

ELABORACIÓN Y EMPLEO DE TRAZAS SINTÉTICAS PARA LA CALIBRACIÓN GEOLÓGICA DE LOS DATOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN

ELABORATION AND USE OF SYNTHETIC TRACES FOR GEOLOGICAL CALIBRATION OF REFLECTION SEISMIC DATA

GUILLERMO MIRÓ PAGÉS
JORGE RUIZ IBARRA
EMILIO R. ESCARTÍN SAULEDA

E-mail: gmiro@civil.ispjae.edu.cu
Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.

RESUMEN: El presente trabajo expone algunas aplicaciones del nuevo sistema de programas MECCA, el cual permite calcular sismogramas sintéticos a partir de registros de carotaje acústico. Estos sismogramas permiten realizar en una forma rápida, económica y confiable, la calibración geológica de los datos sísmicos, lo que es de vital importancia para la correcta interpretación de éstos. En el trabajo se expone la esencia físico-matemática en que se fundamenta el algoritmo empleado, y se muestran algunos ejemplos prácticos de la utilización en nuestro país del sistema referido

Palabras clave: Sísmica; sismogramas sintéticos; calibración geológica.

ABSTRACT: This paper is intended to show a new software "MECCA" to obtain synthetic traces from acoustic well logs, as well as some experiences in using these techniques in geological studies. Some results are shown, obtained by using the above mentioned soft ware with acoustic well log data from Rabihorcado well in Guacanayabo Gulf, in order to do the lithostratigraphic referencing of seismic reflections.

Key words: Seismic; synthetic seismograms; geologic calibration.

INTRODUCCIÓN

La obtención de trazas sintéticas es esencialmente un método de modelaje unidimensional, que comenzó a utilizarse en la década de los 50 y en la actualidad tiene una gran aplicación en el mundo para la solución, mediante métodos sísmicos, de tareas tanto estructurales como estratigráficas, aunque en Cuba apenas ha sido empleado.

Según Denisson (1960) los sismogramas sintéticos constituyen básicamente un método para estudiar la correlación existente entre los datos de pozos y los registros de reflexión obtenidos en las cercanías de éstos.

Este trabajo expone resumidamente una metodología para obtener trazas sintéticas a partir de registros de carotaje acústico, así como las experiencias en el uso de esta técnica en la región sudoriental de Cuba, para de

esta forma realizar la calibración, es decir, la referencia litoestratigráfica de las reflexiones sísmicas registradas en las proximidades de los pozos, aspecto este de gran interés práctico.

Uno de los usos principales de las trazas sintéticas consiste en elevar sustancialmente la confiabilidad en la referencia geológica de las reflexiones, aspecto este de cardinal importancia. Al respecto, Sheriff y Geldart (1985) plantean que muchas veces la referencia geológica de las reflexiones sísmicas no es tan simple y frecuentemente se lleva a cabo en forma imprecisa.

En la figura 1 se representa la esencia del concepto de traza sintética. Como se puede observar, las reflexiones sísmicas surgen asociadas a las variaciones de impedancia acústica que tienen lugar en el medio. Si se conocen detalladamente estas variaciones con la profundidad, resulta posible calcular la amplitud de las

