

PARÁMETROS ELÁSTICOS Y ACÚSTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE FLUIDOS Y LITOLOGÍA EN EL LAGO DE MARACAIBO

JOSÉ ANTONIO NARANJO TORRES¹, GERMÁN MONTERO¹ Y GERARDO NÚÑEZ²

¹Coordinación de Física, Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo (IUTM), Urb. La Floresta Av. 85, Edif. IUTM Telf. (58 - 261) 7546175, Fax: (58 - 261)-7540321. Maracaibo, Venezuela. e-mail: naranjo64@cantv.net

²Departamento de Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

Recibido: octubre de 2005

Recibido en forma final revisado: abril de 2007

RESUMEN

Se ha demostrado que las propiedades de las rocas del yacimiento y de los fluidos contenidos en su interior están relacionadas con los parámetros geomecánicos de éstas. En esta investigación, la dependencia entre los parámetros elásticos y acústicos de las rocas se obtuvieron por medio de la velocidad de la onda compresional (V_p), la velocidad de onda de cizalla (V_s) y la densidad (ρ) obtenida a través de registros de pozo. Como resultado del análisis, se demuestra que los parámetros anteriormente mencionados tienen que ser tomados en conjunto y no por separado, para clasificar las litologías estudiadas. Sin embargo, dos de los parámetros estudiados pueden ser utilizados para indicar las diferencias entre litologías, a través de gráficos correlacionados pero no para discriminar el contenido de fluidos en las arenas.

Palabras clave: parámetros elásticos y acústicos, fluidos, litología.

ELASTIC AND ACOUSTIC PARAMETERS FOR THE PREDICTION OF FLUIDS AND LITHOLOGY IN THE LAKE OF MARACAIBO

ABSTRACT

It has been demonstrated that the properties of reservoir rocks and the fluids contained in their interior are related to their geomechanical parameters. In this study, the relationship between the elastic and acoustic parameters of the rocks was obtained by means of the velocity of the compressional wave (V_p), the velocity of the shear wave (V_s) and the density (ρ) as result of well log analysis. As a result, it is shown that the previously mentioned parameters have to be taken as a whole and not separately in order to classify the studied lithology. However, two of the studied parameters can be used to indicate the differences between lithologies, through correlated graphics but not to discriminate the content of fluids in the sands.

Keywords: elastic and acoustic parameters, fluids, lithology.

INTRODUCCIÓN

Recientemente se han venido utilizando técnicas de interpretación de datos sísmicos pre-apilamiento, basadas en la correlación entre atributos sísmicos, calculados a través de procesos de inversión de amplitudes observadas en función del ángulo de incidencia. Antes de proceder con el análisis de estos atributos se debe hacer un estudio con el fin de determinar si la sísmica responde a cambios de las propiedades de interés en el yacimiento (Wang y Szata, 1999).

Este estudio se lleva a cabo utilizando registros de pozo, ya que los atributos que se extraen de los datos sísmicos

también pueden calcularse de ellos. Esto permite que se puedan analizar los cambios en las propiedades del yacimiento tales como litología y fluidos de una manera rápida (González *et al.* 2002a). Asimismo, para los estudios de caracterización de yacimientos de hidrocarburos no sólo se puede hacer uso de estos atributos sísmicos (Santos *et al.* 2002), sino también, de los atributos sísmicos físicos, que se definen como los que pueden ser extraídos de las trazas sísmicas o calculados a partir de los valores de V_p , V_s y ρ , los cuales son obtenidos a partir de registros de pozo (Fernández *et al.* 2002).

En este artículo se calculan algunos parámetros elásticos y

acústicos con el objetivo de ayudar en la interpretación litológica, estado físico y grado de saturación de las rocas en el subsuelo; aplicando una variación de la metodología desarrollada por Mukerji *et al.* (2001), en el estudio de la física de rocas.

