

“ 一 一 一
 個 個 條
 人 坑 扭
 (...) 和 動
 在 他 發 的
 他 掘 蛇
 的 某 或
 庭 事 者
 院 被 龍”
 裡 塑
 開 造 Shen Kuo)
 掘 像 (circa 1050)

[“...un hombre (...) estaba cavando un pozo en su jardín y exhumó algo con la forma de una contorsionada serpiente o dragón...”]



(humorada de profesionales de Schlumberger)

PROSPECCIÓN ACÚSTICA Y SÍSMICA DE POZO

En 1275 el veneciano Marco Polo llegó a la maravillosa Xanadú (o Shàngdū), capital de verano de los mongoles. Cuatro años después el Imperio mongol pudo conquistar China: la Gran Muralla no tenía la envergadura que alcanzó siglos después y el ejército defensor no era tan fuerte. Dominaron entonces desde la costa pacífica hasta el Danubio europeo, logrando la marca histórica de 33 millones de km², superada por muy poco hacia 1900 por el geográficamente discontinuo Imperio británico. Pero no era el Guinness lo que impulsaba a la dinastía Khan. China (la Catay del relato de Polo a través de la ruta de la seda; en verdad Zhōngguó, 中国, que así la llaman ellos) era por entonces una potencia cultural con la que sólo podía compararse la Civilización islámica. Y en primera fila entre quienes la habían hecho grande figuraba **Shen Kuo**, que había vivido dos siglos antes.

Nacido en 1031 en Qiantang (actual Hangzhou) Kuo era hijo de Shen Zhou –recuérdese que en lejano oriente el apellido va antes que el nombre–, un funcionario provincial de bajo rango. La muy instruida madre de Kuo fue quien les dio a él y a su hermano toda la educación básica, algo que era usual en la China de aquellos tiempos, incluyendo en este caso doctrinas militares que ella había aprendido de su hermano mayor. Kuo tenía cerca de diez años cuando se mudó con su familia a la ciudad portuaria de Xiamen (donde desemboca el Gran Canal concluido el año 609, que conecta hacia el norte con Beijing o Pekín ¡a más de 1.700 km!). Luego progresó con mucho de autodidacta y había cumplido veintiuno cuando murió su padre y tuvo que guardar tres años de luto, casi inactivo, respetando la doctrina del confucianismo. Pero le sirvieron para cargar pila y desde entonces fue una máquina de producir, desarrollar y descubrir en gran variedad de temas. Fue inventor de diversos aparatos de medición, ingeniero hidráulico, cartógrafo, biólogo, geólogo, físico... y hasta músico (aunque no en pozos). También aprobó los exámenes imperiales para comenzar la exigente carrera burocrática: fue estratega militar y administrador de instituciones del gobierno durante la dinastía Song –y su segundo matrimonio fue con la despótica hija de un alto funcionario, que lo obligó a echar al hijo de su anterior esposa–. En 1081, debido a la derrota militar frente a los Tangut (de origen tibetano) Shen sufrió un juicio político y perdió su cargo, pese a que tal revés había ocurrido porque el militar a cargo había desoído el emplazamiento de fortificaciones que él le había indicado.

Tal como hemos citado en el Tema 04, Shen Kuo fue el primero en reportar la existencia de la brújula, en 1086. Y comprobó que el sur geográfico no coincidía con el señalado por la punta imantada, sino que presentaba un pequeño desvío hacia el oeste, siendo así el primero en documentar la



Templo de Xiangji, en Hangzhou (foto gongshu.gov)

declinación magnética. Su contribución a la astronomía, matemática, geografía y medicina quedó plasmada en su libro 夢溪筆談 (Mengxi bitan), Conjunto de relatos, donde mediante los eclipses demostró la esfericidad del Sol y la Luna. Y que fue uno entre sus varios textos publicados. Además se interesó por las perforaciones que se hacían para extraer aceite negro subterráneo. Señaló que las reservas de petróleo eran abundantes y predijo el potencial impacto mundial futuro. También sugirió que los fósiles se habrían formado por restos de plantas y animales antiguos, tal el caso del citado dragón. Ya anciano, Shen vivió en aislamiento en la provincia de Jiangsu, deprimido por la muerte de su intolerante china (gustos son gustos...) y, tras un fracasado intento de suicidio en las aguas del Yangtze (río Azul), finalmente falleció enfermo a la edad de sesenta y cuatro.

La acústica –del griego *ἀκουστικός* (acusticós), auditivo– es la ciencia del sonido –del latín *sonitus*–.

Los griegos **Pitágoras de Samos** en 550 a.C. y **Aristóteles de Estagira** en 350 a.C. hicieron los primeros estudios sobre la naturaleza del sonido. Posteriormente, en el 20 a.C., el arquitecto romano **Marcus Vitruvius** realizó algunas observaciones sobre fenómenos acústicos y aventuró hipótesis ingeniosas en relación con la reverberación y la interferencia. Griegos y romanos supieron tener en cuenta la acústica para construir los anfiteatros en los que se podía oír muy bien las voces de los intérpretes de tragedias y otros espectáculos.

Muchos siglos después, hacia 1600, el eminentísimo **Galileo Galilei** explicó que las ondas sonoras son generadas por las vibraciones de un cuerpo y que, viajando por el aire, llegan a los tímpanos que envían al cerebro la señal que éste interpreta como sonido. Y en 1636 el matemático francés **Marin Mersenne** realizó cálculos al hallar el tiempo de retorno de un eco y obtener con sólo un 10% de error el valor de la velocidad del sonido, así como la frecuencia de vibración de las distintas cuerdas en relación con sus notas y tonos.

Posteriormente, en 1660, el irlandés **Robert Boyle** demostró que el sonido no se propaga en el vacío; en 1687 **Isaac Newton** fue el primero en publicar un tratamiento matemático de los fenómenos acústicos, y durante el siglo XVIII los matemáticos franceses **Jean d'Alembert** y **Joseph Lagrange**, así como los suizos **Johann Bernoulli** y **Leonhard Euler**, contribuyeron al conocimiento del sonido, cuyo tratamiento matemático completo requiere del análisis armónico desarrollado por el matemático francés **Joseph Fourier** en 1822 y aplicado en física hacia 1830 por el alemán **Georg Ohm**. Años después, en 1878, el inglés John Strutt (**Lord Rayleigh**, el de las temidas ondas superficiales, tanto en sismos naturales como artificiales, aunque por distintos motivos) publicó *The theory of sound* con nuevos aportes al tema y en 1880 **Ernst Mach** (nacido en la actual

Chequia, entonces parte del Imperio austrohúngaro) calculó en Viena la velocidad V_A precisa del sonido en el aire, la conocida Mach 1 de 331,5 m/s a 0°C y 1 atm (nivel del mar).

Este guarismo aumenta con la temperatura porque entra en juego mayor energía de las partículas que interactúan en la vibración. En el aire se calcula según: $V_A = 331,5 + 0,606.T$

(la temperatura T en °C y el resultado en m/s)

Las sonoras son ondas compresionales; sólo se diferencian de sus equivalentes sísmicas por el rango de frecuencias involucradas: usualmente no mucho más de 100 Hz en los registros de señal de las primeras, y hasta unos 30.000 Hz para las segundas. Con más de 20.000 son llamados ultrasonidos y caen fuera del espectro audible humano, pero no del perruno y



Alte Universität, Viena, donde Mach hacía bochinche (foto geschichtewiki.wien.gv)

gatuno que llegan a 40.000 Hz, ¡y hasta 150 kHz los delfines y 200 kHz los murciélagos! Debajo de 20 ciclos por segundo son denominados infrasonidos; tampoco los oímos nosotros, pero sí los elefantes y ballenas.

Las ondas acústicas no viajan por el espacio, como tampoco lo hacen las ondas sísmicas, porque no hay un medio que vibre transmitiéndolas. No nos podríamos escuchar en la Luna aunque gritásemos dentro de nuestra escafandra –pero obvio que sí con aparatos de ondas electromagnéticas–. Y ya sabemos que las ondas sísmicas P al pasar al aire viajan con la velocidad del sonido. Y que las ondas S no consiguen pasaje ni aéreo ni marítimo.

Cuenta la leyenda que en un examen final de física, ante la pregunta: “¿Puede transmitirse el sonido por un sólido?” el estudiante respondió “No, no puede”, tras lo cual el profe le pidió que saliera hacia fuera del aula, cerró la puerta y le comunicó “¡Está aplazado!”. Si una puerta cerrada hace que se escuche menos es únicamente porque parte del sonido se refleja en ella, si es hueca este efecto se duplica y la pérdida es mayor, pero dentro de la madera maciza (si no es un aglomerado laxo) la onda viaja mucho más rápido que en el aire.

Nuestras dos cuerdas vocales situadas en la laringe vibran espirando aire pulmonar a presión a través de la glotis. La voz femenina tiene una frecuencia fundamental de entre 150 y 300 Hz, la masculina de entre 100 y 200 Hz, llegando en ambos sexos a máximos de 3.000 a 3.500 Hz. Laringes cortas dan sonidos agudos (de sopranos en

mujeres, de tenores en hombres) y si son largas dan sonidos graves (contraltos, bajos) que siempre son filtrados por el movimiento de la lengua y la cavidad bucal –por ejemplo, impostar es bajar la laringe y levantar el paladar para conseguir una voz más grave, armoniosa e intensa–. Y, si aspiramos helio, su baja densidad hará que las cuerdas vocales se tensen más fácil y vibren con mayor frecuencia y nuestra voz suene graciosamente aguda.

Las ondas de presión aérea sobre el tímpano ponen en acción el complejo instrumento del oído interno (martillo, yunque, estribo, cóclea, conductos semicirculares y la trompa cuya investigación publicó **Bartolomeo Eustachio** en 1564 en la Università La Sapienza de Roma) y los terminales nerviosos transducen las vibraciones en impulsos eléctricos que las neuronas decodifican en el cerebro (a veces mal y entendemos cualquiera). Los oídos aguantan hasta 120 dB discontinuos, pero someterlos a intensidades algo menores que ese valor aunque en forma continua (ejemplo, discotecas) suele causar pérdida de audición permanente. Problema éste que creemos no habrá tenido la audiencia del primer músico (y *luthier* de flauta de hueso perforado de oso) de hace 43.000 años en Europa.

ACÚSTICA EN MARES Y LAGOS

Las ondas de sonido se propagan en el agua a distancias mucho mayores que las electromagnéticas –que son mucho menos absorbidas en el aire y nada en el vacío– y por eso en lagos y mares se emplea el sonar y no el radar, así como la comunicación subacuática es acústica y no mediante radio.

Hasta donde sabemos, fue el genial y multifacético **Leonardo da Vinci** en 1490 el primero en emplear las ondas de sonido en el agua para, a través de un tubo sumergido, detectar la cercanía de barcos en el puerto de Pisa (hoy tapado por la sedimentación del río Arno que fue alejando la línea de costa). Siglos después, tras el desastre del Titanic (1912), **Lewis Richardson** patentó en Inglaterra el primer ecolocalizador subacuático y, como hemos referido en el Tema 14, fue el canadiense **Reginald Fessenden**, mediante un oscilador de 500 Hz, quien primero utilizó esta técnica para localizar tímpanos, en 1913. Este desarrollo fue mejorado en varios países durante la Primera Guerra Mundial para detección y navegación submarina.

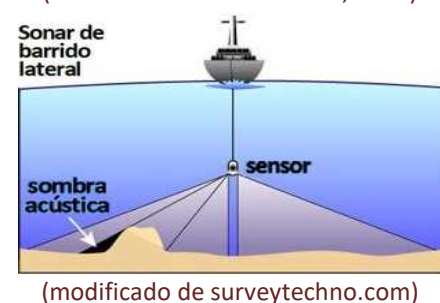
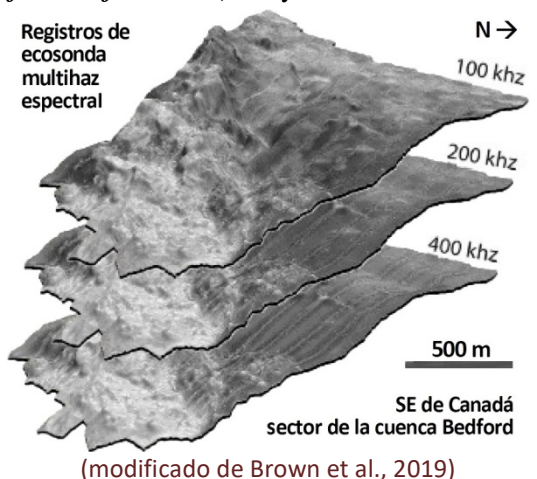
El **sonar** (acrónimo de *SOund Navigation And Ranging*) es una herramienta acústica (sónica) empleada en lagos o mares para navegación, posicionamiento, comunicaciones y localización de cardúmenes. Emite ondas de ultrasonido y registra su tiempo de reflexión (viaje de ida y vuelta) que en base a la velocidad de las ondas en el agua (unos 1.500 m/s) permite el cálculo automático de distancias, tal como lo hacen ballenas, orcas y delfines. **Con este tipo de registros desde barcos se obtuvo la batimetría que permitió descubrir las dorsales oceánicas.** En el ámbito de las geociencias y también en otras disciplinas se utiliza el sonar para la obtención de imágenes acústicas en el fondo de cuerpos de agua. Se basa en la emisión de ondas de sonido y la recepción de sus reflexiones, las cuales **registran variables tiempos de viaje (en función de la distancia) y variables amplitudes (según sea la magnitud de los coeficientes de reflexión de las superficies reflectantes)**. Hay distintas variantes de sonar que surgieron después y aplican a la geología. Veamos.

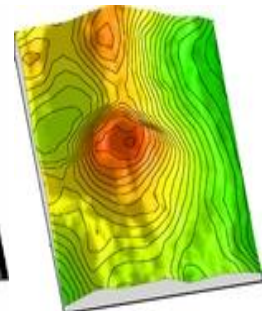
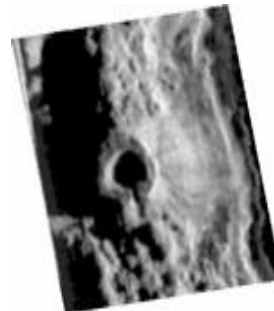
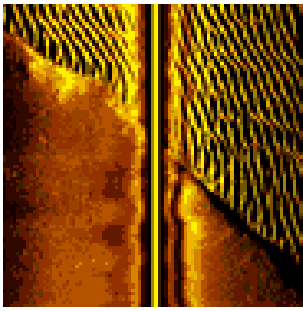
Ecosonda Multihaz (*multibeam echosounder* o *pinger*)

Es un sistema de mapeo de fondos oceánicos cuyo desarrollo inició la marina de Estados Unidos desde la década de 1960 con fines militares y que alcanzó su pleno desarrollo tecnológico y comercial hacia 1990. Se basa en la emisión de un abanico de ondas acústicas desde una embarcación hacia el fondo marino y el registro de sus reflexiones. Su principal utilización es para el mapeo del lecho, pero las versiones más recientes incluyen la discriminación de un espectro de frecuencias cuyas respuestas, combinadas con muestreos sedimentológicos del fondo, ofrecen información geológica (granulometría, litología, etc.) y de la biota, identificándose especies en función de las frecuencias registradas.

