

LA SISMOLOGIA PROSPECTIVA

POTENCIALIDADES Y LIMITACIONES EN EL CONOCIMIENTO DE LAS ROCAS Y FLUIDOS DEL RESERVORIO

Ing. Abel E. Burna
Instituto del Petróleo - U.B.A.



PROLOGO

No será ésta la presentación de un especialista que expone, en profundidad, sobre los últimos desarrollos realizados sobre algún aspecto específico, y relevante, de la prospección geofísica; se ha creído conveniente en vez, y dado el carácter de estas Jornadas, realizar una revisión general de la sismología prospectiva en todos sus aspectos.

Esta exposición, dada la amplitud del tema en relación al limitado tiempo disponible, será necesariamente esquemática y somera; no obstante se pasará revista a los tres grandes aspectos, o componentes, que mancomunadamente han permitido que la sismología prospectiva alcance el alto grado de desarrollo que exhibe en la actualidad.

Los aspectos o componentes que he considerado oportuno analizar aquí son: I - La investigación analítica de la fenomenología de las ondas elásticas, II - Los estudios experimentales en laboratorio y III - El desarrollo de la metodología práctica aplicada a la prospección de hidrocarburos.

Cada uno de los grandes aspectos enumerados en el párrafo precedente tendrá que ver, seguramente, en el futuro afinamiento de la herramienta geofísica y los tres coexisten en una imbricada relación que conforma una realidad única. El enfoque presentado es arbitrario, pero siendo conveniente una disección del tema se eligió aquí que se consideró más conveniente con relación al objetivo propuesto.

Es demasiado frecuente observar que la teoría (o la investigación) es, para los que están en el extremo de aplicación de un campo ingenieril, una elucubración vana y alejada de la realidad, e inversamente, que las actividades aplicadas o prácticas (propias del ingeniero) son consideradas, comúnmente, con cierta carga peyorativa. Espero que esta presentación nos ayude a comprender y valorar adecuadamente ambos aspectos.

LA SISMOLOGIA PROSPECTIVA - GENERALIDADES

Luego de sobrepasarse la etapa originaria de la industria petrolera, cuando la ubicación de los pozos era hecha en base a los afloramientos de petróleo detectados, por medios esotéricos o por mero palpito, se afianzó la Geología de Superficie como método científico de exploración.

La necesidad de contar con afloramientos de los estratos de interés para poder medir sus rumbos y buzamientos, limita naturalmente el alcance exploratorio de la Geología de Superficie; fue así que se desarrolló la "Geofísica", ciencia intermedia entre la Geología y la Física, la cual alargó sensiblemente el brazo exploratorio de la primera.

En particular, la sismología prospectiva con el apoyo de la electrónica y los métodos computacionales, se ha erigido hoy en el más poderoso auxiliar de la Geología; sin embargo, las exigencias a que está siendo sometida, para tratar de localizar los crecientemente velados entrapamientos remanentes, están poniendo en evidencia sus propias e intrínsecas limitaciones.

Los métodos clásicos de la sismología prospectiva apuntaron originariamente a dar una imagen de la geometría del subsuelo, a partir de la energía elástica devuelta por las discontinuidades existentes entre los diferentes estratos geológicos y sus alteraciones.

El procedimiento apuntado fue realmente fructífero; sin embargo, mas allá del verdadero éxito que han tenido estos métodos puramente geométricos, ha surgido gradualmente la necesidad de caracterizar los tipos de material que la onda elástica ha atravesado y aún su contenido de fluidos. El objetivo actual de obtener información litológica y petrofísica del subsuelo por métodos sísmicos, un viejo sueño de los exploracionistas, es inalcanzable sin un mejor conocimiento de la acústica de los medios porosos.

I - INVESTIGACION ANALITICA

Como es sabido, el establecimiento de una teoría es fundamental dado que la misma permite detectar las variables relevantes de un fenómeno no estableciendo, además, las relaciones analíticas que las ligan.

Las relaciones analíticas, o "leyes", le permiten al ingeniero realizar los cálculos que necesita y, al investigador, orientar sus experiencias a las direcciones que aquellas señalan como promisorias; y viceversa, los resultados que proveen las experiencias, que representan la realidad del mundo físico, sirven para confirmar o reajustar la teoría previa.

