

# Identificación del tipo de fluido, usando registros de neutrones pulsados, probabilidad condicional y transformada ondicular discreta

*Enrique Coconi-Morales*  
[ecoconi@imp.mx](mailto:ecoconi@imp.mx)  
*Instituto Mexicano del Petróleo*

Información del artículo: recibido: agosto de 2015-aceptado: septiembre de 2015

## Resumen

Una de las más importantes aplicaciones del análisis de los Registros Geofísicos de Pozo (RGP) comprende la determinación de los fluidos en un yacimiento; es común usar los registros resistivos para calcular las saturaciones de agua y de aceite de una formación, así mismo se usan los registros de densidad y neutrón para la identificación de zona de gas mediante su traslape y gran separación de ambas curvas, y en pozos productores el registro a usar es el de neutrones pulsados, PNC o sigma. Aquí se usará de manera muy particular la descomposición con la transformada ondicular discreta o DWT y las gráficas de escala contra energía o varianza para cinco pozos con diferentes intervalos saturados con fluidos, (aceite, agua, aceite con agua, seco, etc.) y para los siguientes RGP, Resistividad ( $R_t$ ) y PNC. Debido a que la energía de la señal es proporcional a la energía de la transformada de ondícula, las altas frecuencias, (escalas pequeñas) representan la contribución de los poros, las frecuencias intermedias, (escalas medias) corresponden a los fluidos en los poros y las bajas frecuencias, (escalas altas) representan la contribución de la litología o fase de depósito.

**Palabras clave:** PNC, transformada ondicular, probabilidad condicional, fluidos.

## Identify fluid type, using pulsed neutron logs, conditional probability and discrete wavelet transform

## Abstract

One of the most important applications of the geophysical well logging analysis (GWL) comprises determining fluid in a reservoir. It is common to use resistivity logs to calculate water saturation and oil formation, also the density and neutron logs for identifying gas zone by its overlap and large separation of both curves are used; and in production wells, the log used is the pulsed neutron compensated (PNC or sigma). Here it will be used in a very particular way decomposition discrete wavelet transform or DWT and graphic scale versus energy or variance against five wells saturated with different fluids (oil, water, oil, water, dry, etc.) and the following GWL, resistivity ( $R_t$ ) and PNC. Because the energy of the signal is proportional to the energy of the wavelet transform, the high frequencies (small scales) represent the contribution of the pores, intermediate frequencies (intermediate scales), corresponds to the fluid in the pores and low frequencies, (high scales) represent the contribution of lithology.

**Keywords:** PNC, wavelet transform, conditional probability, fluids.

## Introducción

Los registros de Neutrones Pulsados Compensados o PNC se toman en pozos entubados y con producción; miden la relación de captura de neutrones termale con energía cercana a 0.025 eV, en proporción a la formación después de que es bombardeada con neutrones de 14 MeV (Coconi-Morales E., 2000; Ramírez et al. 200). Un generador electrónico de neutrones es la herramienta que produce los neutrones pulsados; los neutrones decaen rápidamente a otros niveles de energía por colisiones sucesivas con los núcleos atómicos de los elementos alrededor de ellos; los neutrones termale son gradualmente capturados por elementos dentro de una nube de neutrones y en cada captura se emiten rayos gama.

La relación con la cual estos neutrones son capturados depende de la sección transversal de captura o sigma,  $\Sigma$

(área efectiva en la cual un neutrón puede ser capturado por un núcleo atómico, y con unidades de medida de unidades de captura o u.c.), la cual es característica de los elementos presentes en la formación.

Debido a que el cloro es el elemento que más neutrones absorbe de los elementos terrestres, la respuesta de la herramienta está determinada principalmente por la presencia de cloro, (cloruro de sodio o sal) en el agua de las formaciones. El PNC permite reconocer la presencia de fluidos, (agua, aceite y gas) en la formación y posteriormente detecta todos los cambios en la saturación de agua durante la vida de producción del pozo.