Estudios realizados por González *et al.* (2002a, 2002b) y por Fernández *et al.* (2002), aplicando esta técnica; extendieron los resultados a la calibración de la inversión sísmica, al estudio de ciertas anomalías en los datos sísmicos y para identificar litologías y fluidos, obteniéndose excelentes resultados en la identificación de las litologías, no así, para la diferenciación de los fluidos.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Módulos elásticos dinámicos

Se observa que para medios elásticos continuos (isótropo y homogéneo) las velocidades de propagación de las ondas P y S dependen de los módulos elásticos dinámicos. Por consiguiente, si se conocen las velocidades de propagación de las ondas P y S se pueden determinar estos módulos de la siguiente manera (Vásquez, 2001):

Módulo de rigidez:

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

Módulo volumétrico:

$$K = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (2)$$

Módulo de Young:

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3)$$

Constante de Lamé:

$$\lambda = \rho (V_p^2 - 2V_s^2) \quad (4)$$

Relación de Poisson:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5)$$

donde:

«G» mide la resistencia al movimiento de los planos de un sólido al deslizarse sobre otro. «E» mide la resistencia de un sólido a un cambio en su longitud. «K» mide la resistencia de sólidos y líquidos a los cambios de volumen. Estos son los Módulos Elásticos (Serway, 1997). Igualmente, « λ » es útil para describir el comportamiento elástico de los materiales, pero no tiene ningún significado físico (Smith y Gildow, 2000), y a «G» y « λ » se les conoce como parámetros elásticos de Lamé (Sun, 1999); « ν », se define como la relación entre la fracción de contracción transversal y la fracción de extensión longitudinal.

Impedancia Acústica

El producto de propagación de una onda compresional V_p por la densidad ρ de un medio se denomina impedancia acústica (IA) (PDVSA – CIED, 2000) y se puede expresar por:

$$IA = V_p \rho \quad (6)$$

Cualquier reflexión será posible cuando exista un cambio en la impedancia acústica en un medio.

Impedancia Elástica

La impedancia elástica (IE) (Connolly, 1999) es una generalización de la impedancia acústica para un ángulo de incidencia diferente de cero (Whitcombe *et al.* 2000), obtenida de la linealización de las ecuaciones de Zoeppritz.

La IE está dada por:

$$IE(\theta) = V_p^{(1+\tan^2\theta)} V_s^{(-8\Theta \sin^2\theta)} \rho^{(1-4\Theta \sin^2\theta)} \quad (7)$$

$$\Theta = \frac{\bar{V}_s^2}{\bar{V}_p^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{Si+1}^2}{V_{Pi+1}^2} + \frac{V_{Si}^2}{V_{Pi}^2} \right) \quad (8)$$

donde:

V_{Pi} , V_{Si} , y ρ_i son las velocidades de la onda P, de la onda S y la densidad en el medio i (Chen, 1994).

La IE proporciona una manera de calibrar la inversión de los datos sísmicos para un desplazamiento no-cero. Además, cuando el ángulo θ se hace cero la IE se convierte en la IA (Connolly, 1999).

Impedancia de Reflexión

El concepto de Impedancia de Reflexión IR, es en esencia una generalización de la Impedancia Acústica (Santos *et al.* 2002; Chen, 1994; Santos y Tygel, 2003), al igual que la Impedancia Elástica, se encuentra:

$$IR(\theta) = \rho V_p \sec \theta \cdot e^{\left[-2(2+\beta) \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta \right]} \quad (9)$$

$$\beta \approx (\Delta\rho/\rho)(\Delta V_s/V_s) \quad (10)$$

$$\Delta V_p = V_{p_{i+1}} - V_{p_i} ; \quad \Delta\rho = \rho_{i+1} - \rho_i \quad (11)$$

Igualmente, en el caso de una incidencia normal la IR se reduce a la IA.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio esta limitada al Bloque III, éste se encuentra ligeramente desplazado al *este* del área *Centro-Sur* del Lago de Maracaibo (PDVSA Intevep, 2005), como se muestra en la figura 1. Este bloque cubre una sección del campo Ceuta, que forma parte del alineamiento regional de Pueblo Viejo. Para el estudio se cuenta con los registros Sónico (V_p), Rayos Gamma, Densidad y Resistividad de cinco pozos del área, distribuidos como se muestra en la figura 2.

