

## PROCESAMIENTO SÍSMICO

*“Lo que Natura non da,  
Processing non presta”*

clásico refrán de los analistas



Mecanismo de Antikythera  
(foto Museo Arqueológico Atenas)

Cerca del 80 a.C., casi dos milenios antes que el Titanic, naufragó un barco griego entre la península del Peloponeso y la isla de Creta, muy cerca de la pequeña isla de Antikythera. En 1901 unos afortunados buzos recuperaron monedas, joyas, estatuas, alfarería y vidriería desde 45 metros de profundidad, y muy en especial un complejo mecanismo de engranajes de bronce corroído (imagen arriba), suerte de reloj-calculadora capaz de predecir eclipses solares y lunares, posiciones planetarias y fechas de juegos olímpicos en base a sistemas aritméticos babilónicos. Es la más sofisticada computadora analógica conocida del mundo antiguo.

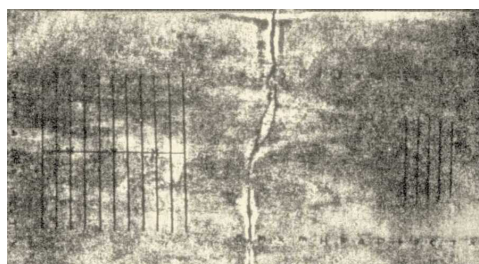


Isla de Antikythera, Grecia (foto kythira.gr)

Los astrolabios utilizados para navegación, agrimensura y astronomía también han sido computadoras analógicas. Permitían definir distancias, posición de los astros y la hora o bien la latitud. Se cree que el griego **Hiparco de Nicea** creó el primero allá por el 150 a.C. Mejorados por los árabes, se los usó hasta la invención del sextante en 1750.

El reloj del Castillo, pergeñado por el kurdo **Abu al-Jazarí** en 1206, era una compu analógica que mostraba el zodiaco, los desplazamientos del Sol y la Luna, tenía cinco tipos de música robótica (onda *ringtones*) y podía reprogramar la duración del día y la noche según la latitud y la fecha. Además al-Jazarí inventó varios vistosos autómatas.

Muchísimo más antiguo que las computadoras analógicas fue el contador o ábaco, primer instrumento de cálculo, posiblemente originario de Sumeria cerca del 2500 a.C. en sistema sexagesimal (60 es práctico por ser el menor número divisible por 1, 2, 3, 4, 5 y 6, aparte de que cada estación tiene unos 90 días, de ahí los grados del ángulo recto). De esa época son las primeras *tablets*, no electrónicas, obvio, sino de arcilla o mármol como la creada por la cultura mesopotámica de Babilonia cerca del 300 a.C. sobre cuya superficie los cálculos se iban indicando con guijarros Y el ábaco chino denominado 算盤 (suanpan: bandeja contadora), un cuadro de ejecitos con bolitas o cuentas perforadas que está documentado cerca del 200 a.C. aunque su uso es probable desde siglos antes.

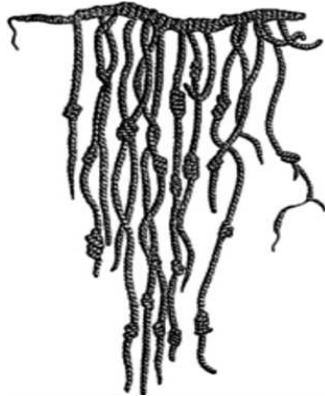


Tableta babilónica hallada rota en Salamis, Grecia (foto Museo Epigráfico Atenas)



Suanpan chino  
(foto Dave Fischer)

Quipus incaico (imagen Christian Mary)



Minarete medieval en Bagdad, Irak (foto mediastimage.com)

Templo Chaubis Khamba en Ujjain, India (foto indiatimes.com)

A su vez en la cultura Inca se emplearon los quipus (*kipu*, nudo), sistemas de cuerditas con nudos para contabilidad y posiblemente otras aplicaciones.

