

Nuevas tendencias de la exploración sísmica

Guillermo Miró Pagés

Correo electrónico: gmiro@civil.cujae.edu.cu

Artículo de Reflexión

Emilio Ricardo Escartin Sauleda

Correo electrónico: escartin@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana Cuba

Hilda Esther Amador Longoria

Correo electrónico: amador@digicupet.cu

Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Resumen

El presente artículo es resultado de un trabajo de investigación bibliográfica realizado por los grupos de investigación GEOPET y GEOMAT del Departamento de Geociencias del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, a fin de dar respuesta a una reciente propuesta de temas de colaboración formulada por la Unión Cubapetróleo (CUPET) en el ámbito de las relaciones tradicionales existentes entre las instituciones citadas; el trabajo a la vez persiguió el propósito de actualizar información con vistas a la impartición de la asignatura Métodos sísmicos para la prospección y exploración de hidrocarburos que se imparte por los autores de este artículo en el cuarto año de la carrera de Ingeniería Geofísica en la Facultad de Ingeniería Civil de la Cujae. El tema objeto de investigación se enfocó en las nuevas posibilidades tecnológicas del método sísmico de exploración a escala internacional, en especial en lo concerniente a la etapa de explotación de los yacimientos de petróleo y gas y a la exploración de depósitos de gas no convencional, aspectos a los cuales se dedica esta publicación.

Palabras claves: exploración, explotación, sísmica, petróleo, gas

Recibido: 2 de agosto del 2013

Aprobado: 1 de septiembre del 2013

INTRODUCCIÓN

Como es conocido, el empleo gradualmente creciente de los hidrocarburos fósiles con fines energéticos comenzó en los albores del pasado siglo XX. Desde entonces, los métodos geofísicos y en especial los sísmicos, han constituido la herramienta fundamental en la prospección petrolera. Desde el año 1914 en que fue patentado el sismógrafo mecánico por L. Mintrop, extraordinario ha sido el desarrollo de esta técnica hasta el momento presente. En la tabla 1 se recogen en forma sintetizada algunos de los hitos principales que han marcado el desarrollo de la sísmica durante el siglo XX.

En numerosas publicaciones de Geofísica Aplicada se exponen con amplitud los fundamentos teóricos y los aspectos prácticos esenciales relativos al *método sísmico de reflexión* [1].

Este método tiene una relevante importancia en el contexto de la Geofísica Aplicada ya que tradicionalmente el mismo ha ocupado y sigue ocupando el liderazgo mundial en la exploración petrolera.

Adicionalmente, desde hace algunos años, también la sísmica de reflexión viene desempeñando un importante rol en la evaluación y el desarrollo de campos petroleros (sísmica

de explotación de reservorios); la experiencia indica que en la medida que se obtienen nuevos datos sísmicos 3D en el entorno de los yacimientos o se procesan los disponibles con nuevos software de elaboración, con frecuencia se logran refinar sus modelos geológicos lo que incide en el establecimiento de políticas más acertadas de explotación de dichos yacimientos.

Tabla 1 Principales etapas de desarrollo del método sísmico de prospección [1] (modificado de Sheriff R.E. <i>et al.</i> , 1995)	
Año	Logro alcanzado
1914	Sismógrafo mecánico de L. Mintrop
1917	Es patentado el método sísmico de prospección
1923	Empleo del método de refracción en México y en Texas (USA)
1931	Realización de perfilajes de refracción
1933	Empleo de agrupamientos de geófonos/canal
1936	Aparición del método de recepción dirigida regulada y de la registración sísmica reproducible
1942	Aparición de los cortes de tiempos
1944	Realización del primer volumen apreciable de observaciones en el mar
1950	Aparición de primeros indicios del surgimiento del método del punto de reflexión común
1952	Registración analógica en cinta magnética
1953	Aparición de los primeros registros con el <i>Vibroseis</i>
1954	Empleo del carotaje acústico
1961-1962	Empleo de la deconvolución de señales sísmicas
1965	Empleo de fuentes neumáticas de excitación
1972	Aparición del método del punto brillante
1974	Registración en forma digital de las señales sísmicas
1975	Aparición de la sismoestratigrafía
1976	Introducción de la sísmica 3D
Décadas 80-90	Desarrollo de modernos hardware y software para el procesamiento y la interpretación. Métodos de búsqueda directa de hidrocarburos
2000 hasta el presente	Sísmica de yacimientos. Sísmica para la exploración de gases no convencionales

El presente artículo es resultado de un trabajo de investigación bibliográfica realizado por los grupos de investigaciones GEOPET y GEOMAT del Departamento de Geociencias del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae a fin de dar respuesta a una reciente propuesta de temas de colaboración formulada por la Unión Cubapetróleo (CUPET) en el ámbito de las relaciones tradicionales existentes entre las instituciones citadas; el trabajo a la vez persiguió el objetivo de actualizar información con vistas a la impartición de la asignatura Métodos sísmicos para la prospección y exploración de hidrocarburos, que se imparte por los autores en el cuarto año de la carrera de Ingeniería Geofísica en la Facultad de Ingeniería Civil de la Cujae y de reflexionar sobre las aparentes tendencias de desarrollo futuro de este método geofísico. El tema objeto de investigación se enfocó en las nuevas posibilidades tecnológicas del método sísmico de exploración a escala internacional, en especial en lo concerniente a la etapa de explotación de los yacimientos de petróleo y gas, y a la exploración de depósitos de gas no convencional, aspectos a los cuales está dedicada la presente publicación.

EXPLORACIÓN SÍSMICA MODERNA

Como es conocido, los métodos sísmicos se basan en el estudio de la propagación a través del medio geológico de ondas elásticas excitadas artificialmente mediante explosiones, golpes en el suelo, vibraciones, etc. Al penetrar estas ondas en las profundidades del subsuelo, las mismas encuentran en su recorrido diferentes fronteras de discontinuidad de las velocidades de propagación de estas a través del medio y/o de las densidades que las caracterizan, las que generalmente coinciden con distintos tipos de fronteras geológicas. Cuando esta situación tiene lugar, ocurre que una parte de la energía de la onda original retorna a la superficie del terreno en forma de ondas reflejadas (o refractadas) las que son susceptibles de ser registradas en esta mediante dispositivos especiales denominados geófonos (o hidrófonos en el caso de los trabajos marinos).