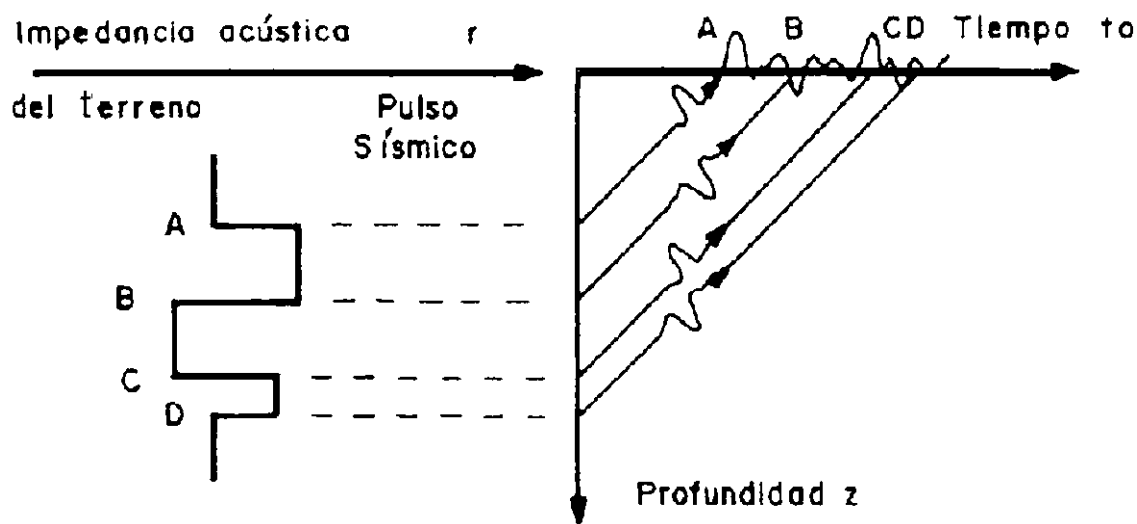


Figura 1. Síntesis de una traza de reflexión.

reflexiones surgidas en cada frontera de cambio, empleando fórmulas convencionales. Combinando estos acontecimientos de reflexión en forma correcta con sus relaciones temporales, es posible sintetizar una traza de reflexión.

El sistema de programas MECCA desarrollado por Escartín (Miró y Escartín, 1996) para la manipulación y elaboración de registros acústicos de pozo, permite el cálculo de las trazas sintéticas. Diferentes autores (Bulatov, 1970; Dupal *et al.*, 1977; Gogonienkov, 1972) se han referido a la correspondencia observada entre los mismos eventos en los sismogramas experimentales de campo y en los sintéticos, y han señalado que a veces pueden existir ciertas diferencias entre éstos, debido a factores como:

- Efecto de diferentes tipos de ondas útiles y ruidos en ambos tipos de registros.
- Atenuación gradual de las amplitudes y de las frecuencias predominantes de los eventos en los sismogramas de campo, lo cual no se manifiesta en las trazas sintéticas.
- Desfase en tiempo entre los mismos eventos, que a veces se aprecia en ambos registros por el efecto de la Zona de Bajas Velocidades que influye en el sismograma experimental y no en el sintético, por atribuir a cada nivel de profundidad el tiempo de recorrido de la onda a partir de datos de primeras entradas de perfil sísmico vertical (VSP, siglas en inglés) (Galperin, 1980; Stewart, 1984) o de la integración del Δt registrado a partir del método acústico de pozo, por diferentes factores (Dupal, 1977).
- Diferente grado de resolución espacial y temporal implícito en ambos tipos de registros.

ASPECTOS BÁSICOS PARA EL CÁLCULO DE TRAZAS SINTÉTICAS

Las trazas sintéticas constituyen un resultado del modelaje sísmico unidimensional, y se calculan las mismas a partir de los datos del método acústico de pozo. A

pesar de que las ventajas del empleo de esta técnica para elevar la efectividad de las interpretaciones sísmicas han sido plenamente demostradas por la experiencia internacional (Dennison, 1960; Gogonienkov, 1972; Sheriff y Geldart, 1985), en Cuba son poco empleadas hasta el presente, lo que se explica por la carencia de un aseguramiento de programas de computación destinados a estos fines y por no disponer de registros acústicos de pozos confiables, por lo que se reportan sólo algunos casos en que fueron calculados los sismogramas sintéticos por compañías norteamericanas con técnicas analógicas.

Metodología de elaboración de las trazas sintéticas

Con frecuencia, para el cálculo de las trazas sintéticas se consideran modelos geológicos constituidos por capas homogéneas horizontales, con velocidades constantes y excitadas elásticamente bajo el efecto de ondas planas. En la figura 2 se ilustra el procedimiento general de obtención de las trazas sintéticas.