**Abu ibn Musa** nació en la region persa de Khwarizm (en castellano Corasmia) al sur del lago Aral (en vías de desaparición como el Colhue Huapi), hoy parte de Uzbekistán. Se mudó a Bagdad –el epicentro cultural de su época–, devino gran matemático y fue conocido como Musa al-Khwarizmi (o sea Musa, el de Khwarizm). Cerca del 830, investigando en la corte del califa al-Mamun, creó lo que se llamaría algoritmo (deformación de su gentilicio), es decir la resolución metódica de álgebra y cálculo mediante una definida sucesión de operaciones. Y calculó la circunferencia terrestre con muy poco error. La palabra guarismo también alude al bueno de Musa.

El vocablo álgebra procede del árabe الجبر (*al-ġabr*), reintegración. Y cálculo

viene del latín *calculus*, piedrita, por las bolitas de los ábacos (y las otras del riñón, etc.). Así como latino es el origen de contar y computar, ambas derivadas de *computare*: *putare*, evaluar; quizá con improprios...

El cero –como parte de la notación numérica posicional– es de origen indio. También lo descubrieron los mayas y lo habían descubierto ya los antiguos egipcios. Cero viene del latín *zephirum* y éste del árabe صفر (*sifr*), de donde también viene la palabra cifra, que a su vez resultó de la traducción del sánscrito शून्य (*shunya*: vacío).

Los chinos dicen que hay cosas que valen por lo que no son, como la ventana, que no es pared y antes, sin vidrio, dejaba pasar el viento además de la luz, y actualmente tenemos las virtuales de las compus y celus (de *wind*, *windows*). El indio **Brahmagupta** escribió en Ujjain en 628 su gran obra “ब्रह्मास फ़ासिख़ांत” (Brahmas phutasiddantha), La apertura del universo, donde explicó que el cero resulta de restar un número por sí mismo.

Los sabios moros de los califatos islámicos llevaron la numeración indoarábica a través de las arenas del Sáhara hasta hacerla llegar desde el Magreb (noroeste de África) hacia al-Ándalus (sur de España) cerca del 950. Y fue **Leonardo de Pisa**, apodado Fibonacci, quien dio cuenta del cero cuando en 1202 publicó su “*Liber abaci*” (Libro del ábaco). Se lo habían enseñado de chico en sus estudios de contabilidad en Bugia, ciudad del norte africano donde comerciaba su padre (hoy Bejaia, en Argelia; ahí había un gran mercado de las ceras y eran fabricadas delicadas velitas llamadas bujías). Pero a la (*non*) *Sancta* Iglesia Católica no le simpatizó el cero, ese símbolo de la nada, y prohibió su utilización durante dos siglos por considerarlo demoníaco...

Sabemos que nuestro sistema digital de cómputos se basa en la numeración binaria, 0 y 1, pasa corriente o no. El matemático indio **Pingala** había pergeñado el sistema binario cerca del año 300 en su “चदा-शास्त्र” (Chanda-shastra), Análisis sagrado de métrica védica, libro en sánscrito con ideas básicas sobre la sucesión de Fibonacci y el triángulo de Pascal.

Antes de lograr la representación de coeficientes binomiales en forma triangular (1684) el francés **Blaise Pascal** había inventado la rueda (*roue*) *pascaline* (1642), un mecanismo de engranajes que permitía sumar y restar, basado en un prototipo del alemán **Wilhelm Schickard**. (Pascal también estudió la presión atmosférica y las unidades nos lo recuerdan). Y en 1670 otro alemán, **Gottfried Leibniz**, creó una versión mecánica capaz de multiplicar y dividir, de donde surgieron los aritmómetros comercializados casi tres siglos, hasta 1950.

Antes de Pascal, en 1614, el escocés **John Napier** desarrolló los logaritmos naturales (o neperianos), con los que simplificó el cálculo de multiplicaciones y divisiones llevándolo a sumas y restas, y entonces los reverendos



Pisa, iglesia de San Nicola del siglo XIII; la sucesión gráfica de diámetros es 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34...

(foto pisatoday.it)

anglicanos **Edmund Gunter** y **William Oughtred** inventaron la regla de cálculo (compu analógica manual) que obtuvo la bendición cristiana y gran difusión en los siguientes siglos.

Hacia 1835 el inglés **Charles Babbage** inventó la máquina diferencial, capaz de calcular funciones polinómicas, y con **Ada Byron** idearon una máquina analítica programable que, como su impresora, no pudieron construir porque en esa época no se fabricaban piezas tan precisas. Basaba su operación en tarjetas perforadas, tal cual hacía para los diseños del tejido el telar del francés **Joseph Jacquard** (apellido que bautizó un sistema textil).