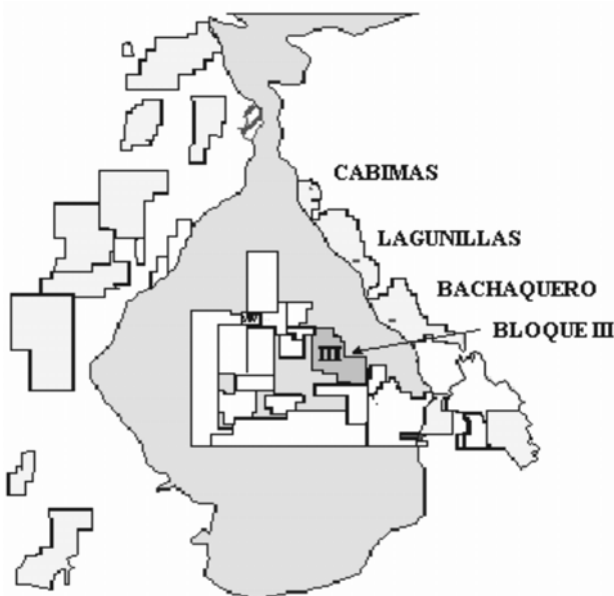


Figura 1. Mapa de ubicación de área de estudio Bloque III.

El rango de profundidad de cada pozo está entre los 8.575 pies y los 14.220 pies de profundidad (tabla 1). Estos atraviesan acumulaciones productoras del Eoceno B, Eoceno C-Superior y Eoceno C-Inferior de la Formación Misoa. La estructura general constituye un monoclin al *este-oeste* de suave buzamiento de 3° a 5° hacia el *sur*. Las capas eocenas, reposan sobre la Formación Guasare, separadas por una discordancia, y consisten en una serie alternante de arenas y lutitas, que representan ciclos transgresivos (PDVSA Intevep, 2005; WEC, 1997).

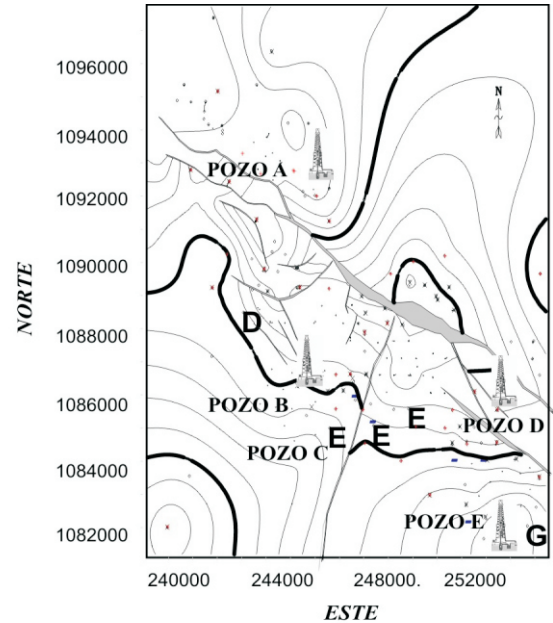


Figura 2. Localización de los pozos en un mapa estructural de un yacimiento en el Eoceno-C en Bloque III (Fuente: PDVSA).

Tabla 1. Intervalos de profundidad y espesores de los pozos de estudio donde son comunes todos los registros disponibles.

POZO	Intervalo de Profundidad (pies)		Espesor Total (pies)
	Desde	Hasta	
A	8.575,5	9.907,5	1.332
B	12.320,25	13.277,5	957,25
C	13.390,5	13.900,5	510
D	12.000	14.220	2.220
E	10.995	13.788	2.793

METODOLOGÍA

Análisis de los registros de pozo

Se estudian los registros de los pozos disponibles del área de estudio y se clasifican en *grupos* (González *et al.* 2002a;

Fernández *et al.* 2002; Mukerji *et al.* 2001; González *et al.* 2002b), como se describe a continuación:

Grupo I: Zona Lutítica: se definen como todas aquellas regiones que poseen un valor en el registro de rayos gamma mayor a 60° API.

Grupo II: Zonas de Arenas con Agua: están definidas por los valores de los registros de rayos gamma menores a 40° API, y una saturación de agua (S_w) mayor al 80 %.

Grupo III: Zonas de Arenas de Transición: son regiones que están definidas por los valores de los registros de rayos gamma menores a 40° API, S_w entre 60 y 80 %.

Grupo IV: Arenas con Hidrocarburos: este grupo está definido por valores del registro de rayos gamma menores a 40° API y S_w menor al 60 %.