Estos sensores son colocados a lo largo de líneas generalmente rectilíneas (perfiles) espaciadas entre sí a distancias que oscilan entre varios kilómetros (sísmica 2D) y decenas de metros (sísmica 3D) y los mismos son conectados a equipos especiales (estaciones sísmicas o sismógrafos), los que permiten obtener sismogramas, es decir, registros del movimiento del terreno (figuras 1 y 2).

Al analizar los sismogramas, habitualmente es posible evaluar entre otros atributos, el tiempo de recorrido de las ondas, o sea, el intervalo transcurrido entre los instantes de excitación y de arribo de las mismas a la superficie; a partir de esto, pueden ser calculados diferentes datos de mucha utilidad tales como las velocidades de propagación de las ondas longitudinales (V_p) y/o transversales (V_s) a través de los estratos del subsuelo, sus profundidades de yacencia, etc., lo que permite lograr la visualización de estos.

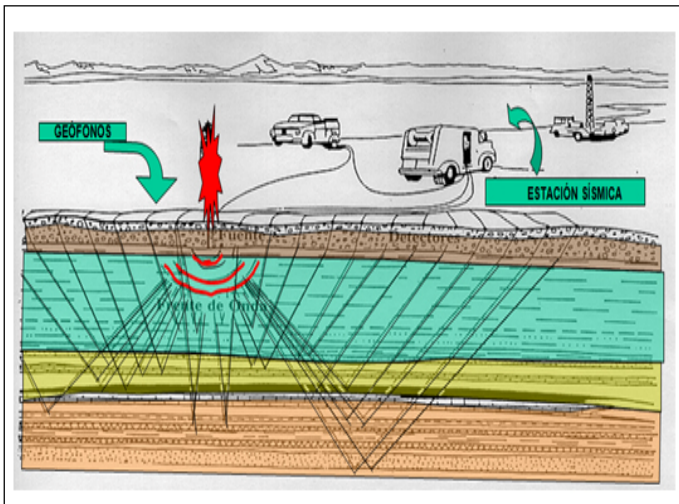


Fig. 1. Principios de trabajo de la exploración sísmica [2]

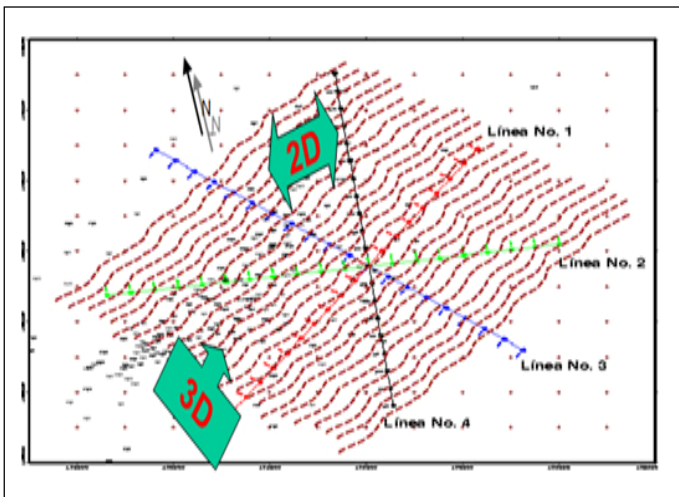


Fig. 2. Imagen de dos líneas para exploración 2D y de una malla densa 3D de perfiles [2]

Actualmente, la exploración sísmica con fines petroleros a nivel mundial, se realiza principalmente mediante el método del punto de reflexión común (MPRC), también conocido como método del punto medio común (MCMP por sus iniciales en idioma inglés), el que permite obtener información ondulatoria redundante de las fronteras reflectoras objeto de estudio y cuyo adecuado procesamiento posibilita generalmente incrementar la resolución de las imágenes y reforzar el efecto de las señales útiles en detrimento de los ruidos.

Esta técnica, que ha probado ampliamente su efectividad a lo largo de decenios, es responsable de la gran mayoría de los hallazgos de trampas petroleras en todo el mundo, gracias a la visualización que propicia de estas.

Hacia finales del pasado siglo, las perforaciones confirmaron no menos del 70 % de las estructuras pronosticadas por la sísmica en el subsuelo, aunque debe significarse que aún la mayoría de las que son perforadas, carecen de interés petrolero, lo que entraña un permanente reto para este método.

Las etapas principales de la exploración sísmica petrolera moderna mediante el MPRC son:

1. Adquisición de los datos sísmicos.
2. Procesamiento de la información.
3. Interpretación geológica.

En la monografía [3] se incluye el artículo titulado "La sísmica de reflexión petrolera a inicios del nuevo milenio: estado del arte", en el que se expone una descripción de las etapas anteriormente referidas en el campo de la búsqueda de nuevas trampas estructurales y estratigráficas en el momento actual.

A continuación se hará referencia a algunas de las aplicaciones más actuales de los métodos de exploración sísmica en la esfera de la explotación de los yacimientos conocidos y de la prospección de gases a escala internacional.

APLICACIÓN DE LA SÍSMICA A LA EXPLOTACIÓN DE LOS YACIMIENTOS PETROLÍFEROS

Entre los logros tecnológicos en el campo de la sísmica que más han propiciado el aumento de su capacidad informativa en los últimos años, se destacan aspectos tales como la introducción del registro, procesamiento e interpretación digital de los datos, las tecnologías de adquisición 3D, la sísmica de pozos, el registro multicomponente, las técnicas de atributos, adopción de nuevos paradigmas de trabajo con la aplicación de tecnologías de visualización mediante realidad virtual inmersiva, etc. [1, 4 - 8], todos los cuales han coadyuvado a que el método sísmico haya alcanzado nuevas posibilidades de exploración, que resultaban imposibles de predecir en un pasado reciente.

Inicialmente, la aplicación de la sísmica se concentró en la exploración, etapa que hoy continúa constituyendo un importante campo de su aplicación. Sin embargo, actualmente, en relación a la necesidad de incrementar los índices de explotación de los yacimientos conocidos por la declinación observada en la tendencia de nuevos hallazgos, este método alcanza también un importante protagonismo en diversas facetas del estudio de los yacimientos lo que es reportado por distintas fuentes [9].