Para el censo estadounidense de 1890 **Herman Hollerith** creó una máquina que trataba automáticamente la información mediante tales tarjetas perforadas (los datos se deducían según estuviesen perforadas o no en una cantidad de posiciones) que permitían luego procesar todo. Tras el exitoso censo fundó la Tabulating Machine Company que en 1924 se convirtió en la International Business Machine Corporation (IBM).

En 1893 el suizo **Otto Steiger** desarrolló la *Millionär* (Millonaria), primera calculadora automática que salió a la venta, con un nombre que inducía a comprarla. A su vez el inglés **Arthur Pollen** construyó en 1912 una versión que resolvía ecuaciones diferenciales por integración, usada para control de disparos navales durante la Primera Guerra Mundial, a partir del concepto del irlandés **James Thomson**, hermano mayor de William (Lord Kelvin).

En 1938 el alemán **Konrad Zuze** completó una potente computadora electromecánica programable. Ese logro fue emulado en 1944 en Estados Unidos por IBM. Y ese mismo año en Inglaterra se construyeron los *Colossus*, ordenadores para decodificar las comunicaciones alemanas durante la Segunda Guerra Mundial. Allí fue esencial la mente del inglés **Alan Turing**, quien logró descifrar los códigos nazis de la máquina *Enigma* (invención del alemán **Arthur Scherbius**), lo cual aceleró el fin de la conflagración. Ya antes, en 1936, Alan había ideado un dispositivo virtual –la máquina de Turing– que permite explicar la lógica de una computadora, clave en el desarrollo de la computación moderna. A pesar de los enormes aportes que hizo por su país, en 1952 fue enjuiciado por ser homosexual –sí–, fue condenado y se le dio la opción de ir preso o tratarse con estrógenos para curar su “*perversion*”, optó por lo segundo, sufrió alteraciones físicas y se suicidó dos años después...

Del otro lado del Atlántico, ya en 1937 **Claude Shannon** había comenzado a emplear el Álgebra de Boole en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) fundando así el uso de circuitos digitales. (Se basó en el sistema lógico ideado en 1854 por el irlandés **George Boole**, esencial para desarrollar el sistema binario de los circuitos electrónicos). Como bien sabemos, un *bit* (acrónimo de *binary digit*) puede ser 0 ó 1, y un *byte* son ocho *bits* (ejemplo, 10101010). Y dado que un *byte* representa  $2^8$  valores posibles y esto se corresponde con dos dígitos hexadecimales, esta notación es la más extendida en la informática actual (desde que la introdujo la firma IBM en 1963):  $2^8 = 2^4 \cdot 2^4 = 16 \cdot 16 = 1 \cdot 16^2 + 0 \cdot 16^1 + 0 \cdot 16^0$  –o sea el número 100 en base 16–.

Como también sabemos, no resulta tan práctico en computación digital el ancestral sistema decimal basado en diez dedos (en latín *decem digiti*), ese ábaco que llevamos siempre a mano.

En 1943 el austríaco **Curt Herzstark** fue acusado de ayudar a personas contrarias al nazismo en la fábrica paterna de instrumental que por entonces se destinaba principalmente para producir ametralladoras. Fue a parar al campo de concentración de Buchenwald, donde para su fortuna le ordenaron culminar el diseño de una calculadora que ya venía craneando desde antes y que los nazis pensaban regalar al *Führer* tras el exitoso final de la guerra. Esto le permitió sobrevivir allí donde por trabajos forzados, enfermedades, tortura, experimentos médicos y fusilamientos murieron 56.000 personas. Recién tras la guerra Curt construyó su calculadora *Curta*, que era accionada por una manivela. Fabricadas en Liechtenstein, fueron consideradas las mejores hasta que llegaron las calculadoras electrónicas hacia 1970.



