

APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA WAVELET EN LA INTERPRETACIÓN DE CORTES SÍSMICOS DE REFLEXIÓN

WAVELET TRANSFORM APPLICATION IN THE INTERPRETATION OF SEISMIC REFLECTION SECTIONS

MARGARITA FERNÁNDEZ LIMIA

ADRIANA MAVILIO NÚÑEZ

GUILLERMO MIRÓ PAGÉS

RENÉ DOMÍNGUEZ GARCÉS

Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría
E-mail: mflimia@electrica.ispjae.edu.cu

Empresa de Geofísica DIGICUPET

RESUMEN: El reconocimiento estadístico de patrones sísmicos de reflexión desempeña un papel muy importante en la interpretación de estos datos. El mismo se basa en la comparación de estos patrones con otros de referencia, correspondientes a zonas bien estudiadas desde el punto de vista geológico y que se caracterizan por una clase de textura dada.

En este trabajo se muestran los resultados de la segmentación supervisada de un corte sísmico de reflexión correspondiente a una región de Cuba. Dicha segmentación se llevó a cabo empleando el método de la transformada wavelet packet, utilizando la base ortogonal Daubechies-2 y la distancia de Mahalanobis como función de discriminación. Los descriptores de textura se obtuvieron a base de los coeficientes de esta transformación. Los patrones de referencia fueron tomados en correspondencia con zonas de diversas texturas, ubicadas a diferentes profundidades a lo largo de un pozo perforado en la región. El resultado de la segmentación constituye una valiosa ayuda para realizar la calibración geológica de las reflexiones sísmicas en el área investigada. Una vez identificadas las zonas texturales correspondientes a cuatro patrones de referencia, se realizó una segunda segmentación, tomando en este caso un solo patrón, correspondiente a una de las zonas del pozo con características de interés para la exploración petrolera. El trabajo demuestra que la técnica empleada en la interpretación de cortes sísmicos, la cual proporciona incluso una valoración cuantitativa de los mismos, puede constituir una herramienta adicional para los especialistas, que les permita complementar y comprobar sus métodos de prospección y análisis.

Palabras claves: Wavelets, cortes sísmicos, segmentación, textura.

ABSTRACT: The statistical recognition of seismic reflection patterns plays a very important role in the interpretation of seismic data. This recognition is based on the comparison of this data with reference patterns extracted from geologically well understood zones that are characterized by reference textures. In this work, the results of a supervised segmentation of a seismic reflection section, corresponding to a Cuban region, are shown. The segmentation was carried out, using the wavelet packet transform with the orthogonal basis Daubechies-2 and the Mahalanobis distance as discrimination function. The texture features were calculated on the expansion coefficients. The reference patterns were taken in correspondence to different texture zones localized at different depths along a well drilled in the region. The segmentation result constitutes a greatful contribution to geological calibration of the seismic reflexions in the investigated area. Texture zones were identified corresponding to four reference patterns and later, a second segmentation was carried out, taking only one reference pattern corresponding to a well zone, whose properties are of interest for oil prospecting. This work shows that the technique used in the interpretation of seismic sections provides quantitative information about them and can be an additional tool for specialists, to corroborate and to test their prospecting and analysis methods.

Key words: Wavelets, Seismic sections, Segmentation, Texture.

INTRODUCCIÓN

La textura, característica muy importante de las imágenes, es utilizada ampliamente en el reconocimiento de patrones. Al trabajar con la textura es necesaria la adecuada selección de sus descriptores (Haralick, 1979). El propósito de todo sistema de análisis de imágenes consiste en realizar la segmentación de éstas en regiones distinguibles entre sí, a partir de sus propiedades.

El reconocimiento estadístico de patrones de reflexión sísmicos desempeña un papel muy importante en la interpretación (Love, 1984; Simaan, 1991; Vinther, 1995). Este reconocimiento se basa en la comparación de los mismos con patrones de referencia correspondientes a zonas bien estudiadas desde el punto de vista geológico y que se caracterizan por una clase de textura dada. El análisis de la textura sísmica ayuda a la interpretación estratigráfica de una región.