Estimación de los parámetros elásticos y acústicos

Primero: se generan pseudo-registros de velocidad de onda S (V_s), a partir de los registros sínicos de onda P (V_p), utilizando las ecuaciones de Grenngberg y Castagna para arenas y para lutitas saturadas de agua (Wang, 2001; Vernik y Fisher, 2001). Subsiguientemente se introduce una dispersión a los valores de V_s por medio de un generador de números aleatorios con una desviación máxima del 5%.

Segundo: se calculan los parámetros elásticos y acústicos: G , E , λ , ν , IA , IE e IR . Para IE e IR , para θ , se toman valores de 30° y 35°, ya que son los considerados óptimos para el cálculo de estas impedancias (Connolly, 1999; Chen, 1994; Santos y Tigel, 2003).

Análisis de frecuencia y relación cruzada

Primeramente con el fin de establecer cuánto puede diferenciar por sí solo un parámetro la litología obtenida a partir de los registros de pozo, se calculan curvas gaussianas de intervalos de frecuencia para cada grupo por parámetro. Esto consiste en tomar uno de los parámetros calculados separado en grupos, calcular intervalos de frecuencias para cada grupo y ajustarle una curva gaussiana y analizar el solapamiento de las curvas obtenidas para cada parámetro.

Posteriormente, se realizan gráficos cruzados de combinaciones de los parámetros en base al análisis de frecuencia: se analiza la respuesta para distintas litologías y fluidos según la clasificación establecida por grupo, y se establece qué combinación permite caracterizar los grupos.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Análisis de los registros de pozo

En la tabla 2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de los registros de pozo, se muestran a los resultados sólo tomando en cuenta los grupos II, III y IV.

Se puede observar que:

a. El pozo *A* es el único que contiene arenas pertenecientes a todos los grupos; los pozos *B*, *C* y *D* contienen arenas pertenecientes a los grupos III y IV; y el pozo *E* sólo tiene arenas pertenecientes al grupo IV.

b. En el pozo *A* se encontraron 40 intervalos de arenas con un espesor total de 322,5 *pies*. Y el espesor de las arenas pertenecientes al grupo II del pozo *A* es de 177 *pies*, lo cual representa aproximadamente el 55 % del espesor total de las arenas.

c. El espesor total de las arenas en el pozo *D* es de apenas 28 *pies*, que corresponde al 1,26 % del espesor total de los registros disponibles del pozo.

En el pozo *B* el espesor de las arenas es de 56,75 *pies* que representa aproximadamente el 6 % del espesor total de los registros.

Tabla 2: Resumen del análisis petrofísico realizado de los pozos de los registros disponibles.

POZO	N° DE INTERVALOS DE ARENAS	ESPESOR DE ARENAS (<i>pies</i>)			ESPESO TOTAL ARENAS (<i>pies</i>)
		GRUPO			
		II	III	IV	
A	40	177	17,75	127,75	322,5
B	15	-	5	51,75	56,75
C	39	-	24	237	261
D	9	-	4	24	28
E	56	-	-	308	308

Análisis de frecuencia

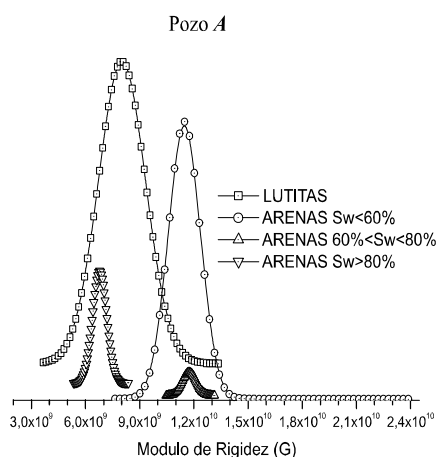
El intervalo de frecuencia de los valores alcanzados por las lutitas para los módulos de Rigidez G y de Young E , por lo general solapa totalmente los intervalos de valores tomados por las arenas de los grupos II y III y casi totalmente a las arenas del grupo IV; esta tendencia es similar para todos los pozos en ambos módulos. En la figura 3a se observa el

gráfico del ajuste de la curva *Gaussiana* a los intervalos de frecuencia para *G* correspondiente al pozo *A*. Para el módulo Volumétrico *K*, en la figura 3b del pozo *A*, los intervalos de las lutitas se desplazan hacia la derecha más que el resto de los grupos; es decir, toman valores más altos.