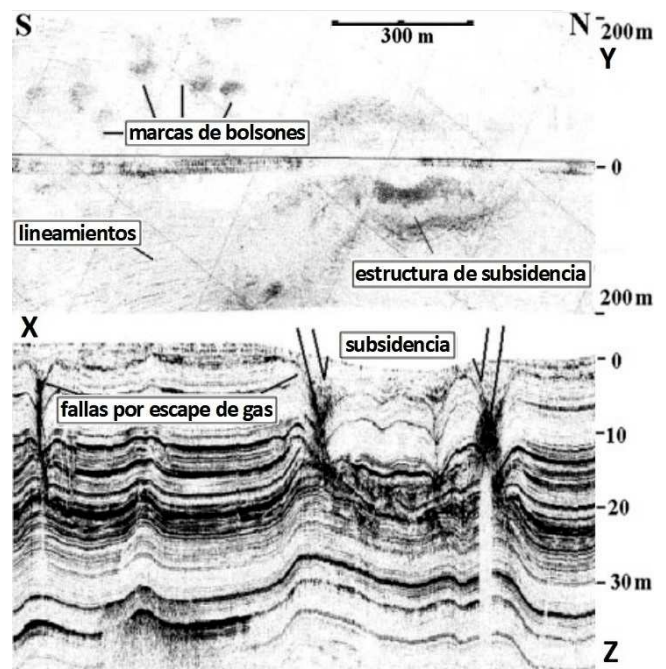
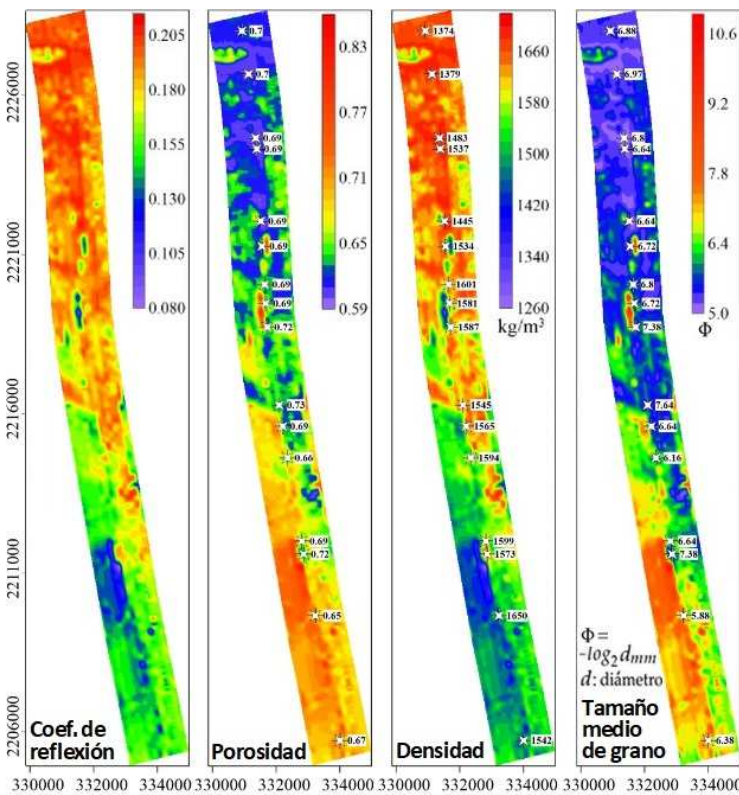
Sonar de Barrido Lateral (*side-scan sonar*)

Se usa comercialmente desde la década de 1960, aunque había sido inventado en torno a 1950 por el alemán **Julius Hagemann** (sirviendo a la Marina estadounidense). Este sistema obtiene dos imágenes, una a cada lado del aparato emisor-receptor (llamado *towfish*, como un pez traccionado), que permiten graficar los rasgos acústicos del fondo marino o lacustre. Se los emplea para geomorfología y sedimentología del lecho, hallazgo de barcos naufragados (tal el Titanic en 1985), aviones accidentados, etc.





izquierda, imagen doble de ondas en un lecho arenoso, tal cual la registra el sensor a ambos lados (de marinesonic.com); luego imagen procesada de sonar lateral de una nave cargo estadounidense hundida tras ser torpedeada por un submarino alemán en 1942 en el golfo de México (de C & C Technologies), y a la derecha imagen de un cono volcánico y mapa de su batimetría (de surveytechno.com)



Mar Negro, arriba registro de sonar lateral y abajo de perfilador de subfondo en el mismo lugar (modificado de Dondurur & Ergün, 2002)

Mar de la China, distintos parámetros obtenidos del proceso de datos de perfilador de subfondo (modificado de Zhou *et al.*, 2024)

Perfilador de Subfondo (*sub-bottom profiler*)

Desarrollado en décadas recientes, es un tipo de



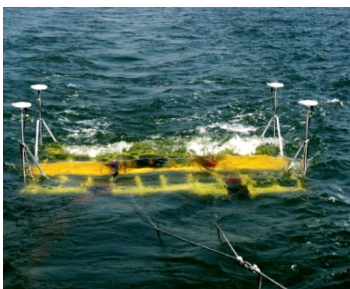
Pez registrador (de surveytechno.com)

sonar (también con un sensor acústico en forma de pez) que permite generar secciones verticales –de forma análoga a la sísmica 2D–, en este caso de poca profundidad bajo el lecho (raramente más de 100 metros) pero de gran resolución, es decir, mucho detalle, ya que emite hasta 50 kHz y posibilita discriminar capas de 10 cm de espesor mínimo, guardando cierta similitud con el georradar –aunque este último define capas aún más finas, es electromagnético y opera en tierra firme–. Estas secciones (figuras arriba) posibilitan estudios estratigráficos o sedimentológicos, así como exploraciones arqueológicas y otras.

Perfilador Gradacional de Subfondo (*chirp sub-bottom profiler*)

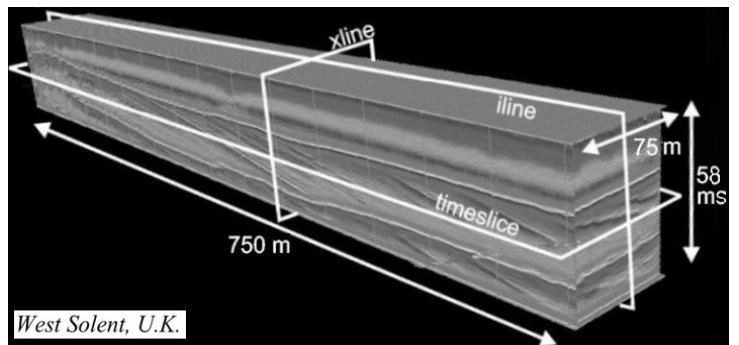
Surgido en los últimos años, permite obtener secciones verticales de muy alta resolución bajo el fondo marino o lacustre a partir de la *emisión gradacional de frecuencias* (en inglés *chirp*, chirrido) que se emite en forma de *barrido* (*sweep*) como hacen las fuentes vibratorias, pero en este caso desde una balsa, gomón o mini-catamarán parecido al que emplea el electroplato (*boomer*) referido en el Tema 13. Pero *poco debajo de la balsa van además los hidrófonos en general en grupos de 4 con unos 25 cm entre ellos y un largo total de alrededor de 2 o 3 m, que deben distribuirse también a lo ancho para una 3D*. La señal abarca un rango típicamente de 1 a 24 kHz o más o menos según el objetivo geofísico y luego obviamente se hace la correlación cruzada para tener la ondícula

de Klauder en fase cero. El resultado final es como el de una sección sísmica, pero de poca profundidad de investigación y altísima resolución de capas delgadas (mínimo de 10 cm). Además de líneas aisladas, pueden registrarse mallados 2D o incluso 3D si su mayor costo lo justifica. Acá vemos figuras que lo ilustran.



Balsa con sensor *chirp* arrastrada durante la adquisición de datos.

Resultado del procesamiento de una adquisición 3D; se indica una línea o *inline*, una travesa o *crossline* y una sección a un determinado *To* o *timeslice* (de Bull *et al.*, 2005)



Las reflexiones acústicas son usadas además para hacer las **ecografías médicas** 2 o 3D. También el **ecoDoppler** (debido al efecto Doppler las ondas vienen agudas y se van graves) a fin de medir las caídas anómalas de frecuencia sónica del flujo sanguíneo, entre otras aplicaciones diagnósticas.

Redes Acústicas Globales

Existe una red de monitoreo acústico oceánico con 11 estaciones distribuidas en el mundo, a cargo de la **CTBTO** (*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization*) para control de la prohibición de ensayos nucleares con sede en Viena (la ciudad donde investigó **Ernst Mach**), 6 estaciones con hidrófonos en profundidad cerca de algunas islas y 5 con sismómetros en tierra sobre otras islas. Así pueden detectar mejor que como lo hacía **Leonardo da Vinci** los sonidos de variadísimos eventos naturales y artificiales (como la implosión del submarino ARA San Juan en el Atlántico Sur en 2017, información que le fue dada a la Armada Argentina mediante una gestión independiente de ésta). La red forma parte de una más amplia cobertura con sensores infrasónicos atmosféricos y sismómetros continentales, además de contar con detectores de radiación nuclear atmosférica. Adicionalmente Estados Unidos tiene su propio *Integrated Undersea Surveillance System* que implementó para la detección de submarinos soviéticos y que ahora funciona con fines científicos.

En los océanos se identifica el canal denominado **SOFAR** (*SOund Fixing And Ranging channel*) de fijación y oscilación sonora, también llamado canal sonoro profundo (*Deep Sound Channel, DSC*), un estrato de agua donde la velocidad del sonido es mínima y actúa como guía de onda para las bajas frecuencias que pueden viajar decenas de miles de kilómetros antes de disiparse. Fue descubierto independientemente por el ruso **Leonid Brekhovskikh** y el estadounidense **Maurice Ewing** (el de la sonda térmica). La presión oceánica crece linealmente con la profundidad, pero la temperatura es más variable, disminuyendo rápido en la termoclina principal (capa de transición entre el estrato de mezcla superficial y el estrato ácuo profundo, a unos 1.000 metros de profundidad en áreas tropicales y saliendo a superficie en áreas polares) con la temperatura luego manteniéndose casi constante hasta el fondo. Cerca de la superficie, la temperatura en rápido descenso causa una disminución de la velocidad del sonido, hasta el citado canal. Luego, con el aumento de la profundidad, la presión creciente determina un incremento de su velocidad. Los aumentos de salinidad hacen crecer levemente la densidad y entonces también la velocidad. Se especula que los cetáceos podrían sumergirse hasta este canal para comunicarse con parientes o amigos a cientos o quizá miles de kilómetros de distancia...

En la atmósfera existió desde 1947 el proyecto secreto Mogul de los Estados Unidos con micrófonos puestos en globos sonda a gran altura para principalmente detectar a mucha distancia las ondas acústicas generadas por eventuales detonaciones atómicas soviéticas. Debido al muy alto costo y poco suceso, desde 1950 la escucha

fue sustituida por sismómetros y detectores radiactivos. El globo 4, lanzado desde Alamogordo (Nuevo México, parte de la vastedad arrebatada por U.S.A.) fue el que se estrolo el 2 de julio de 1947 cerca del poblado de Roswell, incidente que dio letra a los cazadores de OVNIs para fraguar el mito según el cual se recuperaron restos de una nave y cadáveres de extraterrestres. Una más en su larguísima saga de paranoia, fe ciega y mentiras. Rastrear en busca de señales de acaso posibles seres inteligentes en mundos lejanos es todo otro tema.

PERFILES SÓNICOS DE POZO

Permiten rastrear en busca de señales hidrocarbúferas y otras de origen terrícola...

Una de las tareas prioritarias de un intérprete sísmico es la de volcar la información obtenida de un pozo sobre la sección o volumen sísmico que pasa por donde fue perforado. Su objetivo es hallar la correspondencia entre cada reflector sísmico y cada interfaz geológica. Esto le permite valerse de la sísmica *para extrapolar lateralmente la información del sondeo y elaborar mapas referenciados a eventos geológicos conocidos y profundidades ciertas.* Los perfiles sónicos y la sísmica de pozo son los registros necesarios para estos fines.

Mediciones Básicas con el Perfil Acústico

El perfil de ondas sonoras fue desarrollado por la industria petrolera desde la década de 1950. La medición básica registrada por esta herramienta es el tiempo de tránsito (los microsegundos que le toma a la onda recorrer un pie vertical de formación), magnitud recíproca de la velocidad. La siguiente fórmula permite convertir tiempo de tránsito sónico en velocidad: $V = 3,048 \cdot 10^5 / \Delta t$ (Δt es el tiempo en μs /pie y V la velocidad en m/s)

El tiempo de tránsito registrado por estos perfiles en pozos está normalmente en el *rango de 2.000 a 50 μs /pie, que en la pista se grafica creciendo hacia la izquierda* (y z hacia abajo). Esto *corresponde a velocidades del orden de 1.500 a 6.000 m/s, crecientes de izquierda a derecha.*

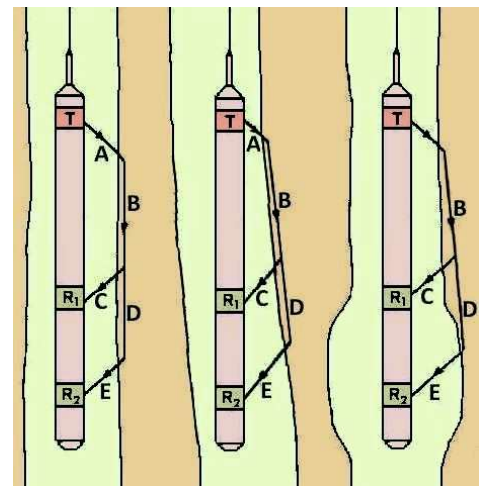
Sistemas de Perfilaje Acústico

- Receptor dual con transmisor único

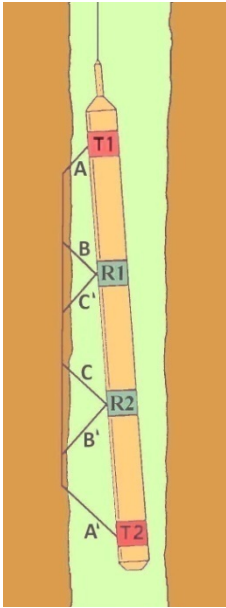
Las primeras herramientas tenían un solo transmisor T monopolar (de onda P) y dos receptores R1 y R2. Obsérvese en los esquemas adyacentes que *es como una sísmica de refracción puesta vertical y a pequeña escala, y también en este caso sólo se leen tiempos de primer arribo.* Este sistema calcula luego el tiempo empleado por la onda para recorrer el intervalo D, como se indica en el gráfico que está más a la izquierda. Esto se logra tratando a T-R1 y T-R2 como dos mediciones separadas de receptor simple y calculando su diferencia. Para T-R2 el tiempo registrado es la suma de los tiempos empleados para atravesar los intervalos A, B, D y E. Y el tiempo registrado para T-R1 representa la suma del viaje por A, B y C. Si los intervalos C y E son iguales, la diferencia entre las dos mediciones es D. El espaciamiento entre R1 y R2 es siempre igual a la distancia representada por el intervalo D, aun cuando sus posiciones relativas respecto a D pueden variar ligeramente debido a cambios en la refracción provocados por cambios de velocidad de los sucesivos estratos atravesados. *El frente de onda sónico sigue también trayectorias por el lodo, pero el viaje por esa vía es más lento y llega tarde. Y produce también un viaje a través de la misma herramienta, el cual es anulado mediante un sistema de ranuras transversales* (foto en la página siguiente). El único problema serio de este dispositivo eran sus registros cuando los intervalos de tiempo desde los dos receptores hasta la formación eran desiguales. Esto ocurría por la inclinación de la herramienta respecto al sondeo (caso "pata de perro", dibujo central) o porque los receptores pasaban frente a una caverna (ver a la derecha). En estos casos el sistema indicaba un tiempo de viaje erróneo a través de la formación porque el intervalo C difería del E.

- Sistema dual compensado

Para superar los antedichos errores fue desarrollado un dispositivo dual que los compensa promediando las lecturas en sentidos opuestos. El sistema usa transmisores y receptores dispuestos como se ilustra en la página siguiente. Los transmisores superior e inferior (cada uno monopolar) dispuestos simétricos disparan la onda sonora alternativamente. Los dos receptores envían a la superficie dos tandas de datos para ser promediados y de allí tener el tiempo de tránsito en la formación. Cuando se encuentra un ensanchamiento o un estrechamiento del pozo (por ejemplo, si éste atravesó arcillas expansibles), o cuando la herramienta de alguna manera se inclina en el pozo, se eliminan los errores introducidos debidos a la diferencia de tiempo de tránsito en el lodo de cada



Trayectorias sónicas con transmisor único en distintas condiciones de pozo; ver texto.



Compensación de recorridos; ver texto.

uno de los sistemas de transmisor simple-receptor dual. Una inspección de la figura colindante muestra que el viaje promedio en el lodo entre A y A', B y B', C y C' es siempre idéntico y en consecuencia ahora resulta ininfluyente.

Ahora bien, **frente a cavernas por derrumbes muy grandes** aun con este sistema podría llegar antes la señal que viaja por el lodo, en cuyo caso se puede optar por un dispositivo similar pero de mayor longitud, el **sónico de espaciamiento largo**. Con distancias más largas entre transmisores y receptores es más probable que siempre llegue antes la señal a través de la formación rocosa. Una herramienta acústica convencional mide en total unos 8 pies y una larga alcanza los 18 pies, en ambos casos con 2 pies entre los receptores.

- Cálculos y ley de velocidad sónica de pozo

Al pie de la página puede verse un tramo de perfilaje acústico (junto con las curvas de potencial espontáneo, diámetro del trépano y calibre del pozo, remarcando los sectores con cavernas o estrechamientos) perteneciente a un pozo de la cuenca Golfo San Jorge. Allí están señaladas tres profundidades X1, X2 y X3. Podemos razonar que para la profundidad X1 una señal acústica demorará Y1 μs en recorrer 1 pie, y en la posición X2 tardará Y2 μs en recorrer la misma distancia vertical o inclinada (si el pozo tuviese una desviación no deseada o un direccionamiento predefinido) a través del correspondiente intervalo de la formación geológica. El cálculo de cuánto tarda la señal en atravesar el tramo entre X1 y X2 será: $T_{1-2} = [(Y2 + Y1) / 2] \cdot (X2 - X1)$

donde (Y2 + Y1) / 2 es el promedio de las mediciones en dicho tramo.