El análisis teórico de un hecho físico complejo, para poder ser desarrollado, debe basarse necesariamente en hipótesis simplificadoras y, recién mas tarde, por ajustes sucesivos, puede ir adaptándose para que incluya, paulatinamente, la totalidad de los aspectos que hacen a dicho fenómeno.

I₁ - Elastodinámica clásica

A - Hipótesis simplificadoras básicas.

- 1) Medios elásticos homogéneos, isótropos e indefinidos.
- 2) Procesos termodinámicamente reversibles (adiabáticos).
- 3) Deformaciones infinitesimales (linealidad).
- 4) Consideración exclusiva de esfuerzos superficiales (tensores simétricos).
- 5) Elección de un sistema de referencia cartesiano ortonormal (ondas planas).

Lo anterior, y con una formulación simple, resulta en:

- a) Solo dos constantes elásticas independientes (constantes de Lamé λ y μ).
- b) Solo dos ondas de cuerpo p y s (longitudinales y transversales).
- c) Vector densidad de flujo de energía e impedancias y admitancias elásticas.
- d) No se evidencia dispersión (las velocidades son independientes de la frecuencia).
- e) No se pone de manifiesto el fenómeno de atenuación (íntimamente relacionado al de dispersión).

B - Con el objeto de analizar los fenómenos que ocurren al introducir discontinuidades, se postulan las mas simples cuales son las establecidas por planos geométricos. Esta nueva hipótesis, que suplanta a la de un medio elástico indefinido, permite estudiar problemas inherentes a semiespacios y se obtienen los siguientes resultados:

- a) Dadas las dimensiones relativas del objeto a iluminar (plano) al λ de la onda incidente, es perfectamente válida la aproximación por la ecuación Eikonal de la teoría de ondas, con la consiguiente legitimidad de la sismica geométrica (teoría de rayos).
- b) Ley de Snell.
- c) Coeficientes de reflexión y transmisión (atributos escalares y vectoriales de las ondas), independientes de la Frecuencia pero función del ángulo de incidencia.
- d) Ondas superficiales (Rayleigh, Love, Stoneley).

12 - Propagación de Ondas en un medio elástico No-Isotrópico

En el caso mas general de anisotropía, en el cual las componentes C_{ijkl} del tensor C de constantes elásticas no exhiben ninguna relación particular, salvo las que surgen tal vez de la simetría de los Tensores Σ y $\mathbb{E}$ y de la reversibilidad termodinámica, las direcciones características de polarización son normalmente aleatorias y dependen continuamente del vector normal al frente de onda. Solamente si el medio presenta alguna simetría adicional, aparecen ciertas direcciones preferenciales de polarización.

En el caso particular de anisotropía transversal (rocas de una cuenca sedimentaria), se necesitan 5 constantes elásticas independientes para definir elásticamente al cuerpo y se infiere que se pueden propagar dos tipos de ondas longitudinales y dos tipos de ondas transversales.

13 - Propagación de Ondas en medios porosos saturados

Se extiende el estudio teórico a un medio poroso saturado con un fluido y existen, esencialmente dos enfoques para resolver el problema.

A) Resolverlo a nivel microscópico para pasar luego a establecer las leyes macroscópicas. B) Ignorar deliberadamente el nivel microscópico y suponer que los conceptos y principios de la mecánica continua pueden ser aplicados a los valores medibles microscópicamente.

A) Teoría de Gassmann.

Se supone que existe un esqueleto, constituido por un sólido elástico isotrópico, y un fluido saturante. Se supone además, implícitamente, que la porosidad es uniforme. Se puede considerar un fluido viscoso.

Teniendo los parámetros del material sólido, del esqueleto seco y los del fluido saturante, esta teoría permite calcular los parámetros de la roca saturada y, de allí, los coeficientes de reflexión. Para, por ejemplo, una interfase gas-petróleo, en una roca reservorio, el coeficiente de reflexión para la onda p puede ser importante.

B) Teoría de Biot.

