

# Efecto de la rugosidad del terreno en las secciones sísmicas: modelamiento por elementos finitos

ROBINSON QUINTANA<sup>1</sup>, SANDRA CÉSPEDES<sup>1</sup>, ALFREDO GHISAYS<sup>1</sup>, GABRIEL PÉREZ<sup>2</sup>, LUIS MONTES<sup>3</sup>

## RESUMEN

Las zonas de piedemonte se caracterizan por las capas someras de baja velocidad y por la topografía rugosa. En esos estratos se produce un ruido coherente llamado *backscattering* que apantalla las ondas que provienen de los reflectores profundos. Esta señal se observa en las secciones sísmicas del piedemonte colombiano, oscureciendo la imagen del subsuelo. Para atenuar esta señal, se presenta en este artículo un método basado en la predicción de dicho ruido y su posterior remoción de los registros. Para ello se simula la respuesta de la capa somera mediante el modelamiento numérico en elementos finitos de la propagación de la onda acústica en un modelo del subsuelo. Posteriormente, esta respuesta se sustrae traza por traza del registro sintético, logrando una atenuación sustancial del ruido en el disparo. Se presentan resultados obtenidos de la simulación con datos sintéticos.

PALABRAS CLAVE: PIEDEMONTE, RUIDO, REGISTRO SÍSMICO, MODELAMIENTO NUMÉRICO, SIMULACIÓN

## ABSTRACT

The foothills areas are characterized by low velocity shallow layers and rugged topography. Inside these stratas a coherent noise named back scattering is produced, that noise overlaps the waves coming from the deeper reflectors. In seismic sections of the colombian foothills this signal is observed, obscuring the subsurface image. A method to attenuate this signal is presented in this paper, the approach is based in the prediction of this noise and the posterior remotion from the seismic records. The shallow layer response is simulated through the numerical modeling in finite elements of the acoustic wave propagation in a subsurface model. Lately, the shallow layer response is subtracted trace by trace from the synthetic record, getting a high noise's attenuation in the shot. We present results obtained by synthetic data modeling.

KEYWORDS: FOOTHILLS, NOISE, SEISMIC RECORD, NUMERICAL MODELING, SIMULATION

## INTRODUCCIÓN

En zonas de topografía rugosa con cambios laterales de velocidad en la capa somera, se produce un ruido llamado *backscattering*, que distorsiona y oscurece la información que viene de las capas más profundas del subsuelo, donde por lo general se halla el objetivo. Las irregularidades de la superficie se comportan como puntos difractores y las reflexiones, en esa superficie libre, se manifiestan como patrones coherentes en todo el registro. Se ha intentado remover su presencia por aplicación de correcciones estáticas (Berryhill, 1979), pero éstas sólo funcionan cuando la distancia entre la fuente y el receptor es pequeña y la elevación moderada (Bevc, 1996). Otra estrategia usada es continuar el campo de onda hasta un nivel llamado datum, sin embargo, el ruido permanece en la sección resultante.

## MÉTODO

En general, la geometría y distribución de velocidades en la capa somera se pueden estimar de una sección apilada. La ecuación de onda se resuelve mediante elementos finitos, modelando así la respuesta de la capa somera y, en particular, el efecto debido a la topografía. Se presenta una estrategia para eliminar este ruido antes de cualquier paso del procesamiento sísmico, incluida la migración.

Se hizo un primer modelo 2D de la capa somera con superficie superior irregular. El modelo se dividió en elementos finitos cuadrados. En uno de los nodos de la grilla, se colocó la fuente en tiempo cero (en este caso una ondícula de Ricker); luego, un programa desarrollado en C++ bajo Diffpack (Langtangen, 1996) calcula el campo de onda en todos los elementos para cada intervalo de muestreo. Como resultado se tiene un primer sismograma sintético.

Un segundo modelo consta de la capa somera sobre un medio semiinfinito; nuevamente se resuelve la ecuación de onda en el nuevo modelo, y se obtiene un segundo sismograma. Restando estos sismogramas obtenemos la respuesta debida, únicamente de la capa más profunda, que es la zona de interés.

1 Grupo de Investigación en Geofísica, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

2 Geofísico Senior. Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol), Bogotá.

3 Profesor asociado. Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. E-mail: lmontes@ciencias.unal.edu.co

### SOLUCIÓN DE ECUACIÓN DE ONDA POR ELEMENTOS FINITOS

La ecuación de onda acústica en elementos finitos en su forma matricial, (Seegerlind, 1984), se expresa por:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (1)$$

donde  $[M]$  es la matriz de masa,  $[K]$  la de rigidez,  $\{f\}$  es el vector de fuerza y  $\{u\}$  el campo de perturbación de la onda en cada elemento del medio.