La transformada wavelet (WT) discreta es una de las técnicas principales y más actuales para el análisis textural de señales e imágenes. Su aplicación, incluyendo la transformada wavelet packet (WPT), a la identificación por textura ha recibido considerable atención en la literatura en la última década (Chang y Kuo, 1992; Chang y Kuo, 1993; Manian y Vásquez, 1997). La WPT se calcula según un algoritmo de árbol y permite hacer un *zoom* dentro de cualquier canal de frecuencia deseado para una posterior descomposición, en contraste con la WT convencional, la cual realiza la posterior descomposición sólo en los canales de baja frecuencia.

Como experiencia previa a este trabajo puede señalarse que recientemente fue utilizada la transformada wavelet packet 1D para la identificación de patrones sísmicos en un conjunto de datos 3D correspondientes a una región de Venezuela (Fernández y otros, 2000 a; Fernández *et al.*, 2000 b). Como resultado se pudo corroborar la presencia de un paleocauce a una determinada profundidad.

En este trabajo se aplica el método de la transformada wavelet packet (2D) para realizar el análisis por textura de una imagen correspondiente a un corte sísmico de reflexión (2D) obtenido para una región de Cuba. El objetivo es identificar dentro de la imagen zonas de diferentes texturas que son el reflejo de regiones con características geológicas diferentes. El reconocimiento se basa en patrones de referencia que fueron tomados en correspondencia con zonas de diferentes texturas ubicadas a distintas profundidades a lo largo de un pozo profundo perforado en la región.

Una vez identificadas las zonas texturales correspondientes a cuatro patrones de referencia, se realizó una segunda segmentación, tomando en este caso un solo patrón de referencia, correspondiente a una de las zonas del pozo cuyas características resultan de interés para la exploración petrolera. Esto se hizo con el objetivo de identificar y de evaluar cuantitativamente, a través de un parámetro, la similitud con esta zona de muestras de 32 x 32 pixel² alrededor de cada pixel de la imagen.

CORTE SÍSMICO DE TIEMPOS

En la figura 1 se muestra la imagen de un corte sísmico de tiempos correspondiente a una región de Cuba. Superpuesta a la figura, se aprecia una traza sintética (Miró y otros, 1999) en el lugar de ubicación de un pozo profundo. Se distinguen zonas de diferentes texturas que corresponden a áreas con características geológicas distintas. Fueron seleccionadas cuatro áreas texturales a lo largo del pozo para confeccionar los patrones de referencia, las cuales se muestran en la figura encerradas en rectángulos blancos.

TRANSFORMADA WAVELET

La transformada de Fourier ha sido ampliamente utilizada en la descomposición de señales, ésta usa funciones complejas sinusoidales como funciones base. A diferencia de ésta, la wavelet tiene una extensión finita, lo cual proporciona localización espacial y un contenido de frecuencia dentro de un rango cuyo ancho queda determinado por el principio de incertidumbre a través del ancho espacial. Este último depende del nivel de frecuencia de la wavelet, de manera que a mayor frecuencia, menor ancho espacial (mayor resolución espacial), pero mayor incertidumbre en la frecuencia. La descomposición wavelet permite realizar la localización simultánea en el dominio espacial y frecuencial a través de un análisis de multirresolución de la imagen.

Las wavelets discretas ortogonales son linealmente independientes y forman un conjunto completo para las funciones de energía finita. Las wavelets de Daubechies constituyen una base wavelet ortonormal, de soporte compacto, y han sido ampliamente utilizadas en el procesamiento de imágenes.

Figura 1. Corte sísmico de reflexión. Texturas de referencia (1-4) en rectángulos con bordes blancos.



