

Programación de registros sínicos de pozos petroleros en medios anisotrópicos

Lorenzo Rivero^{1}, Carlos Fimlay² y José Franceschini¹*

¹Departamento de Física, Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. ²Repsol. Buenos Aires, Argentina.

Recibido: 02-06-08 Aceptado 18-05-09

Resumen

Este trabajo se fundamenta en la construcción de un modelo de velocidades intervalicas basado en el cálculo de registros pseudosónicos considerando el factor de anisotropía delta para un medio anisotrópico. Estos son obtenidos a partir de las velocidades de superficie corregidas por el factor delta, y las velocidades en pozos. A partir de estos registros se construyeron dos secciones de velocidades intervalicas en profundidad controladas por pozos con registros sínicos conocidos en cada extremo. Estas secciones fueron usadas como base de comparación entre las secciones de velocidades interválicas corregidas por el factor delta y aquellas donde dicho factor no había sido aplicado con el fin de analizar el impacto generado por la aplicación de esta corrección en el modelo de velocidades sísmicas. En la sección AB se observaron anomalías de velocidad, las cuales son asociadas a variaciones estratigráficas propias de un ambiente depositacional de tipo fluvial. La sección BC muestra anomalías mucho más pronunciadas, en las cuales pudieran estar infiriendo la presencia de fluidos además de cambios estratigráficos. Esta metodología permitió identificar en forma certera las zonas con mayores variaciones laterales de velocidad, las cuales pueden ser usadas para orientar la adquisición de futuros registros sínicos en dicha área.

Palabras clave: Anisotropía delta, velocidad interválica.

Programation of sonic logs of petroleum wells in anisotropic media

Abstract

This work is based on an interval velocity model constructed from pseudosonic logs calculation considering the Delta anisotropic factor. These pseudosonics, calculated each kilometer, were obtained from surface seismic velocities information corrected by Delta anisotropic factor, and known well log velocities. In that way, two depth interval velocities sections were constructed between well with log velocities information. These velocities sections were used as a reference to compare between the interval seismic velocity section corrected by Delta factor and the section without the correction in order to analyze the influence of this factor application on the seismic velocity model. In section AB two well defined and discontinuous velocities anomalies can be observed, which according with the geology of the area can be interpreted as a fluvial channels. Section BC also shows two more important anomalies compare with the two previous

* Autor para la correspondencia: lorenzo_rivero@cantv.net

ones, which can be interpreted not only as stratigraphic changes but also as a fluid changes. Finally, this methodology led us identify in a more clear way the mayor anomalies velocity variations, which can be used as guide line for new well log velocity acquisitions.

Key words: anisotropic delta, interval velocity.

Introducción

En la interpretación sísmica los registros sísmicos son de gran utilidad, ya que muestran la ubicación exacta en profundidad de las interfaces acústicas en el subsuelo las cuales originan las reflexiones o las refracciones de las ondas sísmicas que se propagan en este medio. También son el principal factor en la elaboración de los sismogramas sintéticos los cuales son esenciales en la calibración sísmica-pozo, entre otras aplicaciones.

En la caracterización de los yacimientos los registros sísmicos también son de gran interés ya que suministran datos de velocidades interválicas en pozo. Sin embargo ya que estos registros representan un costo muy elevado para la industria petrolera, solo son obtenidos en algunos puntos del área de interés, y son seleccionados por los intérpretes basados en su experiencia o criterios económicos.

Las velocidades interválicas obtenidas de los registros sísmicos proporcionan información detallada pero en un solo punto del área, mientras que la sísmica de superficie aporta una mayor densidad de velocidades de apilamiento, las cuales aunque menos precisas, son obtenidas a distancias regulares a lo largo del tendido sísmico, lo que permite una mayor disponibilidad de información de estas velocidades interválicas calculadas a través de la ecuación obtenida por Dix (1). La existencia de una función de velocidad que relacione de manera directa las velocidades de apilamiento y los registros sísmicos en pozo nos permite obtener datos de velocidad interválica estimados para los pozos a partir de las velocidades de apilamiento, creando de esta forma una sección de velocidades pseudosónicas que muestra-

ran las variaciones laterales de velocidad en el subsuelo que a su vez permitirán inferir las zonas donde sea necesaria la adquisición de nuevos registros sísmicos de pozos, contando de esta forma con una técnica que permitirá optimizar la adquisición de estos registros fundamentada ya no en criterios subjetivos si no en el análisis de velocidades existentes en el área las cuales están relacionadas con las propiedades físico-mecánicas del suelo.