Para el tramo que va de X2 a X3 será: $T_{2-3} = [(Y3 + Y2) / 2] \cdot (X3 - X2)$

Y así sucesivamente para cada uno de los tramos en forma individual. Si quisiéramos saber el tiempo total que demora la señal acústica en ir de X1 a X3 obviamente sería: $T_{1-2} + T_{2-3} = T_{1-3}$

Generalizando puede escribirse que: $\sum_{i=1}^n (Y_n + Y_{n-1} / 2) \cdot (X_n - X_{n-1}) = T_{1-n}$

Un abordaje más preciso es el que nos da el **Tiempo de Tránsito Integrado (TTI)** en cualquier tramo del pozo que sea de interés. El TTI es **la sumatoria de todos los tiempos de tránsito registrados por el perfil acústico en el intervalo considerado** o sea la integral bajo la curva de valores medidos. La compañía de perfilaje provee la presentación con las marcas laterales que van dando cuenta de dicha integración calculada automáticamente.

Una **Ley de Velocidad de Pozo** es una gráfica de profundidades (usualmente en ordenadas, con la boca de pozo arriba y z creciendo hacia abajo) versus los tiempos de viaje de las ondas acústicas o bien de las sísmicas (en abscisas, normalmente crecientes de izquierda a derecha). Es una información de uso habitual y, **en su versión más económica, se la puede construir a partir de los tiempos de tránsito integrados que da un perfil sónico**.

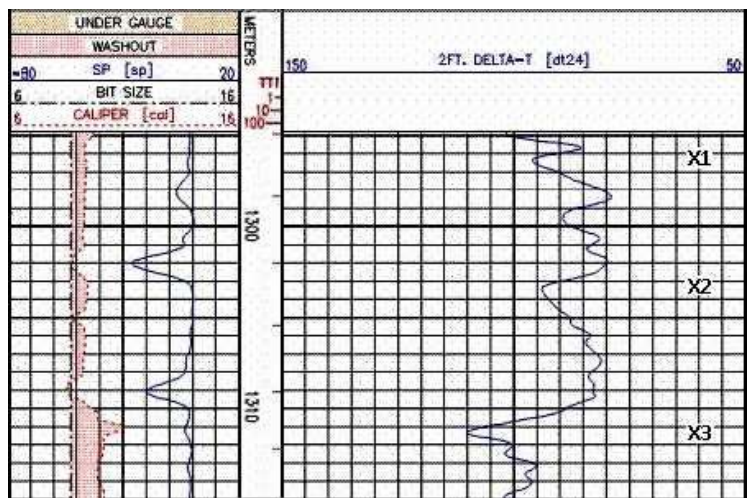
La adquisición de sísmica de pozo es una opción más cara que se describe más adelante.

- Otros beneficios de este perfil

El acústico sirve también para hacer la **correlación de capas entre pozos vecinos**, análogamente a otros perfiles. Pero también es un **perfil clásico de porosidad, porque en rocas porosas, fisuradas o con fluidos la velocidad acústica disminuye, al igual que en lutitas con materia orgánica**. En cambio la velocidad es mayor en rocas más compactas, muy cementadas o con fuerte diagénesis.



Herramienta sónica (foto Schlumberger)



Tramo de perfil con registro de calibre, diámetro de trépano –bit size–, SP, cavernas –washout–, estrechamientos –under gauge– y ΔT medido por el acústico, con sus marcas del TTI (gentileza YPF)

Las ecuaciones más usadas para calcular la porosidad son las publicadas por Willie *et al.* (1958) que considera la compactación y Raymer *et al.* (1980) que no la tiene en cuenta por su difícil estimación. Se elige la que mejor ajusta en el entorno geológico específico cotejando con datos de petrofísica en muestras y/o registros de RMN.

Prof.(mbbp)	$\Delta T(\mu s/ft)$	ΔT medio	$\Delta T(S/m)$	V(m/s)	TTI(s)
200.0000	100.50	100.60	0.000330052	3029.821074	0.00005030
200.1524	100.70	100.80	0.000330709	3023.809524	0.00010070
200.3048	100.90	100.80	0.000330709	3023.809524	0.00015110
200.4572	100.70	100.50	0.000329724	3032.835821	0.00020135
200.6096	100.30	100.10	0.000328412	3044.955045	0.00025140
200.7620	099.90	100.30	0.000329068	3038.883350	0.00030155
200.9144	100.70	100.97	0.000331283	3018.568953	0.00035204
201.0668	101.25	101.52	0.000333087	3002.216203	0.00040280
201.2192	101.80	102.07	0.000334892	2986.039677	0.00045384
201.3716	102.35	102.62	0.000336696	2970.036541	0.00050515
201.5240	102.90				

Ejemplo de tabla de valores calculados en un tramo de pozo.

Perfil de Cemento (cement bond log)

Es una imagen sónica del caño que entuba el sondeo y de las rocas de la pared, registrada para confirmar la presencia o discernir la eventual ausencia de cemento entre ambas. La finalidad es la de evaluar la efectividad de la operación de cementación para posteriormente definir sobre bases firmes las capas potencialmente productivas que serán punzadas u otros trabajos de terminación del pozo.

En la siguiente figura de la izquierda, dos imágenes típicas antes y después de la inyección de cemento; la posterior a la inyección exhibe una cementación muy pobre arriba ya que se sigue viendo la señal del acero.

Si la cementación es pobre la señal reflejada en la tubería es fuerte porque poca energía pasa a la formación. Si la inyección es eficiente la energía pasa mejor a la formación a través del cemento y poca se refleja en el caño.

Imágenes Acústicas

Proviene del registro de numerosos perfiles sónicos (24 ó más) en el perímetro del pozo para conseguir el mapeo cilíndrico de la variación de los tiempos de tránsito en las rocas de la pared del pozo en el tramo de interés y, a partir de eso, las velocidades, para luego adicionalmente calcular las impedancias acústicas. Son imágenes alternativas o a veces complementarias de las conseguibles con el perfilaje microrresistivo ya referido en la pág.212. Las curvas se procesan también azimutalmente como en los perfiles resistivos a fin de obtener la información de **rumbo e inclinación de los estratos**. E incluso se puede medir la **variación azimutal del calibre**.

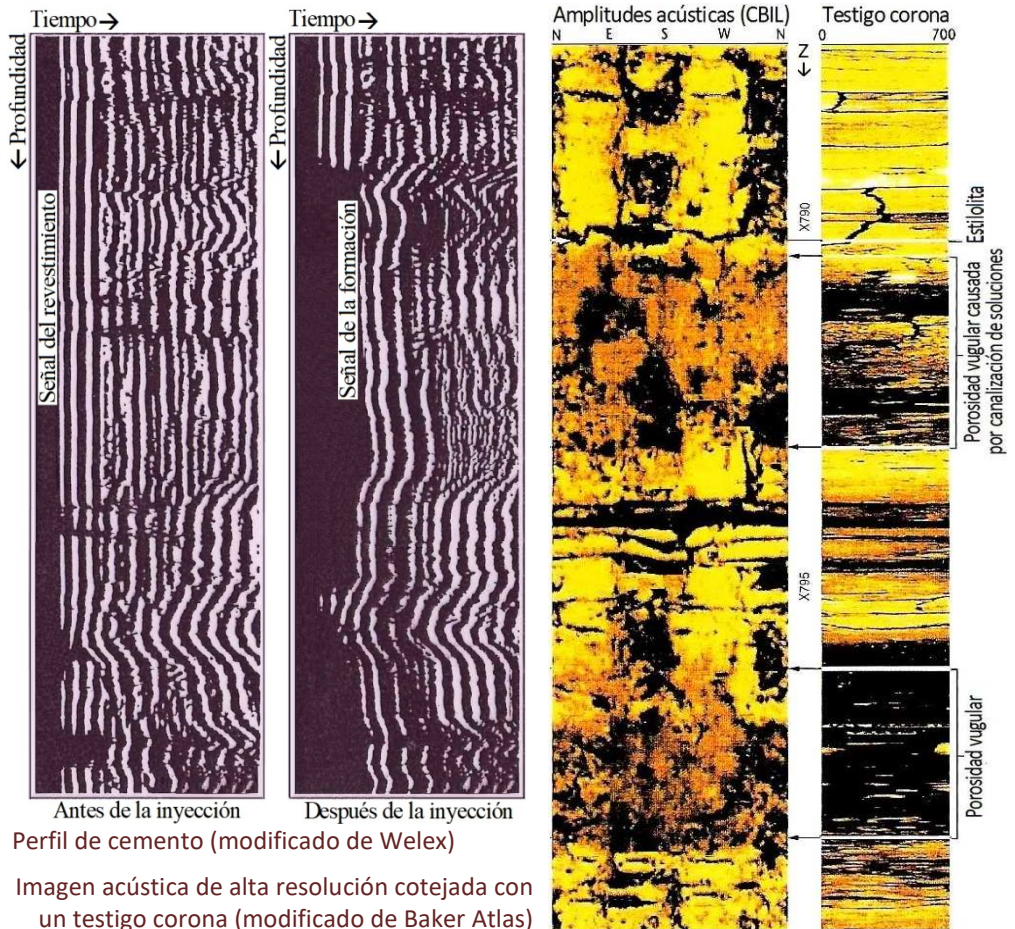
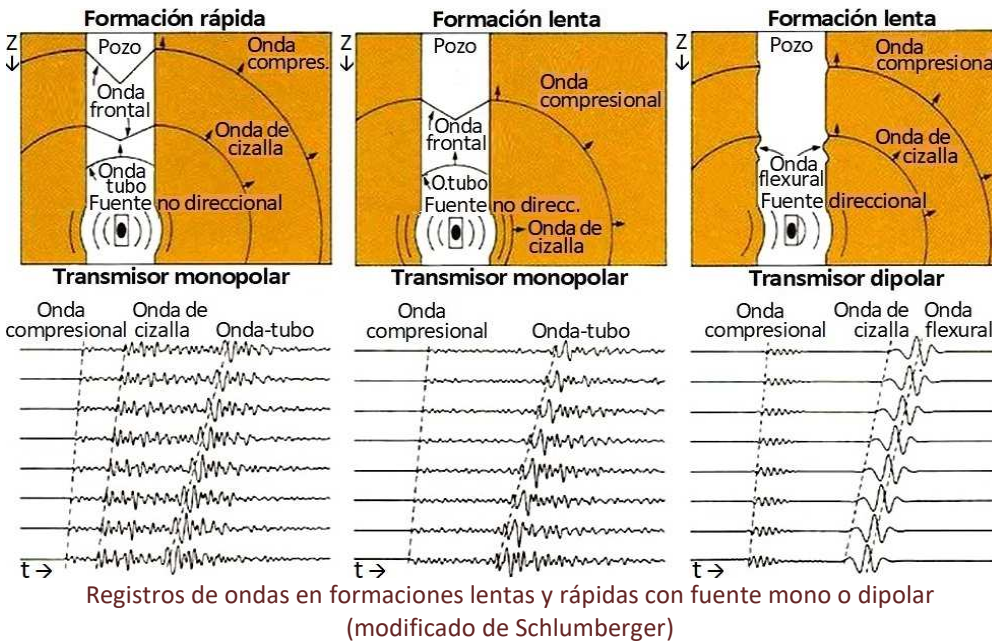


Imagen acústica de alta resolución cotejada con un testigo corona (modificado de Baker Atlas)

Perfil Sónico Dipolar

Los tradicionales transmisores monopoles permiten generar en las formaciones geológicas más compactas o rápidas los tres tipos de ondas que son de interés: compresionales, transversales y Stoneley (ondas-tubo, referidas como *fluid waves*), las dos últimas por conversión del modo de vibración de las P. Pero en las formaciones lentas (poco consolidadas, porosas o muy fisuradas, que en muchos casos son reservorios) las ondas de corte reducen notablemente su amplitud, además de que sería necesario apoyar los detectores contra la pared del pozo ya que no viajan por el fluido. Es por esto que se desarrolló la herramienta dipolar, que genera la llamada **onda flexural** (de oscilación ortogonal a un tubo o placa, típica de algunos instrumentos musicales) que se comporta como si fuera onda S pero tiene gran amplitud. El dipolar es un registro acústico con una herramienta de dos polos: dos emisores muy juntos que originan las ondas flexurales, que pueden registrarse bien. Pero durante este perfilaje igual se registran las ondas P (de fuente monopolar) y las ondas de Stoneley (ondas-tubo) que surgen a partir de las P en el límite sólido-fluido, cuya atenuación aporta información sobre las fracturas

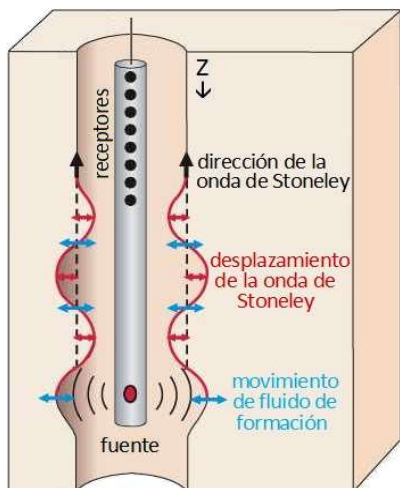
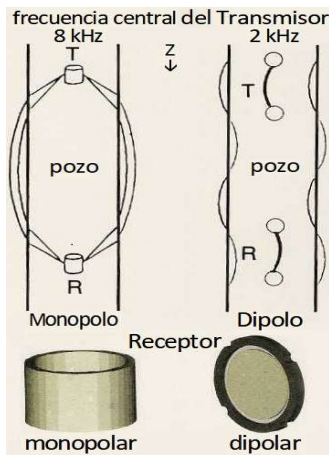


atravesadas. *Interesa leer bien sólo el primer arribo de cada uno de estos tres tipos de onda.* A la izquierda se grafica cada posible caso.

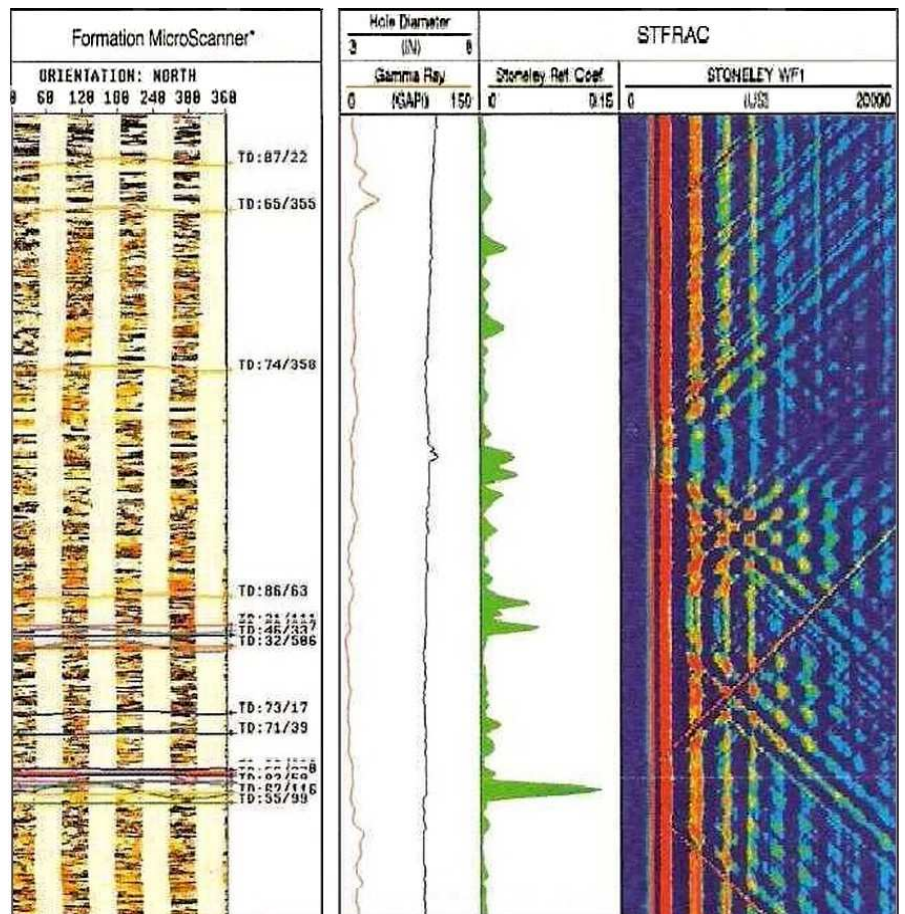
Las figuras de más abajo ilustran esquemáticamente estos transmisores. Poder disponer simultáneamente de las velocidades de las ondas primarias y secundarias permite hacer inferencias sobre los tipos de rocas y eventualmente la presencia de fluidos, porque se puede proceder al cálculo de los distintos **módulos elásticos**:

Volumétrico: $K = \delta \cdot V_p^2 - 4/3 V_s^2$ **Lamé:** $\mu = \delta \cdot V_s^2$ **Poisson:** $\sigma = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2}$ **Young:** $E = 3K\mu / (3K + \mu) = 2\mu(1 + \sigma)$

A la derecha se ilustra un registro de imágenes de pozo, junto con su diámetro, rayos γ y la información que dan las **ondas Stoneley** que se *atenúan donde hay aumentos de permeabilidad* y se *reflejan en las fracturas que atraviesan el sondeo* dando alineamientos oblicuos que convergen en ellas.