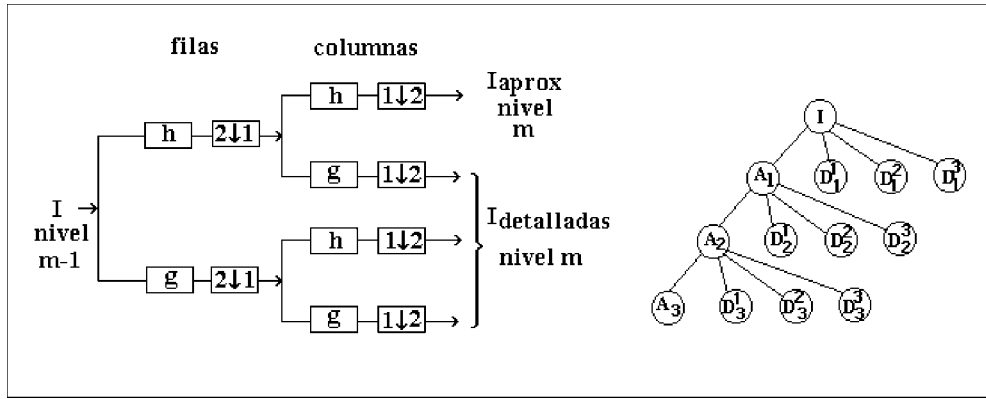


Figura 2. Obtención de sub-imágenes a la resolución 2^{-m} a partir de la sub-imagen a la resolución 2^{-m+1} y estructura piramidal de descomposición de la imagen en aproximadas y detalladas.

Las funciones de la base wavelet (ψ) discreta se obtienen por escalamiento y traslación de la función wavelet madre $\psi(x)$:

$$\psi_{m,n}(x) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}x - n) \quad (1)$$

donde m y n son números enteros.

La wavelet madre $\psi(x)$ se obtiene a partir de la función *scaling* $\{\phi\}$ asociada a la base wavelet, la cual, a su vez, se construye a partir de un conjunto de coeficientes :

$$\phi(x) = \sqrt{2} \sum_k h(k) \phi(2x - k) \quad (2)$$

y de aquí, a través del conjunto de coeficientes $\{g\}$ se llega a la wavelet madre:

$$\psi(x) = \sqrt{2} \sum_k g(k) \phi(2x - k) \quad (3)$$

donde

$$g(k) = (-1)^k h(k) \quad (4)$$

Los conjuntos de coeficientes $\{h\}$ y $\{g\}$ determinan el tipo de base wavelet discreta.

La transformada wavelet usa una familia de funciones wavelets y sus asociadas funciones *scaling*, para descomponer la imagen original en diferentes sub-bandas de frecuencia. El proceso de descomposición se aplica recursivamente a la sub-banda de más baja frecuencia para generar el próximo nivel de descomposición. Los filtros wavelet $\{g\}$ (pasabanda) y de *scaling* $\{h\}$ (pasabajo) son aplicados en ambas direcciones, horizontal (x) y vertical (y), seguidos por un submuestreo dos a uno de la imagen. Esto genera tres imágenes detalladas $D_j^k f, k = 1, 2, 3$, que contienen altas frecuencias en la dirección horizontal, vertical o en ambas, respectivamente, en dependencia de la orientación seleccionada, y una aproximada

$A_j f$, la cual corresponde a la sub-banda de más baja frecuencia, tanto en la dirección horizontal como en la vertical. Aquí j denota el nivel de descomposición o resolución. El proceso se repite sobre la imagen aproximada para producir el próximo nivel de resolución. Este proceso se ilustra en la figura 2.

La imagen aproximada (sub-banda de baja frecuencia en las direcciones x e y de la imagen) a una resolución dada m , se expresa como combinación lineal del conjunto de funciones:

$$\Phi_{m,k_x,k_y}(x,y) = 2^{-m} \phi(2^{-m}x - k_x) \phi(2^{-m}y - k_y), \quad (5)$$

que se obtiene por traslación de la función *scaling* a esa resolución, siendo k_x y k_y números enteros.