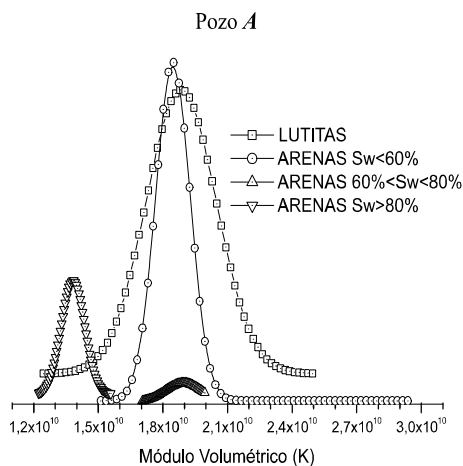
Para la constante de Lamé λ se tiene que: para los pozos *A*, *C* y *E* las arenas se desplazan hacia valores bajos, en especial las de los grupos II y IV, disminuyendo el solapamiento entre las lutitas y estas arenas. En los pozos *B* y *D* los intervalos de frecuencia de las arenas están solapados por las lutitas. El rango de valores tomados por λ en las arenas en estos pozos es amplio y no contribuye a una buena diferenciación entre las lutitas y las arenas, como se muestra en la figura 4a. Los pozos *B* y *D* son los de espesores totales de arenas más bajos, consecuentemente el bajo espesor de arenas afecta el cálculo de λ .

Con respecto a la relación de Poisson de los pozos *A*, *C* y *E* los valores tomados por las arenas del grupo IV están bien diferenciados, las arenas grupo II toman valores más altos de ν que las arenas del grupo III; notando que este parámetro está bastante afectado por el contenido de fluido en los poros. Para los pozos *B* y *D* se observa la misma tendencia pero en mucho menor grado; en este caso también el poco espesor total de las arenas afecta el cálculo de ν , como se nota en la figura 4b para el pozo *A*.

Para la Impedancia Acústica (*IA*) (figura 5a), las arenas toman un rango de valores pequeño y esto hace que se agrupen y su intervalo de frecuencia resalte, con excepción del pozo *D*, formando un pico muy estrecho y alto. La *IA* también la afecta el poco espesor de arenas, pero en menor grado. Aunque casi todos los valores de las arenas están solapados por los de las lutitas.

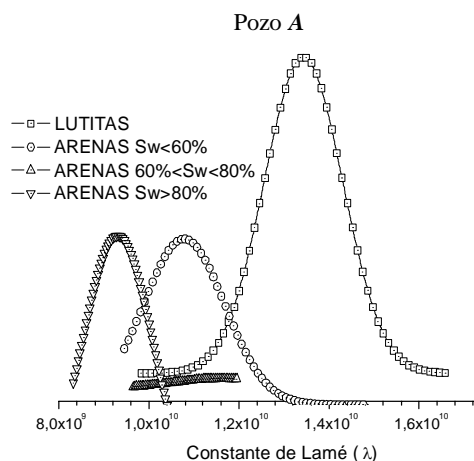


a)

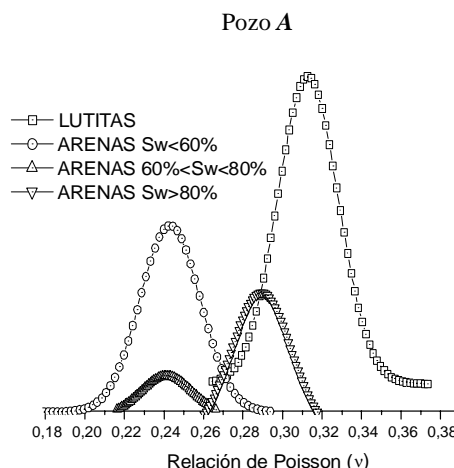


b)

Figura 3. Curvas Gaussianas del pozo *A*:
a) módulo de Rigidez, b) módulo Volumétrico.



a)