Es conocido que los ingenieros petroleros necesitan contar con modelos confiables sobre los yacimientos petrolíferos que explotan a fin de tomar decisiones acertadas para la producción y el desarrollo de estos. Frecuentemente necesitan respuestas a interrogantes que los geofísicos pueden ayudar a aclarar, tales como: ¿Cuál es el volumen de porosidades en las rocas? ¿Cuál es el grado de interconexión entre los poros (permeabilidades)? ¿Cuáles son los tipos de fluidos confinados en el reservorio? ¿Cuál es el régimen de energía/presión que puede propiciar el fluido de los hidrocarburos? ¿Cuál es la geometría de las capas de rocas porosas e interconectadas? ¿Existen barreras al flujo de fluidos (fallas sellantes, barreras estratigráficas, etc.)?

Los siguientes métodos pueden ayudar al esclarecimiento de estas incertidumbres:

- Sísmica, gravimetría y otros datos geólogo-geofísicos de superficie.
- Perfilaje sísmico vertical (conocido generalmente como VSP por sus iniciales en idioma inglés), tomografía entre pozos, carotaje acústico y otros datos geofísicos de pozos.
- Muestras de núcleos tomadas en los pozos del yacimiento.
- Datos de producción y del régimen de presiones del yacimiento.

En lo referente a la sísmica, hay que resaltar la relevante contribución de los llamados atributos en la visualización de las anomalías de interés. Según la definición que se ha dado en [10]: "Por atributo se entiende cualquier información derivada de los datos sísmicos obtenida bien a partir de mediciones directas, por la lógica o la experiencia basada en el razonamiento".

Un atributo no es más que una magnitud sísmica directamente medida o derivada de una medición. Todos los atributos de horizontes y de formaciones resultan en realidad interdependientes, siendo cada uno de los diferentes atributos, portadores de información de interés. Esta información suele ser revelada mediante la adecuada visualización del atributo.

Generalmente se considera que los atributos básicos caracterizan: tiempos de recorrido, amplitudes, velocidades, frecuencias, polaridad, atenuación de la ondícula y coherencia entre trazas.

En el artículo [7] su autor plantea importantes consideraciones acerca del uso y abuso que se le ha dado en los últimos años a los atributos, alertando que aunque las computadoras son magníficas herramientas, las respuestas exploratorias todavía solo pueden ser halladas en la mente de los hombres.

Las investigaciones geofísicas dedicadas al estudio de los yacimientos, en las que son ampliamente empleadas las técnicas de atributos referidas anteriormente, han sido agrupadas en la llamada *geofísica de reservorios* [1] la que ha sido subdividida en tres vertientes:

- **Geofísica para la delimitación de los reservorios:** consiste en el empleo de la sísmica para precisar los límites del reservorio y localizar fallas y otras "barreras" al flujo de los fluidos.

En [11] se muestran siete casos históricos sobre la aplicación de sísmica 3D y dos sobre la aplicación del VSP para la delimitación de yacimientos y se reporta el logro de la reanimación de la producción de un campo petrolero que aparentemente estaba agotado, como resultado de una mejor estrategia de explotación trazada sobre la base de la información que aportó un nuevo levantamiento sísmico 3D realizado en el área.

- **Geofísica para la descripción de los reservorios:** presupone el empleo de la sísmica para ayudar a esclarecer importantes características internas de un campo, tales como los espesores netos de las formaciones del reservorio y de las zonas no porosas, las porosidades asociadas a las distintas litologías, los coeficientes de Poisson, etcétera.

Uno de los parámetros de mayor interés es generalmente la permeabilidad; la cual, la mayoría de las veces, puede ser medida únicamente en los núcleos de pozos por lo que su muestreo resulta insuficiente. Sin embargo, según evidencia la experiencia [11] la permeabilidad es groseramente proporcional a la porosidad, la que a su vez puede ser inferida a partir de las amplitudes y/o de las velocidades sísmicas.

- **Geofísica para el servicio a la explotación de los reservorios:** implica la utilización de datos sísmicos adquiridos repetidamente una vez transcurridos ciertos lapsos de tiempo (técnica conocida como sísmica 4D), para el monitoreo del movimiento de los fluidos en los yacimientos en el marco de los procesos de recuperación secundaria. Los atributos generalmente valorados con este fin son las amplitudes y las velocidades ya que con frecuencia el gas, el petróleo y el agua que rellenan los poros de las rocas influyen en los valores de las velocidades y de las densidades y por lo tanto se expresan en variaciones de los contrastes de reflectividad con las formaciones adyacentes, que se manifiestan a su vez en los datos sísmicos con el decursar del tiempo.

En diversas publicaciones se aborda el papel actual del método sísmico y la amplia gama de tareas que resuelve tanto en la exploración como en el estudio de los campos petroleros y los positivos impactos que esto acarrea.

- En el artículo referido en [12], por ejemplo, se tratan interesantes experiencias sobre este tema concluyéndose que "...los datos sísmicos pueden incrementar el valor de los activos en todas las etapas de la vida productiva del yacimiento". Durante la etapa de evaluación, los ingenieros de perforación se apoyan en modelos tridimensionales geomecánicos y de presión basados sobre datos sísmicos para predecir la posible ubicación de sitios riesgosos del subsuelo, tales como zonas de flujo aguas subterráneas, de altas presiones de poros, etcétera.

Durante la etapa de desarrollo se confeccionan mapas de las propiedades de los yacimientos en los intervalos entre pozos, utilizando datos sísmicos calibrados con información de estos. Posteriormente los grupos de producción emplean levantamientos de sísmica 4D para detectar eventuales cambios de saturación y de presión acaecidos con el decursar del tiempo, a fin de lograr un mejor emplazamiento de nuevos "pozos de relleno" y de prolongar la vida productiva del yacimiento.

En otros trabajos de publicación más reciente [13 -16] se exponen ejemplos de aplicaciones combinadas de la sísmica, la geofísica de pozos y la petrofísica al estudio de yacimientos, lo que tiene también una gran actualidad.

APLICACIÓN DE LA SÍSMICA A LA EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS DE GAS

Desde su surgimiento, el método sísmico de prospección concentró su atención en la búsqueda de petróleo; actualmente, junto a esta misión, la sísmica presta también

una importante prioridad a la prospección de gases, la que adquiere creciente relevancia en el presente cuando los yacimientos petroleros parecen comenzar a declinar en muchas regiones del mundo y atendiendo también al efecto menos nocivo sobre el medio ambiente de la explotación de estos con relación a la del petróleo. Hoy son publicados numerosos artículos que destacan la importancia perspectiva de esta fuente por sus impactos energéticos y medioambientales [17].