El registro sintético de un PNC, se construye mediante la siguiente ecuación, (Dewan, 1983; Schlumberger, 1991):

$$\Sigma_{log} = S_w * \phi * (\Sigma_w - \Sigma_h) + \phi * (\Sigma_h - \Sigma_{ma}) + vsh * (\Sigma_{sh} - \Sigma_{ma}) + \Sigma_{ma} \quad (1)$$

Donde  $\Sigma_{log}$  es la sigma del registro para cada profundidad;  $\phi_e$  es porosidad efectiva;  $\Sigma_w$  es el grado de saturación con agua;  $\Sigma_w$  y  $\Sigma_h$  son las sigmas para el agua e hidrocarburo respectivamente;  $V_{sh}$  es el volumen de arcilla,  $\Sigma_{sh}$  sigma de la arcilla y  $\Sigma_{ma}$  es la sigma de la matriz.

En el procesamiento de los Registros Geofísicos de Pozos (RGP), la transformada de ondícula o WT, se ha usado para identificar límites de formaciones e incrementar la resolución vertical, (Guan et al., 2004; Coconi-Morales E., 2006); en la identificación de zonas con fluidos (Li and Zhao, 2005, Coconi-Morales E., 2010, 2012, 2014).

Una función ondicular (ondícula madre) se define con una función localizada y oscilante del tiempo,  $y(t)$  (Deighan et al., 1997; Burke, 1998). La condición de localización en el tiempo se refiere a que la onda es oscilatoria de longitud finita (soporte compacto) y tiende a cero rápidamente. Cualquier función que se quiera usar como ondicular necesita cumplir con las siguientes condiciones de admisibilidad, (Goupillaud et al., 1984):

1) Debe ser totalmente integrable y cuadrado integrable (energía es finita);

2) Debe ser de banda limitada (soporte compacto), con media cero;

3) Debe de ser ortogonal y ortonormal, como se menciona en Meyer, (1993).

En la **Figura 1** se presentan la teoría básica de la transformada ondicular, tipos de ondículas; de la ondícula madre y (a, b), se generan las ondículas de las diferentes familias respectivas mediante el escalamiento (a); traslación (b).

Mientras que las escalas altas (bajas frecuencias) corresponden a una visión global no detallada de la señal, las bajas escalas (altas frecuencias) corresponden a una vista detallada (Deighan et al., 1997; Strang, 1989), entendiéndose por escala la relación matemática que asegura la representación proporcionada de los elementos originales de una serie de tiempo sobre un plano o dentro del espacio 2D (Strang, 1989; Deighan, et al., 1997; Burke, 1998).

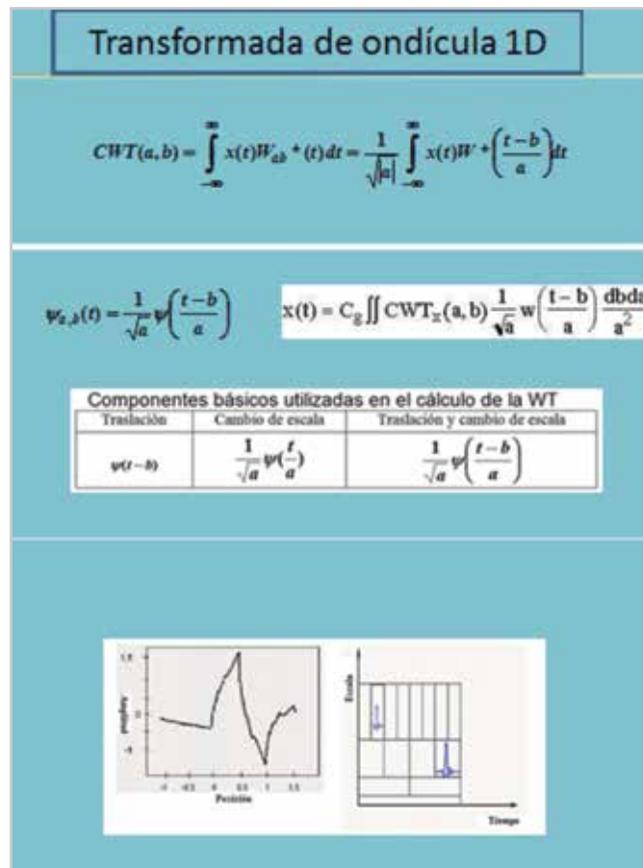


Figura 1. Teoría básica de la transformada ondicular (WT), ecuaciones y ondículas.