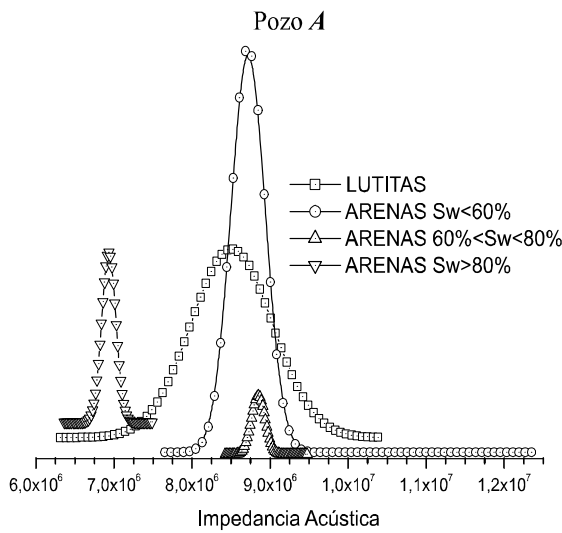


b)

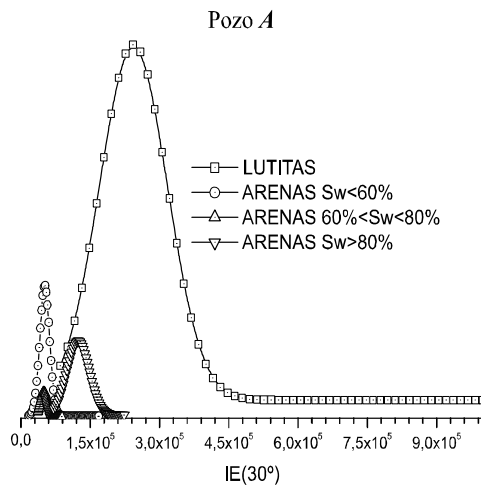
Figura 4. Curvas Gaussianas del pozo *A*:
a) la constante de Lamé, b) relación de Poisson.

La Impedancia de Reflexión (IR) evaluada en 30° y 35° , a pesar de que es una generalización de la impedancia acústica, no se observa una mejoría en la identificación de los grupos con respecto a ésta. Igualmente, al cambiar el ángulo de estudio de 30° a 35° afecta muy poco los intervalos de valores tomados por los grupos definidos, y muestra un leve desplazamiento de estos intervalos a valores más bajos.

En la Impedancia Elástica (IE) evaluada a 30° (figura 5b), las lutitas y las arenas se agrupan en intervalos bastante pequeños, produciendo picos de lutita bastante altos, dando la impresión de que las arenas se reducen. Todas las arenas se agrupan en valores bajos de la IE . Este comportamiento es similar para todos los pozos, y se acentúa al realizar el cálculo a 35° .



a)



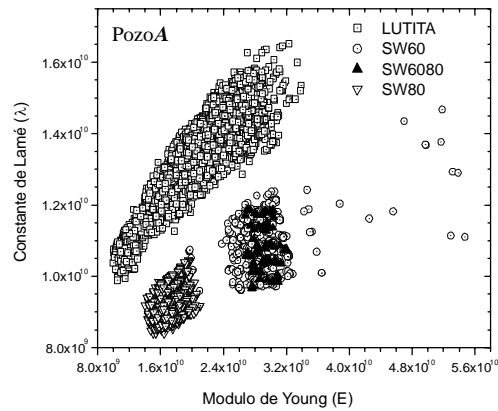
b)

Figura 5. Curvas Gaussianas del pozo A de:
a) Impedancia Acústica, b) Impedancia Elástica a 30° .

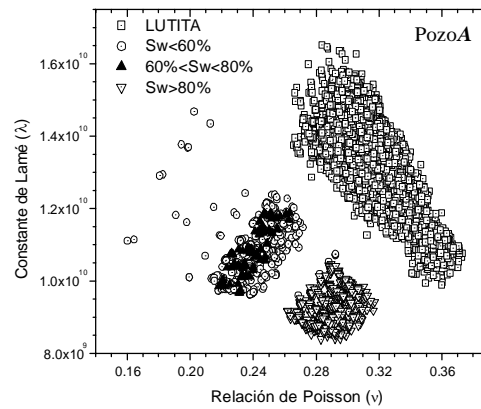
Relación Cruzada

Los gráficos cruzados de la constante de Lamé λ en función de los módulos elásticos G , E y K , son prácticamente iguales, los grupos están bien definidos y separados unos de otros, con la excepción de las arenas correspondientes al grupo III, que están solapadas por las arenas del grupo IV en todo momento. El gráfico cruzado λ vs ν , tiene el mismo comportamiento de los gráficos cruzados de λ y los módulos elásticos, pero de manera inversa. Esto se puede apreciar en las figuras 6a y 6b.