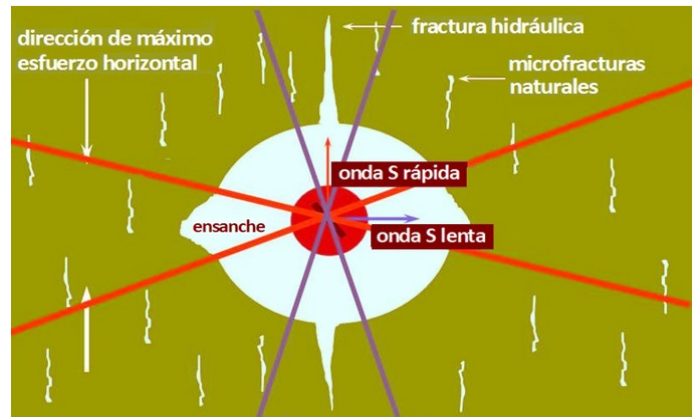
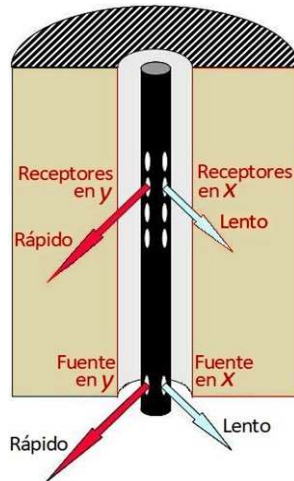


Adquisición de la onda de Stoneley (figuras modificadas de Baker Atlas)

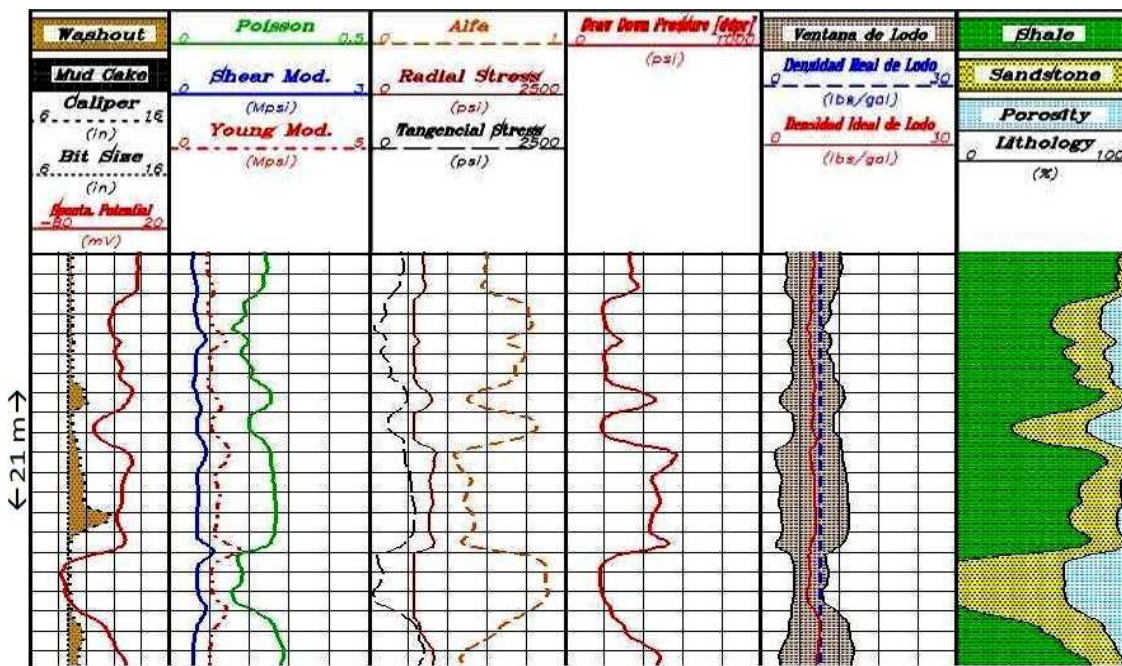


A la derecha registro de onda de Stoneley para identificación de fracturas junto con los coeficientes de reflexión –picos donde son atravesadas–, calibre, rayos γ e imágenes microrresistivas a la izquierda (modificado de Schlumberger)

También se ha diseñado una **herramienta acústica dipolar doble** (*cross-dipole acoustic system*), que posee dos dipolos orientados ortogonales entre sí, lo que posibilita registrar ondas S en dos azimuts (grafica inmediata de la izquierda) para **detectar anisotropía litológica o estructural**. Las ondas de corte viajan más rápido paralelamente a las fracturas, canalizadas por ellas, y se ralentizan cuando deben atravesarlas en dirección aproximadamente ortogonal. A la derecha puede visualizarse de manera esquemática su potencial empleo para averiguar la orientación de las fracturas naturales, como asimismo de las hidráulicas artificialmente inducidas y también el ovalamiento que pudo haber sufrido el pozo en función del campo de esfuerzos actuante en el subsuelo.



Cortes vertical (izquierda) y horizontal (derecha) mostrando la utilidad del acústico dipolar (figuras modificadas de Baker Atlas)



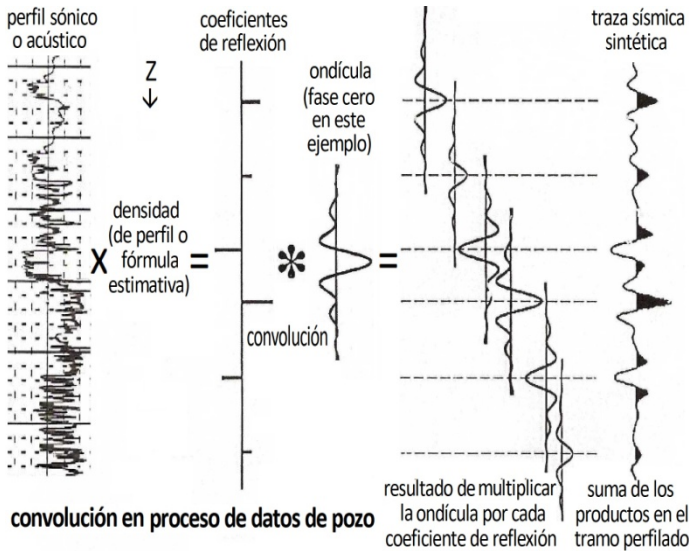
Presentación de un tramo de perfilaje acústico dipolar a los fines de la ingeniería de perforación; en las sucesivas pistas, de izquierda a derecha, la información del calibre del pozo, módulos elásticos, esfuerzos, caídas detectadas en la presión, densidad de lodo y litología más porosidad (gentileza Baker Atlas)

SISMOGRAMA SINTÉTICO (*synthetic seismogram*)

Como ya se puntualizó en el Tema 15, cada sismograma registrado, conocido como traza sísmica S(t), resulta de la convolución de los coeficientes de reflexión F(t) con la ondícula G(t): **S(t) = F(t) * G(t)**

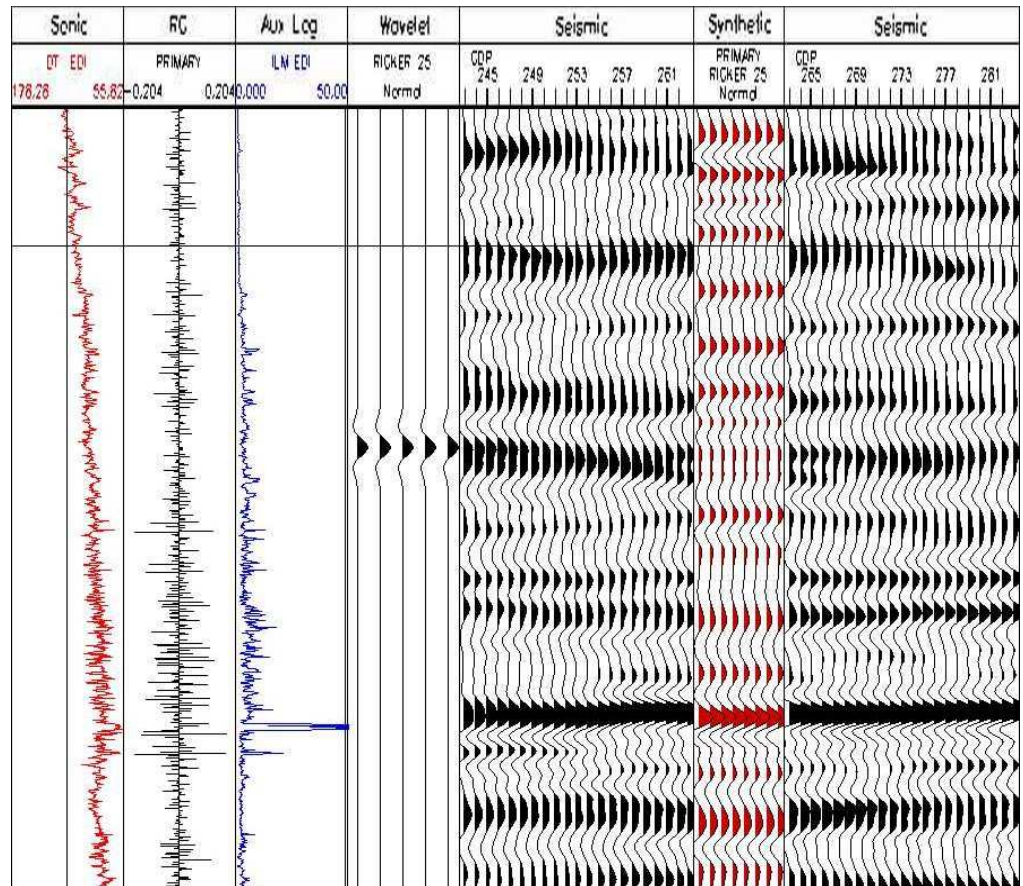
(donde t es el tiempo empleado por el frente de onda sísmico para recorrer el camino desde la fuente hasta las sucesivas interfaces reflectoras y desde ellas hasta los receptores)

Un **sismograma o traza sintética** *consiste en la imitación informática del proceso real de convolución*. Para generarlo se debe disponer de la serie de coeficientes de reflexión, es decir de la sucesión de impedancias acústicas que permiten calcularlos. Y éstas pueden obtenerse a partir de perfiles de velocidad en pozo (sónico o acústico) y densidad (obtenido usualmente con una herramienta radiactiva o en casos específicos con un gravímetro). En la práctica el dato siempre obligatorio es la velocidad –principal factor de la impedancia–, mientras que puede prescindirse del dato real de densidad en cuencas sin destacados contrastes litológicos, como sucede en la cuenca Golfo San Jorge. En este caso se podría asignar una densidad (δ) media constante, o aproximar con la empírica **fórmula de Gerald Gardner et al.** (abreviación de *alii*) de 1974: $\delta = a \cdot V^b$ (V es la velocidad de cada capa, a y b magnitudes empíricas; por ejemplo, a=0,3 y b=1/4 en clásticas) En cuencas como la Neuquina estas asunciones de la densidad podrían llevar a grandes errores, ya que se intercalan



litologías muy diversas (clásticas, carbonáticas, evaporitas, etc.) no siendo válida una relación lineal entre densidad y velocidad. En cualquier caso, habiendo calculado la serie de coeficientes de reflexión, luego se procede a convolucionar con una ondícula (sea analítica o extraída de datos reales de sísmica de superficie) y se obtiene una traza sísmica en la posición del pozo, o sea que se aplica un proceso que simula la generación de una traza en subsuelo, como se ilustra a la izquierda. Esta traza sintética –habitualmente repetida unas 5 a 9 veces a los fines visuales– se correlaciona luego con la sísmica de superficie en el lugar del sondeo y así pueden identificarse los eventos geológicos a través de los perfiles de pozo y analizar si su existencia se refleja en la sísmica.

Pozo en Chubut, cuenca Golfo San Jorge, de izquierda a derecha: perfil sónico, serie de coeficientes de reflexión, perfil de resistividad, ondícula analítica, sección sísmica y sismograma sintético –en rojo– intercalado en ésta (gentileza Tecpetrol)



SÍSMICA DE POZO

Nos vamos a referir ahora a los registros sísmicos reales en los pozos. *Un sismograma sintético*, como vimos, si bien muy útil, es información acústica que se vistió con una ondícula, disfrazándose de sísmica, pero *no es verdadera sísmica*,

En la sísmica de pozo se hace vibrar el subsuelo

con una fuente sísmica que generalmente se halla en la superficie y un receptor (geófono triaxial dentro de una herramienta; foto a la derecha) registra las ondas en el interior del pozo ubicándose a profundidades previamente definidas, empezando desde abajo, como todo perfilaje.

Prueba de Velocidad (checkshot survey)

Es el tipo de registro sísmico de pozo más básico y antiguo (McCullum y LaRue, 1931, Estados Unidos). En él las posiciones o estaciones de anclaje de la herramienta a distintas profundidades son definidas observando los cambios de tendencia del perfil acústico previamente registrado en el mismo pozo, de forma tal de dividir al sónico en zonas donde el carácter del perfil es más o menos constante. En los raros



Herramienta de geófono triaxial de Baker Hughes fuera del pozo; obsérvese el brazo para empujar contra un lado y pegar la herramienta en el opuesto (foto L. Chelotti)

casos en que el perfil sónico no ha sido registrado, puede recurrirse a uno de resistividades profundas, que suele tener cierta proporcionalidad general con los perfiles de velocidad.

Con una fuente muy cercana a la boca de pozo se hacen varios disparos –para obtener sendos registros– por cada profundidad de anclaje de la herramienta (cuyo brazo pega el receptor contra la pared del pozo) y luego son sumadas las señales para aumentar la relación señal/ruido. Como en sísmica de refracción, *sólo sirve leer el tiempo de primer arribo* (en este caso *la onda directa descendente*) para cada profundidad y se tiene así una ley tiempo/profundidad: la **ley de velocidad sísmica de pozo**, tal como la ilustrada aquí mediante la curva que nos da las velocidades medias V_m –en cada punto según las escalas vertical y horizontal superior–. Se representan también las **velocidades interválicas V_i sísmicas** computadas en km/s (escala abajo).

Recuérdese que *una ley de velocidad puede obtenerse también de la corrección dinámica o desde otros datos.*

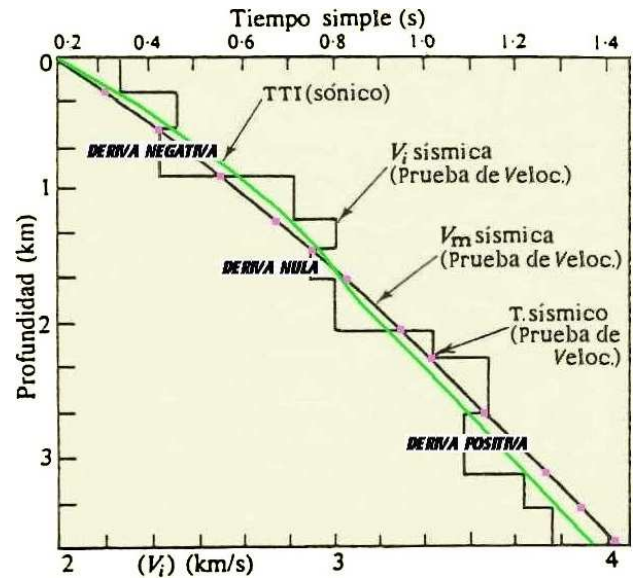
Calibración del Perfil Sónico

Un sismograma sintético procesado sin ajuste sísmico será mucho mejor que no disponer de ninguno, pero casi siempre presentará efectos distorsivos por una o varias de las siguientes causas:

- **Cambios laterales de velocidad** en la inmediatez del pozo, que darán unas lecturas para el perfil sónico (el cual lee a menos de un metro desde la pared del sondeo) que diferirán respecto a la sísmica de pozo (la cual promedia valores a decenas de metros de distancia). Por este motivo la traza sintética puede aparecer acortada o alargada en distintos tramos respecto a las trazas sísmicas de superficie del entorno del sondeo, dependiendo tales diferencias de cuán importantes sean esas variaciones laterales y en qué sentido se produzcan.