Antes de valorar las posibilidades existentes de detectar los gases naturales acumulados en el subsuelo, es menester referirse brevemente a la naturaleza de estos [18].

Al parecer, no existe una explicación única acerca de cómo se forman los gases naturales. La mayoría de los yacimientos en que ellos se encuentran han sido descubiertos en cuencas sedimentarias y su génesis ha estado asociada a la deposición y posterior transformación a altas temperaturas de materia orgánica (*gas termogénico*), lo que ha dado lugar a la formación de aquellos. Sin embargo, según se reporta [19], estos también pueden formarse a partir de otros procesos de transformación anaerobia de materia orgánica por diversas bacterias, a temperaturas relativamente bajas (*gas biogénico*) y a partir de compuestos de carbón sometidos a altas presiones y temperaturas.

Actualmente, en la literatura técnica especializada, se diferencian los gases convencionales de los que no lo son; estos últimos se asocian con los gases naturales que se encuentran contenidos en formaciones rocosas "de difícil producción", es decir, que requieren técnicas de estimulación especiales para extraer este recurso. Los gases naturales asociados a yacimientos de carbón, a arenas compactas, a formaciones de esquistos y a hidratos en los fondos marinos, son todos ejemplos de gases no convencionales [20].

El trabajo "Sistemas petroleros no convencionales" [21] constituye una abarcadora compilación de artículos dedicados a este tema.

Es un hecho reconocido que la mayoría de las cuencas petroleras en todo el mundo, localizadas tanto en áreas terrestres como marinas, se "expresan" mediante emanaciones gaseosas que llegan a la superficie o través de distintos tipos de anomalías sísmicas, lo que confiere a la identificación e interpretación de estas últimas una gran importancia para la exploración.

A continuación se tratarán brevemente los hidrocarburos gaseosos y las posibilidades modernas del método sísmico para su prospección.

Hidrocarburos gaseosos

Gas biogénico

Hoy en día se estima que el gas biogénico representa el 20 % o más de todo el gas confinado en el subsuelo terrestre. Los sistemas someros de gas biogénico constituyen un recurso inapreciable actualmente, en la medida que las demandas de gas natural aumentan. Los pozos perforados para la búsqueda de gas biogénico, frecuentemente tienen bajas tasas de aprovechamiento [19] lo que puede parecer poco rentable; sin embargo, no es menos cierto que la poca profundidad de estos, abarata considerablemente este tipo de exploración. Consecuentemente, los sistemas someros

de gas biogénico pueden resultar ideales para operadores domésticos pequeños y para contribuir al desarrollo de países emergentes.

Gas termogénico

Aparentemente existen controversias acerca de la génesis del *gas profundo*; algunos especialistas consideran que la mayor parte del metano existente en los subsuelos del mundo es de origen inorgánico y que se hallan vastas reservas de él, aún no descubiertas, a profundidades mayores de 5 000 m.

No obstante [22], la mayoría de los investigadores que estudian este tema, sustentan el origen orgánico del metano y sostienen que los gases naturales pueden ser hallados a variadas profundidades aunque la mayor parte de ellos se forma en rocas sometidas a altas presiones y temperaturas durante un prolongado período de tiempo.

Indicadores sísmicos sobre la existencia de gases en el subsuelo

En los últimos años han sido detectados numerosos yacimientos de hidrocarburos en diferentes regiones del mundo gracias a la manifestación de distintos tipos de anomalías de gas; por ejemplo, según ha sido estimado, más del 75 % de todas las cuencas petrolíferas del mundo presentan en su superficie manifestaciones de este tipo. La identificación de las emanaciones gaseosas se lleva a cabo con distintas técnicas entre las que predominan las de teledetección, el RADARSAT y las de exploración sísmica.

En la figura 3, por ejemplo, se muestra una anomalía acústica que se expresa hasta en el tirante de agua, atribuida a emanaciones gaseosas en la bahía de Cárdenas, al norte de Cuba [23]. Esta anomalía inicialmente, fue interpretada como un ruido no definido en el registro, pero posteriormente al procesamiento de los datos, se concluyó que estos supuestos ruidos, constituían en realidad emanaciones gaseosas posiblemente asociadas a zonas de debilidad tectónica existentes en el corte geológico del subfondo marino, lo que ratificó el interés gasopetrolífero de la región.

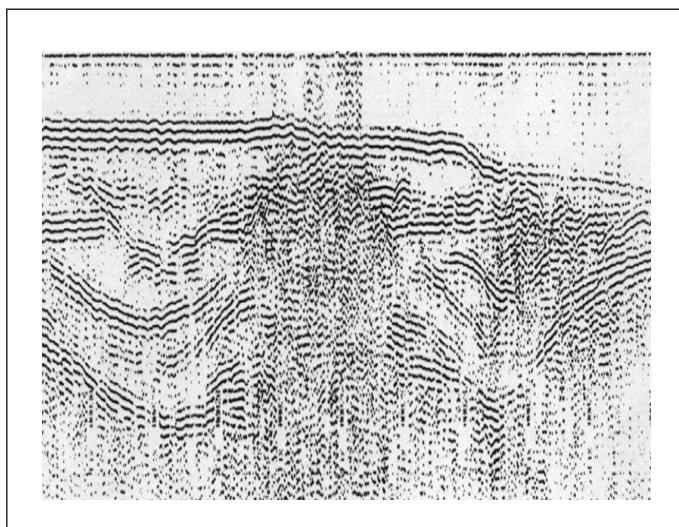


Fig. 3. Ejemplo de columna acústica localizada hacia el centro de la imagen, detectada mediante sísmica de alta resolución en la bahía de Cárdenas [23]

El objetivo principal del método sísmico ha sido desde su surgimiento, ubicar en el subsuelo la presencia de fronteras de discontinuidad de las velocidades de propagación de las ondas elásticas a través de las rocas, las que como muestra la experiencia, muchas veces se hallan estrechamente relacionadas con importantes horizontes geológicos.

En diferentes fuentes bibliográficas básicas concernientes al método sísmico [1] se han expuesto importantes consideraciones respecto al comportamiento de las velocidades y de las fronteras sísmicas asociadas principalmente a las variaciones de estas.

Durante muchos años, la mayoría de los investigadores dedicados a la prospección sísmica, consideraron que las variaciones de velocidades asociadas a los cambios de litología entre capas que yacían consecutivamente, eran la causa de la formación de las reflexiones sísmicas dentro de los medios geológicos; hoy en día, sin embargo, también se reconoce el importante papel que juegan otros factores en la formación de estas.