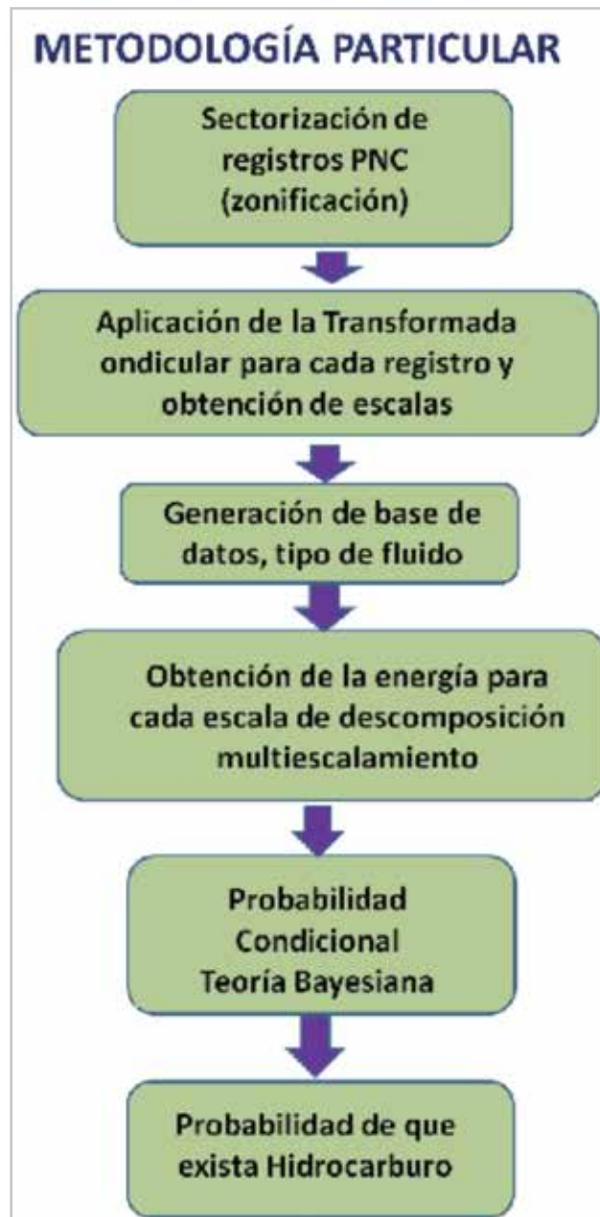
### Metodología

En la **Figura 2** se muestra la metodología particular usada en este trabajo, la cual incluye sectorización del registro, aplicación de la transformada ondicular, escalas, obtención de su energía para cada escala de descomposición y uso de la probabilidad condicional.

Se sectorizó cada uno de los registros PNC (sigma) de cinco pozos, de los cuales se presenta uno en la **Figura 3**, (Sigma), en zonas de aceite con gas, aceite, aceite con agua salada, exclusivamente agua salada y carentes de fluidos, (seco). Así se diseñó e implantó una base de datos; en la **Tabla 1** se presentan los resultados obtenidos de los cinco pozos, se muestra el pozo, tipo de fluido existente y las escalas que sobresalen; se muestran siete zonas sin fluido (secas),

nueve de aceite, dos de agua salada, tres de aceite con gas y una de aceite con agua.

Es común usar los registros PNC para la determinación del tipo de fluido eventualmente presente en las formaciones, (Fondyga A. and Sherba G., 2004), por lo que se analizó la distribución de la respectiva varianza en función de cada una de las escalas (energía). Esto se consigue mediante la aplicación de la transformada ondicular o WT, se calcularon las gráficas de escala contra energía, **Figura 4**, con las cuales se obtuvieron los valores máximos, para cada una de las diferentes zonas en que se sectorizaron los pozos. Se totalizan siete zonas sin fluido (secas), nueve de aceite, dos de agua salada, tres de aceite con gas y una de aceite con agua.