El método acústico de pozo de tiempo intervalo proporciona como resultados los tiempos de propagación de las ondas elásticas en el medio que rodea al pozo en función de la profundidad z . Estas curvas deben transformarse en curvas de velocidad del medio $V(z)$, a través de la expresión:

$$V(z) = \frac{L}{\Delta t(z)} \quad (1)$$

Donde:

L es la longitud de la sonda de pozo y $\Delta t(z)$ es el tiempo intervalo de propagación de las ondas elásticas en el medio, en función de la profundidad.

La curva de los coeficientes de reflexión en función de la profundidad se obtiene a partir de la información de los métodos acústico y de densidad. Debido a que:

$$K(z) = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_2 + \tau_1} \quad (2)$$

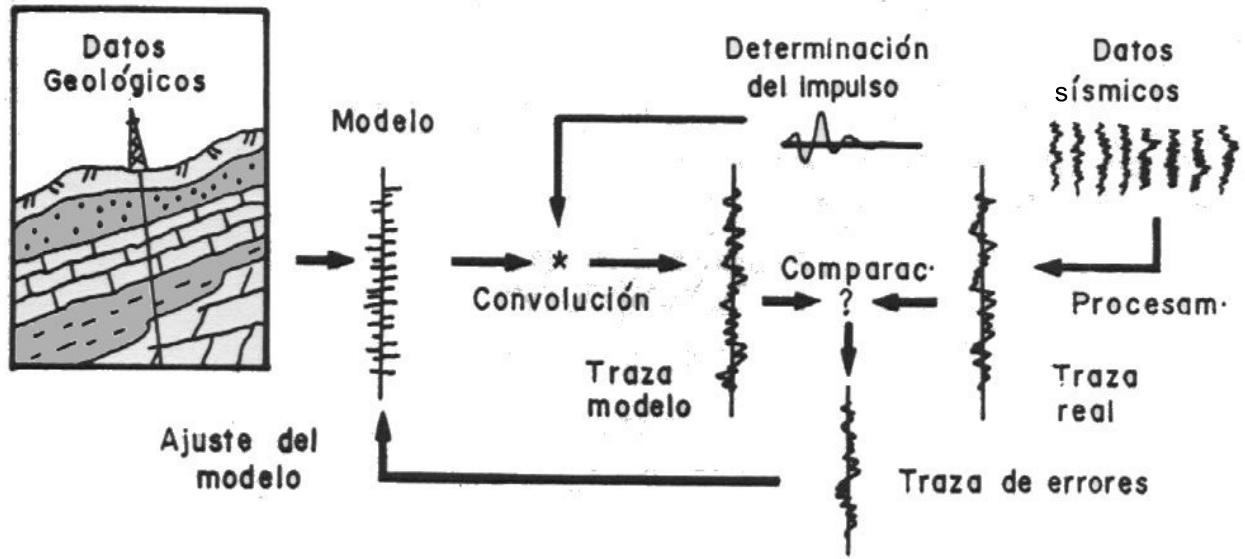


Figura 2. Procedimiento general de obtención de las trazas sintéticas.

Donde:

$K(z)$ es el coeficiente de reflexión calculado de forma estricta; τ es la impedancia acústica del medio 2, y los subíndices 1 y 2 se refieren a las propiedades por encima y por debajo, respectivamente, de la frontera entre ambos medios.

La impedancia acústica de un medio se define como el producto de la velocidad de las ondas elásticas V por su densidad σ ($\tau = V \cdot \sigma$). A veces no se cuenta con datos del método de densidad de pozo, por lo que se considera que el medio está caracterizado por un único valor de densidad y se emplea con buen grado de aproximación la expresión:

$$K(z) \approx \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \quad (3)$$

Uno de los pasos más importantes de la elaboración de los sismogramas sintéticos es el cambio de coordenadas de profundidad z a tiempos t_0 de la curva $K(z)$, ya que la curva $K(t_0)$, que recibe el nombre de reflectividad del medio, constituye la respuesta del mismo al impulso unitario o función Delta de Dirac.