Para solucionar el problema planteado (2) se desarrolló una metodología que permite determinar estas variaciones laterales de velocidad. Sin embargo este modelo esta basado en ecuaciones que no consideran la anisotropía del medio por donde la onda se propaga.

En este trabajo se incorporará el factor de anisotropía delta el cual afecta a las velocidades de apilamiento y por ende a las velocidades interválicas y se analiza el impacto de este factor, construyendo un nuevo modelo de velocidades donde bajo un criterio de comparación se observa si existen o no anomalías residuales entre el modelo isotrópico y el anisotrópico que permitan obtener una mejor resolución de la sección de velocidades en el área de estudio.

Metodología

Para el estudio realizado se analizaron varios pozos del área de Bachaquero mostrada en la figura 1 y se seleccionaron tres de ellos identificados como A, B, C con sus respectivos registros sísmicos y un cuarto pozo D con registros de velocidades V_p y V_s además de un registro de densidad ρ . Adicionalmente se utilizaron las velocidades de apilamiento V_p de una adquisición en 3D realizada en el área, ya que estas se adaptan



Figura 1. Ubicación de los pozos A, B, C y D en el área de estudio (PDVSA).

en mayor grado a la estructura real del subsuelo, generando valores de velocidad V_p de mayor precisión en cada punto del área.

De los datos de velocidad V_p y V_s en el área de estudio se obtuvo una relación lineal [1] que permite el cálculo de las velocidades V_s en cada punto de la región donde existe información de velocidades V_p

$$V_s = 0,72V_p - 670 \text{ (m/seg)} \quad [1]$$

$$R^2 = 0,975$$

A través del modelo geológico del área se definieron los estratos en intervalos de 200 m para los cálculos del factor de anisotropía delta correspondientes a cada uno de estos usando para este fin las ecuaciones propuestas por (3).

$$\delta = \frac{2\phi(1-\phi)}{(\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + 2\mu_2)} \times \left[\frac{(\mu_1 - \mu_2)(\lambda_1\mu_2 - \mu_1\lambda_2)}{\mu_2\phi + \mu_1(1-\phi)} \right] \quad [2]$$

$$\frac{1}{\bar{V}_p^2} = [\phi\rho_1 + (1-\phi)\rho_2] \left[\frac{\phi s_1^2}{\rho_1} + \frac{(1-\phi)s_2^2}{\rho_2} \right] \quad [3]$$

$$\frac{1}{\bar{V}_s^2} = [\phi\rho_1 + (1-\phi)\rho_2] \left[\frac{\phi t_1^2}{\rho_1} + \frac{(1-\phi)t_2^2}{\rho_2} \right] \quad [4]$$

De las que se obtiene, combinando [3] y [4] la expresión

$$f = \frac{\frac{\bar{V}_s^2 t_2^2}{\bar{V}_p^2 \rho_2} - \frac{S_2^2}{\rho_2}}{\left(\frac{S_1^2}{\rho_1} - \frac{S_2^2}{\rho_2} \right) - \frac{\bar{V}_s^2}{\bar{V}_p^2} \left(\frac{t_1^2}{\rho_1} - \frac{t_2^2}{\rho_2} \right)} \quad [5]$$

donde ρ_1 y ρ_2 son las densidades respectivas de los dos estratos, λ y μ las constantes de Lamé, ϕ es la fracción de material 1 presente en el conjunto de estratos constituyentes, \bar{V}_s y \bar{V}_p las velocidades promedios entre los estratos y los términos s_n^2 y t_n^2 representan el cuadrado de la lentitud de la onda P y el cuadrado de la lentitud de la onda S en cada estrato y están definidos como

$$s_n^2 = \frac{\rho_n}{\lambda_n + 2\mu_n} \quad [6]$$

$$t_n^2 = \frac{\rho_n}{\mu_n} \quad [7]$$

Posteriormente se calcularon las velocidades de apilamiento en función del factor δ a partir de la ecuación propuesta por Thomsen (4).

$$V_{NMO}(P) = V_p(1 + 2\delta)^{\frac{1}{2}} \quad [8]$$

Luego se calcularon las velocidades interválicas usando la ecuación

$$v_{int, iso} = \left[\frac{(V_b^2 t_b - V_a^2 t_a)}{(t_b - t_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [9]$$

donde V_a y V_b son las velocidades de apilamiento en el tope y la base del intervalo.