A su vez, las imágenes detalladas a una resolución m se expresan como combinación lineal de los conjuntos:

$$\begin{aligned} \Psi_{m,k_x,k_y}^1(x,y) &= 2^{-m} \phi(2^{-m}x - k_x) \psi(2^{-m}y - k_y), \\ \Psi_{m,k_x,k_y}^2(x,y) &= 2^{-m} \psi(2^{-m}x - k_x) \phi(2^{-m}y - k_y), \\ \Psi_{m,k_x,k_y}^3(x,y) &= 2^{-m} \psi(2^{-m}x - k_x) \psi(2^{-m}y - k_y), \end{aligned} \quad (6)$$

que caracterizan la descomposición de la imagen en sub-bandas de baja frecuencia en x y alta en y ; de alta frecuencia en x y baja en y , y de alta frecuencia tanto en x como en y , para un nivel m de descomposición, respectivamente.

La transformada wavelet packet es la transformada wavelet de estructura de árbol (Chang y Kuo, 1993). La principal diferencia entre este algoritmo y el algoritmo piramidal tradicional de la transformada wavelet es que la descomposición se aplica en forma recursiva no simplemente a las sub-imágenes de más baja frecuencia, sino que puede ser aplicada a cualquier sub-imagen in-

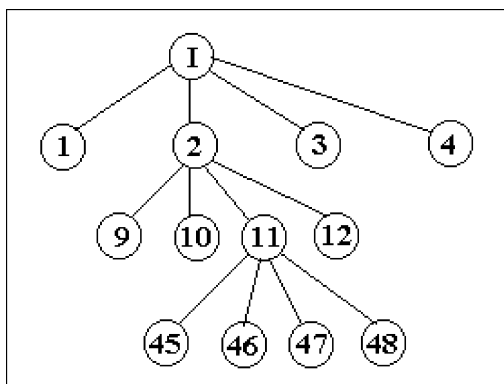


Figura 3. Ejemplo de una posible estructura de árbol correspondiente a la descomposición wavelet packet de una imagen, donde se muestran los canales terminales.

dependientemente de su rango de frecuencias (Fig. 3), lo cual significa que con la transformada wavelet packet se puede realizar la descomposición de cualquier canal de frecuencia. Normalmente se utiliza un criterio energético para decidir si es necesaria una posterior descomposición de una sub-imagen en particular.

Los descriptores de textura se calculan a partir de los coeficientes $c_{i,j}$ del desarrollo de la imagen $I(x, y)$ en la base wavelet (5, 6) o wavelet packet seleccionada, que en nuestro caso fue la base ortonormal Daubechies 2. El índice i indica el canal de frecuencia o sub-banda y el j toma M valores, siendo M el número de coeficientes asociados a la sub-imagen i .

Los descriptores módulo, energía, valor medio, desviación estándar y residuo promedio fueron calculados para cada canal i de frecuencia, a partir de las expresiones siguientes:

$$md_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |c_{i,j}| \quad (7)$$

$$E_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |c_{i,j}|^2 \quad (8)$$

$$vm_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M c_{i,j} \quad (9)$$

$$sd_i = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{(c_{i,j} - vm)^2}{M-1}} \quad (10)$$

$$rms_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |c_{i,j} - vm| \quad (11)$$

CONSTRUCCIÓN DE LOS PATRONES

Fueron seleccionadas 25 muestras de 32×32 pixel² tomadas aleatoriamente dentro de cada una las zonas encerradas por los rectángulos blancos, en la imagen

