 6. El parámetro de precisión se fijó en 0.2 milisegundos.

Los resultados de la reconstrucción numérica (distribución de la velocidad) se correlacionaron con la información geológica. Es evidente que entre los 8 y 14 metros de profundidad se presenta una zona de aumento de velocidad (de 3.2 a 3.4 km/seg), que es representativa de lentes de calcarenita con pedernal (Figura 5).

Con la ayuda de la tomografía fue posible delimitar lateralmente las fronteras entre las diferentes unidades geológicas, además de su contraste de velocidad. A la profundidad de 15 m la velocidad disminuye de 3.0 a 2.3 km/seg. Este cambio de velocidad se asocia a la presencia de una capa de limolita.

Las discontinuidades en la distribución de velocidad nos permiten inferir entre los 4 y 7 m de profundidad una zona de fracturamiento. Cabe mencionar que los resultados obtenidos son confirmados localmente por los diferentes registros geofísicos de pozo. Por ejemplo, en la zona anómala de aumento de velocidad (8 y 14 m) tenemos un aumento en la densidad. La correlación de nuestros resultados con la información geológica y los datos de pozo (resistividad, potencial natural, densidad, temperatura, calidad de la roca RQD, parámetros estáticos y dinámicos) permitió elaborar un modelo petrofísico-geológico del subsuelo para la zona en estudio (Figuras 6 y 7).