Hipótesis:

- a) La longitud de onda es grande en relación a las dimensiones del volumen macroscópico elemental.
- b) Desplazamientos pequeños de ambas fases, fluido y sólido.
- c) Fase líquida continua.
- d) La matriz es elástica e isotrópica.

Esta teoría conduce a una primera formulación de un hecho natural observable, la atenuación de las ondas elásticas y además predice la existencia de una segunda onda p , de baja velocidad, la cual fue confirmada en experiencias de laboratorio.

La onda p de baja velocidad es la que viaja en la parte líquida por los poros interconectados, y los mecanismos para que esta onda exista se dan en presencia de alta movilidad y a alta frecuencia. Desgraciadamente las permeabilidades y viscosidades usuales son generalmente inadecuadas y además las frecuencias a las que puede aparecer son demasiado altas en comparación a las utilizadas en sismología prospectiva.

I₄ - Propagación de Ondas en medios viscoelásticos

Las teorías que tratan con medios porosos saturados, exponen un mecanismo de disipación que se explica por un movimiento relativo del fluido con respecto al esqueleto o matriz elástica.

Sin embargo, siendo que este mecanismo puede ser considerado en muchos casos despreciable, las causas de la disipación deben ser buscadas en los movimientos propios de las partículas ya sean pertenecientes al sólido o al fluido.

Los mecanismos mas probables, aparte del mecanismo tipo Biot, incluyen: Fuerzas capilares, efectos térmicos, fricción intergranular y movimientos locales del fluido (microscópicos, enmarañados e irreversibles).

Dada la extrema complejidad que entraña un estudio completo del problema, se recurre a modelos que requieren el conocimiento de no solo los valores presentes de tensiones y deformaciones, si no también de los pasados (modelos con memoria).

El comportamiento de los materiales, como función del tiempo, puede ser llevado a cabo por medio de ensayos de CREEP (variaciones de la deformación a tensión constante) o de RELAJACION (variaciones de la tensión para mantener la deformación constante).

En particular al estudiarse aquí modelos con memoria, aparece el fenómeno de histéresis elástica que da cuenta de la disipación de energía (que es una causa de la atenuación de las ondas elásticas) y del fenómeno asociado de dispersión.

Como en el estudio de todo sistema real (disipativos) es aquí de gran utilidad definir el factor de calidad Q que caracteriza cuantitativamente a las pérdidas del medio y cuyos valores van desde $Q=0$ para un medio de atenuación infinita (sin cualidades de transmisión) a $Q=\infty$ para un medio ideal, no disipativo.

El factor de calidad Q permite conocer, implícitamente, las funciones de creep y de relajación que en muchos casos no pueden ser obtenidas en forma explícita; existen varias formas de introducirlo y es inversamente proporcional a los coeficientes de atenuación espacial y temporal y al decrecimiento logarítmico.

II - RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el análisis experimental (elástico) de los diferentes tipos de rocas, los parámetros que se presentan como más interesantes de estudiar son las velocidades (V_p y V_s) y el factor de calidad Q ó, equivalentemente, la atenuación. Estos parámetros son analizados en función de la frecuencia, presión, contenido de fluidos, viscosidad, etc..

II₁ - Velocidades

Aunque existen varias áreas en las que el conocimiento de las velocidades de las ondas elásticas es de gran valor, el campo principal de investigación sigue siendo el de la geofísica de prospección petrolera dado el rol fundamental que allí juega la sismología de reflexión, como así también el V.S.P. y el perfilaje sísmico de pozos.

A continuación se expone una síntesis de los principales resultados obtenidos en la medición de velocidades.

- a) Un medio viscoelástico exhibe dispersión inversa, dado que la velocidad se incrementa ligeramente con la frecuencia. Este hecho es conocido a través de otros indicios y es hipótesis usual en los procesos de deconvolución de las trazas sísmicas.
- b) La velocidad aumenta con la presión de confinamiento y con la presión diferencial o efectiva.