Calculadora Curta  
(foto Alex Quobex)

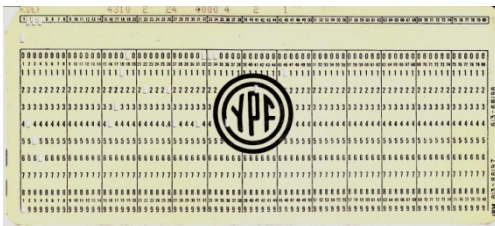
La *ENIAC* (*Electronic Numerical Integrator And Calculator*) fue construida en la universidad de Pennsylvania en 1946 para el Pentágono (para balística, etc.). Funcionaba a válvulas y usaba tarjetas perforadas para ingresar los datos. La reprogramación implicaba la engorrosa modificación de los cartuchos magnéticos, ¡ocupaba 167 m<sup>2</sup>!, gastaba muchísima electricidad, generaba bocha de calor y era re-lenta. Pero no había nada mejor.

En 1947 en los laboratorios Bell inventaron el transistor. Y en 1951 comenzó a operar la *EDVAC*, ya no decimal sino binaria y con el primer programa guardable. Fue diseñada por el húngaro **John von Neumann** (uno de los máximos matemáticos del siglo, que siendo niño prodigio había obtenido el premio Eötvös al mejor alumno). A él debemos la máquina de Von Neumann, concepto que establece el diseño de autorreplicación de funciones para conseguir un rendimiento exponencial –que por desgracia también aprovechan los virus informáticos–.

En 1953 IBM fabricó su primer ordenador a escala industrial, con transistores en vez de válvulas (200 veces más chicos), iniciando la segunda generación de computadoras y haciendo posible su aplicación a sísmica. Después vinieron los circuitos integrados, los microprocesadores, las *PC*, las ventanas gráficas, las redes, la IA...

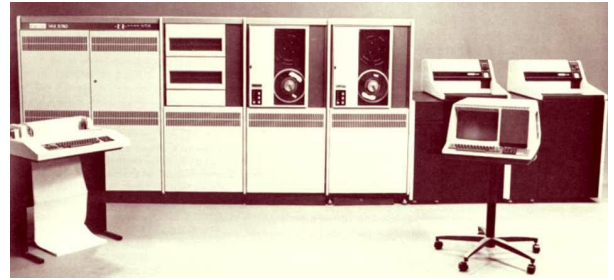
Quienquiera haya sido el genio inventor de la máquina de Antikythera, seguramente no imaginó que pasarían más de mil quinientos años hasta que su computadora pudiese ser superada, ni que otros cinco siglos después el

progreso tecnológico tuviese tan vertiginoso avance.



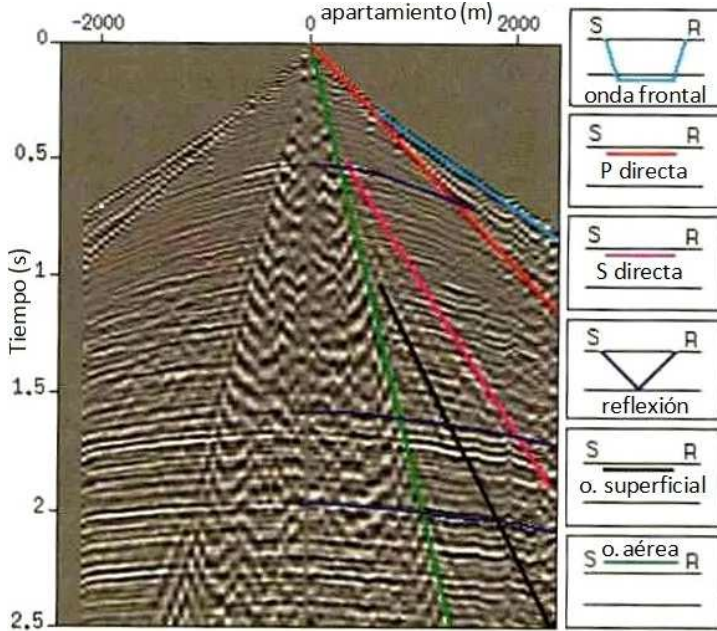
Tarjeta perforada.

Antigua máquina Vax para procesamiento sísmico (fotos Y.P.F.)