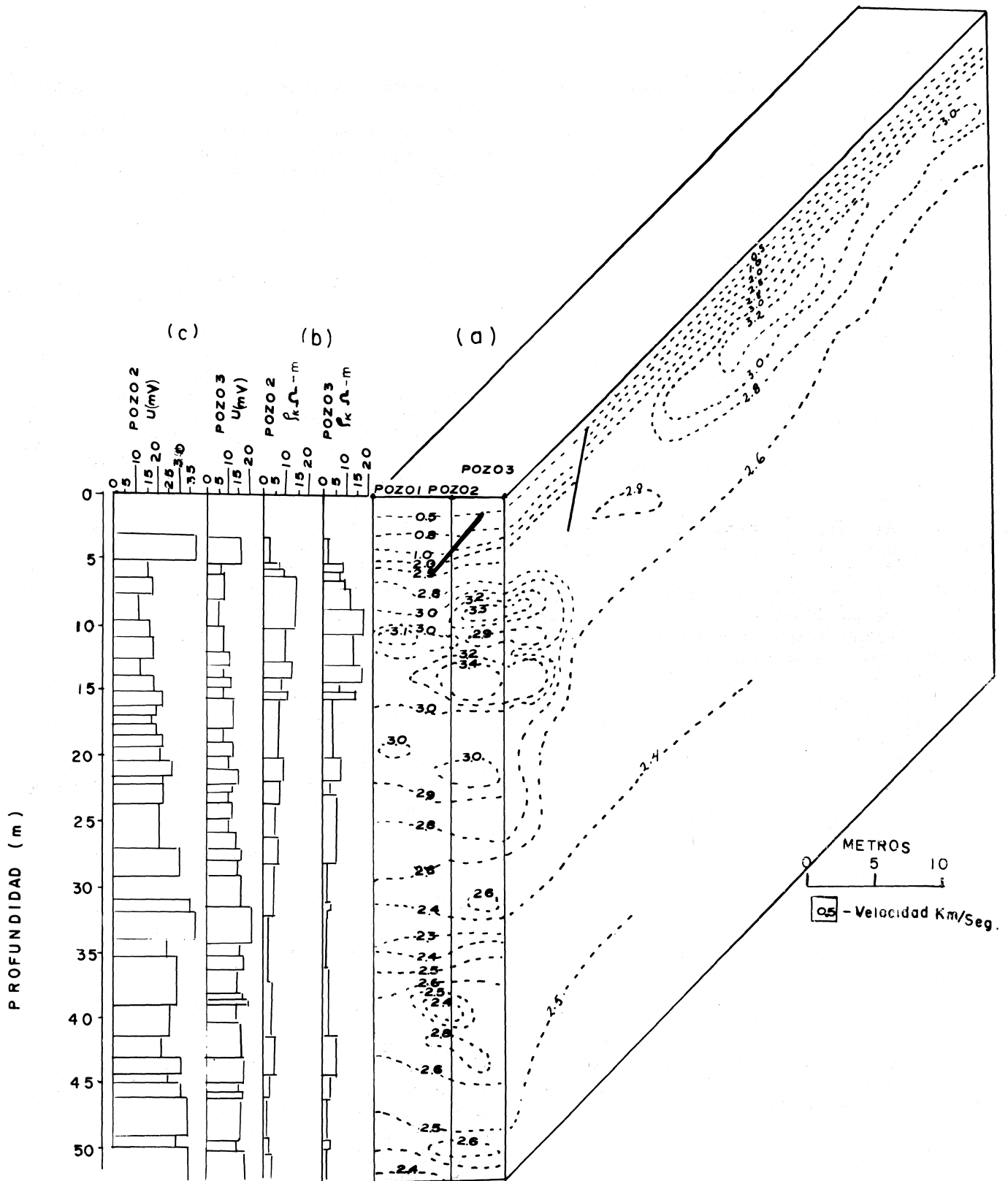
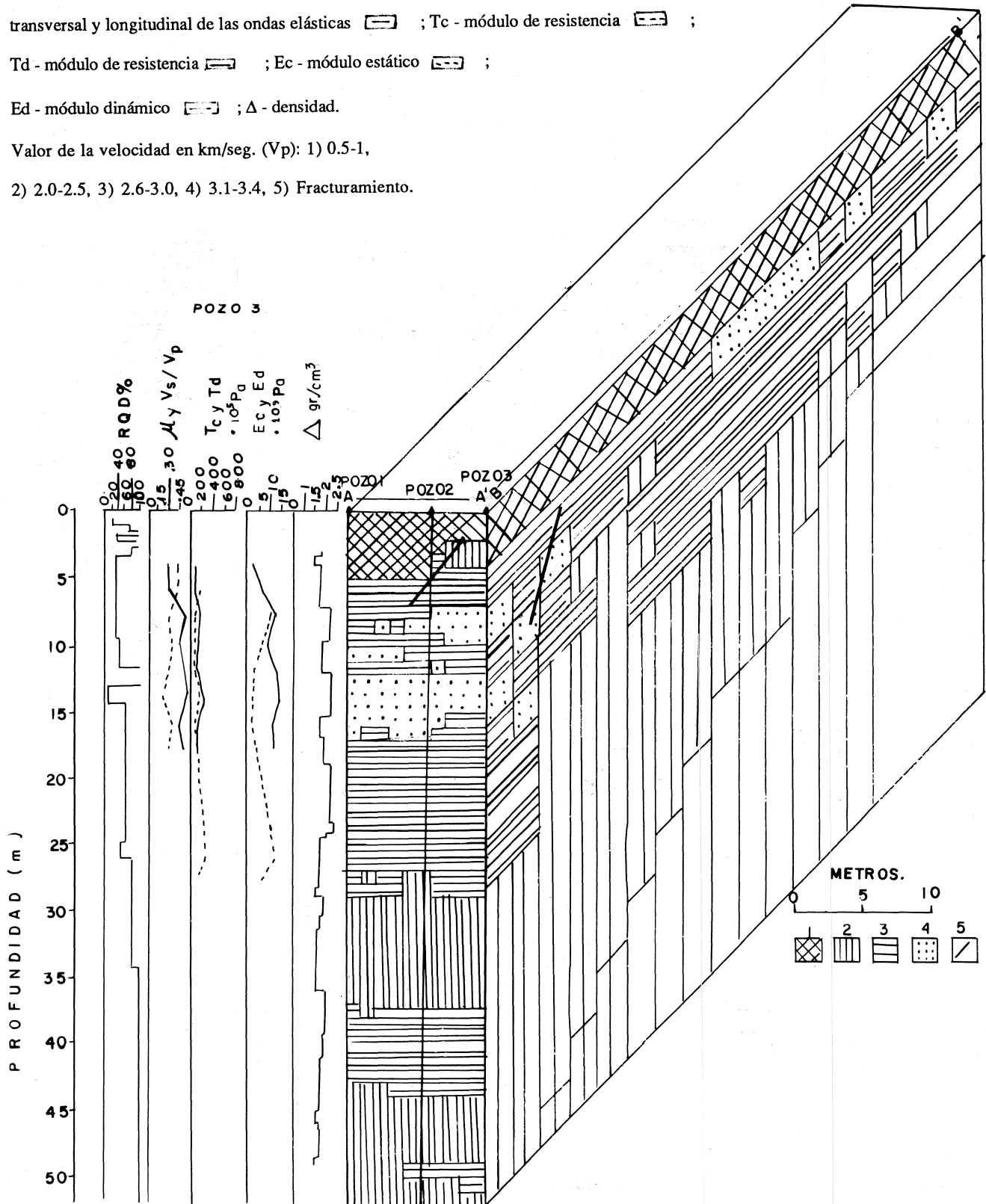