La solución de la ecuación de onda expresada en (1) por elementos finitos es:

$$u^l = 2u^{l-1} - u^{l-2} - \Delta t^2 [M]^{-1} \{ [K]u^{l-1} + f \} \quad (2)$$

Donde  $u^l, u^{l-1}$  y  $u^{l-2}$  representan el campo de onda en cada elemento del medio estimado en los instantes actual ( $l$ ), anterior ( $l-1$ ) y tras anterior ( $l-2$ ), respectivamente.

En una región donde se atenúe la energía de la onda, la ecuación (1) se modifica mediante la introducción de un término que incorpora ese efecto. Ese coeficiente de amortiguación se expresa mediante la matriz de amortiguamiento. Finalmente la expresión queda:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\}, \quad (3)$$

ecuación cuya solución viene dada por la expresión

$$u^l = \{ t^{-1} [M] + 0.5 [C] \}^{-1} [ t^{-1} [M] \{ 2u^{l-1} - u^{l-2} \} + 0.5 [C] u^{l-2} - t [K] u^{l-1} + \{ f \} ] \quad (4)$$

Matemáticamente es muy complicado determinar la matriz de amortiguación  $C$ , ya que se desconoce la matriz de viscosidad; por tanto, se formula la hipótesis de que la solución amortiguada sea una combinación lineal de la solución no amortiguada y, en consecuencia, la matriz  $[C]$  sea una combinación lineal de las matrices de rigidez y de masa. La estabilidad de la solución mediante elementos finitos requiere que las dimensiones de la grilla del modelo satisfagan las denominadas condiciones de Courant, en las cuales se establece una relación entre las dimensiones de la grilla,  $\Delta x = \Delta y$ , el intervalo de muestreo  $\Delta t$ , y la velocidad del medio,  $V$ , en tal elemento, dadas por:

$$\frac{V \Delta t}{\Delta x} \leq \sqrt{0.5} \quad (5)$$

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se construyó un modelo sencillo de la capa somera con una superficie irregular por medio de una grilla en dos dimensiones, (figura 1).

El modelo consta de 27 322 nodos y 36 867 elementos. Las dimensiones de grilla cuadrada que garantizan cumplir las condicio-

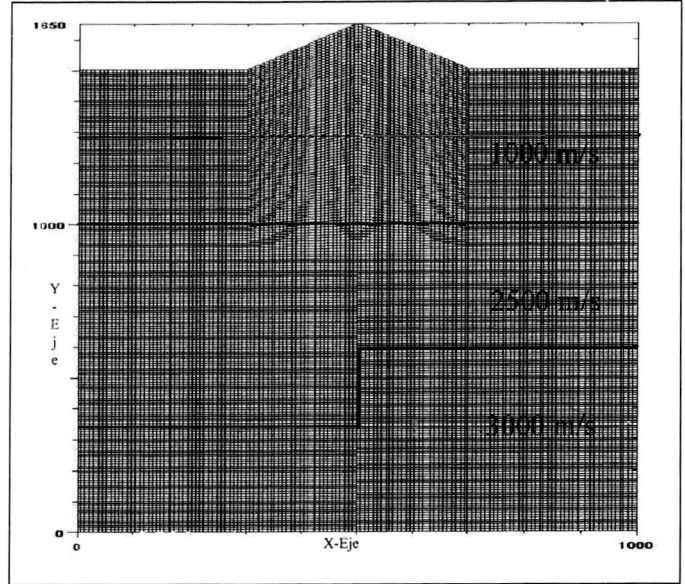


Figura 1. Modelo 2D con velocidades de intervalo en profundidad.

nes de Courant son 7 m de lado. A la capa somera se le asignó una velocidad de 1000 m/s y a la subyacente 2500 m/s.

$$\frac{V (2500m) \Delta t (0.002s)}{\Delta x} \leq \sqrt{0.5}$$

La fuente representada en una ondicula de Ricker, con frecuencia de 40 Hz, se colocó en el elemento 96 del modelo, activándose en el tiempo cero. El tiempo total de la simulación es 0.358 segundos. Se ejecutó el programa en el primer modelo tomando