En vista de que las velocidades interválicas son una función del tiempo doble de incidencia normal y las obtenidas por los sónicos son una función de la profundidad, se hizo necesario la utilización de los disparos

sísmicos en superficie o checkshot obtenidos en los puntos A, B y C los cuales proporcionan la relación tiempo-profundidad necesaria para poder expresar las velocidades interválicas en función de la profundidad y de este modo relacionar ambas velocidades. La relación profundidad-tiempo para cada pozo con su respectivo coeficiente de correlación se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$Y = 257,41t^2 + 710,96t + 55,421$$

$$R^2 = 0,999 \quad [10]$$

$$Y = 224,66t^2 + 766,71t + 8,1332$$

$$R^2 = 0,999 \quad [11]$$

$$Y = 210,39t^2 + 871t - 42,519$$

$$R^2 = 0,999 \quad [12]$$

En razón de la alta cantidad de puntos de los registros sísmicos se realizó un muestreo, para lo cual se dividió la profundidad en intervalos de clase cada 1,5 m graficando el punto medio de dicho intervalo con el correspondiente promedio de la velocidad interválica; y debido a que las velocidades interválicas calculadas de las velocidades de apilamiento son muy pequeñas en comparación a las velocidades interválicas obtenidas por los registros sísmicos se realizó una interpolación en las curvas, obteniendo por cada 1 metro de profundidad el respectivo valor de velocidad con el objeto de obtener una mayor información y una mejor relación con los registros sísmicos.

Posteriormente se elaboró un programa que maneja el lenguaje de programación Visual Basic para Excel, el cual permite determinar para lecturas comunes de profundidad las diferencias entre las lecturas de velocidades interválicas obtenidas por ambos métodos

Para determinar si existen o no cambios laterales de velocidad se generaron pseudosónicos en las direcciones A→B y B→C. Los pseudosónicos en la dirección

A→B se generan sumando las diferencias de velocidad entre las velocidades interválicas obtenidas en A para cada lectura de profundidad común por los métodos sísmico y apilamiento a las distintas velocidades interválicas en esta dirección para una misma profundidad hasta llegar al punto B y de la misma forma en la dirección B→C.

Se construyó con los pseudosónicos obtenidos una sección de contornos de velocidad a través del software Surfer que permite determinar con precisión las zonas donde existen mayores variaciones de velocidad entre estos puntos. Para la construcción de la sección de contornos de velocidad en la dirección A→B se ubicó el sísmico de A en el origen de un sistema de coordenadas, los pseudo-sísmicos fueron ubicados en la componente horizontal con una separación de un kilómetro hasta llegar al sísmico de B. La componente vertical del sistema está dada por las lecturas de profundidad común de los sísmicos y pseudosísmicos y una tercera componente es la dada por las líneas de contornos de velocidad las cuales indican los valores de velocidad común a una determinada profundidad para cada sísmico y pseudosísmicos en esta dirección (figura 2). Este proceso se aplicó de igual forma a la sección B→C (figura 3).

Con los resultados obtenidos en las secciones de velocidades sísmicas donde se ha considerado la anisotropía δ se determinó para puntos de profundidad común las variaciones de velocidad entre el modelo isotrópico y el anisotrópico, permitiendo así una mejor visualización de las zonas donde están dadas estas variaciones (figuras 4 y 5).

Análisis de los resultados

En las secciones de velocidad obtenidas en la dirección A→B y B→C del modelo isotrópico, se muestra como la velocidad entre estos puntos varía lateralmente lo que permite de esta forma determinar las zonas más óptimas para la adquisición de los próximos registros sísmicos. Sin embargo la in-