Fig. 5. Campo de velocidad (V_p).
 a - iso-velocidades; b - resistividad aparente; c - potencial natural.

Fig. 6. Resultados del estudio tomográfico integrados con parámetros dinámicos (T_d) y estáticos (T_c),

RQD - calidad de la roca; μ - coeficiente de Poisson $\left[\begin{array}{|c|} \hline \text{---} \\ \hline \end{array} \right]$; V_s/V_p - relación de la velocidad transversal y longitudinal de las ondas elásticas $\left[\begin{array}{|c|} \hline \text{---} \\ \hline \end{array} \right]$; T_c - módulo de resistencia $\left[\begin{array}{|c|} \hline \text{---} \\ \hline \end{array} \right]$;
 T_d - módulo de resistencia $\left[\begin{array}{|c|} \hline \text{---} \\ \hline \end{array} \right]$; E_c - módulo estático $\left[\begin{array}{|c|} \hline \text{---} \\ \hline \end{array} \right]$;
 E_d - módulo dinámico $\left[\begin{array}{|c|} \hline \text{---} \\ \hline \end{array} \right]$; Δ - densidad.

Valor de la velocidad en km/seg. (V_p): 1) 0.5-1,
 2) 2.0-2.5, 3) 2.6-3.0, 4) 3.1-3.4, 5) Fracturamiento.