del corte sísmico que se muestra en la figura 1. Se llevó a cabo la descomposición wavelet packet de cada una de las 25 imágenes correspondientes a cada zona de referencia hasta un nivel de descomposición $N = 2$. Se calcularon los descriptores de textura (7 – 11) para cada canal de frecuencia de cada una de las muestras y luego se halló el valor medio de los mismos por canal, considerando las 25 muestras para cada zona de referencia, y de esta forma quedó determinado el árbol promedio asociado a cada patrón. Se calcularon las matrices de covarianza de cada descriptor para cada patrón. Con posterioridad, se construyó el mejor árbol para cada patrón, y se comparó la energía de cada canal o nodo del árbol promedio E (7) con el valor máximo E_{max} correspondiente al sub-nivel de descomposición (en nuestro caso $m = 1$). Esto es, si $E > GE_{max}$, el nodo se descompone posteriormente, de otra manera no se realiza la descomposición del mismo. Aquí G es una constante menor que 1 (0,10). Este proceso se repite hasta que se alcanza el nivel de descomposición. Se definieron los cinco vectores descriptores de los patrones, cuyas componentes son los valores de dichos descriptores, correspondientes a los nodos terminales del mejor árbol de cada patrón, ordenadas en forma decreciente de la energía. Asimismo, las matrices de covarianza de cada patrón asociadas a cada descriptor, se conforman considerando únicamente los canales de frecuencia terminales del mejor árbol, atendiendo al orden energético establecido.

ALGORITMO PARA LA PRIMERA SEGMENTACIÓN

La ventana de segmentación de dimensiones 32×32 pixel² se desplaza píxel a píxel a través de la sección, que se escogió para segmentar, de la imagen del corte sísmico. Las dimensiones de la ventana deben ser tales que la misma porte la información necesaria para caracterizar la textura y, al mismo tiempo, garantice una resolución espacial adecuada.

Para cada posición de la ventana se lleva a cabo la descomposición wavelet packet de la imagen encerrada en la misma, hasta igual nivel de descomposición que en el caso de los patrones, utilizando la misma base de funciones. Se calculan los descriptores para cada canal y se determina el mejor árbol de la muestra, teniendo en cuenta el descriptor energía, tal como se hizo en el caso de los patrones. Se determinaron los vectores descriptores de la muestra, tal como se hizo con los patrones. Se consideraron para la muestra sólo los $J = 5$ primeros canales dominantes en energía. También se seleccionaron los J primeros canales de cada patrón. Como un primer paso en el proceso de clasificación fueron eliminados de la lista de patrones candidatos, aquellos cuyos primeros canales no coincidían ni en tipo ni orden con los de la muestra. Si todos los patrones son descartados, el procedimiento descrito se repite tomando en cuenta $J - 1$ canales dominantes, y así sucesivamente.