A la adquisición le sigue el procesamiento de los datos de sísmica de reflexión, a cargo de los procesadores o analistas. Pero siempre debe recordarse que es crítico optimizar los parámetros de registro para luego poder encarar un mejor proceso de la información, so pena de escuchar el preclaro refrán citado al inicio... donde *processing* reemplaza a salamandra, el símbolo del esoterismo medieval. Esto en cambio es alquimia informática...

**Es importante que el intérprete geofísico participe de la definición de los parámetros de la adquisición y del procesamiento** de cada proyecto que luego abordará. Los datos adquiridos durante semanas o meses en un área en tierra o mar –como el registro simétrico acá ilustrado– deben procesarse a fin de obtener secciones sísmicas 2D o un volumen (3D), que luego serán interpretados en términos geológicos, petroleros u otros.



Arribos en un registro de campo (modificado de S.E.G.)

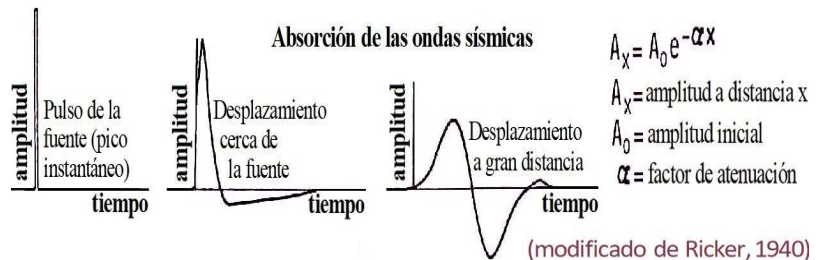
Fue en Estados Unidos en 1936 que **Frank Rieber** ideó el procesamiento de los datos, en ese momento sólo posible con técnicas fotográficas poco prácticas. Éste comenzó a aplicarse recién desde 1953 con la evolución de la cinta magnética y la computación digital. Como ya referimos, en 1956 **Harry Mayne** patentó el método de Punto Común Medio o apilamiento (*Common Medium Point* o *stacking*), en el que inicialmente se registraban 6 trazas por PCM (cobertura o fold de 600%) y ahora se registran usualmente 48 (4.800%) en la sísmica tridimensional y 96 (9.600%) en la bidimensional. Actualmente se va haciendo un procesado rápido de campo para control de calidad, pero el procesamiento fino se hace en un centro informático donde los analistas requieren de un mes o más para obtener un resultado confiable que minimice los ruidos y maximice la señal consiguiendo la mejor resolución posible.

### FUNDAMENTOS DEL PROCESADO SÍSMICO

Un frente de onda sísmico producido por una fuente impulsiva es inicialmente un pulso de gran amplitud que contiene un alto espectro de frecuencias en ese pico instantáneo (*spike*; figura abajo). Puede describirse mediante la **función Delta de Dirac** (hallada por el inglés **Paul Dirac** hacia 1930) y así plantearse como una función  $\delta(t)$  que posee un valor infinito en  $t = 0$  y se anula en cualquier otro punto, de manera tal que su integral resulta igual a 1, es decir:

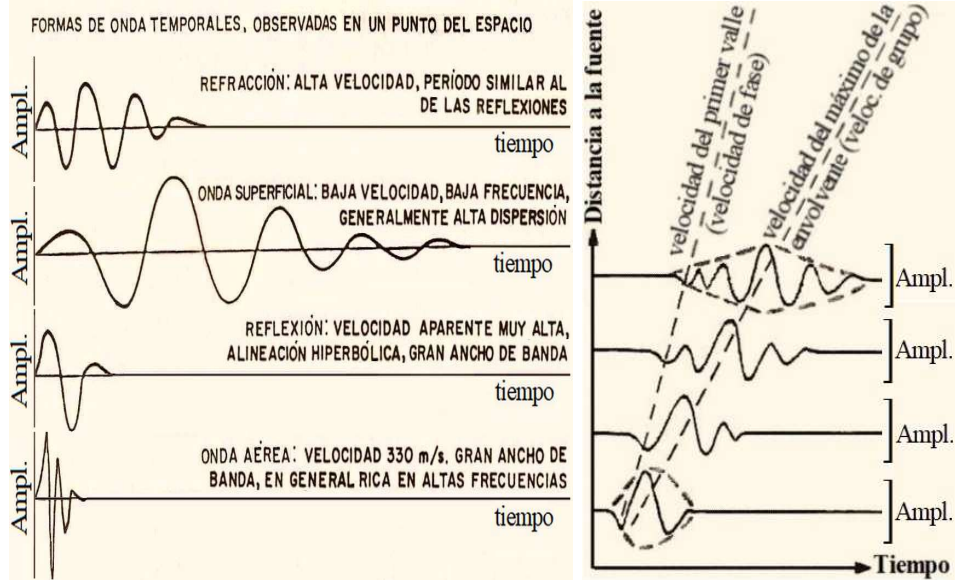
$$\delta(t - a) = 0 \text{ si } t \neq a, \text{ y } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