Para obtener $K(t_0)$ es necesario calcular previamente:

$$TI(z) = T_{ini} + \int_{Z_{ini}}^z \delta t(u) du \quad (4)$$

que constituye el tiempo integral de propagación de las ondas desde la profundidad inicial Z_{ini} hasta la profundidad z . Por lo general, estas curvas de $TI(z)$ necesitan ser calibradas, es decir, corregidas, para que puedan ser comparables con los hodógrafos de las primeras entradas del VSP. Esta corrección es importante ya que de lo contrario, los eventos en el sismograma sintético resultan típicamente desfasados en el sentido del incremento de

tiempos de sus verdaderas posiciones, esto dificulta su comparación con los eventos equivalentes en los cortes de tiempo. Luego de obtenerse:

$$t_0(z) = 2 \cdot TI(z) \quad (5)$$

que es el tiempo de propagación de las ondas en el medio, comparable con las observaciones de sísmica superficial, se obtiene $K(t_0)$ como solución de un sistema de ecuaciones:

$$K(t_0) = \begin{bmatrix} K(z) \\ t_0(z) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Estos valores generalmente tienen que ser regularizados en el eje t_0 . Una vez regularizada, esta curva $K(t_0)$, en el caso más general, puede ser modificada mediante algún procedimiento adecuado, tal como el algoritmo de Kuznetz-Varanov, con el propósito de modelar algunos fenómenos sísmicos específicos, tales como la formación de ondas múltiples en diferentes fronteras. Por último, estas curvas regularizadas y modeladas $K(t_0)$ se someten a la operación de convolución digital con un operador que representa la forma de onda de la fuente sísmica.

Este operador se puede determinar teóricamente (pulsos de Ricker o Berlage) o extraerse de los datos de la sísmica superficial.

El resultado de la convolución es la traza sintética $A(t_0)$, que se expresa como:

$$A(t_0) = k(t_0) * I(t_0) \quad (7)$$

donde $k(t_0)$ es la reflectividad del medio, $I(t_0)$ es la forma de la onda de la fuente y el símbolo (*) denota la convolución digital. Esta traza sintética puede ser utilizada directamente para comparaciones con registros sísmicos de superficie o de pozo, expresados en término

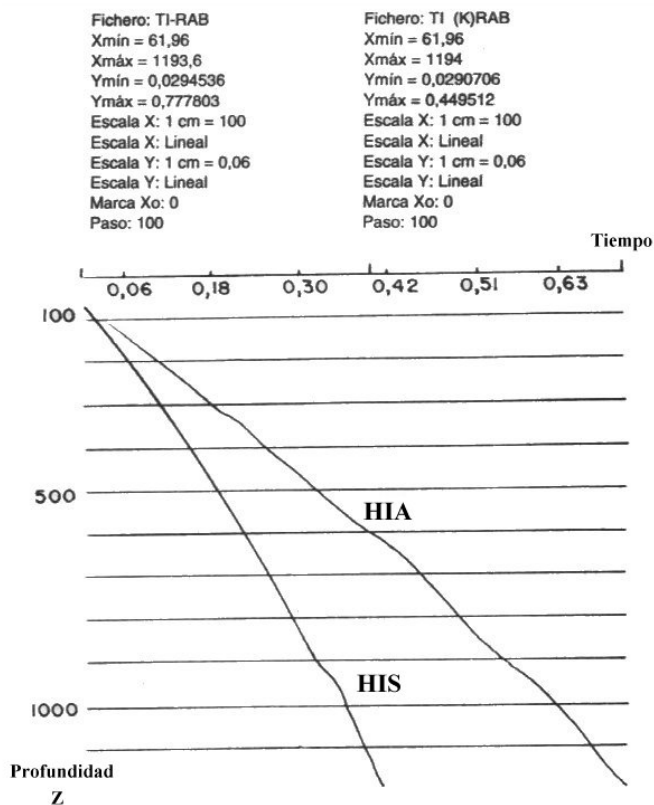


Figura 3. Hodógrafos en el pozo Rabihorcado.
 HIS: Hodógrafo Integral Sísmico.
 HIA: Hodógrafo Integral Acústico.

de tiempos, puede ser modulada en el tiempo o ser sometida a un cambio de coordenadas para ser formulada en función de la profundidad z, eliminando la variable t_0 .

$$A(z) = \begin{matrix} A(t_0) \\ t_0(z) \end{matrix} \quad (8)$$

En este último, caso la traza A(z) puede utilizarse para compararla con los datos originales de pozo y con otros datos geológicos expresados en términos de profundidad.