Históricamente, la sísmica concentró su atención en la detección indirecta de eventuales acumulaciones de hidrocarburos vinculadas principalmente con altos estructurales. En la actualidad, el desarrollo tecnológico alcanzado por el método permite a este en ocasiones, detectar directamente los hidrocarburos en el subsuelo [7, 24, 28] sobre la base de las posibilidades que existen hoy en día de registrar reflexiones sutiles procedentes de fronteras asociadas a variaciones de velocidades vinculadas a cambios de los tipos de fluidos confinados en los espacios porales de las rocas sedimentarias.

Hoy en día es conocido que las fronteras que separan arcillas de arenas subyacentes saturadas con gas, con frecuencia provocan una fuerte reflexión con polaridad negativa cuya detección constituye el objetivo del método del punto brillante (identificado en idioma inglés como *bright spot*) y que el contacto horizontal gas-agua salada o gas-petróleo inmerso en un paquete de rocas terrígenas como las areniscas, a veces se expresa en las secciones sísmicas de ondas P como una frontera reflectora aproximadamente plana (figura 4), detectable mediante el llamado método del punto plano (identificado en idioma inglés como *flat spot*).

También ha sido confirmada la efectividad que frecuentemente tiene la técnica sísmica AVO (Amplitud Versus Offset), para detectar capas saturadas de gas, basada, en el análisis de las variaciones de las amplitudes de las reflexiones sísmicas asociadas a los cambios del coeficiente de Poisson (σ) a lo largo de las fronteras investigadas [18].

Las anomalías sísmicas mencionadas, han sido registradas en numerosas áreas de todo el mundo, asociadas a distintas profundidades y referidas tanto a gases termogénicos (a mayores profundidades) como a biogénicos (a profundidades más someras). Según se ha considerado, "cuando los *flat spots* son identificables, resultan el indicador más definitivo e informativo sobre la existencia de hidrocarburos en el

subsuelo" [1]; no obstante, es importante tener en cuenta que según ha demostrado la experiencia, no siempre estos tipos de anomalías están asociados a concentraciones de gas con valor comercial y que a veces incluso no responden a la existencia de hidrocarburos en absoluto, sino a otros diversos factores sísmicos y/o geológicos.

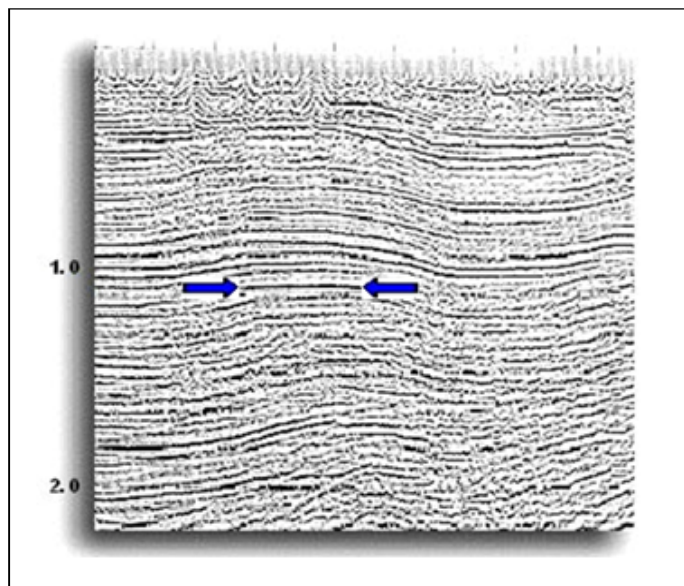


Fig. 4. Anomalia similar a un *flat spot*, observada en una sección sísmica adquirida en la cuenca del Cauto, Cuba [18]

APLICACIÓN DE LA SÍSMICA A LA EXPLOTACIÓN DE LOS YACIMIENTOS DE GASES NO CONVENCIONALES

En numerosos artículos recientemente publicados y en múltiples contribuciones presentadas en eventos actuales dedicados a las Geociencias se aborda el tema de los llamados *gases no convencionales* [29- 32]. Una definición ofrecida sobre el término "gas no convencional" (GNC) aparece expuesta en [32] donde dice textualmente: "El gas no convencional es aquel tipo de gas confinado en el subsuelo cuya extracción solo puede ser lograda por estimulación (fracturación) hidráulica mediante pozos horizontales especialmente perforados a ese fin"; tanto en esta publicación como en [30], se exponen detalles sobre la explotación de estos gases lo que releva la necesidad de hacerlo en el presente artículo que está enfocado a las tecnologías geofísicas más adecuadas para su prospección.

A pesar de la innegable solución energética que este tipo de gas aporta, hay que señalar que actualmente se discute a escala internacional sobre sus aparentes consecuencias perniciosas al medio [33 - 35].

En la figura 5 se ilustran las acumulaciones típicas de gases naturales que se manifiestan en el subsuelo.

En las diferentes facetas de la exploración de los GNC se emplea ampliamente el método sísmico principalmente en su modalidad 3D. El principal objetivo de la sísmica, al igual que en la exploración petrolera tradicional, es identificar los rasgos estratigráficos y estructurales que pueden ser

limitantes o facilitadores para la producción de gas. El análisis de atributos sísmicos (principalmente coherencia y curvatura) es muy importante en la exploración de GNC pues proporciona valiosa información sobre discontinuidades, fallas, fracturas, carsismo y sus efectos en las rocas gasíferas. Los resultados de la interpretación de los mapas de atributos sísmicos permiten visualizar la variación de las propiedades composicional, petrofísica y geomecánica de las litofacies, lo que puede sugerir que algunas sean más favorables para la perforación horizontal que otras.

En distintas publicaciones actuales se refieren experiencias sobre la aplicación de la sísmica tanto activa como pasiva a la exploración y explotación del GNC [36-38, 43].

En el artículo [37] que resume los resultados del taller "Geofísica para los gases no convencionales", celebrado en Hamburgo, Alemania, el 9 de marzo de 2012, por ejemplo, se abordan importantes interrogantes tales como: ¿Necesitamos una geofísica no convencional en la exploración y el desarrollo de hidrocarburos no convencionales? ¿Cuáles son los métodos geofísicos apropiados para explorar los hidrocarburos no convencionales? ¿Cómo debemos adaptar los programas de exploración y las medidas de sondeos? ¿A qué propiedades de los testigos se debe prestar atención en el caso de los no convencionales? ¿Es posible utilizar las directrices de interpretación existentes para las medidas de fondo de pozo? ¿Qué métodos geofísicos se pueden añadir a la exploración sísmica para mejorar las imágenes subterráneas? ¿Qué métodos sísmicos especiales existen para permitir o mejorar las interpretaciones?