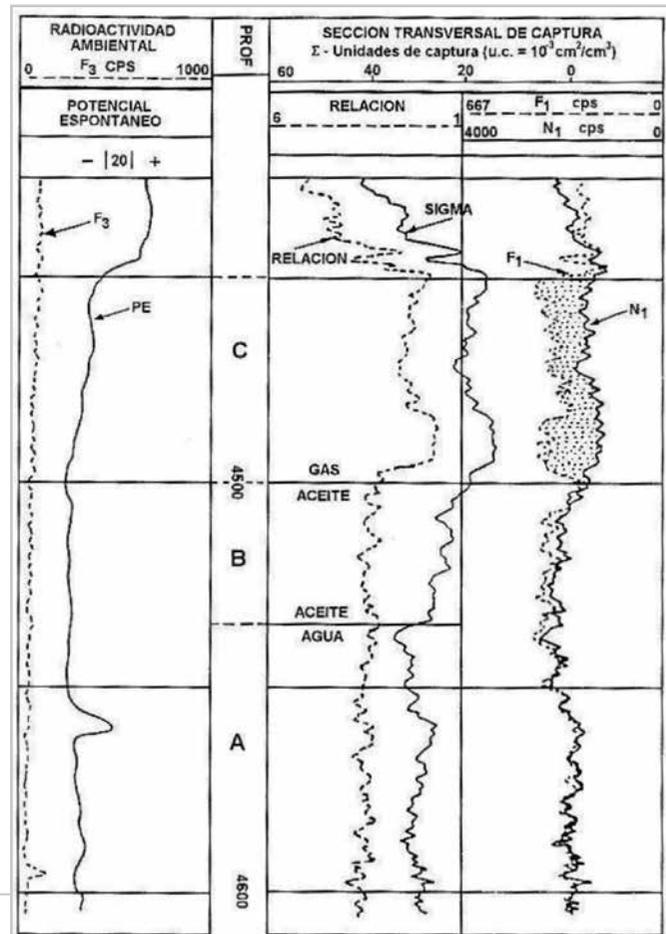
**Figura 2.** Metodología usada, incluye sectorización del registro, aplicación de la transformada ondicular, escalas, obtención de su energía para cada escala de descomposición y uso de la probabilidad condicional.

**Tabla 1.** Características de los valores máximos, para cada uno de las diferentes zonas en que se sectorizaron los pozos.

POZO	FLUIDO	ESCALA	POZO	FLUIDO	ESCALA
1	Seco	4,7,9	1	Aceite	5,7,9
1	Seco	5,8,10	3	Aceite	6,8,10
2	Seco	4,8,10	3	Aceite	6,9
2	Seco	5,7,10	1	Aceite	4,5,8
2	Seco	5,9	3	Aceite	5,6,8
3	Seco	4,7,10	4	Aceite	4,6,9
3	Aceite	4,7,9	5	Aceite	6,7,9
3	Aceite	4,6,8	1	Aceite-gas	5,7,9
5	Seco	5,8,10,12	5	Aceite-gas	6,9
5	Agua	3,5,7	5	Aceite-gas	4,6,8
5	Agua	3,6,9	5	Aceite-agua	6,8,10

**Interpretación de datos y resultados**

De la **Figura 4** se observa que para una sola zona de aceite limpia se tiene un comportamiento específico, (escalas predominantes) con respecto a las demás zonas de estudio. Pero para calcular la probabilidad condicional, (Kendall M., 1994) de varias zonas de interés se observa en la **Figura 5**, que las escalas predominantes caen dentro de un cierto rango y es necesario saber cuál es la escala que presenta la mejor probabilidad de éxito.