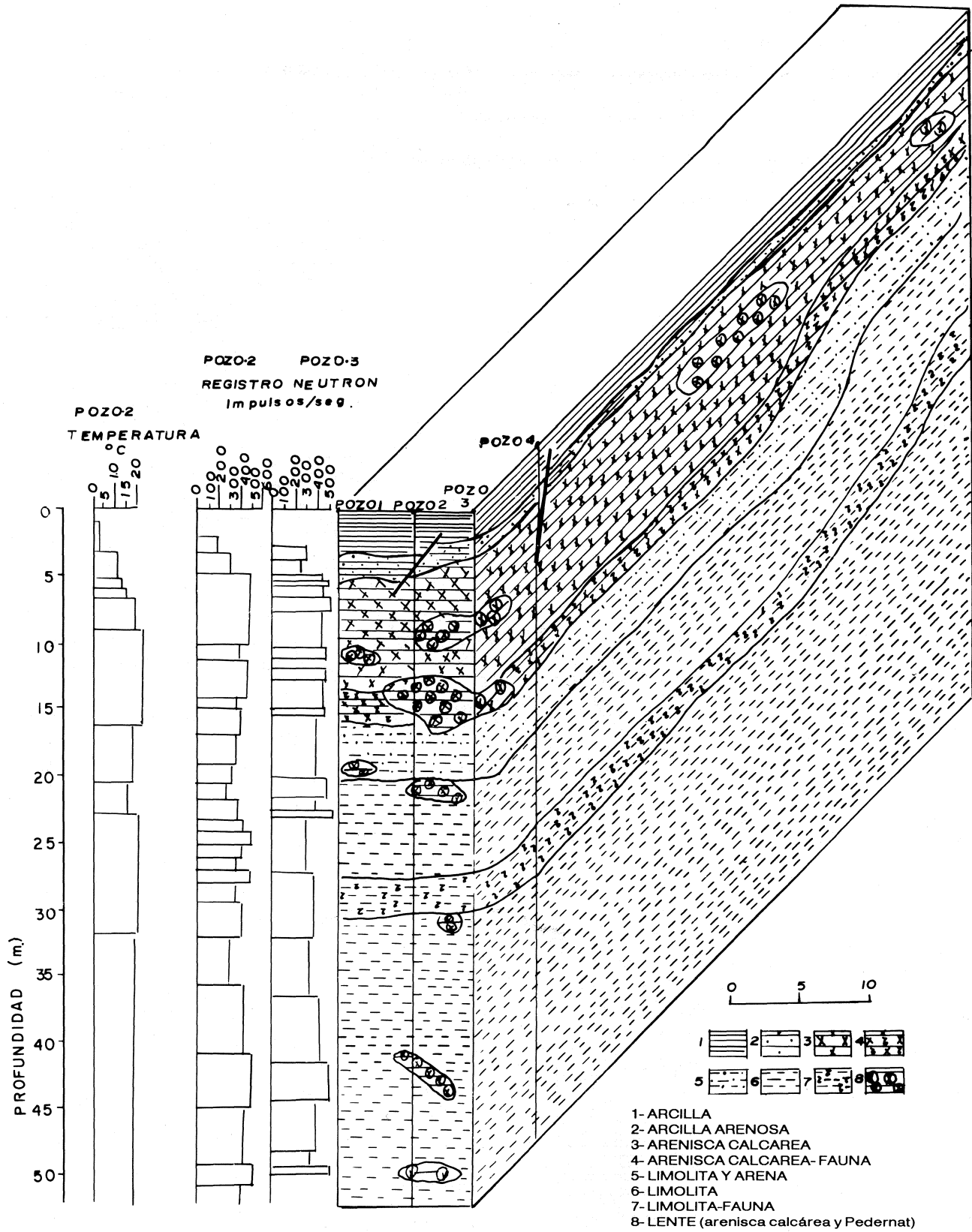


Fig. 7. Modelo Petrofísico-geológico.

CONCLUSIONES

- 1) Se determinó una zona de aumento de velocidad asociada a lentes de calcarenita con pedernal (8 - 14 m de profundidad).
- 2) Existe una zona de disminución de velocidad a los 15 m de profundidad asociada a una capa de limolita.
- 3) Existe también una zona de fracturamiento entre 4 y 7 m de profundidad.
- 4) Conjuntamente con información de registros geofísicos de pozo, se pudo elaborar un modelo petrofísico-geológico del subsuelo del sitio en estudio.
- 5) Las correcciones realizadas por desviación de pozo y efecto de la zona de baja velocidad nos ayudaron a mejorar nuestra información sobre tiempos de arribo.
- 6) Este estudio en particular ha ayudado a excluir la presencia de zonas de karst, de fracturamiento o fallamiento importantes o grandes volúmenes de material poco consolidado que bajo el gran peso de la estructura de una central eléctrica daría origen a problemas de subsidencia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Oscar Campos Enríquez su apoyo en la elaboración del presente artículo.