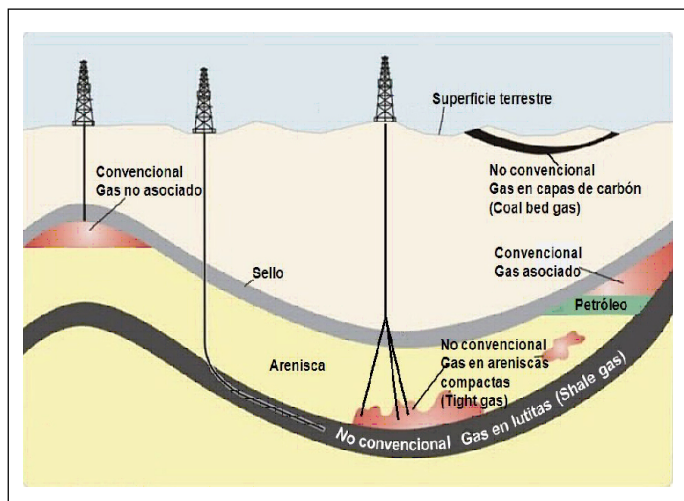


Fig. 5. Distribución esquemática de las acumulaciones de gas natural en el subsuelo (convencional y no convencional) [30]

Algunas de las principales conclusiones derivadas de este taller fueron las siguientes:

- La nueva geofísica requiere del registro completo de tres componentes de los parámetros elásticos (sísmica multicomponente).
- Si se emplean sistemas de monitoreo permanente, en muchas ocasiones se logran detectar microsismos inducidos

por fracturas y ruido pasivo, cuyo análisis e interpretación es útil para estimar las propiedades elásticas de las diferentes capas investigadas y para orientar un empleo más racional de los procesos de fracturación hidráulica.

- El procesamiento sísmico de coherencia ayuda en la identificación de los sistemas de fallas, lo que es de suma importancia para optimizar la orientación de los pozos.

- La inversión conjunta de los datos PP y PS proporciona una determinación más confiable de la densidad, la impedancia y los índices de fracturación, lo que ha sido comprobado en varios casos de estudio de gas esquistoso.

Algunas de las publicaciones consultadas resaltan también la gran utilidad de la sísmica para optimizar la orientación de los pozos, partiendo de que este método puede aportar una valiosa información para caracterizar sistemas de fallas, propiedades geomecánicas y estados tensionales de los macizos de rocas que son investigados, sobre la base de los efectos de anisotropía que se observan a menudo en los datos sísmicos 3D y que se expresan mediante variaciones de amplitudes y de tiempos de registro de las ondas sísmicas, asociados a las variaciones de los azimuts de registro y mediante el empleo de sísmica multicomponente, vinculados a la birrefringencia de las ondas transversales.

Por otra parte, se aprecia que resulta muy prometedora la aplicación combinada de la sísmica marina de reflexión y del método electromagnético para cuantificar volúmenes de hidratos de gas [18]. Esta fuente de gas no convencional es universalmente aceptada como la más voluminosa y perspectiva a escala internacional, por abundar en los océanos de todo el mundo y muy recientemente aparecen reportes sobre la introducción de nuevas tecnologías para su explotación [44, 45].

MIRANDO AL FUTURO

Resulta muy difícil conjeturar pronósticos sobre las tendencias de desarrollo futuro de una tecnología de investigación tan dinámica como la sísmica petrolera. Sin embargo, basada a la revisión realizada sobre su estado del arte y los previsibles retos que se avecinan, puede suponerse que algunos de los principales elementos que incidirán en su evolución futura a escala internacional serán probablemente los siguientes:

1. Necesidad de desarrollar nuevos proyectos en variados y más complejos ambientes tales como zonas de aguas profundas y ultraprofundas, árticas y cinturones plegados, para la exploración de capas subsalinas, yacimientos en reservorios carbonatados altamente heterogéneos, rocas ígneas y metamórficas con sistemas de fracturas poco predecibles, etcétera.
2. Prioridad de incrementar el índice de recuperación de hidrocarburos en campos conocidos.
3. Exploración y explotación de hidrocarburos no convencionales (combinación de sísmica activa y pasiva).
4. Continuo y vertiginoso desarrollo y perfeccionamiento de las tecnologías y capacidades de cómputo.

5. Incremento del número de canales de registro telemétrico e incorporación de las posibilidades que ofrece la nanotecnología al diseño de nuevos equipos de medición.

6. Ascendente rol de la sísmica de pozos.

7. Mayor acento del papel del modelaje y de la migración en profundidad.

8. Más generalizada y extendida consideración del papel de la anisotropía sísmica.

9. Más acentuado empleo de las técnicas de visualización y de realidad virtual.

10. Integración de los datos sísmicos con los de otras ramas de las geociencias a fin de incrementar la confiabilidad de los pronósticos exploratorios.

Los aspectos anteriormente referidos, al igual que otros que no fueron identificados actualmente, pero cuyas posibilidades exploratorias vayan siendo evidenciadas, deberán constituir temas de atención por el claustro de la carrera de Ingeniería Geofísica a fin de irlos incorporando a los planes y programas de estudio para brindar el más sólido y actualizado nivel a los egresados de la misma en el futuro.

CONCLUSIÓN

En la literatura técnica relativa al método sísmico resaltan las posibilidades tecnológicas actuales y perspectivas de este a escala internacional, en especial las concernientes a la etapa de explotación de los yacimientos de hidrocarburos y a la exploración de depósitos de gas no convencional, las que deben ser consideradas a los efectos de su posible implementación en la prospección del subsuelo cubano y abordadas en la enseñanza del método sísmico en la carrera universitaria de Ingeniería Geofísica.