Experiencias sobre el cálculo de las trazas sintéticas en el golfo de Guacanayabo

Durante los trabajos sísmicos realizados en esta región, fue registrado un fondo de intensos y disímiles ruidos, lo que dificultó la interpretación de los cortes de tiempo en esta área. Esta circunstancia sugirió la conveniencia de utilizar aquí las trazas sintéticas ya que, como es conocido, éstas pueden ayudar considerablemente en la referencia geológica de las reflexiones.

En el pozo Rabihorcado se cuenta con registro acústico de tiempo intervalo $\Delta t(z)$, el que fue empleado con este fin. El proceso de cálculo se inició con la digitalización del registro, utilizando un intervalo de discretización de 1 m, según las recomendaciones expuestas en la literatura al respecto (Gogonienkov, 1972).

El proceso de discretización fue realizado con ayuda del programa MECCA1, que es uno de los que integra el

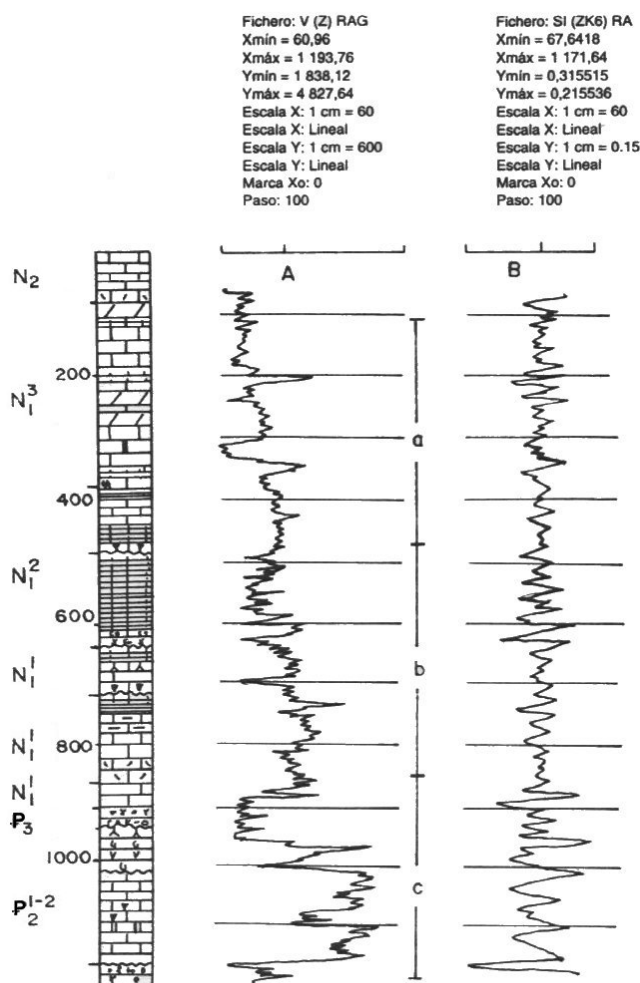


Figura 4. Columna litoestratigráfica, curva acústica (A) y traza sintética (B), correspondientes al pozo Rabihorcado.

sistema MECCA, y se contó con un digitalizador acoplado a una microcomputadora. Posteriormente, mediante los programas MECCA2 y MECCA3 se obtuvo la curva V(z) al calcular para cada valor de z su correspondiente valor $1/\Delta t(z)$, ya que la distancia existente entre los dos receptores en la sonda de medición L era de 1m. También se calculó el tiempo integral según (4) de los valores $\Delta t(z)$ determinados hasta cada profundidad respectiva, y se obtuvo como resultado un Hodógrafo Integral Acústico (HIA) en función de z.