- c) Existe una ligera dependencia de la velocidad con la saturación siempre que ésta se mantenga entre el 10 % y el 90 %. En los extremos (rocas totalmente saturadas o secas), la velocidad incrementa en forma significativa.
- d) La velocidad se incrementa fuertemente con la viscosidad.
- e) La velocidad disminuye ligeramente con la temperatura.

II₂ - Atenuación ($\sim Q^{-1}$)

Se presenta en lo que sigue un resumen de los resultados que con relación a la atenuación han sido obtenidos en experiencias de laboratorio y de campo. Este parámetro es mucho mas difícil de medir que las velocidades y además exhibe un mayor grado de variación.

- a) En formaciones rocosas existe una fuerte dependencia de Q con la frecuencia cuando esta es alta ($\approx 10 \text{ KH}_z$). En el rango de las frecuencias propias de la sismología prospectiva ($10 \text{ H}_z - 50 \text{ H}_z$) el factor de calidad Q es prácticamente constante lo que implica que los coeficientes de atenuación (espacial o temporal) dependen linealmente de la frecuencia).

En el caso de los fluidos $Q \sim f^{-1}$

- b) Q crece con la presión.
- c) Q disminuye con la saturación, Q_p aparece siempre mayor que Q_s a una saturación del 100 %.
- d) La atenuación es altamente sensitiva a la viscosidad del fluido saturante, si bien la relación es compleja.
- e) La atenuación decrece significativamente al aumentar la temperatura.

III - LA SISMOLOGIA PROSPECTIVA

Como ya se expresó, la sismología prospectiva se usó rutinariamente, y se usa, para obtener una imagen geométrica del subsuelo y este procedimiento fue, en consecuencia, particularmente fructífero en la detección de trampas de tipo estructural, lo cual induce a pensar que las trampas remanentes (a descubrir) serán de creciente complejidad y contendrán, en general, acentuados componentes estratigráficos.

Por otro lado, la heterogeneidad espacial en la porosidad, permeabilidad, contenido de arcilla, etc., concurren a la complejidad de los reservorios y estos parámetros no pueden ser inferidos a partir de datos de pozos (perfilajes, testigos, etc.), pues si bien los mismos pueden ser de alta calidad relativa, son excesivamente puntuales a esos fines.

Queda entonces clara la esperanzada expectativa que se ha depositado sobre los métodos geofísicos, en particular en el desarrollo de la sismoestratigrafía.

La sismología de reflexión, como técnica aplicada a la prospección de hidrocarburos, está integrada por tres áreas con características muy particulares y que, dada su aplicación secuencial, pueden ser consideradas como etapas; ellas son: Adquisición de datos, Procesamiento e Interpretación.

A continuación se hace una somera revisión de los aspectos más salientes de la sismología de reflexión, referidos al análisis que estamos realizando, al mismo tiempo que se puntualizan sus limitaciones y potencialidades.

III₁ - Adquisición de Datos

En esta primera etapa se establecen, fundamentalmente, las limitaciones de tipo físico que presenta este método de prospección y debe tenerse presente también que al auscultar la tierra por medio de una excitación elástica, los datos que recogemos son inevitablemente una mezcla de información y de ruidos.

Un relevamiento sísmico debe contemplar no solo un adecuado planeamiento de la malla de líneas a prospectar sino también un apropiado diseño de la geometría del sistema de registración tendiente a proveer, a la siguiente etapa de procesamiento, de datos con una óptima relación señal/ruido y con la apropiada densidad espacial y temporal. No debe perderse de vista la conocida sentencia que suele colocarse en los centros de procesamiento: "Garbage in garbage out".

Habiendo llegado a este punto es oportuno remarcar que los términos señal y ruido tienen, la mas de las veces, un sentido relativo y que la categorización de un evento como tales, es también dependiente del objetivo que perseguimos. Veremos luego que esto último debe ser tomado en debida cuenta si nuestra meta final no es la estrictamente estructural, sino los aspectos físicos de las rocas y su contenido de fluidos.

a) Limitaciones debidas a los niveles relativos de señal.