**Figura 3.** Clasificación de los diferentes fluidos existentes usando un registro Sigma (TDT).

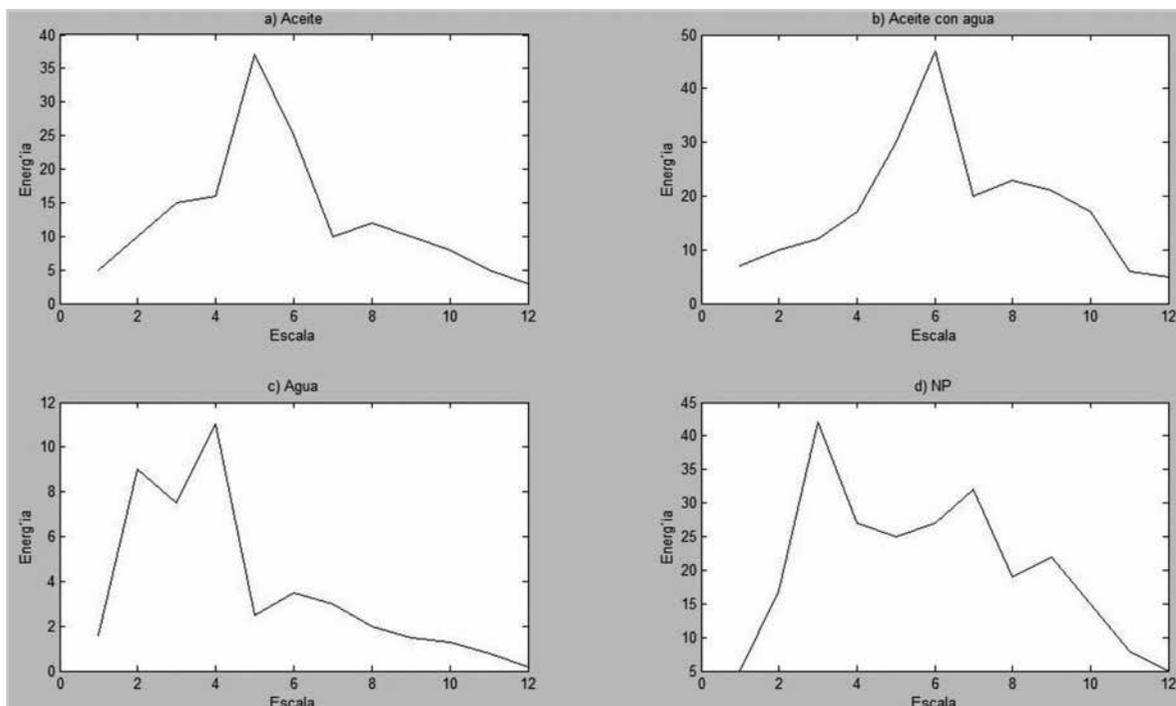


Figura 4. Gráfica de la varianza en función de la escala, para ser usado en la obtención de la probabilidad condicional, mostrando el comportamiento de los diferentes fluidos. Energía en función de la escala para a) aceite, b) aceite con agua, c) agua y d) no productor.

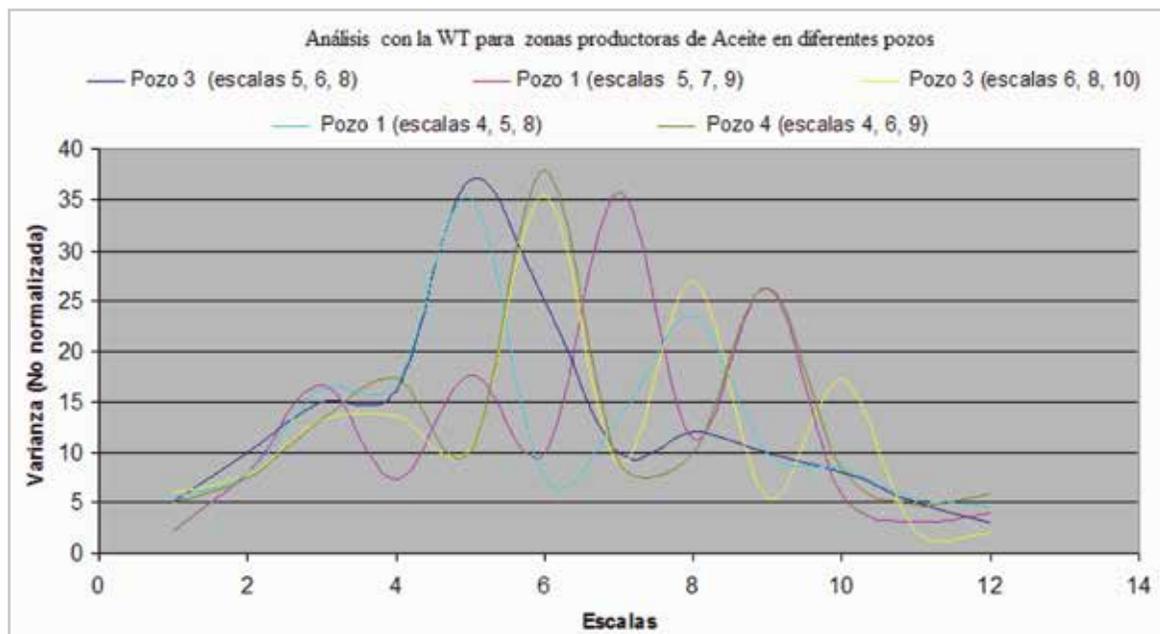


Figura 5. Comportamiento de las escalas predominantes para diferentes zonas de aceite en cinco pozos de estudio.