El proceso de cálculo continuó posteriormente con el establecimiento de una conciliación entre los datos de velocidades y de tiempos integrales, a partir de que ya se contaba para cada z con los valores correspondientes de estas variables.

Partiendo de la curva V(t) y por medio de los programas MECCA2 y MECCA3, fueron calculados los coeficientes de reflexión $K(t_0)$ a partir de las expresiones (3) a la (6), con lo cual se obtuvo una traza sintética de impulsos (conocida también como reflectividad del terreno).

A continuación, con el programa MECCA4 fueron creados varios impulsos de Ricker con frecuencias predominantes de 30; 40; 50; 60, y 80 Hz, con un intervalo de discretización de 0,001 s.

TABLA 1. COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS DEL CORTE DE TIEMPOS, DE LA TRAZA SINTÉTICA Y SU CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA EN EL POZO RABIHORCADO

Datos del perfil sísmico t[s]	Datos de la traza sintética t[s]	Z[m]	Datos del pozo. Correlación estratigráfica
0,200	0,200	200	Contacto dentro del N_1^3 (calizas y argilitas calcáreas)
0,320	0,320	300	Capa de baja velocidad en el N_1^3
0,418	0,412	490	Frontera $N_1^3 - N_1^2$
0,500	0,520	600	Discordancia $N_1^2 - N_1^1$
0,600	0,610	720	Discordancia dentro del N_1^1
0,680	0,700	900	Frontera $N_1^1 - P_3$
0,740	0,760	960	Frontera acústica próxima al contacto $P_3 - P_2^{1-2}$
0,860	0,860	1 100	Frontera acústica dentro del P_2^{1-2}

Finalmente, utilizando el programa MECCA5, a partir de los ficheros de los datos de las trazas sintéticas de impulsos y de los pulsos creados, fueron obtenidos los valores de las trazas sintéticas correspondientes mediante el cálculo de la expresión (7). Estos resultados fueron graficados empleando el programa MECCA6.

En la figura 3 aparecen representados el Hodógrafo Integral Sísmico (HIS) obtenido en el pozo Rabihorcado mediante el método sísmico integral de pozo, es decir, sobre la base de la técnica tradicional de realizar explosiones en las proximidades del pozo y registrar a lo largo de éste y el HIA referido anteriormente.

Como se aprecia en la figura 3, se manifiesta un desplazamiento sistemático (*drift*) entre ambos hodógrafos en este pozo, y se alcanza en la profundidad máxima que fue investigada ($h_{MÁX}=1200$ m) una diferencia de tiempo $\Delta T=0,328$ s. Esta situación motivó la búsqueda de algún procedimiento que permitiera corregir este efecto, ya que en presencia del mismo se dificulta notablemente la comparación entre las trazas sintéticas derivadas del método acústico de pozo y las trazas de los sismogramas de campo. En la literatura técnica (Gogonienkov, 1972; Sheriff y Geldart, 1985) hay referencias a la necesidad de realizar una calibración a los HIA antes de emplear sus valores de tiempo para calcular las trazas sintéticas. Está planteado que para realizar esta calibración es necesario contar con los HIA y con algunos puntos de los HIS distribuidos a lo largo de todo el pozo. Sin embargo, las fuentes bibliográficas consultadas no exponen claramente cómo realizar la calibración. Por esta razón fue concebido un procedimiento simple para ejecutar la misma, el que se expone en detalle en García y Delfino (1991). Una vez realizada la calibración del HIA, se estableció una nueva depen-

Fichero: V (Z) RAG Xmin = 0,0561412 Xmax = 0,898133 Ymin = 1 850,62 Ymax = 4 767,72 Escala X: 1 cm = 0,04 Escala Y: 1 cm = 500 Escala Y: Lineal Marca Xo: 0 Paso: 0,1	Fichero: SI (ZK6) RA Xmin = 0,0591412 Xmax = 0,898133 Ymin = 0,265684 Ymax = 0,282661 Escala X: 1 cm = 0,04 Escala Y: 1 cm = 0,125 Escala Y: Lineal Marca Xo: 0 Paso: 0,1
--	--