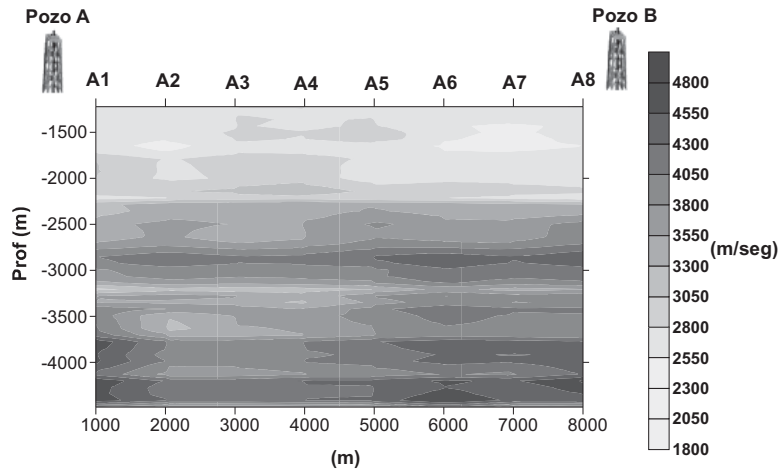


Figura 2. Sección de velocidades del modelo anisotrópico en la dirección A→B.

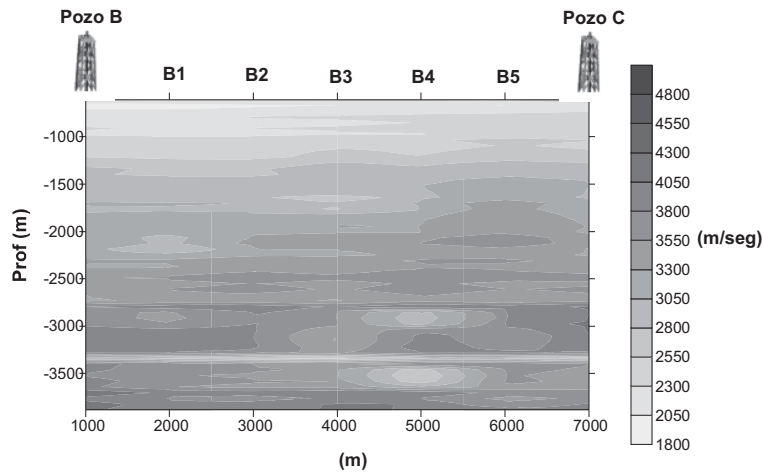


Figura 3. Sección de velocidades del modelo anisotrópico en la dirección B→C.

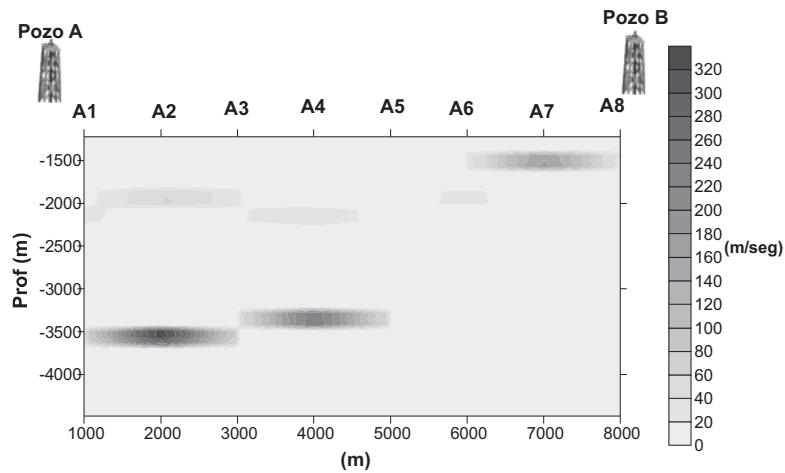


Figura 4. Sección de variaciones de Velocidad entre el modelo isotrópico y el anisotrópico en la dirección A→B.

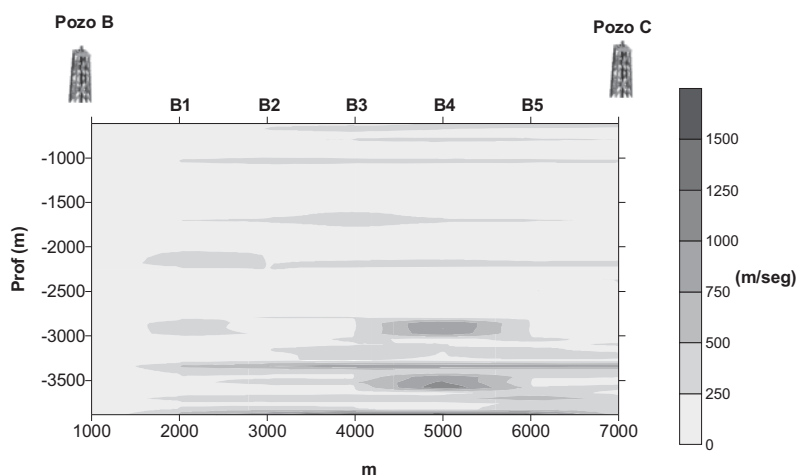


Figura 5. Sección de variaciones de Velocidad entre el modelo isotrópico y el anisotrópico en la dirección B→C.

corporación del factor de anisotropía delta en este análisis nos muestra en las nuevas secciones de velocidad variaciones entre ambos modelos que merecen nuestro análisis.