De la teoría bayesiana, para una zona de aceite:

$$P(A/B) = \frac{P(A_i) * P(B / A_i)}{\sum P(A_i) * P(B / A_i)} \quad (1)$$

$$P(m^\circ / \lambda) = \frac{P(m^\circ) * P(\lambda / m^\circ)}{\sum P(m^i) * P(\lambda / m^i)} \quad (2)$$

Y usando los datos de la **Tabla 1**, se estimó la probabilidad condicional de que en la escala 5 el fluido predominante fuera aceite, habiéndose obtenido el valor de 0.60 (se cuantifica la posible presencia de aceite).

## Conclusiones

Con el análisis anterior se puede obtener la siguiente conclusión: la determinación de la escala óptima de representación de un registro geofísico de pozo, con un aumento relativo de su resolución, permite la identificación sectorial de zonas de interés eventualmente relacionadas a parámetros petrofísicos, (saturación, porosidad, permeabilidad). Sectorización de zonas que pueden ser cuantificadas aplicando el teorema de Bayes.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Instituto Mexicano del Petróleo para la presentación de este trabajo.

## Referencias

1. Alvarez, G., Sanso, B., Michelena, R.J. et al. 2003. Lithologic Characterization of a Reservoir Using Continuous-Wavelet Transforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **41** (1): 59-65.
2. Bourke, L. y Delfiner, P. 1989. Using Formation MicroScanner Images. *The Technical Review* **37** (1): 16-40.
3. Boyeldieu, C. y Jeffres, P. 1988. Formation MicroScanner: New Developments. Transactions of the SPWLA 11th European Evaluation Symposium.
4. Coconi-Morales, E. 2000. *Método de Captura de Neutrones Pulsados (PNC) en el Monitoreo del Avance del Casquete de Gas y la Saturación de Agua en el Campo Cantarell*. Tesis de Maestría, UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, México, D.F.
5. Coconi-Morales, E., Lozada-Zumaeta, M., Rivera-Recillas, D. et al. 2006. Identifying Reservoir Fluids in Sandy Clay and Carbonate Reservoir Using the Wavelet Transform with Well Logs. SPWLA 47th Annual Logging Symposium, Veracruz, México, junio 4-7. SPWLA-2006-LLL.
6. Coconi-Morales, E., Ronquillo-Jarillo, G. y Campos-Enriquez. 2010. Multi-Scale Analysis of Well-Logging Data in Petrophysical and Stratigraphic Correlation. *Geofísica Internacional* **49** (2): 55-67.
7. Coconi-Morales E., Ronquillo-Jarillo, G. y Castrejón-Vacio, F. 2014. Aplicación de Transformada Ondicular Discreta Bidimensional (DWT-2D) a Registros Geofísicos de Imágenes de Pozo en la Determinación de la Distribución de Porosidad Secundaria. *Ingeniería Petrolera* **54** (4): 201-215.
8. Daubechies, L. 1992. The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis. *IEEE Transactions on Information Theory* **36** (5): 961-1005.
9. Daubechies, L. 1992. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, Pennsylvania: Society for Industrial and Applied Mathematics.
10. Gersztenkorn, A., Smythe, J. y Radovich, B. 2005. Stratigraphic Detail from Wavelet Based Spectral Imaging. *Recorder* **30** (4): 40-43.