En el desarrollo de las tareas exploratorias con sísmica de reflexión, de deben grabar señales que provienen de toda una gama de profundidades, algunas provocadas por interfaces muy superficiales y otras producidas en discontinuidades elásticas profundas. Debido a una serie de fenómenos (Dispersión geométrica, atenuación, particionamiento de la energía, etc.) las amplitudes de las señales que se recepcionan están en una relación aproximada a $1:10^6$ la cual obligó al desarrollo de equipos de registración con un alto rango dinámico (los equipos de registración digitales tienen un rango dinámico teórico de 84 db) y a imponer controles de ganancia para compensar los aproximadamente 120 db de decaimiento de señal, en función del tiempo. Este hecho establece una primera y substancial limitación a la utilización de los resultados obtenidos en laboratorio en condiciones perfectamente controlados.

b) Limitaciones debidas a la presencia de la capa meteorizada.

La existencia en sismología continental de una capa superficial meteorizada o "weathering", comunmente de espesor variable y de gran heterogeneidad, la cual debe ser atravesada por la onda sísmica, supone un filtrado complejo que distorsiona

na la onda tanto en amplitud como en fase. Este hecho introduce una componente de imponderabilidad que debe ser debidamente considerada.

c) Limitaciones debidas a la superposición de señales.

La necesidad de mejorar la relación señal/ruido ha impuesto la utilización de elementos múltiples, tanto en emisión como en recepción, lo cual implica que la señal registrada es la superposición de cierta cantidad de ondas individuales que han recorrido caminos ligeramente diferentes.

d) Limitaciones debidas al desconocimiento de la forma de onda de excitación, cuando se trabaja con fuentes impulsivas.

A menos que se trabaje con una fuente oscilatoria (Vibroseis) la forma de onda no es conocida y esto implica que no tenemos a nuestra disposición ni su espectro de amplitud ni su espectro de fase. Si bien se ha tratado de subsanar este inconveniente a través de consideraciones analíticas, o meramente registrando en un canal especial la forma de onda a poco de salir del punto de excitación, queda un amplio margen para las suposiciones cuando se desean hacer estudios de atenuación o en procesos de convolución.

e) Limitaciones debidas al filtrado corta-alto que impone la tierra como sistema.

Se ha visto ya que las rocas exhiben coeficientes de atenuación directamente proporcionales a la frecuencia ($Q \propto c^{\text{te}}$). Este hecho, que significa que la tierra se comporta como un filtro pasabajo, ha sido comprobado en laboratorio y es también claramente observable en los registros de campo.

Dicho de otra manera, cuanto mas largo es el camino recorrido por la onda elástica, mas predominarán las bajas frecuencias (la penetración es inversamente proporcional a la frecuencia) y, por ende, también disminuirá el poder de resolución o separación, lo cual incide directamente, y en forma negativa, en la exploración de cuencas profundas.

Un ejemplo de lo expresado en el párrafo anterior, lo tenemos cuando pretendemos calcular el espesor de una capa reservorio a partir de la medición del intervalo de tiempo que media entre las reflexiones provenientes del techo y de la base de dicho estrato; en general se admite que estas reflexiones quedan resueltas cuando el espesor $h \geq \lambda/2$, donde $\lambda = v/f$ es la longitud de onda del evento registrado, y como límite, en casos muy especiales, cuando $h = \lambda/8$ (ver fig. 1).

Evento	Velocidad V [m / s]	Frec. f [Hz]	Long. de onda λ [m]	Esp. normal h [m]	Esp. lí- mite h_1 [m]
Superficial	2.000	50	40	20	5
Profundo	5.000	20	250	120	30

Fig. 1

El efecto de filtrado señalado anteriormente, explica porqué los rangos de frecuencia que se utilizan en los diferentes métodos que hacen uso de ondas elásticas son tan diferentes (Ver Fig. 2); es que no se ha hecho una caprichosa elección cuando en sismología prospectiva se utilizan frecuencias bajas con relación a otros métodos; estas están impuestas naturalmente y son función de la distancia emisión-recepción utilizada. Sería un simple derroche de energía usar frecuencias mas altas que aquellas a las que la tierra es "transparente".