En primer lugar es importante conocer lo referente a la información geológica del área del campo de Bachaquero ya que las variaciones de velocidad son función de las propiedades geológicas de las rocas.

Los estudios realizados por (5-7) muestran estudios estructurales y geológicos detallados del área de Bachaquero.

Desde el punto de vista estructural el campo de Bachaquero puede interpretarse como un monoclinial de bajo buzamiento limitado por una falla hacia el oeste, una discordancia hacia el noroeste, un contacto agua-petróleo al sur y por degradación progresiva en la calidad de las arenas en las direcciones norte y este.

En el contexto regional el área de estudio esta situada al noroeste de Venezuela, dentro de la cuenca petrolífera del lago de Maracaibo; esta cuenca esta delimitada al oeste-noroeste por la sierra de Perijá, al sur-sureste por la Cordillera de los Andes, al este-noreste por la Serranía de Trujillo, y al norte por la falla de la Oca.

El área de estudio se encuentra ubicada dentro del campo de Bachaquero tiene una superficie aproximada de 33,29 km² el cual desde el punto de vista estructural es un monoclinial alargado en sentido nortesur con un fuerte buzamiento entre 45 y 60 hacia el este. Está limitada al oeste por la falla de intercampo y al este por la falla de Pueblo Viejo. Estructuralmente, el área se originó con la inversión de una antigua falla normal de edad eoceno, la falla de Pueblo Viejo, cuyo rejuvenecimiento empezó levemente durante la formación de los mapas de Lara en el eoceno tardío y siguió durante toda la orogénesis andina, que empezó en el área, en el oligoceno. Paralela a la falla de pueblo viejo se formó un sistema de fallas secundarias que dividió el área en bloques escalonados.

Es importante observar que el área de estudio en esta investigación se encuentra ubicada en el flanco oeste de este monoclinial y no está afectado por fallas o elementos estructurales de importancia.

Desde el punto de vista estratigráfico el ambiente deposicional del campo varía entre fluvial y costero y hay probadas evidencias de la existencia de sistemas de canales. Adicionalmente, se ha detectado estratificación local, representada por lentes de lutita

lateralmente continuos que a su vez ocasiona cierta anisotropía en la distribución de permeabilidad y algunos parámetros elásticos.

Del análisis de los mapas de distribución de arena en el área se observa que existe una tendencia en la distribución de las arenas en dirección norte-este. Los canales principales son bordeados por otros cuerpos de arena de diferente espesor; que pueden interpretarse como bancos de río depositados en un ambiente continental específico de una zona de meandros.

El grupo de arenas-arcillosas se presenta con espesores variables en toda la zona sedimentada, esta característica es propia de ambientes continentales.

Ahora bien, del análisis de las secciones de velocidad se observan anomalías entre el modelo isotrópico y el anisotrópico en la dirección A→B. En estas secciones se muestran dos marcados cambios de velocidad entre ambos modelos, donde la máxima variación está ubicada a una profundidad entre 3300 m y 3800 m y entre los pseudosónicos A1, A2, A3 y A4. Estas variaciones están en el orden 320 m/seg las cuales de acuerdo a su geometría y a la geología del área podrían estar asociadas a variaciones estratigráficas propias de un ambiente deposicional de tipo fluvial.

En la dirección B→C la sección de variación de velocidad muestra mayores anomalías entre ambos modelos donde la más pronunciadas están ubicadas a una profundidad entre 2800 m y 3700 m y entre los pseudosónicos B3 y B5. Estas variaciones están en el orden de 1300 m/seg en la que pudiera estar infiriendo tanto la presencia de fluidos anómalos además de los cambios estratigráficos.

En los dos modelos anisotrópicos obtenidos se observa una clara tendencia en la disminución de la velocidad con respecto al modelo isotrópico, lo cual está ajustado y en

concordancia con la geología y estratificación del área.