BIBLIOGRAFIA

- CARRILLO, B. J., 1972. Symposium sobre nomenclatura del Jurásico Superior de la Cuenca de Tampico-Mizantla. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petr.*, XXIV, 1-3.
- C.F.E., 1984. A.P.N.C. Cazones Norte, Geología, Geotecnia, Geofísica Regional y Local. Informe inédito, p. 140.
- EFIMOVA, E. A. y V. PIUP, 1982. Reconstrucción del campo de velocidad con datos de ingeniería sísmica. *Ingeniería*, 1, 1-60.
- FAWCETT, J. A. y R. W. CLAYTON, 1984. Tomographic reconstruction of velocity anomalies. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 74, 6, 2201-2219.
- GILBERT, P., 1972. Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections. *J. Theor. Biol.* 36, 105-117.
- GORDON, R., R. BENDER y G. T. HERMAN, 1970. Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for three dimensional electron microscopy and X-ray photography. *J. Theor. Biol.* 29, 471-481.
- GORDON, R. y G. T. HERMAN, 1974. Three-dimensional reconstruction from projections: A review of algorithms. *Int. Rev. Cytol.* 38, 11-151.
- GORDON, R., 1974. A tutorial ART (Algebraic Reconstruction Techniques). *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 21, 78-93.
- GUSTAVSSON, M., S. IVANSONS, P. MOREN y J. PIHL, 1986. Seismic Borehole Tomography-Measurements System and Field Studies. *Proc. IEEE* 74, 339-346.
- HERMAN, G. T., A. LENT y S. W. ROWLAND, 1973. ART: Mathematics and Applications. *J. Theor. Biol.*, 42, 1-32.
- IVANSSON, S., 1985. A study of methods for tomographic velocity estimation in the presence of low-velocity zones. *Geophysics*, 50, 969-988.
- NATTER, F., 1986. The mathematics of computerized tomography. J. Wiley and Sons Ltd. and B. G. Teubner.
- PETERSON, J. E., B. N. P. PAULSSON y T. V. McEVILLY, 1985. Applications of Algebraic Reconstruction Techniques to Crosshole Seismic Data. *Geophysics*, 50, 1566-1580.
- RADCLIFF, R. D., C. A. BALANIS y H. W. HILL, 1981. Electromagnetic Geophysical Imaging Incorporating Refraction. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, AP-29, 288. A stable geotomography technique for refractive media. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, GE-22, 6, 698-703.
- RONQUILLO, J. G., 1985. Integración de Investigaciones Geológico-Geofísicas para la Evaluación de Condiciones Geológicas en Grandes Obras Civiles. MGU (Moscú), 1, 1-20.
- ROBERTS, J. D. M., R. M. BELCHAMBER, T. LILLEY, D. BETTERIDGE, I. BISHOP y P. STYLES, 1989. An evaluation of Computerized Tomography for Near-Surface Geophysical Exploration. *Computers and Geosciences* 15, 5, 727-737.
- SANTIAGO, J. A., B. B. CARRILLO y A. MARTELL, 1984. Geología Petrolera de México. Evaluaciones de Formaciones en México. PEMEX - SCHLUMBERGER, I, 1-36. Editions Galilée, París, Francia.
- SOCHUREK, H., 1987. Medicine's new vision. *Nat. Geogr.*, 171, 1, 2-41.
- STORK, C. y R. W. CLAYTON, 1991. An implementation of tomographic velocity analysis. *Geophysics*, 56, 4, 483-495.
- VASCO, D. W., 1991. Bounding seismic velocities using a tomographic method. *Geophysics*, 56, 4, 472-482.

G. F. Ronquillo

Present address:

Gerencia de Investigación de Ciencias de la Tierra,
 Instituto Mexicano del Petróleo,
 Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152,
 Col. San Bartolo Atepehuacan,
 Delegación Gustavo A. Madero,
 C.P. 07730, México, D. F.