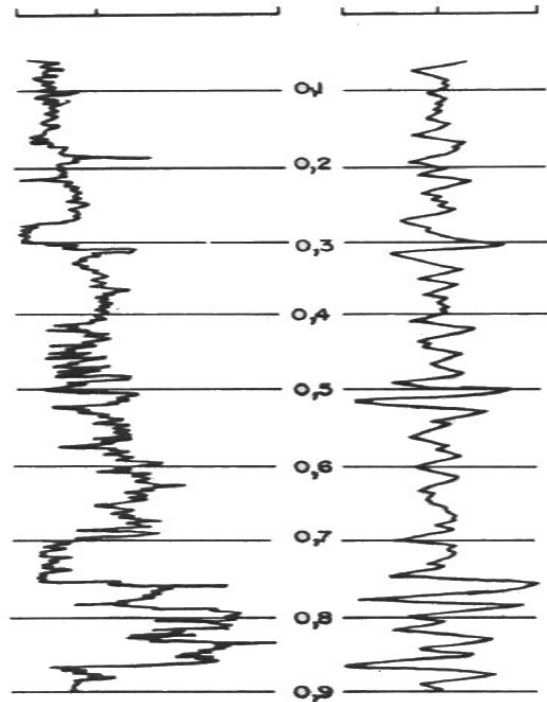


Figura. 5. Comparación de la curva V(t) (izquierda) con la traza sintética (derecha).

dencia $T(z)$ y sobre la base de ésta fueron calculadas de nuevo las trazas sintéticas.

En la figura 4 se muestran la columna litoestratigráfica del pozo, el gráfico V(z) y la traza sintética calculada para un pulso de Ricker con frecuencia predominante de 80 Hz. Es de significar que la traza sintética aparece representada en escala de profundidades, lo que permite comparar las tres informaciones.

Referencia geológica de las reflexiones sísmicas reconocidas

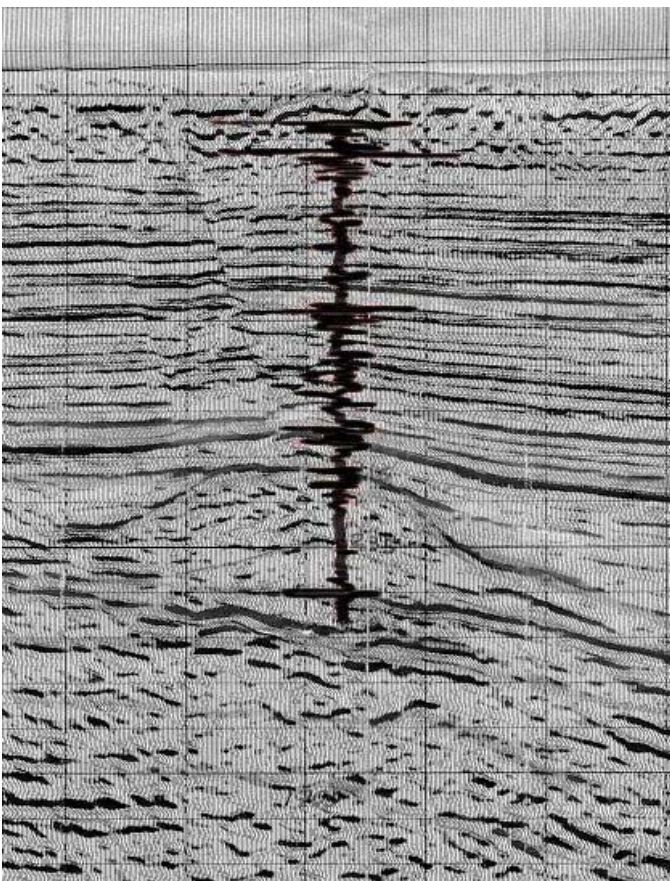
En primer lugar llama la atención que el corte acústico del pozo Rabihorcado, según se ve en la curva V(z) (Curva A de la Fig. 4), es bastante diferenciado, lo que sin duda propicia la formación de reflexiones. Al analizar la curva de velocidades y la columna del pozo mostradas en la figura 4, se aprecian tres intervalos principales.