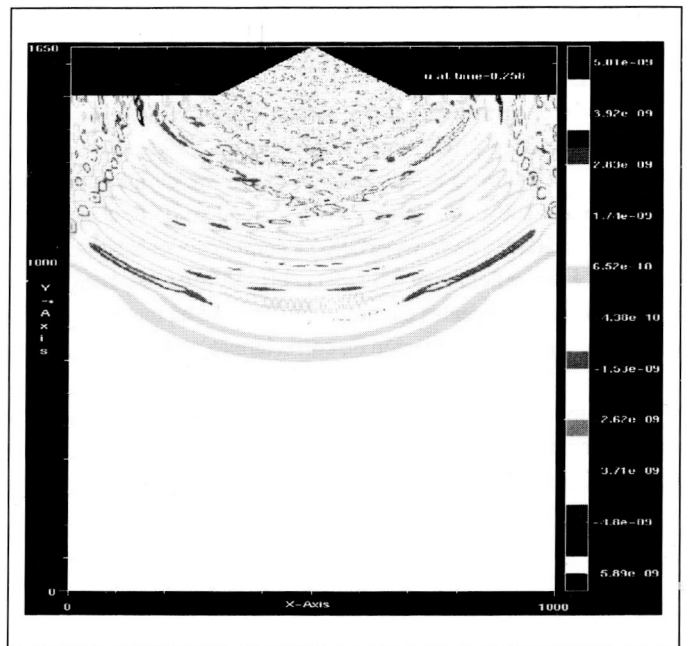


Figura 2. Instantánea del tiempo 258 ms, muestra el ruido generado y la onda sobre la primera interfase.

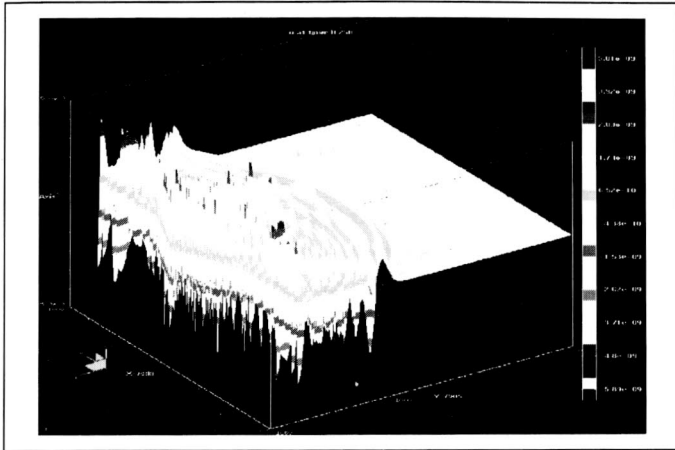


Figura 3. Instantánea del tiempo 258 ms con los valores de amplitud.

muestras en el tiempo cada 2 ms. El resultado presentado en la instantánea de la figura 2 corresponde a la respuesta de la capa somera.

Observe las anomalías y múltiples causadas por la capa somera. Como se puede observar en la figura 3, las amplitudes en la zona superficial alcanzan valores que están entre  $2.83 \times 10^{-9}$  y  $5.01 \times 10^{-9}$ , en contraste con las amplitudes del frente de onda que sólo alcanzan valores comprendidos entre  $-2.62 \times 10^{-9}$  y  $-1.53 \times 10^{-9}$ , debido al ruido generado por las múltiples y la dispersión.

Un segundo modelo fue generado a partir del primero. Para ello se adicionó, debajo del primer modelo, una tercera capa profunda con una velocidad de 3000 m/s. Una interfase quebrada separa este

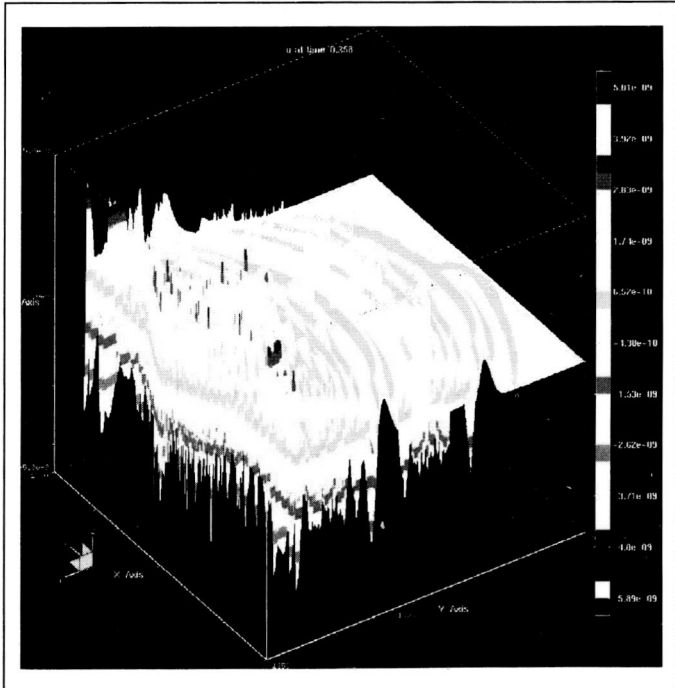


Figura 4. En el tiempo 358 ms la onda penetra en el tercer medio, se observan las difracciones en la capa somera.