- **Condición del pozo**, que hace que allí donde está más deteriorado (por la invasión del lodo, expansión de arcillas, cavernas, etc.) dará lecturas de velocidad más bajas para el perfil acústico que para la sísmica, debido a que esta última promedia a distancias mayores donde la alteración se torna insignificante. Por esta razón en los tramos de pozo en peor condición las velocidades acústicas son más lentas que las sísmicas. Esto generalmente acontece en la parte más somera del sondeo, donde las rocas son menos competentes y la exposición a la circulación de lodo ha sido más prolongada en el tiempo.

- **Dispersión de ondas**, o sea la dependencia de la velocidad registrada con la frecuencia de la fuente en función de la velocidad de fase de cada una. Dado que la herramienta acústica emite energía a 20 o 30 kHz y la sísmica a no más de 100 o 140 Hz, las velocidades sísmicas resultan más lentas. Este fenómeno ocurre a lo largo de todo el pozo, pero se manifiesta en los sectores donde la condición de éste es buena (porque no es contrarrestado por el efecto anterior), casi siempre la parte profunda.

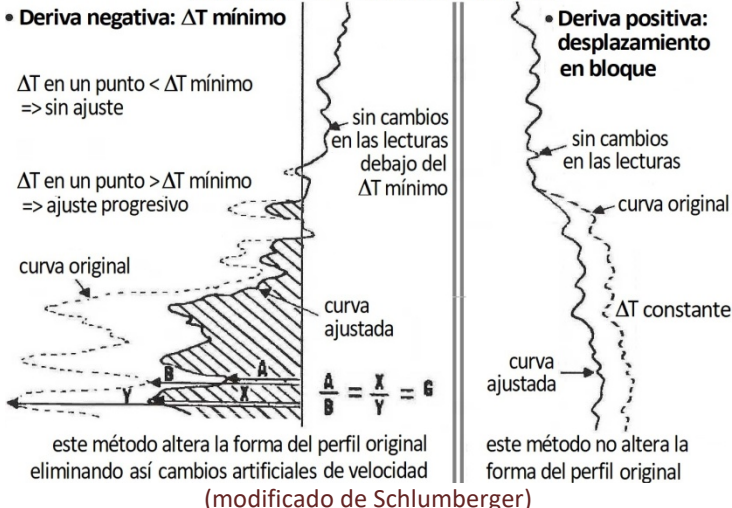


Ley de velocidad de pozo; tiempos de tránsito integrados –TTI– sónicos y sísmicos de la prueba de velocidad, así como velocidades sísmicas interválicas V_i y medias V_m ; se indican los tramos de deriva negativa, nula y positiva.

La calibración del perfil sónico se consigue ajustándolo con el registro de tiempo de primer arribo de la onda sísmica (directa) de la prueba de velocidad. El método clásico de calibración consiste en aplicarle al acústico las correcciones indicadas por una curva de deriva (*drift*) obtenida a partir del análisis de las diferencias entre las leyes de velocidad (ejemplo arriba) de los tiempos registrados mediante la prueba de velocidad (T sísmico) y los Tiempos de Tránsito Integrado del perfil sónico (TTI): **DERIVA = T sísmico – TTI**

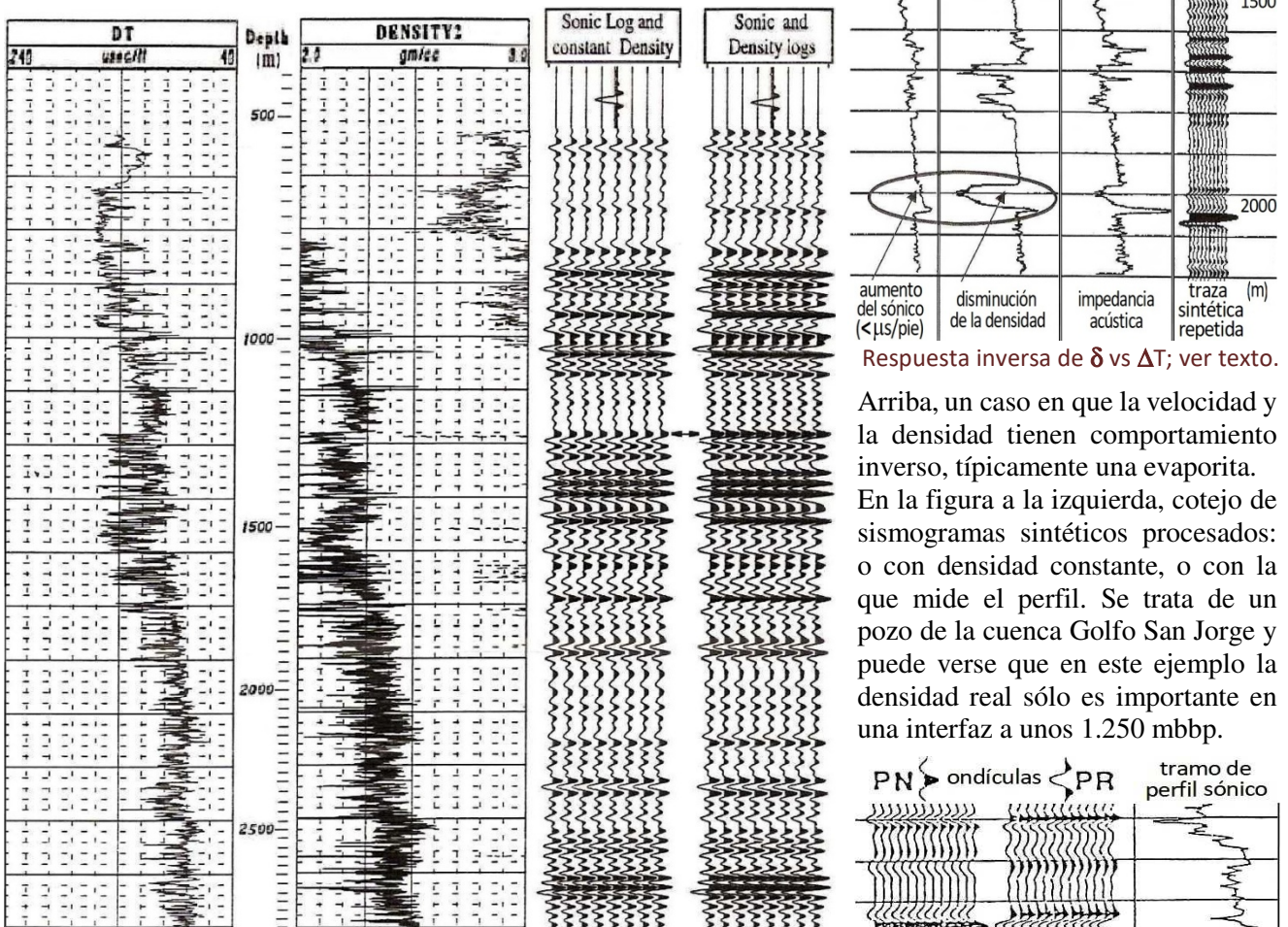
La figura adyacente esquematiza los métodos de corrección de la deriva, por Δt mínimo si ésta es negativa y por desplazamiento en bloque si es positiva. En este último caso se corre toda la curva

Métodos de corrección de la deriva:



en forma pareja para compensar la diferencia de tiempo entre acústico integrado y sísmica, por efecto de la dispersión. Pero si la deriva es negativa el corrimiento debe hacerse en forma proporcional, como se aprecia, porque se asume un efecto variable consecuente de las condiciones también variables del sondeo.

El resultado es una sucesión de velocidades con la cual se puede construir una serie de coeficientes de reflexión y finalmente una traza sintética que correlacionará mejor con la sísmica de superficie, evitándose los efectos distorsivos antes explicados.

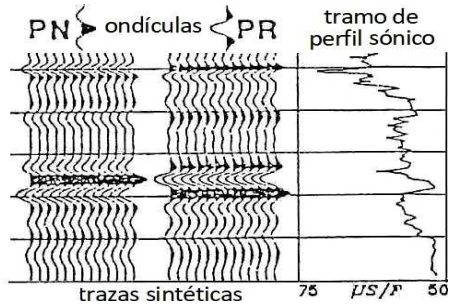


Respuesta inversa de δ vs ΔT ; ver texto.

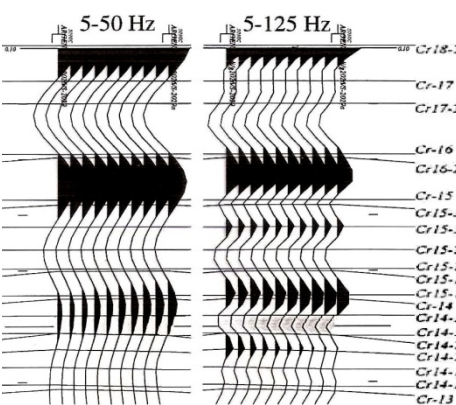
Arriba, un caso en que la velocidad y la densidad tienen comportamiento inverso, típicamente una evaporita. En la figura a la izquierda, cotejo de sismogramas sintéticos procesados: o con densidad constante, o con la que mide el perfil. Se trata de un pozo de la cuenca Golfo San Jorge y puede verse que en este ejemplo la densidad real sólo es importante en una interfaz a unos 1.250 mbbp.

Sismograma sintético computado a partir del ΔT pero con y sin δ en un pozo de Chubut mostrando que en este caso δ es prescindible (gentileza Tecpetrol)

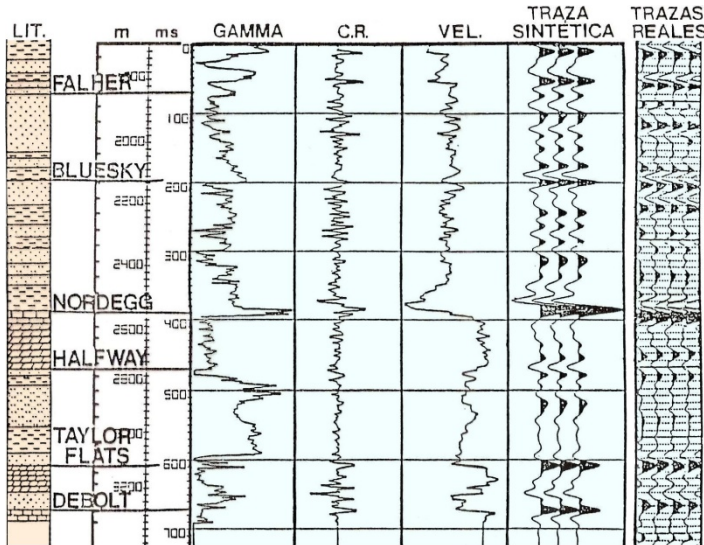
A la derecha, un sismograma sintético procesado alternativamente con una ondícula de **polaridad normal o reversa** según la **convención americana**. En el primer caso un incremento de la impedancia se corresponde con un pico (*pick*). En el segundo, con un valle (*through*). La convención europea es a la inversa. El proceso simultáneo con las dos polaridades es práctica común, de modo que en la interpretación se pueda cotejar con las secciones de sísmica de superficie (2 o 3D) en una u otra polaridad según corresponda (y de paso puede verificarse si la polaridad reportada en la sección o volumen es correcta). Además, **al colgar la traza sintética sobre la sísmica deben controlarse los planos de referencia**. Si difieren, la traza creada es movida en vertical hasta hallar coincidencia. La diferencia en tiempo doble puede ser aproximadamente calculada con la velocidad de reemplazo (de la capa consolidada bajo la meteorizada) usada en la corrección estática. Acá al lado se ve un detalle de traza sintética procesada alternativamente con frecuencias máximas de 50 y 125 Hz. El segundo caso provee mayor resolución y se acerca (sin llegar) a la posibilidad de inferir sísmicamente las capas más espesas de la formación C. Rivadavia.



Sónico y sismograma en polaridad normal PN y reversa PR (modif. de Schlumberger)



Sismograma creado con dos frecuencias máximas distintas y cotejo con niveles estratigráficos (gentileza Tecpetrol)

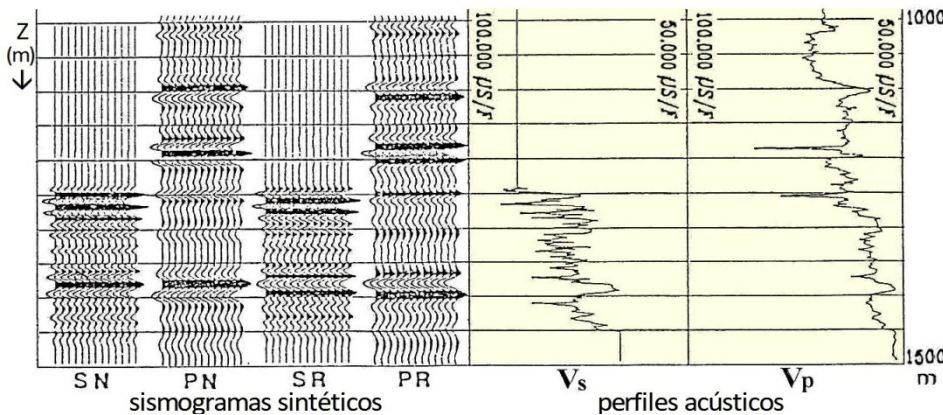


Sin embargo, la única que vale para comparar es la que se equipara con las frecuencias realmente cosechadas con la sísmica de superficie: las menores lamentablemente.

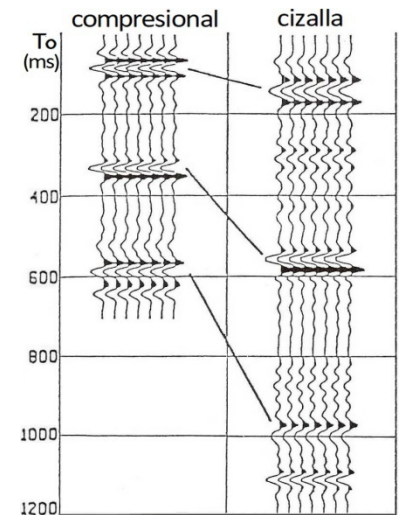
A la izquierda, perfiles de un pozo y litologías (de muestreos, sean recortes, testigos laterales o testigos corona, o deducidas a partir de datos de perfiles) que son correlacionadas con el sismograma sintético creado y con una angosta franja de la sísmica real, se trate de 2 o 3D.

Otra opción, para casos especiales, es la de generar sismogramas sintéticos de ondas S a partir de acústicos dipolares, como se ilustra a continuación escalado en tiempo y profundidad (por su costo el dipolar abarca sólo una parte y el obtenido de ondas P cubre el total).

Desde la izquierda, litologías, formaciones, profundidad, rayos γ , coeficientes de reflexión, velocidades acústicas y cotejo de la traza sintética con una franja de sísmica real (modificado de Halliburton)



Acústicos de ondas P y S con los que fueron generados los sismogramas de polaridad normal –SN y PN– y reversa –SR y PR– mostrados en escala vertical métrica, que no es lo usual, y por ello tienen el mismo largo. (figuras modificadas de Baker Atlas)



cotejo de sismogramas sintéticos
Los tiempos son más largos para las ondas S que viajan más lento.