De esta forma las variaciones de velocidad obtenidas en los modelos anisotrópicos en las respectivas direcciones analizadas se observa como el factor de anisotropía delta influye en las velocidades interválicas mostrando cambios de velocidad que no son visibles en el modelo isotrópico.

Conclusiones

En esta investigación se determinó un modelo matemático que muestra la dependencia de las velocidades interválicas de Dix en función del factor de anisotropía delta, permitiendo incorporar en estas velocidades las propiedades elásticas del medio por donde la onda se propaga y generando de este modo un mejor ajuste entre las velocidades interválicas.

Las variaciones de velocidad obtenidas entre los modelos isotrópicos y anisotrópicos muestran la influencia del factor de anisotropía en las velocidades interválicas.

La incorporación del factor de anisotropía delta en el modelo de velocidades sísmicas muestra variaciones laterales de velocidad asociadas a la presencia de canales fluviales las cuales están en concordancia con la litología y estratificación del área de estudio.

El método desarrollado en esta investigación permite determinar en forma más certera las zonas con mayores variaciones laterales de velocidad, las cuales pueden ser usadas para orientar la adquisición de futuros registros sísmicos en el área de estudio.

Referencias bibliográficas

1. DIX C.H. *Geophysics* 20: 68-86 1955.
2. RIVERO. L. Uso de velocidades sísmicas en la programación de registros sísmicos de pozos (Para obtener el título de Licenciado en Física). Facultad Experimental de Ciencias.

- Universidad del Zulia. Maracaibo (Venezuela). 84 pp. 1997.
3. BRITTAN J., WARNER M., PRATT G. **Geophysics** 60: 1243-1248. 1995.
 4. THOMSEN L. **Geophysics** 51: 1954-1966. 1986.
 5. GUTIÉRREZ F. Ambientes sedimentarios de algunas arenas petrolíferas Miocenas en la costa del Lago de Maracaibo. **Memoria IV Cong. Geol. Venez.** Caracas (Venezuela) 5: 2637-2686. 1972.
 6. VERA O. Estudio Geológico detallado del Yacimiento Bachaquero Inferior-13 (Para obtener el título de Ingeniero). Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas (Venezuela). 90 pp. 1993.
 7. MORALES J. Identificación de las formaciones del mioceno y discordancia del Eoceno, en el área de Bachaquero lago, mediante el uso de ripios y parámetros de perforación (Para obtener el título de Ingeniero). Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. Mérida (Venezuela). 130 pp. 2000.
 8. ANSTEY. **Seismic Interpretation the Physical Aspects**. International Human Resources Development Corporation Boston (USA). 1977.
 9. WINTERSTEIN D.F. **Geophysics** 15: 661-672. 1986.
 10. FIMLAY C.J., HAMILTON D.S., HANDFORD R. **Caracterización de los yacimientos de la sección terciaria del bloque B en el sur del lago de Maracaibo**. PDVSA/BEG. Maracaibo (Venezuela). 1996.
 11. FRANCESCHINI J.P. **Propiedades elásticas de los sólidos**. Monografías FEC-LUZ. Maracaibo (Venezuela). 2004.
 12. CANTOS F.J. **Tratado de Geofísica Aplicada**. Librería Ciencia-Industria, S.L. Pl. Madrid (España). pp. 520. 1974.
 13. LEVIN F.K. **Geophysics** 36: 510-516. 1971.
 14. TSVANKIN L., THOMSEN L. **Geophysics** 59: 1290-1304. 1994.
 15. TSVANKIN L. **Geophysics** 60: 1095-1107. 1995.
 16. LESKINEN R. **Introduction to seismic processing**. Training Department Petty-Ray Geophysycal Division. 20: 418-438. 1975.
 17. SCHLUMBERGER C.A. Seismic Applications (WST and Geogram). Comunicación personal. 1979.
 18. SCHLUMBERGER C.A. Sísmica de pozo. Comunicación personal. 2001.
 19. SHERIFF S.A. **Seismic Stratigraphy**. International Human Resources Development Corporation. Boston (EEUU). 1978.
 20. TANER, M.T., KOEHLER F. **Geophysics**. 34: 859-881. 1969.
 21. STOEPH. **Geophysics** 31: 900-916. 1966.
 22. GRECHKA W., TSVANKIN L., COHEN J. **Geophysics Prospecting** 47: 117-148. 1999.