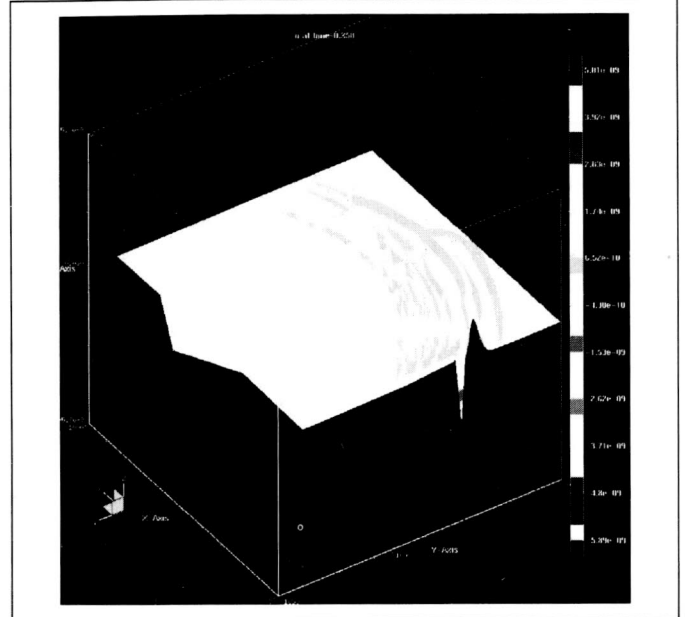


Figura 5. La instantánea muestra sólo las reflexiones de la capa más profunda y el ruido somero atenuado.

nuevo medio de la segunda capa (figura 1). El programa se ejecutó sobre este segundo modelo. Del resultado de esta simulación se seleccionó una instantánea, la cual se muestra en la figura 4. Se observa una complejidad de reflexiones, entre las que se incluye el efecto de la capa somera sobre la información del reflector profundo quebrado.

Restando de la segunda simulación el resultado de la primera, se obtiene la respuesta, debida únicamente de la capa más profunda, que es nuestro interés. La figura 5 muestra el resultado de esta sustracción. Se ha eliminado toda señal asociada a la capa somera. Por otro lado, la información del reflector profundo quebrado queda realzado, aún con ruido fácilmente eliminable por los procesos convencionales.

### CONCLUSIONES

En los modelos sintéticos, se ve que la metodología de eliminación del ruido por el método de elementos finitos para la solución de la ecuación de onda es apropiada para atenuar el ruido causado por las irregularidades de la topografía. Se requiere conocer la geometría y las velocidades de las capas someras para obtener registros semejantes a la realidad. Se propone el método de elementos finitos para simular los ruidos causados por la capa de baja velocidad y su futura aplicación para remover estos ruidos de datos reales.

El software desarrollado y el hecho de usar la ecuación de onda permiten su aplicación a modelos 3D.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia, al Instituto Colombiano para el avance de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" (Colciencias) y al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP-Ecopetrol) por la colaboración y el apoyo para llevar a buen término la presente investigación. Este artículo es resultado del proyecto Modelamiento de Fenómenos de Dispersión Sísmica Asociado a la Topografía y a las Capas Someras del Subsuelo, cofinanciado por Colciencias mediante contrato No. RC 271-2000.

## BIBLIOGRAFÍA

- BERRYHILL, J. R. 1979. Wave equation datuming. *Geophysics* 44(8):1329-1344.
- BEVC, D. 1996. Flooding the topography: Wave equation datuming of land data with rugged acquisition topography. *Geophysics* 62(5):1558-1569.
- LANGTANGEN, H. P. 1996. *Efficient Element Solution of the Linear Wave equation in Diffpack*. The Diffpack version 1.4. Report Series. SINTEFF. University of Oslo.
- SEGERLIND, L. 1984. *Applied Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons.
- ZIENKIEWICZ, O. 1992. *El método de los elementos finitos*. Vol. 2. McGraw-Hill.