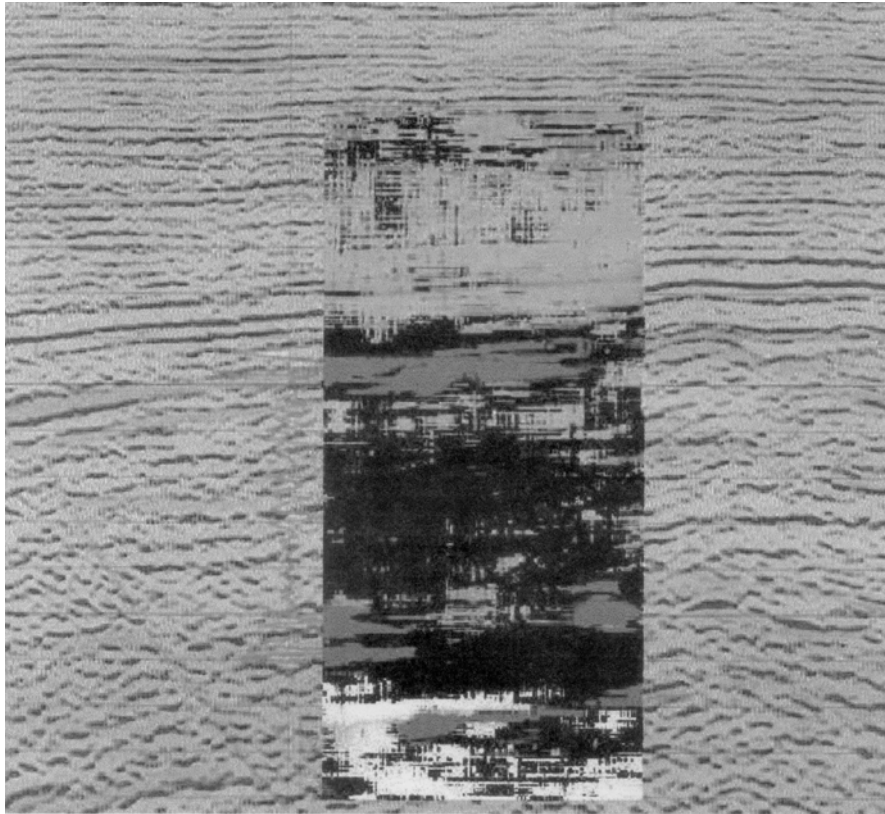


Figura 4. Imagen segmentada de una porción del corte sísmico, tomando como referencia cuatro patrones.

Se calculó la distancia de Mahalanobis:

$$D_i = \sum_{j=1}^5 (\bar{d}_j - \bar{d}_{ij})^j Cov_{ij}^{-1} (\bar{d}_j - \bar{d}_{ij}) \quad (12)$$

entre las texturas de cada patrón en la lista de candidatos y la textura desconocida dentro de la ventana. Por último se asigna a la misma, específicamente al punto central de la ventana, la clase correspondiente a la textura patrón cuya distancia de Mahalanobis resulte menor.

El grado de similaridad entre la muestra dentro de la ventana y la textura de referencia o patrón finalmente seleccionada, puede expresarse en términos del inverso de esta distancia.

En la expresión (12) \bar{d}_j y \bar{d}_{ij} son, respectivamente los vectores descriptores j -dimensionales de la textura desconocida y de la textura patrón i . Aquí el índice j especifica el tipo de descriptor. Cov_{ij} es la matriz de covarianza del descriptor tipo j para la textura de referencia i .

ALGORITMO PARA LA SEGUNDA SEGMENTACIÓN

Con el objetivo de determinar la similaridad entre las diferentes zonas del corte sísmico y una única zona, ya estudiada, que presenta determinado interés desde el

punto de vista geológico, se hizo una segunda segmentación, utilizando un solo patrón de referencia correspondiente a esa zona.

Para hacer esto se siguieron los dos primeros pasos del algoritmo anterior y, posteriormente, fueron seleccionados los $J=5$ canales dominantes de la muestra, se halló la distancia de Mahalanobis entre los vectores descriptores de la muestra y el patrón, y se consideraron sólo las componentes correspondientes a estos canales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4 se muestra el resultado de la primera segmentación. Se visualiza la parte segmentada, donde se han asignado tonalidades diferentes a las zonas identificadas con las texturas de referencia de 1 a 4 (ver Fig. 1). Así, a las zonas identificadas con el patrón 1 se les asignó el color gris claro; con el patrón 2, el negro; con el 3, gris oscuro, y a las identificadas con el 4, el blanco. Con estos resultados se muestra cómo están distribuidas las diferentes zonas texturales dentro de la región del corte sísmico seleccionada para analizar, y al mismo tiempo, a partir de esto, valorar las características litoestratigráficas de la misma.

En la parte superior de la región segmentada se observa un predominio de la textura correspondiente al patrón 1. A medida que se desciende en la figura, se observa un