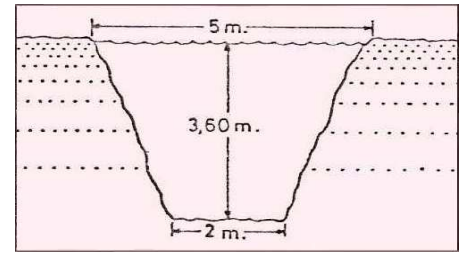
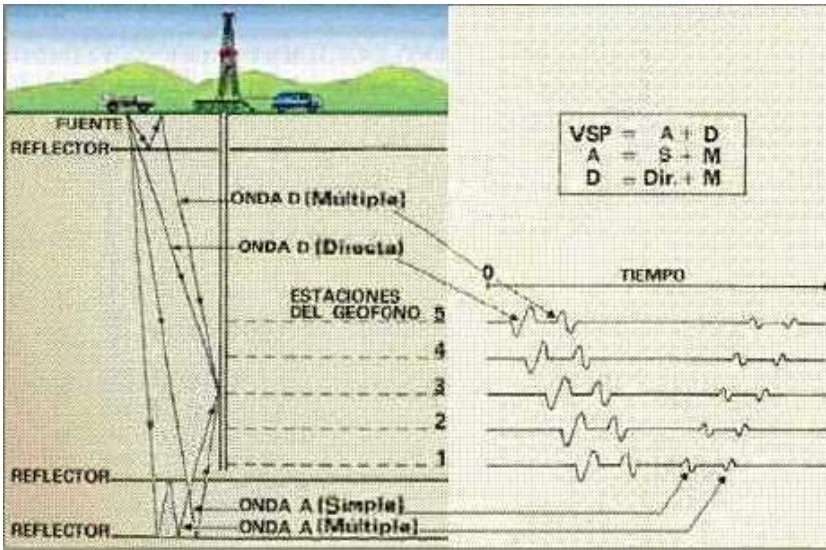
Con todo, el sismograma sintético sigue siendo un producto artificial, con limitaciones inherentes al modelo teórico que le da origen. Estos modelos toman datos de velocidad y densidad de perfiles de pozo que, aun corregidos, pueden no coincidir con lo que ve una onda sísmica al atravesar el subsuelo. Además suponen estratificación horizontal –aunque con bastante mayor tiempo de procesamiento podría hacerse un modelo de capas buzantes–, computan incidencia vertical del rayo sísmico –también podría simularse incidencia inclinada–, asumen conocer el tipo de ondícula –que puede realmente conocerse si se la extrae de la sísmica de superficie– y además están limitados por la extensión del registro acústico en el pozo, es decir sólo suministran información de los estratos perfilados en el sondeo y no de los ubicados por debajo. Una traza sintética es, en suma, de importantísima ayuda para la puesta en profundidad de la sísmica de superficie, pero **no es lo Más**.

Perfil Sísmico Vertical (Vertical Seismic Profile o VSP)

Concebido en los Estados Unidos entre 1953 y 1958 por Jolly, Riggs, Clifford, Levin y Lynn, fue desarrollado en la Unión Soviética con gran efectividad. Así, para superar las limitaciones de una traza sintética, se puede recurrir a un VSP –a un costo bastante mayor– que analiza no sólo el primer arribo de la onda directa sino todo el tren de ondas y donde las posiciones de geófono son equiespaciadas entre 15 y 30 metros a lo largo del pozo. Este intervalo de muestreo espacial mínimo dependerá de la frecuencia máxima esperada y de la velocidad mínima esperada en la zona de interés. Según el teorema de muestreo de Nyquist, que ya hemos citado en el Tema 14, para evitar el doblamiento o *aliasing* espacial, dados ciertos valores de velocidad mínima ($V_{\text{mín}}$) y frecuencia máxima (F_{max}), la **separación entre geófonos** deberá ser: $\Delta Z(m) < V_{\text{mín}}(m/s) / 2 F_{\text{max}}(Hz)$

El campo de ondas sísmicas presentes en el VSP se divide en ondas descendentes (*down*) y ascendentes (*up*), con

sus correspondientes múltiples, lo cual puede ser visualizado en la figura de la izquierda.

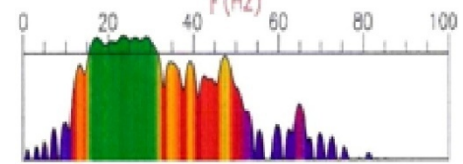


Medidas de foso para cañón de aire.

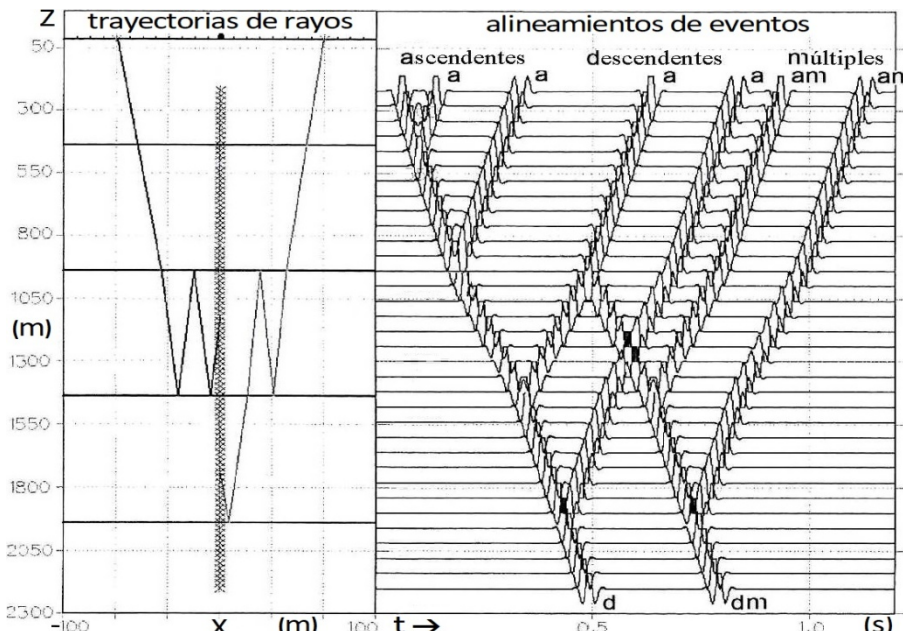
Arriba, medidas recomendables del foso donde se sumerge un cañón de aire en agua o lodo de perforación, para ser empleado como fuente en tierra, donde, sin embargo, la fuente más común es el camión vibrador.

Todas las otras fuentes conocidas son utilizables en mar o tierra, según sea el caso específico.

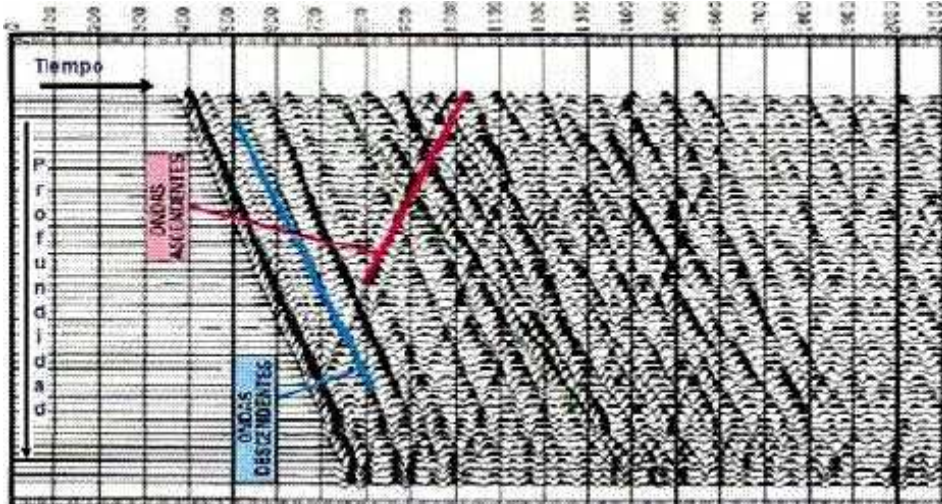
Aquí se representa un espectro de frecuencias típico, el cual va siendo monitoreado durante la adquisición y naturalmente siempre resulta más rico en altas frecuencias en la porción más somera del pozo en evaluación.



Espectro de frecuencias en pozo.

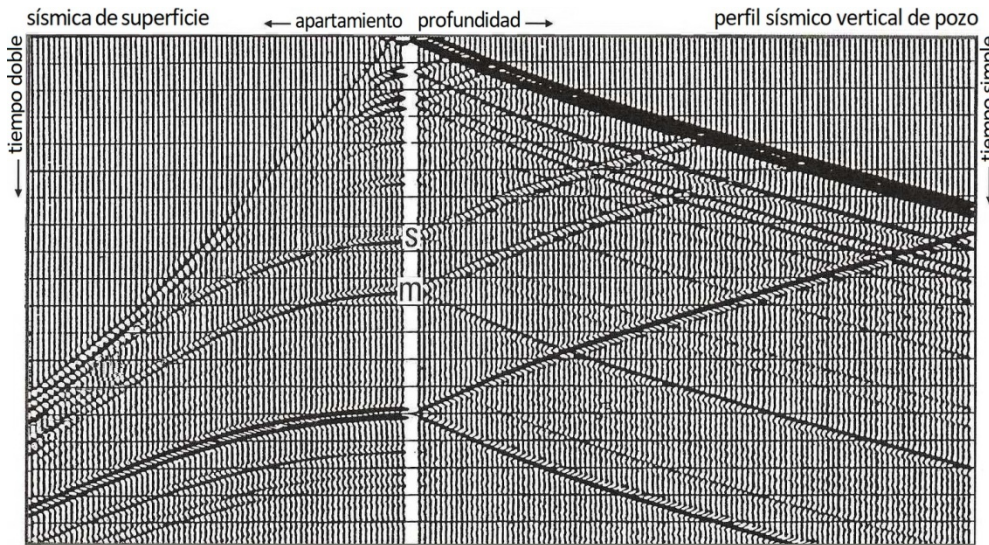


Arriba, esquema de rayos registrados en un perfil sísmico vertical. Abajo, registro real del mismo; ver texto (figuras modificadas de Schlumberger)



El campo ascendente de ondas es separado del descendente y después se efectúa un procesamiento de los datos semejante, aunque un poco más sencillo, que el aplicado en la sísmica desde la superficie. Al visualizar todo el conjunto de trazas resulta posible identificar fácilmente las reflexiones múltiples que pudieran haberse producido, lo cual es un dato de gran utilidad para identificarlas luego si

estuvieran presentes en la sísmica de superficie (2 o 3 dimensiones), y eventualmente eliminarlas en un posterior reproceso de esta última. Abajo se ilustra comparativamente la familia de trazas de superficie que corresponde a la locación del pozo (con tiempo vertical de ida y vuelta) y la familia de trazas del perfil sísmico vertical (con tiempo sólo de ida), distinguiéndose, entre otras, una reflexión simple y su correspondiente múltiple, que no es tan evidente en los datos superficiales porque no se la ve iniciar descolgada como sí ocurre en los datos del VSP.



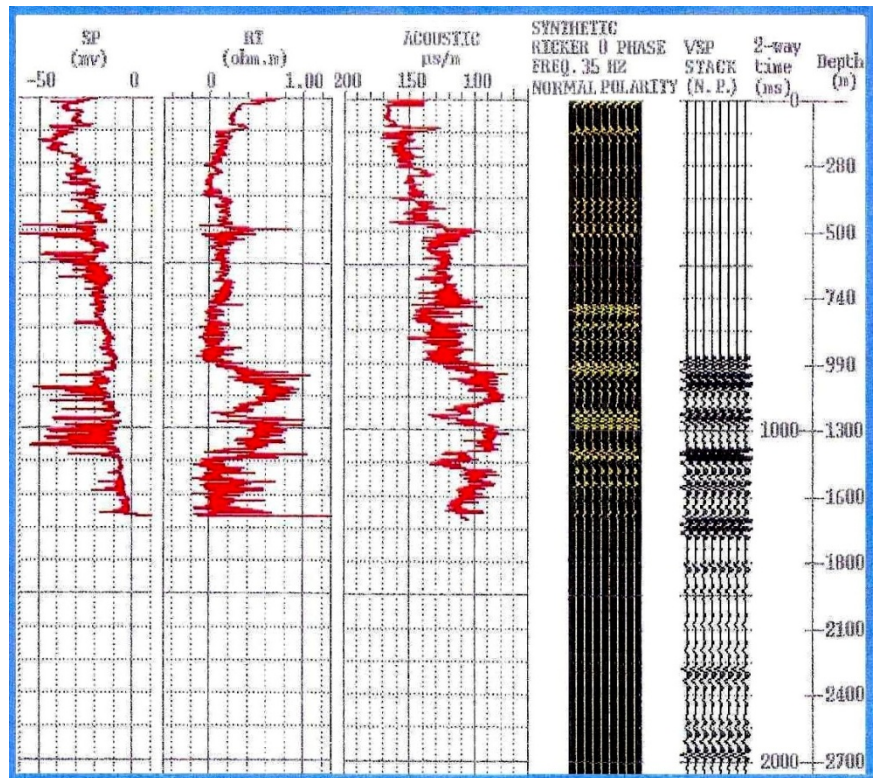
Correspondencia entre familias de trazas de sísmica registrada desde superficie y desde pozo; S: reflexión simple, m: múltiple de S; ver texto (modificado de Schlumberger)

Las trazas de la familia de pozo (o sea las registradas durante el VSP) luego son sumadas y se obtiene una única traza sísmica real apilada en la posición del sondeo. Ésta abarca desde la última posición del geófono, es decir la más superficial, normalmente la número 40, ya que ése es el número mínimo de estaciones recomendadas para poder conseguir una buena traza suma. Y que además llega no solamente hasta la primera posición de recepción (que es la más profunda) sino hasta

muchos metros por debajo del fondo del pozo: 1.000 o más, teóricamente tanto como se desee, asumiendo que la calidad se deteriora con la profundidad. El tiempo de representación de la traza apilada final resulta doble porque se suman los tiempos verticalizados de las ondas descendentes más los que corresponden a las ondas que ascienden hasta la misma posición de anclaje del geófono.

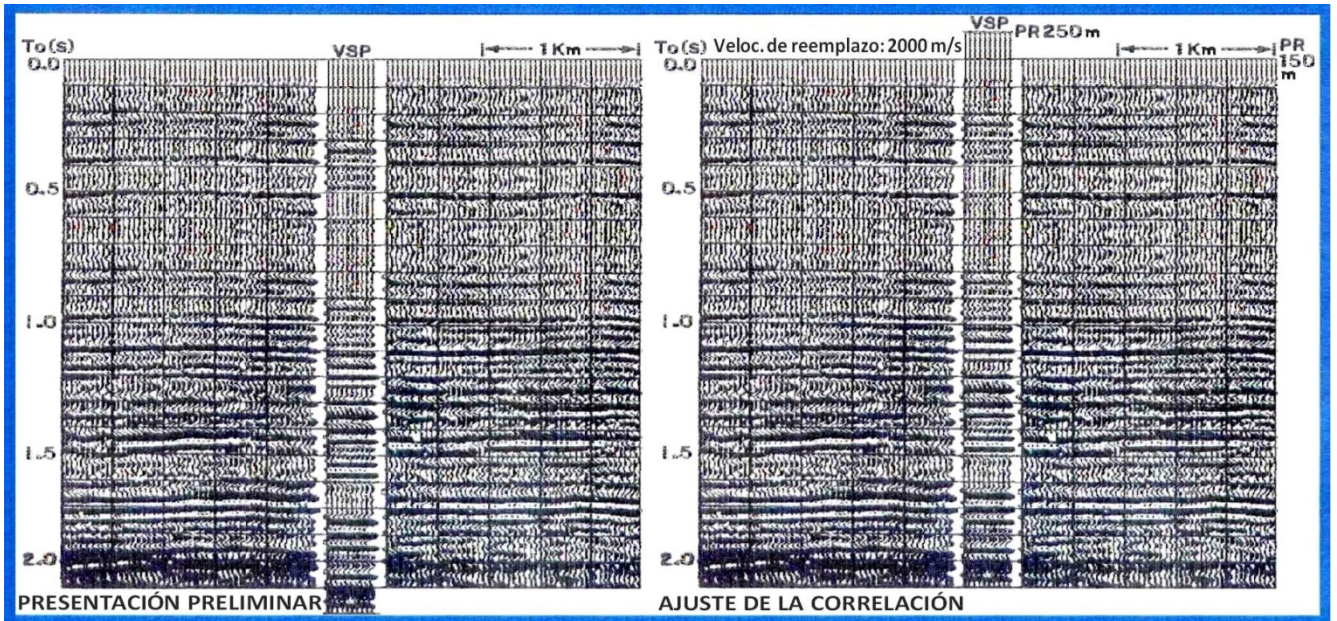
El tramo superior del pozo, si no queda cubierto por el perfil sísmico vertical –lo cual suele ser así por su falta de interés aplicado–, se completa con algunas estaciones de prueba convencional para poder calibrar el perfil sónico también en ese tramo y consecuentemente, sin gastar mucho, poder ajustar el sismograma sintético, que habrá de tener alguna utilidad en ese sector superior carente de una traza real de pozo. Esto se ilustra a la derecha. Lo comentado acerca de colgar la traza sintética respecto a la sísmica de superficie (verificando planos de referencia, polaridades y aspecto general de las reflexiones) funciona del mismo modo con esta traza real del perfil sísmico vertical (figura al inicio de la página siguiente).