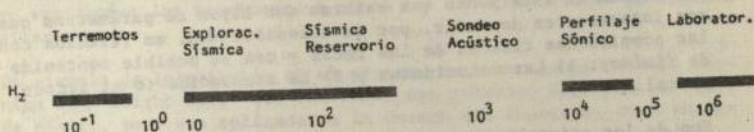


Fig. 2

Para no hacer demasiado larga esta exposición, digamos por último que el concepto de RAYO subyace a toda la sismología prospectiva clásica y ésta, así llamada sísmica geométrica, ha sido la fértil idea que es tableció las bases para el desarrollo de este método exploratorio a partir de leyes simples.

Pero los rayos no tienen, en el campo que nos ocupa, existencia física; son una idealización que es válida, como límite, cuando las dimensiones del objeto que se "ilumina" son de orden superior a las longitudes de onda utilizadas.

Trabajando con fenómenos ondulatorios, los que sí tienen existencia física son los frentes de onda, y la energía elástica que arriba a un punto de recepción, como superposición constructiva y luego de haber sido reflejada en una interfase profunda proviene, NO DE UN PUNTO del reflector, sino de toda un área del mismo llamada ZONA DE FRESNEL (ver Fig. 3).

Este área, en el caso de una interfase plana y subhorizontal, es circular y su radio depende del λ de la onda registrada. Los valores del radio, r_F , de la zona de Fresnel pueden ir desde los 100 m. para interfases superficiales a alrededor de 700 m para interfases profundas.

Dado que la energía elástica recibida en un punto de registraci3n es la suma de toda la energía re-emitida por esta zona, se hace evidente que es ilusoria la búsqueda de detalles del subsuelo densificando como lo sugiere la teoría de rayos, mas allá de ciertos límites, los puntos de recepci3n.

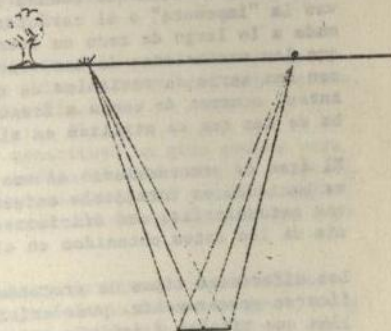


Fig. 3

Los datos registrados en los relevamientos de campo, son enviados a un centro de procesamiento donde serán convenientemente reducidos, corregidos, filtrados y elaborados para poder extraer de ellos información sobre la geometría y, eventualmente, las propiedades físicas de las rocas del subsuelo.

Recordemos en este punto que existen dos tipos de parámetros que son interesantes de medir, por su accesibilidad, en relación con las propiedades físicas de las rocas y con su posible contenido de fluidos: A) Las velocidades y B) La atenuación (o el factor de calidad Q).

Uno de los primeros pasos que se realizan en esta etapa de procesamiento es la determinación de las velocidades, con el objeto de corregir las trazas para poder luego llevar a cabo la operación de suma o "stacking".

Debemos observar, sin embargo, que este análisis de velocidad tiene las siguientes características diferenciales con relación a las determinaciones de laboratorio: 1) Se basa en corregir la curvatura de los eventos reflejados que aparecen sobre una familia dada de trazas y, por consiguiente, es una medición indirecta y poco sensible, máxima para reflexiones profundas, por su escasa curvatura. 2) La optimización no es buscada en la determinación misma de la velocidad sino en que provea la mejor suma posible, y debe aclararse que sobre la curvatura de los eventos reflejados inciden factores ajenos a la velocidad, como los buzamientos. 3) No da indicación directa de la velocidad propia de la formación, en cuyo techo o base se produjo la reflexión, sino de la velocidad (media cuadrática) de toda la serie de rocas suprayacentes.

Algo similar pasa con el análisis de la atenuación, las alteraciones espectrales que puedan observarse en una reflexión, llevan la "impronta" o el carácter de la atenuación sufrida por la onda a lo largo de todo su recorrido. Debe ser señalado además que las variaciones de las velocidades y del factor de calidad Q con una serie de variables de reservorio, tal como se consignó antes, ocurren de común a frecuencias ultrasónicas, muy por arriba de las que se utilizan en sismica prospectiva (ver Fig. 2).