A la derecha vemos la forma de onda que registra un sismómetro cerca del disparo (o sea, cómo vibra la tierra a causa del pico energético) y más lejos cómo reduce luego su amplitud y pierde gradualmente altas frecuencias a medida que viaja, estirándose. Esta **ondícula de fase mínima**, definida por el estadounidense **Norman Ricker**, tiene un valle y un pico principales y eventualmente otro valle y pico pequeños, es asimétrica, está corrida o desfasada y no tiene valores antes del cero, porque antes de ese instante nadie había procedido a emitir energía desde la fuente. (La ondícula de vibradores –simétrica y de fase cero– se ve en la pág.375).



(modificado de Ricker, 1940)

Aquí del lado izquierdo se ven algunas formas de onda típicas que aparecen en los registros, todas resultantes de la mutación progresiva de la función delta de Dirac. En 1839 el irlandés **William Hamilton** halló que existe una velocidad de grupo ( $V_g$ ) distinta a la velocidad de fase ( $V_f$ ); figura a la derecha. Esta última es aquella con que se propaga la fase de la forma de onda, por ejemplo tomando como referencia su primer pico o primer valle. La de grupo, en cambio, es la velocidad de propagación de las variaciones en la forma de la amplitud de onda, o sea su envolvente o modulación; parecido a la señal de las radios AM.



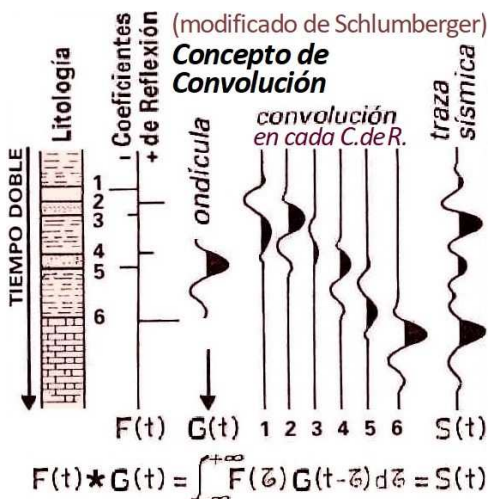
(modificado de Horizon Exploration Ltd.)

(modific. de Balch & Smolka, 1970)

Matemáticamente:  $V_f = \omega/K$  y  $V_g = \lambda\omega/\partial K$  ( $\omega$  es la pulsación y  $K$  la constante de propagación) (Los distintos colores del espectro visible tienen distintas frecuencias y por tanto distintas velocidades de fase, y son esas velocidades diferentes las que hacen que por la ley de Snell se separen los colores en un prisma –un medio dispersivo, como todo sólido o líquido–, pero no se separan en el aire, que es un medio no dispersivo).

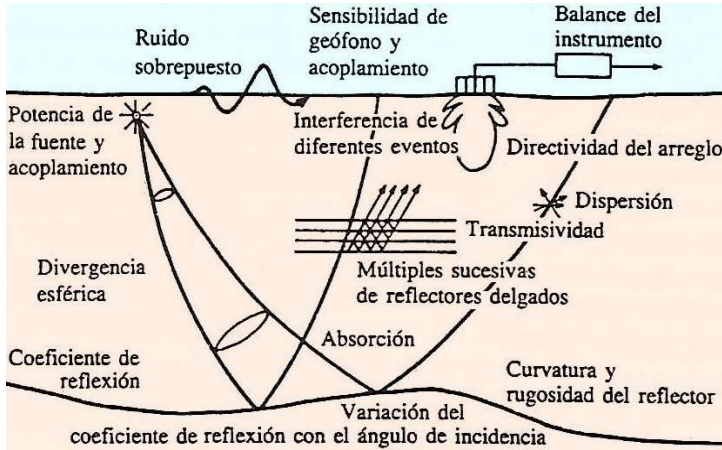
Ahora bien, cada traza sísmica es esencialmente una serie de valores de amplitud registrados a lo largo del tiempo (de ida y vuelta sísmico). Representa el resultado del arribo de **señales**, esto es, sucesivas respuestas reflectivas provenientes de interfaces de muy variada magnitud (desde límites formacionales hasta laminación sedimentaria, tanto mayor su amplitud cuanto mayor sea el contraste de impedancias acústicas) que se interfieren entre sí y a la vez son interferidas por diversos tipos de **ruidos**, sean éstos superficiales o profundos.