Un VSP generalmente tiene mayor resolución que la sísmica 2 o 3D porque las ondas viajan menos y por consiguiente tienen menor atenuación de sus altas frecuencias. Esta no es una ventaja para la correlación entre ambas sísmicas y, de hecho, se puede aplicar un filtro corta-altos sobre la traza del VSP para asemejarla a



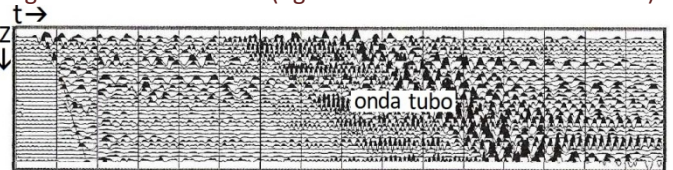
Perfiles de potencial espontáneo, resistividad y acústico, traza sintética creada con este último y traza real del perfil sísmico vertical (modificado de Baker Atlas)

las trazas de superficie. Pero esta mejor resolución de pozo puede ser útil para algún eventual proceso especial de la sísmica superficial (inversión de trazas, realce de las frecuencias u otros que se abordan en el Tema 18).



Arriba, ajuste de un VSP con la sísmica de superficie. Abajo, registro con onda tubo. (figuras modificadas de Baker Atlas)

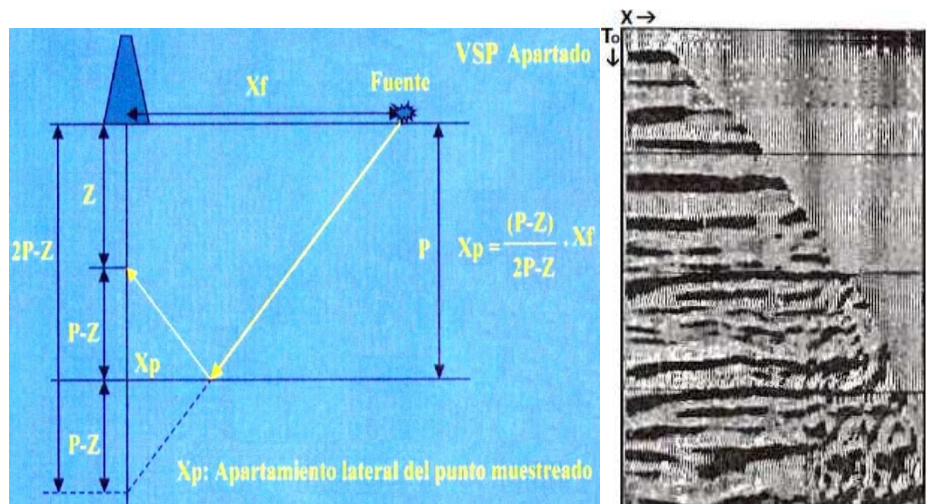
De modo que, *al igual que una prueba de velocidad, el VSP también permite construir una ley de velocidad*, pero además provee un **sismograma real** de pozo, la visualización debajo de él y, como *bonus*, denunciar reflexiones múltiples que se colaron.



Si el pozo abierto tiene mal calibre, quizá el perfil sísmico vertical podrá únicamente registrarse a pozo entubado, por los problemas de anclaje de la herramienta en las cavernas. Pero entonces es más factible que aparezcan en los registros las ondas tubo (de Stonley) que en este caso son ruidos que pueden invalidar un VSP. Acá arriba vemos su registro, en general más notorio en un geófono horizontal que en uno vertical (recordar que son 3, en *x, y, z* en la herramienta triaxial). Las tubo pueden atenuarse bajando el nivel de lodo (en el tramo de cañería guía) o reubicando la fuente tal que haya una zanja o pileta entre ésta y la boca de pozo. Pero si el problema no halla solución, se tendrá que desistir de registrar el VSP y alternativamente conformarse con una prueba de velocidad (*checkshot*) si los primeros arribos están libres de ruido, lo que servirá para tener un mejor sismograma sintético (si se ha registrado el acústico, cosa que casi siempre se hace).

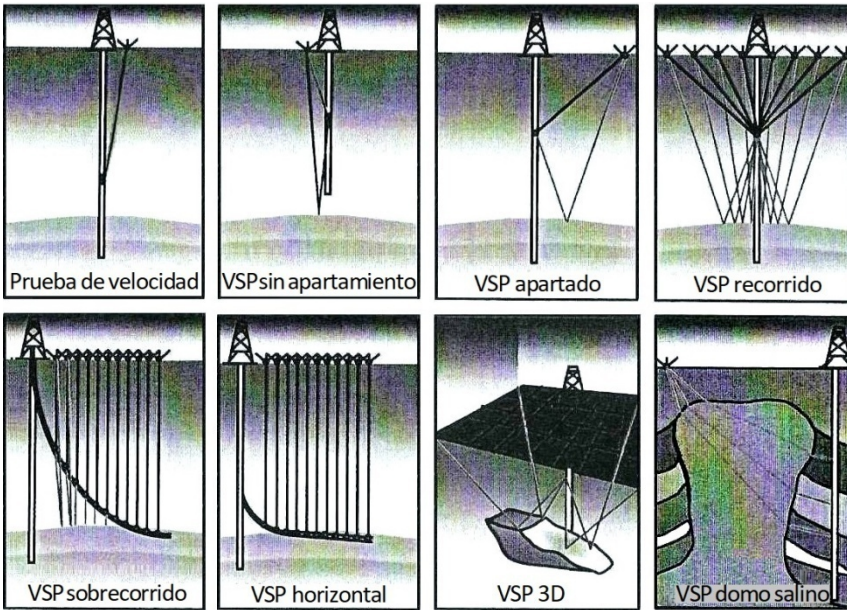
Sísmica de Pozo Apartada

Existe una gran variedad de registros con apartamientos que permiten la obtención de secciones sísmicas angostas hacia los lados de los pozos perfilados –es decir, diversas trazas apiladas– a fin de tener información con la que resolver cuestiones estratigráficas o estructurales cuando no existe sísmica previa con tales rumbos o la hay pero no es de buena calidad. El caso más típico es el **VSP apartado** (*offset VSP*). En



Cálculo del apartamiento de un punto de reflexión y a la derecha una sección real de VSP apartado (modificado de Baker Atlas)

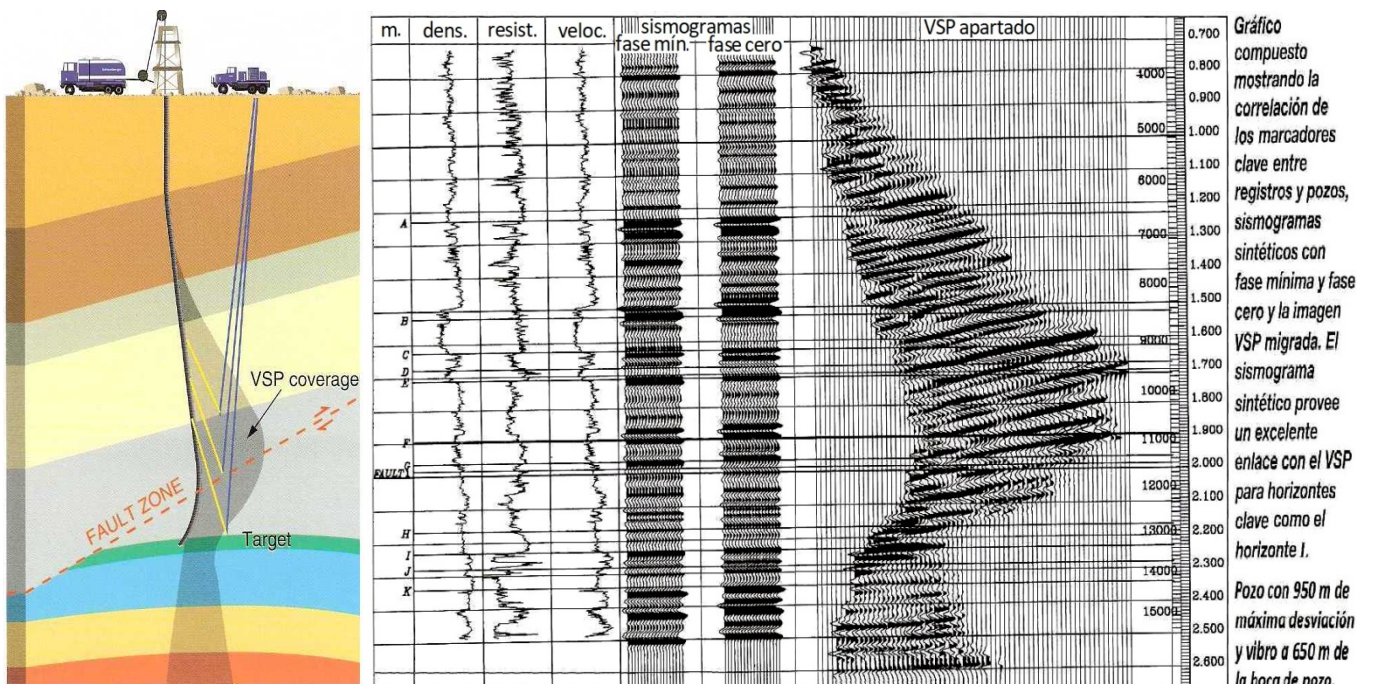
él se aleja la fuente a una posición fija a cientos de metros de la boca de pozo, tal como se esquematiza aquí arriba, y entonces se registran las habituales 40 estaciones o más, como en un VSP sin apartamiento.



Diferentes configuraciones de VSP (modificado de Baker Atlas)

Otra variante es el **VSP recorrido** (*walkaway*) en cuyo caso se recurre a varias posiciones de fuente a distintas distancias de la boca de pozo, pero se limita el número de posiciones de recepción a unas pocas dentro del sondeo. También se emplean las alternativas de **VSP sobrecorrido** (*walkabove*) y el **horizontal** para pozos dirigidos. Otro es el **multi-azimut**: serie de VSP apartados con varios rumbos en un mismo pozo, sea vertical o dirigido (figura en pág.409). Y existen otras configuraciones de adquisición que se esquematizan en la figura a la izquierda.

Tierra del Fuego: modelado, mapa y sección de VSP apartado en pozo dirigido bajo el mar (de J. Erlicher y L. Chelotti)



Modelo y registro procesado de un VSP en un pozo dirigido en la cuenca Noroeste de Argentina (modific. de Schlumberger)

Gráfico compuesto mostrando la correlación de los marcadores clave entre registros y pozos, sismogramas sintéticos con fase mínima y fase cero y la imagen VSP migrada. El sismograma sintético provee un excelente enlace con el VSP para horizontes clave como el horizonte I. Pozo con 950 m de máxima desviación y vibro a 650 m de la boca de pozo.

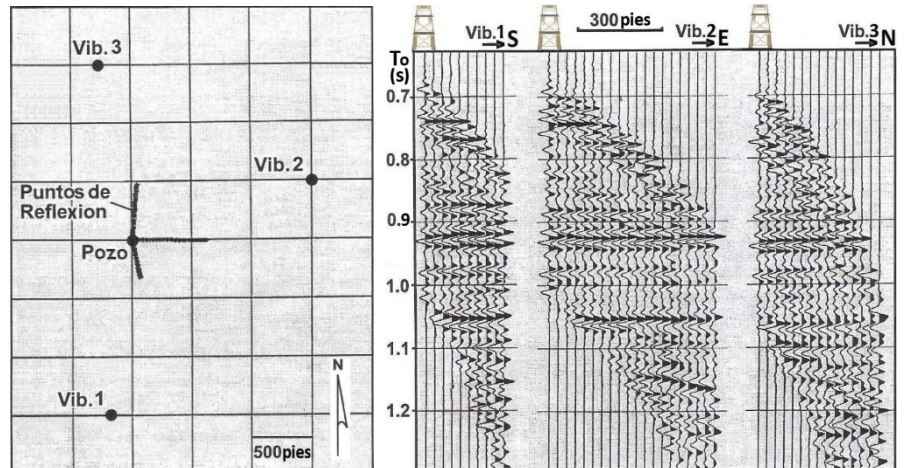
Sísmica de Pozo al Perforar

También se puede registrar sísmica durante el perfilaje simultáneo (LWD, Logging While Drilling). Se puede operar con el trépano oficiando de fuente mientras perfora, con un geófono triaxial registrando en la superficie (ver Carcione *et al.*, 2001), técnica que suele generar una ondícula muy mala—. O bien con un geófono ubicado como parte del conjunto de fondo en la misma columna de perforación y una fuente en la superficie (vibro, cañón de aire u otra) que es la opción casi siempre empleada. Pero, incluso en este segundo caso, los registros obtenidos durante la perforación nunca son de buena calidad, por más que durante los segundos de adquisición se procura perforar suavemente. La razón de su empleo es que permite predecir las formaciones que serán atravesadas para ajustar entonces correctamente el momento de dejar de perforar para proceder a operaciones críticas.

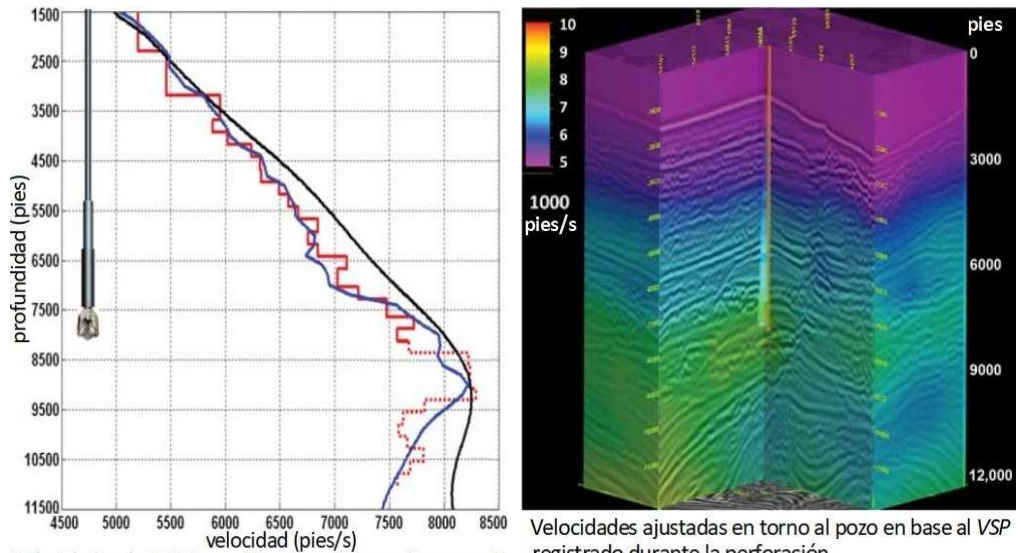
Situaciones típicas son *ensayos* a pozo abierto, *coroneo* de reservorios y *entubamiento* previo a una zona sobrepresionada (ejemplo acá arriba) o a la entrada a un diapiro para cambiar la composición o densidad del lodo en función de las condiciones geológicas o de reservorios que se intenta atravesar sin dañar. También se puede recurrir a esta técnica cuando se está haciendo el *seguimiento de una perforación* a lo largo de un reservorio, ya sea horizontal o de muy bajo ángulo (como la formación Springhill en la cuenca Austral marina).