El gráfico $IA-\lambda$ tiene una buena separación entre los diferentes grupos (figura 7b), linealizando los valores de los diferentes grupos, en especial el de las lutitas. La λ y IR (30° y 35°) tienen un comportamiento muy similar al de $IA-\lambda$, pero acentuando el alineamiento de los puntos y reduciendo la separación entre las arenas y las lutitas.



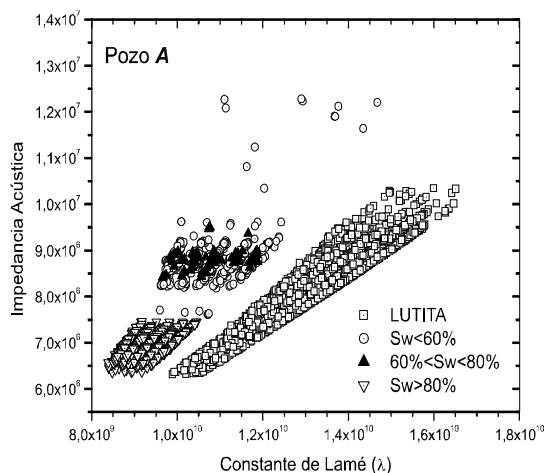
a)



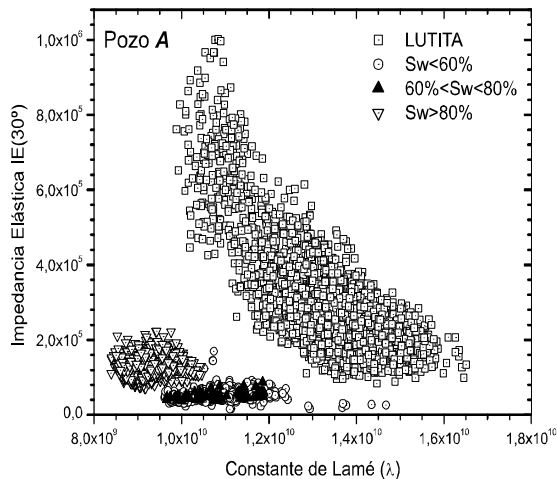
b)

Figura 6. Gráficos cruzados del pozo A de:
a) la constante de Lamé (λ) y el Módulo de Young E ;
b) la constante de Lamé (λ) y la relación de Poisson (ν).

Para $IE(30^\circ)$ y λ , en la figura 7b se observa una ligera separación entre lutitas y arenas, pero las arenas de los diferentes grupos forman un solo conjunto, agrupándose sin importar el fluido con el que están saturadas. Tomando $IE(35^\circ) - \lambda$ muestra un comportamiento donde los grupos tienden a agruparse aún más, y la separación entre las arenas de diferentes grupos desaparece por completo y tienden a alinearse en un intervalo de valores de IE pequeño.



a)



b)

Figura 7. Gráficos cruzados del pozo A de: a) la impedancia Acústica y la constante de Lamé (λ); b).

Para la Impedancia Elástica y la Impedancia Acústica, se observa una separación para las diferentes litologías. Las lutitas tienden a constituir un conjunto con forma de decaimiento exponencial, y las arenas de los grupos III y IV se alinean a valores bajos de IE . Las arenas del grupo II del pozo A, aunque están separadas tienden también a agruparse con una forma de decaimiento exponencial.

CONCLUSIONES

Del análisis de los intervalos de frecuencia se obtiene que ninguno de los parámetros elásticos y acústicos calculados en este trabajo a partir de los registros de pozo disponibles se puede utilizar por sí solo para clasificar litologías y fluidos en las rocas. Igualmente, si el espesor de las arenas a estudiar es pequeño, comparado con el espesor del intervalo a estudiar, afecta en gran medida los resultados de los parámetros estudiados, tornándose estos menos confiables.