11. Grubb, H. y Walden, A.T. 1997. Characterizing Seismic Time Series Using the Discrete Wavelet Transform. *Geophysical Prospecting* **45** (2): 183-205. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2478.1997.00346.x>.
12. Harker, S.D., McGann, G.J., Bourke, L.T. et al. 1989. Methodology of Formation MicroScanner Images Interpretation in Claymore and Scapa Fields (North Sea). *Geological Society, London, Special Publication* **48**: 11-25. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.048.01.03>.
13. Hubbard, B.B. 1998. *The World According to Wavelets: The Story of a Mathematical Technique in the Making*, second edition. Wellesley, Massachusetts: A.K. Peters.
14. Li, X.-G. y Ulrych, T.J. 1995. Tomography Via Wavelet Transform Constraints. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1995: 1070-1073. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1887301>.
15. Li, X-P. y Haury, J.C. 1995. Characterization of Heterogeneities from Sonic Velocity Measurements Using the Wavelet Transform. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1995: 488-491. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1887346>.
16. Lloyd, P., Dahan, C. y Huttin, R. 1986. Formation Imaging with the Micro Electrical Scanning Arrays: A New Generation of Stratigraphic High Resolution Dipmeter Tool. SPWLA 10th European Symposium, Aberdeen, Escocia, abril 22-25.
17. Lozada-Zumaeta, M. y Ronquillo-Jarillo, G. 1997. Multiresolution Analysis and Seismic Attributes. Moscow'97, International Geoscience Conference & Exhibition. Moscú, Rusia, septiembre 15-18.
18. Lozada-Zumaeta, M. y Ronquillo-Jarillo, G. 2001. Transformada de Ondícula Aplicada al Análisis Sísmico de Reflexión. Séptimo Congreso Internacional SGGF, Salvador, Brasil, 493-496.
19. Mallat, S. 1997. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. San Diego, California: Academic Press.
20. Meyer, Y. y Ryan, R.D. 1993. *Wavelet Algorithms & Applications*. Philadelphia, Pennsylvania: Society for Industrial and Applied Mathematics.
21. López L., A. [1988]. Correlación de Registros Utilizando Técnicas de Inteligencia Artificial, Rev. AIPM. v. XXVIII.
22. Ramírez J., H. y Morfín F., E. 2000. *Curso de Registros Geofísicos de Pozo, Nivel Avanzado*. México, D.F.: Publicación Interna IMP.
23. Rivera-Recillas, D.E., Lozada-Zumaeta, M.M., Ronquillo-Jarillo, G. et al. 2005. Multiresolution Analysis Applied to Interpretation of Seismic Reflection Data. *Geofísica Internacional* **44** (4): 355-368.
24. Torrence, C. y Compo, G.P. 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* **79** (1): 61-78.

## Semblanza del autor

### Enrique Coconi Morales

Ingeniero Geofísico por parte de la ESIA del IPN. Maestro en ciencias por parte de la DEPMI, UNAM. Doctor en Ingeniería por parte del Posgrado IMP. Pertenece al sistema nacional de investigadores.

Mención honorífica en examen de maestría. Primer lugar premio a la mejor tesis de licenciatura en la industria petrolera nacional. Tercer lugar premio a la mejor tesis de maestría en la industria petrolera nacional.

Investigador en la Gerencia de Geofísica Cuantitativa de la dirección de Exploración, en el área de Registros geofísicos de pozos. Capacitación a personal de Pemex, impartición de cursos en el área de Registros geofísicos de pozos. Desarrollo de metodología para procesado e interpretación de registros. Metodología para análisis multiescala en registros geofísicos de pozos y metodología para obtención de volúmenes mineralógicos.

Obtención de cuatro derechos de autor y seis artículos con arbitraje en revistas internacionales.

Profesor de las carreras de Ingeniería Geológica y Geofísica de la ESIA Ciencias de las Tierra del IPN. Impartición de más de 80 cursos en el área de Registros geofísicos de pozos, Petrofísica, Métodos geofísicos, computación, Geofísica nuclear en las carreras de Ingeniería Geofísica, Geológica a nivel licenciatura y nivel posgrado. Dirección de 80 tesis a nivel licenciatura, dos de maestría y sinodal en más de 90 tesis. Impartición de ocho seminarios de titulación y actualización para 150 estudiantes de las carreras de Ingeniería Geológica, Geofísica y Petrolera. Presidente de la Academia de Geofísica superficial desde el año 2000.

Responsable de reestructuración de las materias de Registros geofísicos I, II y Petrofísica. Corresponsable de la reestructuración de la carrera de Ingeniería Geofísica del IPN del 2008 al 2009. Participación en congresos de la UGM, SPWLA y EAGE con más de 20 ponencias.