Registros de Ondas S

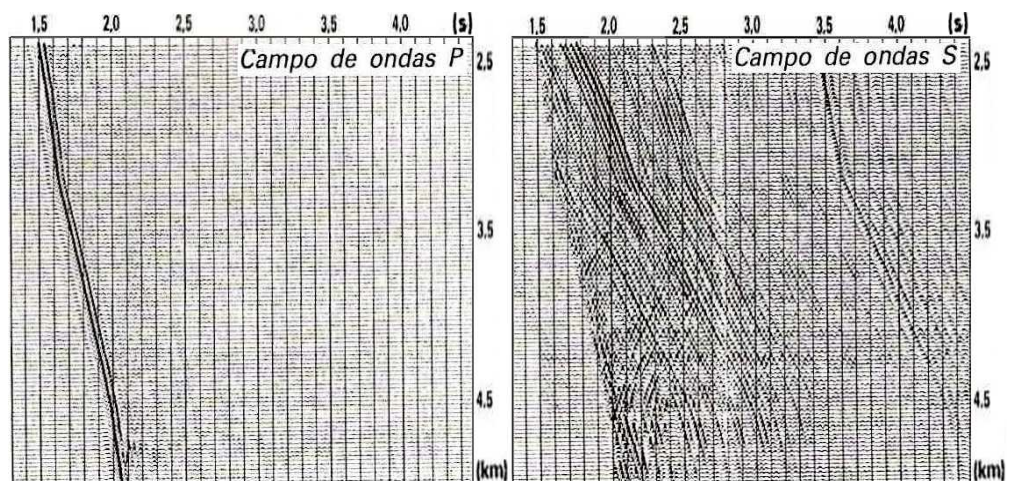
En cualquiera de las modalidades de los VSP se puede optar por adquirir, además de las ondas longitudinales, también las transversales, alargando el tiempo de registro y procesando la información de los canales horizontales del geófono de pozo, que desde hace muchísimos años es rutinariamente triaxial (son tres geófonos en x, y, z). No es necesario



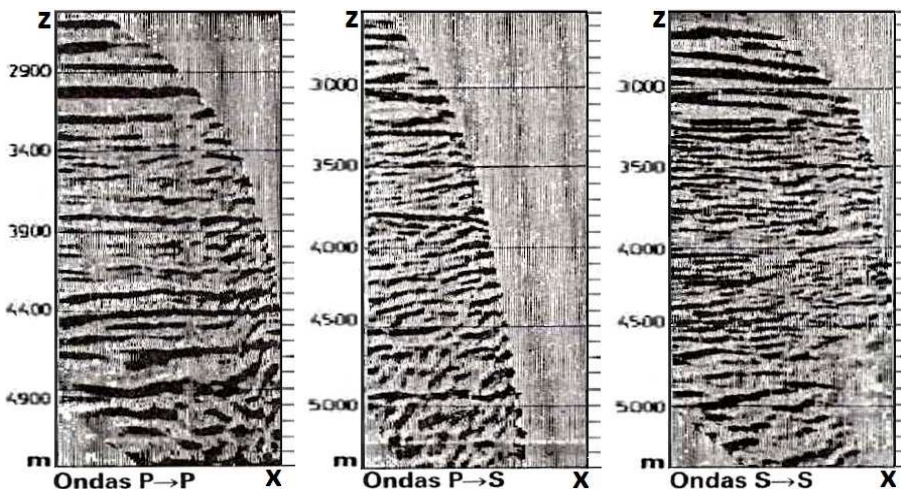
Mapa y secciones de VSP multiazimut (modificado de Schlumberger)



Velocidades de VSP: interválticas en rojo y medias en azul. En negro velocidades medias estimadas antes del VSP. Obsérvese la caída de velocidad en el fondo a causa de una zona sobrepresionada (modificado de Esmer soy *et al.*, 2013)



Familias de trazas de ondas P y S en un VSP apartado (modificado de Schlumberger)

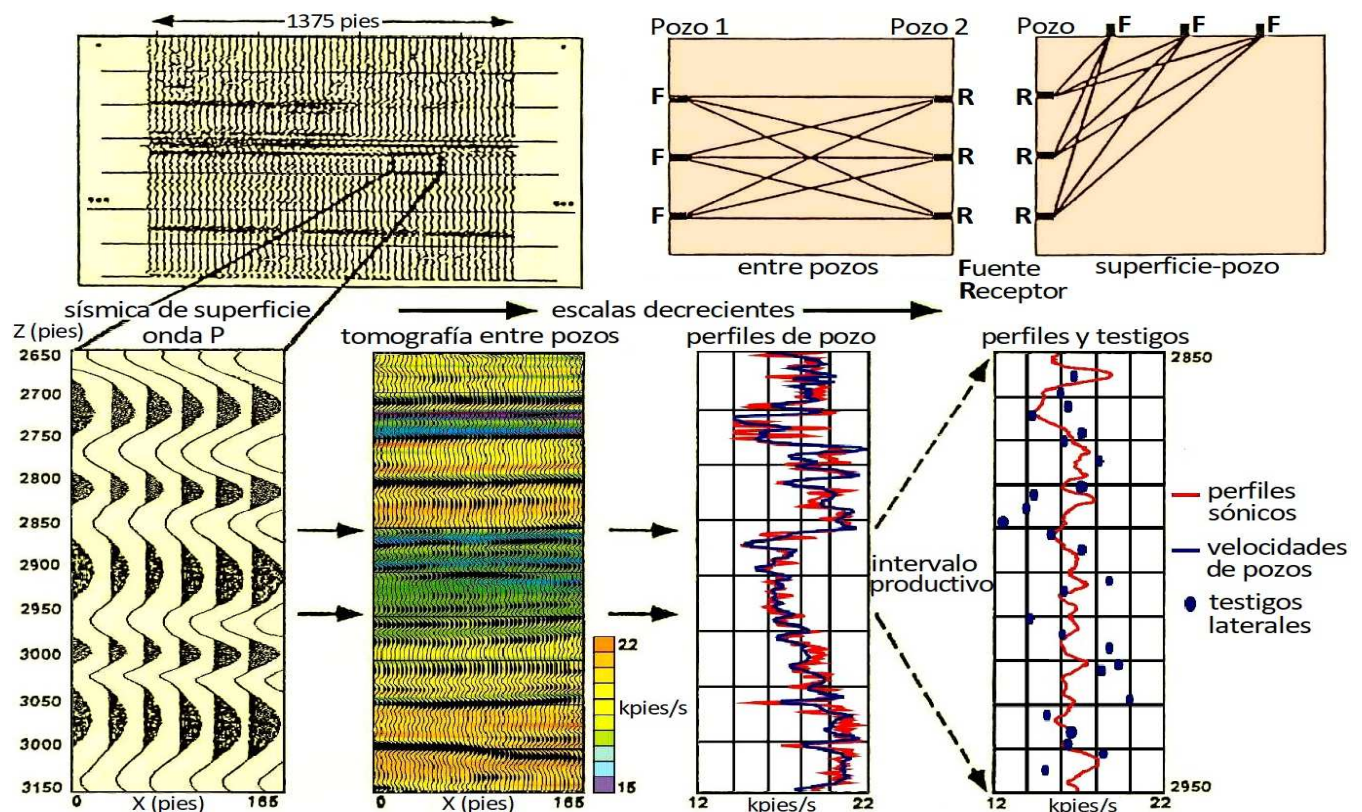


cambiar la fuente de energía, ya que las ondas S igual se producen desde tales fuentes convencionales en tierra –no así en el mar–, y además también se generan ondas S en el subsuelo por conversión de modo de las P (véanse las figuras).

VSP apartado de ondas sólo P –PP–, de ondas S creadas en subsuelo por conversión de modo –PS– y de ondas S que partieron como tales desde la fuente sísmica –SS–; el PS cubre menor distancia horizontal por efecto del cambio de ángulo por la ley de Snell (modificado de Schlumberger)

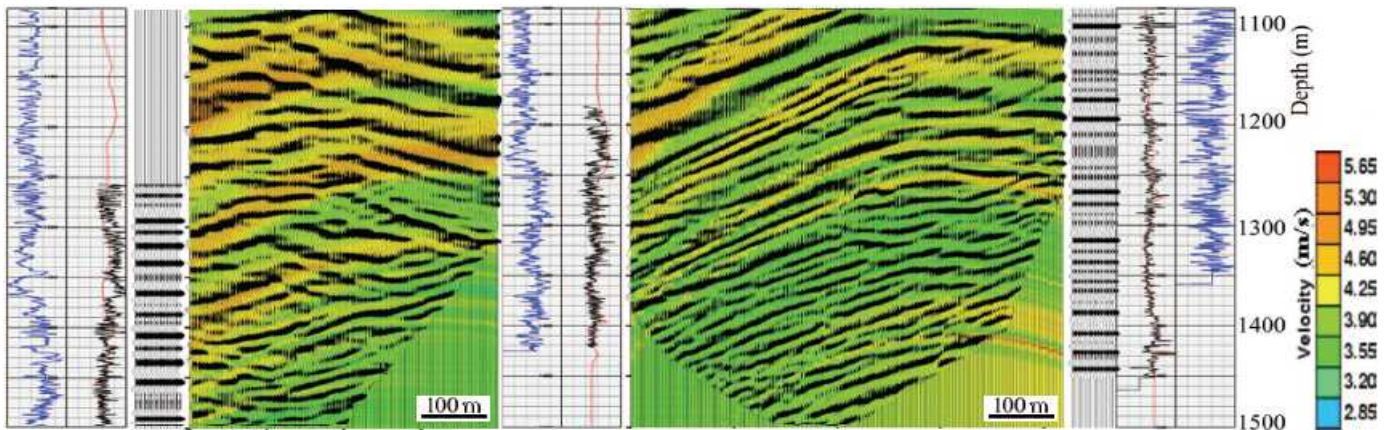
Tomografía Sísmica entre Pozos (crosswell seismic tomography)

Consiste en aplicar técnicas no convencionales de adquisición que procuran el registro de pozo de las más altas frecuencias posibles para una resolución de mucho detalle. Esto puede hacerse con una técnica pozo-superficie (tipo VSP recorrido), o bien entre dos o más pozos, con la fuente (electrocánula u otra) desplazándose dentro de uno de ellos y los receptores dentro del otro u otros pozos. En cualquiera de los dos casos es determinante el distanciamiento fuente-receptores para poder obtener las altas frecuencias que se buscan, lo que implica sondeos poco profundos (en general no más de 1.000 m) si se emplea la técnica pozo-superficie: es como un VSP apartado somero y con cañón de aire pueden favorablemente alcanzarse 800 Hz de frecuencia y 3 m de resolución vertical. O pozos cercanos entre sí (ideal no más de 200 m) en la técnica pozo-pozo, aunque a mayores distancias también puede hacerse con resultados menos óptimos. Pero además se requiere de una geología favorable, con buenos contrastes de impedancia acústica entre las capas de interés, donde se realiza un procesamiento muy cuidado para maximizar la relación señal/ruido y se emplea un modelado iterativo (para minimizar errores) con un algoritmo por trazado de rayos. Se va comparando con datos acústicos del sondeo, operando en celdas a las que se asignan magnitudes como velocidad y factor de atenuación. Las siguientes figuras ilustran estas técnicas.



Esquema de las técnicas tomográficas pozo-pozo y superficie-pozo; se ilustra una aplicación comparada con sísmica convencional de superficie, datos de perfil sísmico y testigos laterales (modificado de Harris & Langan, 1997)

Un caso entre superficie y pozo somero (50 m) aplicado al cateo carbonífero puede verse en Kragh *et al.*, 1991.



Imágenes tomográficas entre pozos en el yacimiento Jiangnan, China; en azul perfil de rayos γ ; negro, acústico; rojo, velocidades tomográficas; sismogramas sintéticos en negro y tomografías en colores (modificado de Dong *et al.*, 2005)

Este último ejemplo en China es evidencia de la permanente búsqueda de conocimiento y recursos. Hay todavía combustible para alientos de fuego (para desgracia del medioambiente). Pero dragones todavía no aparecen.

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Qué distintos tipos de registros pueden obtenerse con sonares en mares y lagos?
- Explicar brevemente los distintos tipos de herramientas acústicas de pozo y sus aplicaciones.
- ¿Qué pasos deben seguirse para obtener un sismograma sintético?
- Señalar los motivos por los que los tiempos integrados del acústico no coinciden con los que da la sísmica y explicar qué es la calibración de un sónico.
- ¿Por qué en una Prueba de Velocidad sólo interesan los tiempos de primer arribo y en un VSP importa todo el tren de ondas?
- Indicar las ventajas de un Perfil Sísmico Vertical convencional.
- ¿Qué variantes de un VSP permiten obtener más de una traza apilada?, ¿qué información útil pueden brindar?
- ¿Para qué puede servir registrar sísmica durante la perforación?
- ¿Para registrar sísmica de onda S, qué tipos de fuentes pueden emplearse y cómo se trabaja?
- Comentar sumariamente las técnicas de tomografía sísmica de pozos.

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Brown, C., Beaudoin, J., Brissette, M. & Gazzola, V., 2019. Multispectral multibeam echo sounder backscatter as a tool for improved seafloor characterization. *Geosciences*, V.9 N°126 (19 p).
- Bull, J., Gutowski, M., Dix, J., Henstock, T., Hogarth, P., Leighton, T. & White, P., 2005. 3D chirp sub-bottom imaging system: Design and first 3D volumen. *International Conference Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, Proceedings* (6 p).
- Carcione, J., Petronio, L., Poletto, F., Seriani, G. & Miranda, F., 2001. A 3D elastic modelling code for seismic well propagation and 3D SWD surveys. *Science and Supercomputing at CINECA Report* (p 318-323).
- Dong, Q., Marion, B., Meyer, J., Xu, Y. & Xu, D., 2005. Imaging complex structure with crosswell seismic in Jiangnan oil field. *The Leading Edge*, V.24 N°1 (p 18-23).
- Ellis, D. & Singer, J., 2007. *Well logging for Earth scientists* (p 479-595). Springer.
- Esmersoy, C., Ramirez, A., Teebenny, S., Liu, Y., Shih, C., Sayers, C., Hawthorn, A. & Nessim, M., 2013. A new, fully integrated method for seismic geohazard prediction ahead of the bit while drilling. *The Leading Edge*, V.32 N°10 (p 1222-1233).
- Gardner, G., Gardner, L. & Gregory, A., 1974. Formation velocity and density –The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, V.39 (p 770-780).

- Hardage, B., 1985. Vertical seismic profiling - A measurement that transfers geology to geophysics. En Seismic stratigraphy II (p 13-34); Berg, O. & Woolverton, D. Eds. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 39.
- Harris, J. & Langan, R., 1997. Crosswell seismic fills the gap. En Geophysical Corner, A.A.P.G. Explorer (p 173).
- Hartse, H. & Knapp, J., 1990. Understanding offset VSP. The Leading Edge, V.9 N°4 (p 30-36).
- Hornbach, M., Mann, P., Frohlich, C. & Ellins, K., 2011. Assessing geohazards near Kingston, Jamaica: Initial results from chirp profiling. The Leading Edge, V.30 N°4 (p 410-413).
- Hornby, B., Yu, J., Sharp, J., Ray, A., Quist, Y. & Regone, C., 2006. VSP, beyond time to depth. The Leading Edge, V.25 N°4 (p 446-452).
- Kang, M., 2011. Analysis of the ME70 multibeam echosounder data in echoview-current capability and future directions. Journal of Marine Science and Technology, V.19 N°3 (p 312-321).
- Kragh, J., Gouly N. & Findlay, M., 1991. Hole-to-surface seismic reflection surveys for shallow coal exploration. First Break, V.9 N°7 (p 335-344).
- Lawrence, M., 2004. Acousting monitoring of the global ocean for the CTBT. Acoustics, Proceedings (p 455-460).
- Lubis, M., Kausarian, H. & Anurogo, W., 2017. Review: Seabed detection using application of image side scan sonar instrument (acoustic signal). Journal of Geoscience, Engineering, Environment and Technology, V.2 N°3 (p 230-234).
- McQuillin, R., Bacon, M. & Barclay, W., 1985. An introduction to seismic interpretation (p 59-69). Gulf Publishing.
- Pramanik, A., Singh, V., Promod, P., Kumar Srivastava, A. & Sinha, D., 2000. Utilization of multi-azimuth offset VSP surveys for reservoir mapping: A case study. Proceedings E.A.G.E. (9 p).
- Ramanantoandro, R., 1979. Estimation of the dispersion of compressional waves in rocks from ultrasonic to seismic frequencies. Journal of Geophysics, V.46 N°4 (p 451-454).
- Raymer, L., Hunt, E. & Gardner, J., 1980. An improved sonic transit time-to-porosity transform. SPWLA 21st Annual Logging Symposium, N°1980-P.
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. Basic exploration geophysics (p 536-539). John Wiley & Sons.
- Schlumberger, 1972. Fundamentos de interpretación de perfiles (p 49-56, 145-148).
- Schlumberger, 1987. Evaluación de formaciones en la Argentina, cap: II (p 1-40), IV (p 22-30), VI (p 8-11).
- Schlumberger, 1990. Sísmica de pozo (42 p).
- Schultz, P., 1999. The seismic velocity model as an interpretation asset (234 p). Distinguished Instructor Series N°2, Society of Exploration Geophysicists.
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Sheriff, R. & Geldart, L., 1995. Exploration seismology (p 128-133, 487-504). Cambridge University Press.
- Stewart, R. & Disiena, J., 1989. The values of VSP in interpretation. The Leading Edge, V.8 N°12 (p 16-23).
- Tang, X. & Patterson, D., 2009. Single-well S-wave imaging using multicomponent dipole acoustic-log data. Geophysics, V.74 N°6 (p 211-223).
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 347-350 y 798-800). Cambridge University Press.
- Western Atlas, 1994. Introducción al perfilaje de pozos (cap. 6; 175 p).
- Western Atlas, 1996. Sísmica de pozo y perfil sónico (48 p).
- Wyllie, M., Gregory, A. & Gardner, L., 1958. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. Geophysics, V.23 (p 459-493).
- Wong, J. & Stewart, R., 2007. Velocity tomography and reflectivity imaging using crosswell seismic data from the Noel tight gas field. CREWES Research Report, V.19 (13 p).
- Zhou, Q., Li, X., Zheng, J., Li, X., Kan, G. & Liu, B., 2024. Inversion of sub-bottom profile based on the sediment acoustic empirical relationship in the Northern South China Sea. Remote Sensing, V.16 N°4 (19 p).

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.