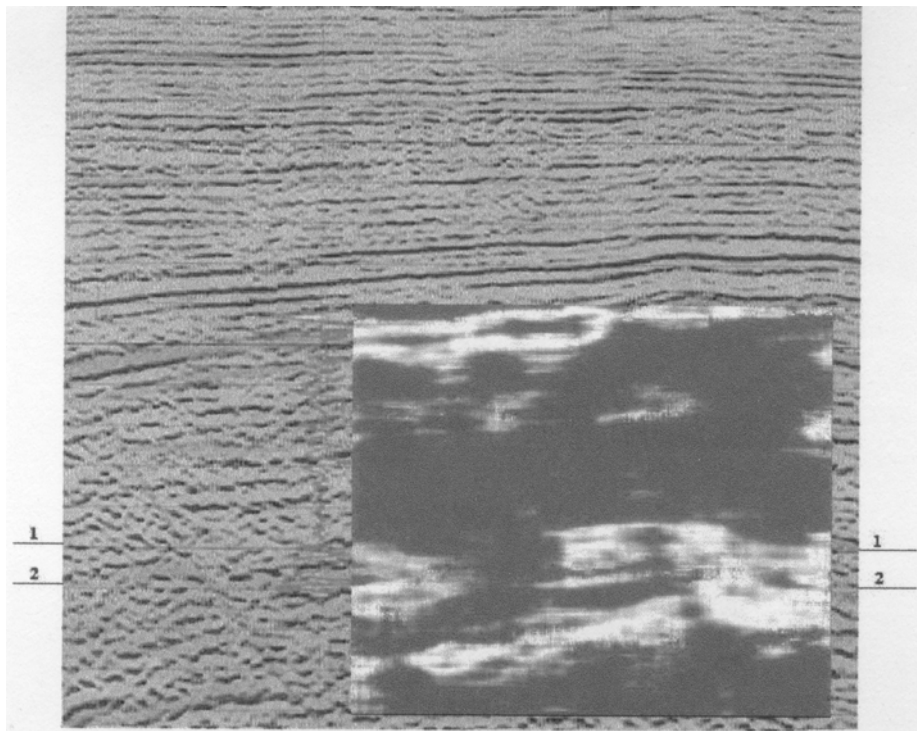


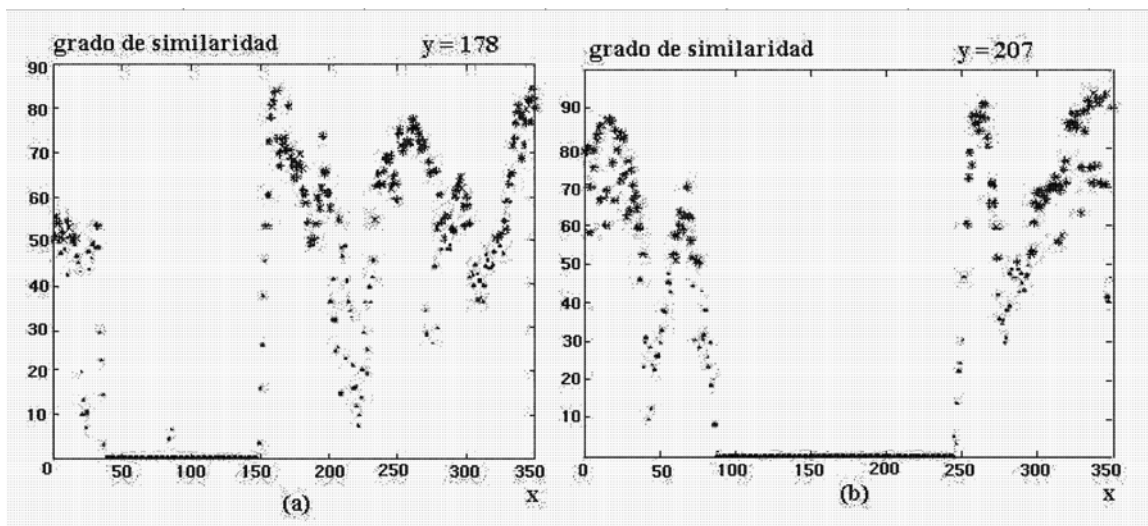
Figura 5. Imagen segmentada tomando como referencia el patrón 3.

predominio de la textura del patrón 2, apareciendo a intervalos la textura de referencia 3, correspondiente a un intervalo de interés desde el punto de vista de la prospección petrolera. En la zona de la base de la figura se observa un predominio de la textura de referencia 4.