REFERENCIAS

1. **SHERIFF, Robert E.; GELDART, L. P.** *Exploration Seismology*. Cambridge, United States: Cambridge University Press, Second Edition, 1995, 566 pp. ISBN 0-521-46282-7.
2. **COLECTIVO DE AUTORES.** *Curso sobre métodos sísmicos*. PDVSA Exploración-Producción, Caracas, República Bolivariana de Venezuela, 2000, 72pp.
3. **MIRÓ PAGÉS, Guillermo.** *Monografía sobre sísmica petrolera*. Publicación del Departamento de Geociencias, Facultad de Ingeniería Civil, Cujae, La Habana, Cuba, 2011, 191 pp. ISBN 978-959-261-340-9.
4. **AARRE, Victor; ASTRATTI, D.** "Seismic detection of subtle faults and fractures". *Journal Oil Field Review, Schlumberger*, 2012, vol. 24, núm. 2, p. 15.
5. **BAGAINI, CLAUDIO; BUNTING, T.** "Land seismic techniques for high quality data". *Journal Oil Field Review, Schlumberger*, 2010, vol. 22, núm. 2, p. 11.
6. **BLACKBURN, JOHN; DANIELS, J.** "Borehole Seismic surveys: Beyond the Vertical Profile", *Journal Oil Field Review, Schlumberger*, 2007, vol. 15, núm. 1, p. 15.
7. **BROWN ALISTAIR, R.** *Interpretation of three-dimensional seismic data*. Sixth edition. Tulsa, Oklahoma, USA: AAPG Memoir 42, SEG Investigations in Geophysics No. 9, 2004, 541 pp. ISBN 0-89181-364-0.
8. **ESCARTÍN SAULEDA, Emilio R.** "Aplicación de la tecnología de Realidad Virtual en la exploración para petróleo". *Memorias del Segundo Congreso de Ingenieros Geofísicos Cubanos*, 2002, La Habana, Cuba, en CD-Rom. ISBN 959-7117-11-8.
9. **LOBO, Vielmal.** *La estrategia de explotación: programa de vida del yacimiento* [en línea]. Méjico, 2010. Disponible en Web: <http://energiaadebate.com/la-estrategia-de-explotacion-programa-de-vida-del-yacimiento/>
10. **SHERIFF, Robert E.; TANER, M. T.; KOEHLER, F.** "Complex trace analysis". *Geophysics*, 1979, vol. 44, pp.1041-1063.
11. **SHERIFF, Robert E.** *Reservoir Geophysics*. Compendio de artículos. Tulsa, Oklahoma, USA, Editorial SEG. 1992.
12. **DAVIES, Richard.; CARTWRIGHT J. A. et al.** *3D Seismic Technology Application to the Exploration of Sedimentary Basins*. Geological Society, London, U.K., Memoirs, vol. 29, 2004, 355 pp. ISBN 1-86239-151-3.
13. **DOMÍNGUEZ GÓMEZ, Alberto; FERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Pedro et al.** "Resultados de la integración de la interpretación sísmica 3D y datos de pozos en el área Guanabo - Vía Blanca en la faja septentrional de Cuba". *Memorias de la V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*, 2013, La Habana, Cuba, en CD-Rom. ISSN 2307-499X.
14. **CASTRO CASTIÑEIRAS, Olga.** "Sobre la evaluación petrofísica de las formaciones cubanas: proyecto en preparación". *Memorias de la V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*, 2013, La Habana, Cuba, en CD-Rom. ISSN 2307-499X.
15. **VALLADARES AMARO, Silvia; SEGURA SOTO, Rafael et al.** "Reservorios gasopetrolíferos fracturados de Cuba. Caso de estudio: reservorios carbonatados en la Franja Norte de Crudos Pesados". *Memorias de la V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*, 2013, La Habana, Cuba, en CD-Rom. ISSN 2307-499X.
16. **VARGAS MELEZA, Luis; VALLE MOLINA, C.** "Avances y aplicaciones de sísmica de rocas para exploración de hidrocarburos" *Ingeniería, investigación y tecnología*, 2012, FI-UNAM, vol. XIII, núm. 4, pp. 439-450. ISSN 1405-7743.
17. **ECHEVARRÍA RODRÍGUEZ, Gustavo.** "Nuestro Globo tiene mucho gas". *Boletín de la Sociedad Cubana de Geología*, 2006, vol. 6, núm. 1, p. 16. ISSN: 0864-3636.
18. **MIRÓ PAGÉS, Guillermo.** "Papel actual del método sísmico en la exploración de hidrocarburos gaseosos". *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 2012, II Época, vol. 13, núm. 2, p. 10. ISSN 1729-3790.
19. **SHURR, G.; RIDGLEY, J.** "Unconventional shallow biogenic gas system". *Revista AAPG*, 2002, vol. 86, núm.11, p. 27.