El área de procesamiento es una de las más favorecidas y se viene haciendo un formidable esfuerzo investigativo para hallar nuevas metodologías, más eficientes y exactas, para afinar el análisis de los datos obtenidos en el campo.

Los diferentes tipos de procesamiento desarrollados pueden clasificarse groseramente, pues existe un gran solapamiento, en aquellos que tienden a definir mejor el aspecto estructural y en los que tienen carácter sismoestratigráfico.

Los problemas que pretende resolver la sismoestratigrafía fueron (y están siendo) abordados a través de enfoques muy diversos que, algunos más otros menos, son sugeridos por los fenómenos estudiados analíticamente y confirmados en laboratorio.

No obstante lo anterior, y dada la extrema complejidad de los fenómenos involucrados todos deben ser justificados a posteriori por el ajuste de los resultados que proveen, con aquellos que proporciona la realidad.

Debería hacerse aquí expresa mención de que el éxito que puede obtenerse con alguno de estos métodos está en estrecha dependencia al ámbito donde se lo ha aplicado exitosamente y que es muy riesgoso extrapolar los resultados a otros con características geológicas diferentes.

Un ejemplo de lo afirmado en el párrafo anterior lo ha dado la técnica del "Bright Spot" que fué usado con relativo éxito en el Golfo de México, pero que aplicado en la Cuenca del Colorado, aquí en Argentina, condujo al "descubrimiento" de un filón-capa de basalto. En resumen, no existe una relación biunívoca que nos permita aseverar que determinadas alteraciones observadas en los datos sísmicos corresponden, con exclusividad, a ciertas características de las rocas del reservorio.

A nuestro criterio no parece promisorio la investigación sismoestratigráfica a través del estudio directo de velocidades o atenuaciones pues, por lo expuesto, en las alteraciones que éstas puedan exhibir ha tenido primordial incidencia la totalidad del paquete de sedimentos suprayacentes y poca o ninguna la formación que produjo la reflexión.

Estas determinaciones deben hacerse, en todo caso, en forma indirecta y la variable que estimamos mas adecuada de analizar es el coeficiente de reflexión, pues el mismo es dependiente de los parámetros físicos que caracterizan a las formaciones determinantes de la interfase y no de los de las rocas atravesadas por la onda antes o después de producida la reflexión.

Pero existe otro hecho, anticipado por la teoría y confirmado en la práctica: Los coeficientes de reflexión son también dependientes del ángulo de incidencia.

Esta, por así decirlo, doble dependencia del coeficiente de reflexión, lo hace sumamente atractivo y potencialmente muy interesante, como herramienta de la sismoestratigrafía.

El método de sumación o "stacking" constituyó un gran avance para la sísmica estructural pero, como se dijo al hablar de la relatividad del concepto de "ruido", el mejoramiento de la relación señal/ruido por sumación exige una corrección (dinámica) previa que produce estiramiento de la ondícula.

El estiramiento de ondícula apuntado, y la misma suma de trazas realizada con el objeto de mejorar la definición estructural, constituyen una introducción de ruido, por alteración espectral, cuando nuestro objetivo es estratigráfico.

Luego de haberse cumplido con el objetivo estructural, obteniéndose la sección sumada que permitirá individualizar los horizontes de interés, sería interesante analizar los espectros de las ondículas,

representativas de esos horizontes, contrastando los correspondientes a las trazas alejadas (gran ángulo de incidencia) con los de las cortas (bajo ángulo de incidencia).

No debería considerarse a esta exposición como detractora del método sísmico sino, mas bien, como un franco sinceramiento en cuanto a sus limitaciones; de todas maneras creemos que existe un gran potencial en el mismo que tendremos que esforzarnos en investigar y desarrollar.

Para terminar se transcribe un pensamiento del Dr. Amos Nur, Director del proyecto de Física de las Rocas del Departamento de Geofísica de la Universidad de Stanford: "Existe poca duda de que los métodos sísmicos jugarán, en el futuro, un rol protagónico en la resolución de problemas de producción y recuperación. No obstante, primero necesitamos comprender mejor lo que las ondas sísmicas pueden decirnos sobre las rocas del reservorio, y cómo extraer la información deseada...".