Intervalo a: abarca desde la superficie hasta una profundidad de 490 m. Este intervalo se caracteriza porque la curva de velocidades aparece relativamente menos diferenciada, es decir, parece representar una frecuencia espacial predominante, relativamente más baja. En el mismo impera, desde el punto de vista litológico, la componente carbonatada.



Figura 6. Corte sísmico A en el que se ve la traza sintética ubicada en la posición de un pozo profundo.

Figura 7. Corte sísmico B en el que se ve la traza sintética ubicada en la posición de un pozo profundo.



Intervalo b: desde la profundidad aproximada de 490 m hasta los 900 m la curva de velocidad se torna de muy alta frecuencia. Según se ve en la columna litológica, aquí predomina la componente arcillosa calcárea, y se aprecia que el mismo resulta más heterogéneo y más diferenciado que el anterior.

Intervalo c: a la profundidad aproximada de 900 m el aspecto de la curva vuelve a variar apreciablemente hasta la profundidad final del pozo, en que parecen predominar las componentes carbonatadas y efusivo sedimentarias. En la figura 5 se presenta la comparación entre la curva $V(t)$ y la traza sintética representada en escala de tiempo T , y en la Tabla 1 se sintetizan los resultados del análisis realizado.

Por último, en las figuras 6 y 7 se muestran otros dos cortes de tiempos (A y B) correspondientes a líneas sísmicas que interceptan pozos profundos de la región sudoriental de Cuba. En estos dos casos, las trazas sintéticas que aparecen superpuestas a los cortes en los lugares de ubicación de los pozos fueron calculadas de modo similar a como fue anteriormente expuesto, con lo que se logró una precisa calibración geológica de las reflexiones sísmicas registradas en las áreas respectivas.

CONCLUSIONES

1. El sistema de programas MECCA permite calcular trazas sintéticas a partir de registros de pozo de carotaje acústico en una forma rápida y confiable, lo que contribuye a elevar el rigor en la calibración geológica de las reflexiones sísmicas.
2. Fueron elaboradas las trazas sintéticas correspondientes a los registros acústicos del pozo Rabihorcado, ubicado en el golfo de Guacanayabo, lo que ha permitido precisar la correlación sismogeológica de los eventos sísmicos en el área mencionada.

BIBLIOGRAFÍA

- BULATOV, B.: Carotaje acústico, Niedra, Moscú, 1970.
- DENNISON, A. T.: "An Introduction to Synthetic Seismogram Techniques", *Geophysical Prospecting*, 8 (2): 231-242, 1960.
- DOMÍNGUEZ, R., S. TOUCET, P. ABALLÍ, J. PROL Y G. MIRÓ: "Resultados de las últimas investigaciones geofísicas para petróleo llevadas a cabo en la Cuenca sur de Cuba", Informe de Investigación, Empresa de Geofísica, La Habana, 1999.
- DUPAL, F.: Seismic applications of well logs. Resumen de trabajos del V simposio europeo sobre técnicas de métodos geofísicos de pozos, París, Francia, 1977.
- GALPERIN, E. I.: Perfilaje sísmico vertical, Niedra, Moscú, 1980.
- GARCÍA, M. R. y E. DELFINO: "Posibilidades del carotaje sísmico", Tesis de diploma, Departamento de Geofísica, ISPJAE, Ciudad de la Habana, 1991.
- GOGONIENKOV, G. N.: *Cálculo y empleo de los sismogramas sintéticos*, Niedra, Moscú, 1972.
- MIRÓ, G., y E. ESCARTÍN: "Elaboración y empleo de trazas sintéticas", *Minería y Geología*, 13 (2):3-12, 1996.
- SHERIFF, R. E. y L. P. GELDART: *Exploration Seismology*, 2. ed. University Press, Cambridge, 1985.
- STEWART, R.: "Vertical Seismic Profile (VSP)", *Geophysics*, 49 (8):200-219, 1984.