20. **RHODRI, Thomas.** "Unconventional Gas Gaining Momentum Worldwide" [en línea]. *Petroleum Economist* [ref. Febrero 2010]. Disponible en Web: <http://www.petroleumeconomist.com/Article/2746052/Unconventional-gas-gaining-momentumworldwide.html> [consultado el 7 de agosto 2013].
21. **LAW, Ernest.** "Unconventional petroleum system". *Revista AAPG*, 2002, vol. 86, núm. 11, 127 pp.
22. **FLOODGATE, David; JUDD, A.D.** "The origin of shallow gas". *Continental Shelf Review*. 1992, vol.12, núm. 10, pp. 1145-1156.
23. **ALFONSO, Idoris; GABILONDO, J.; SALAZAR C.; MIRÓ PAGÉS, Guillermo.** "Experiencias del empleo de la sísmica de alta resolución en la plataforma insular cubana". *Revista Minería y Geología*, vol. XVI, núm. 2, pp. 33-38, 1999.
24. **AVSETH, Per; MUKERJI, T.; MAVKO, G.** *Quantitative seismic interpretation*, New York, USA: Cambridge University Press, 2005, 109 pp. ISBN-100-521-81601-7.
25. **MAMDOUH, Gadallah.** *Reservoir Seismology*, Oklahoma, USA, PennWell Books, 1994, 382 pp. ISBN 087814-411-0.
26. **VEEKEN, Paul.** *Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterisation*, Handbook of geophysical exploration, Amsterdam, Elsevier, 523 pp. ISBN-10: 0-08-045311-2.
27. **HINDS, Ronald; RICK, K.** *Borehole geophysics: Theory and practice*. La Habana, Cuba: Curso de posgrado, 2011, 443 pp.
28. **CASTAGNA, J.; BACKUS, M. M.** "Offset dependent reflectivity: Theory and practice of AVO analysis", *Revista Applied Geophysics*, 1994, núm. 8, Editorial SEG, 48 pp.
29. **MARRERO FAZ, Manuel.** Gas no-convencional: ¿Revolución energética?, Conferencia especial. Memorias de la V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, 2013, La Habana, Cuba, en CD-Rom. ISSN 2307-499X.
30. **DELGADO LÓPEZ, Orelvys; LÓPEZ QUINTERO, Orlando, et al.** "Gas no convencional, estado y perspectivas para su exploración en Cuba", *RCI*, 2012, vol. III, núm. 3, pp.29 - 39. ISSN 2223 -1781.
31. **SUMI, L.** *Oil and Gas Accountability Project (OGAP).* "Shale Gas: Focus on the Marcellus Shale" [en línea]. USA [ref. de 9 de agosto 2013]. Disponible en sitio Web: <http://www.earthworstation.org/pubs/OGAPMarcellusShaleReport-6-12-08.pdf>.
32. **VERA DÍAZ, Julio César.** "Perspectivas de los hidrocarburos no convencionales en Colombia" [en línea]. XIII Congreso Nacional y IV Internacional de Servicios Públicos y TIC, Medellín [ref. Junio2011]. Disponible en Web: <http://gasnoconvencional.com/programacion.html> [ref. de 9 de agosto 2013].
33. **ROCHA, Laura.** "¿Qué es el fracking que genera polémica?" 2013 [en línea]. Argentina [ref. de 8 de agosto 2013]. Disponible en el sitio Web: <http://blogs.lanacion.com.ar/ecologico/econoticias/que-es-el-fracking-que-genera-polemica/>.
34. **CLAYTON, Tim.** "Petroleras podrían haber provocado seísmo en Texas". 2012 [en línea]. USA [ref. de 9 de agosto 2013]. Disponible en sitio Web: <http://actualidad.rt.com/ciencias/view/55136-eeuu-petroleras-podrian-haber-provocado-seismo-texas>.
35. **GROUP E IBC DE BRASIL.** *Primer Simposio latinoamericano de gas no convencional* [en línea].Asociación de Profesionales de las Industrias del Petróleo y de la Minería de Argentina [ref. Septiembre 2011]. Disponible en Web: <http://gasnoconvencional.com/programacion.html> [ref. de 7 de agosto 2013].
36. **STEPHENSON, Mike.** "Seismic properties: shale gas anisotropy". 2013 [en línea]. England [ref. de 5 de agosto de 2013]. Disponible en sitio Web: <http://www.bgs.ac.uk/research/energy/shaleGas/anisotropy.html>.
37. **BUCKER, Christian; KRAWCZYK, C.** "La geofísica para los gases no convencionales todavía presenta retos". EAGE Publications, vol. 30, núm. 5, 2012 [en línea]. Hamburgo, Alemania [ref. de 9 de agosto 2013]. Disponible en sitio Web: <http://fb.eage.org/publication/content?id=58746>.
38. **NORTON, Mark.** *Integration of Surface Seismic and Microseismic for the Characterization of a Shale Gas Reservoir*. 2011 [en línea]. Calgary, Canadá [ref. de 9 de agosto 2013]. Disponible en sitio Web: <http://209.91.124.56/publications/recorder/2011/01jan/Jan2011-Integration-of-Surface-Seismic.pdf>.
39. **KOESOEMADINATA, Adam.** "Seismic reservoir characterization in Marcellus shale" 2011 [en línea]. USA [ref. de 6 de agosto 2013].Disponible en sitio Web: http://www.slb.com/~media/Files/technical_papers/seg/seg2011232.pdf.
40. **BARUCH, Elizabeth; SLATT, Roger; MARFURT, Kurt.** *Seismic Analysis of the Barnett Shale* [en línea]. AAPG book on gas shales, Texas, USA. [ref. de 20 de Julio 2013]. Disponible en Web: http://shaleconsortium.com/docs/Baruch_et_al_Chapter13.pdf.
41. **MAXWELL, S. C.; CHO, D. et al.** "Enhanced reservoir characterization using hydraulic fracture microseismicity" en SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 2011, SPE 140449.
42. **MARTÍNEZ PEREIRA, Alejandro.** *Fundamentals of Borehole Seismic Technology*. Texas, United States of America, Editorial Schlumberger, 2010, pp. 207-231. ISBN-10:097885307-5.

43. BURCH, D.; DANIELS, J. "Live Hydraulic Fracture Monitoring and Diversion". *Oil Field Review*, 2009, vol. 21, núm. 3, p. 13.
44. ANÓNIMO. "Futuro de la Energía" [en línea]. Perú [ref. de 22 de Julio 2013]. Disponible en sitio Web: <http://tellyspaucar.wordpress.com/2013/05/16/futuro-de-la-energia-shale-gas-en-eeuu-y-los-hidratos-de-metano-en-japon/>
45. KUMAR, Naresh; Sanjeev, R. *Exploration of Gas Hydrates*, Berlin, editorial Springer-Verlag, 2011, 277 pp. ISBN 978-3-642-14233-8.

AUTORES

GUILLERMO MIRÓ PAGÉS

Ingeniero Geofísico, Doctor en Ciencias Geológicas, Profesor Titular, Departamento de Geociencias, Facultad de In-

geniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba. Miembro de la Sociedad Cubana de Geología y de la Sociedad Geofísica del Brasil

Emilio Ricardo Escartín Sauleda

Ingeniero Geofísico, Doctor en Ciencias Geológicas, Profesor Titular, Departamento de Geociencias, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba. Miembro de la Sociedad Cubana de Geología

Hilda Esther Amador Longoria

Ingeniera Geofísica, Máster en Ciencias, Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

New Tendencies in Seismic Exploration

Abstract

The present article reflects the result of a work of bibliographical investigation carried out by research groups GEOPET and GEOMAT Department of Geosciences of the Cujae in order to give answer to a recent proposal about collaboration topics formulated by the Union Cubapetróleo (CUPET) in an environment of the existent traditional relationships among the mentioned institutions; at the same time the work pursued the purpose to upgrade information with a view to the teaching of the subject «Seismic Methods for prospecting and exploration of hydrocarbons» which is imparted at the fourth course of Geophysical Engineering career in the Faculty of Civil Engineering of Cujae. The aim of the research was the new technological possibilities of the seismic method of exploration at international scale, especially concerning to the stage of oil fields exploitation and to the exploration of deposits of non conventional gas, aspects to which the present publication is dedicated.

Key words: exploration, exploitation, seismic, oil, gas