En la figura 5 se muestran los resultados de la segunda segmentación, la que permitió, en primer lugar, localizar zonas con características geológicas similares a las del patrón 3, que como se apuntó anteriormente es de interés gasopetrolífero, y en segundo lugar, determinar el grado de similitud de cada vecindad dentro de la

imagen, con la textura de referencia 3, a través de un parámetro cuantitativo. La región investigada en este caso, no contempló la parte superior de la sección sísmica, pues de acuerdo con los resultados de la primera segmentación, la textura 3 no se encuentra presente en esa región. En la parte segmentada los tonos claros corresponden con zonas de mayor similitud con la textura de referencia, y las zonas oscuras son las que más se diferencian. Se aprecia cómo la zona correspondiente a la textura de referencia se extiende en una franja hacia la derecha con una cierta inclinación hacia arriba.

Figura 6. Comportamiento del grado de similitud al patrón 3 a lo largo de las líneas trazadas en la figura 5.



En la figura 6a se muestra el comportamiento del grado de similaridad con la textura de referencia 3, expresada en porcentaje, de la vecindad alrededor de cada píxel a lo largo de las líneas rectas 1 y 2 que han sido trazadas en la figura 5. La figura 6 a corresponde a la recta señalada con el número 1 y la figura 6 b a la recta 2. Los asteriscos corresponden a los píxeles para los cuales el grado de similaridad sobrepasa el 50 % y los puntos a los que están por debajo de este valor. Esto aporta un criterio cuantitativo acerca de la presencia del intervalo de interés litoestratigráfico detectado en el pozo hacia otros sectores del área investigada.

CONCLUSIONES

El análisis de textura de las imágenes de cortes sísmicos de reflexión constituye una herramienta complementaria a las utilizadas de forma convencional para la interpretación de éstos. La técnica utilizada en este trabajo resulta eficiente y adecuada para este tipo de tarea. El método aplicado brinda una información útil para la prospección gasopetrolífera en otros sectores del territorio investigado en que no existan datos de pozos. Los resultados obtenidos corroboran que en la sísmica 2D, al igual que en la 3D, el procesamiento de imágenes aporta una valiosa información adicional para la calibración geológica de las reflexiones sísmicas.

BIBLIOGRAFÍA

- CHANG, T. AND C. J. KUO: "A Wavelet Transform Approach to Texture Analysis", Proc. Int. Conf. Acoust. Speech, Signal Proc., vol. 3 :661-664, 1992.
- : "Texture Analysis and Classification with Tree-Structured Wavelet Transform", *IEEE Transactions on Image Processing*, 2 (4): 429-441, 1993.
- FERNÁNDEZ, M., A. MAVILIO Y J. R. JIMÉNEZ: "Reconocimiento de patrones sísmicos utilizando la transformada Wavelet, Memorias del X Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2-5 abril, 2000 a.
- FERNÁNDEZ, M., A. MAVILIO Y M. TEJERA: "Texture Segmentation of a 3D Seismic Section with Wavelet Transform and Gabor Filters", Proceeding of the IEEE of the 15 International Conference on Pattern Recognition, vol. 3:358-361, 3-7 September, Barcelona, 2000 b.
- HARALICK, R. M.: "Statistical and Structural Approaches to Texture", Proceeding of the IEEE, 67 (5): 187-192, 1979.
- LOVE, P. L. AND M. A. SIMAAN: "Segmentation of Stacked Seismic Dates by the Classification of Image Texture", 54th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, Session: S7.3: 480-482, 1984.
- MANIAN, V. AND R. VÁSQUEZ: "On Scaled and Rotated Texture Segmentation Using a Class of Basis Functions", *SPIE*. 3078:324-332, 1997.
- MIRÓ, G., E. ESCARTIN, J. RUIZ, R. DOMÍNGUEZ Y S. TOUCET: "Elaboración de Sismogramas Sintéticos", I Congreso Nacional de Geofísica, Ciudad de La Habana, marzo 2000 (CD).
- SIMAAN, M. A.: "Knowledge-Based Computer System for Segmentation of Seismic Section Based on Texture", Soc. Expl. Geophys, CM1.2:141-159, 1991.
- VINTHER, R., K. MOSEGAARD AND K. KIERKEGAARD: "Seismic Texture Classification: To Computer-Aided Approach to Stratigraphic Analysis", 65th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, CT1.5: 153-155, 1995.