Se logró establecer que principalmente los gráficos cruzados de la constante de Lamé λ con los otros parámetros son buenos indicadores de las diferencias entre litologías. Igualmente, los gráficos cruzados entre las impedancias Acústica y Elástica dan buenos resultados como indicadores de litología. Pero en ninguno de los casos estudiados se logró obtener una buena discriminación para el contenido de fluido en las arenas.

REFERENCIAS

- CHEN, T. (1994). Multiconverted Reflections in Marine Environments with Thin Permafrost Layers, M.Sc. Thesis, University of Calgary, Department of Geology and Geophysics.
- CONNOLLY, P. (1999). «Elastic impedance», *The Leading Edge*, Vol. 18, N° 4 438-452.
- FERNÁNDEZ, S., GONZÁLEZ, E. Y REGUEIRO, J. (2002). «Impedancia acústica y elástica para la identificación litológica y de fluidos: Aplicación al campo Chimire – Boca». XI Congreso Venezolano de Geofísica.
- GONZÁLEZ, E., MUKERJI, T., MELÉNDEZ, L., RAMOS, A. Y MAVKO G. (2002a). «Atributos AVO para la identificación litológica y de fluidos: Estudio de factibilidad en un campo del Oriente Venezolano», XI Congreso Venezolano de Geofísica.

- GONZÁLEZ, E., MUKERJI, T., MICHELENA, R. Y MAVKO, G. (2002b). «Statistical rock physics to select optimal seismic attributes for lithology discrimination in the heavy oil Orinoco Belt of Eastern Venezuela», XI Congreso Venezolano de Geofísica.

- MUKERJI, T., AVSETH, P., MAVKO, G., TAKAHASHI, I., GONZÁLEZ E. (2001). «Statistical rock physics: Combining rock physics, information theory, and geostatistics to reduce uncertainty in seismic reservoir characterization», *The Leading Edge*, vol. 20 N° 3 (March 2001) pp. 313-319.

- PDVSA–CIED. (2000). «Taller de Sísmica».
- PDVSA INTEVEP. (2005). «Codigo Geologico De Venezuela (Lexico Estratigrafico)». www.pdvsa.com/lexico.
- SANTOS, L. T. AND TYGEL M. (2003). «Impedance-type approximations of the P–P elastic reflection coefficient: Modeling and AVO inversion», 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- SANTOS, L., TYGEL, M. AND BUGINGA, R. (2002). «Reflection Impedance». Soc. of Expl. Geophys (SEG) 72th annual meeting expanded abstracts.
- SERWAY, R. (1997). «Física: Tomo I», 4^a Ed. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. México.
- SMITH, G. AND GILDOW, M. (2000). «A comparison of the fluid factor with λ ? and μ ? in AVO analysis». Soc. of Expl. Geophys (SEG) 70th annual meeting expanded abstracts.
- SUN, Z. (1999). «Seismic Methods for Heavy Oil Reservoir Monitoring and Characterization», Doctor Of Philosophy. Thesis, University of Calgary, Department of Geology and Geophysics.
- VÁSQUEZ, A. (2001). «Introducción a la Geomecánica Petrolera», V.V.A. Consultores, C.A., 5^a Edición, Caracas.
- VERNIK, L. AND FISHER, D. (2001). «Estimation of net-to-gross from P and S impedance: Part I – petrophysics» Soc. of Expl. Geophys (SEG) 71th annual meeting expanded abstracts.
- WANG, Z. AND SZATA, K. (1999). «Rock physics lithology and porosity prediction in carbonate reservoirs». Soc. of Expl. Geophys (SEG) 69th annual meeting expanded abstracts.
- WANG, Z. (2001). «Fundamentals of seismic rock physics», Geophysics, Vol. 66, N^o. 2; P. 398–412.
- WEC. (1997). «Evaluacion De Pozos» Shlumberger, Well Evaluation Conference.
- WHITCOMBE, D., ABERDEEN; CONNOLLY, P., REAGAN, R., REDSHAW, T. (2000). «Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction» Soc. of Expl. Geophys (SEG) 70th annual meeting expanded abstracts.