Las señales sísmicas son el resultado de la **convolución** del frente de onda generado en la fuente con los sucesivos coeficientes de reflexión correspondientes a interfaces en el subsuelo. Puede pensarse la convolución como el proceso por el cual la forma de onda (ondícula) se modifica al reflejarse, modificación que es proporcional a la magnitud y signo del coeficiente de reflexión. Como se vio en el Tema 14 (pág.354), la ondícula se invierte cuando hay inversión de impedancias, o sea coeficiente de reflexión negativo. Además la amplitud reflejada es directamente proporcional al módulo de dicho coeficiente. De modo que, como resultado de la convolución, la señal que llega trae en su impronta la información de los contrastes de impedancia acústica del subsuelo. Matemáticamente, una convolución es un operador (simbolizado  $\star$ ) que transforma dos funciones **F** y **G** (aquí, respectivamente, la serie de coeficientes de reflexión y la ondícula) en una tercera función **S** (la señal registrada) que representa la magnitud en la que se superponen **F** y una versión de **G** trasladada y temporalmente invertida (por eso en la ecuación va  $-\tau$ ). Es un promedio pesado que **G** le va haciendo a **F**. La expresión analítica, al pie de la figura contigua, indica que la convolución ( $\star$ ) es la integral de una serie de productos de  $d\tau$  donde la función **G**( $t$ ) se va desplazando temporalmente respecto a la función **F**( $t$ ) para, a través de todo el proceso de convolución, dar finalmente la función **S**( $t$ ). Debe empero recordarse que el patrón de interferencia resultante en la traza en este caso idealizado sólo resulta de los coeficientes de reflexión, mientras que en la vida real el plato resultante de esta receta finaliza abundantemente condimentado con variopintos ruidos someros y profundos, a veces demasiado picantes aunque la adquisición de los ingredientes haya sido esmerada.

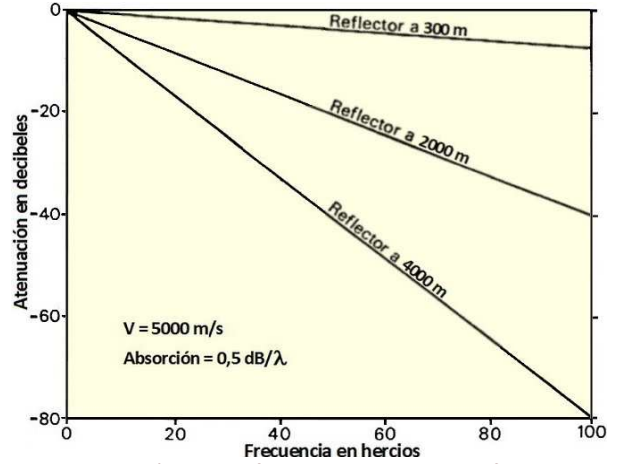


Pero, además de las interferencias que producen los ruidos y la señal en sí misma, el registro convolucional de las reflexiones –dado por un sismograma o traza– siempre acaba significativamente afectado por pérdidas de amplitud y frecuencia. Es, en suma, una **caja negra** –en el

sentido de la teoría de sistemas— que incluye todo lo que en subsuelo altera la transmisión de las ondas y no tenemos posibilidad de manipular, sino sólo la de optimizar la entrada (emisión) y la salida (recepción). A la izquierda vemos los principales *factores que afectan la amplitud de las ondas* en tránsito por el subsuelo.

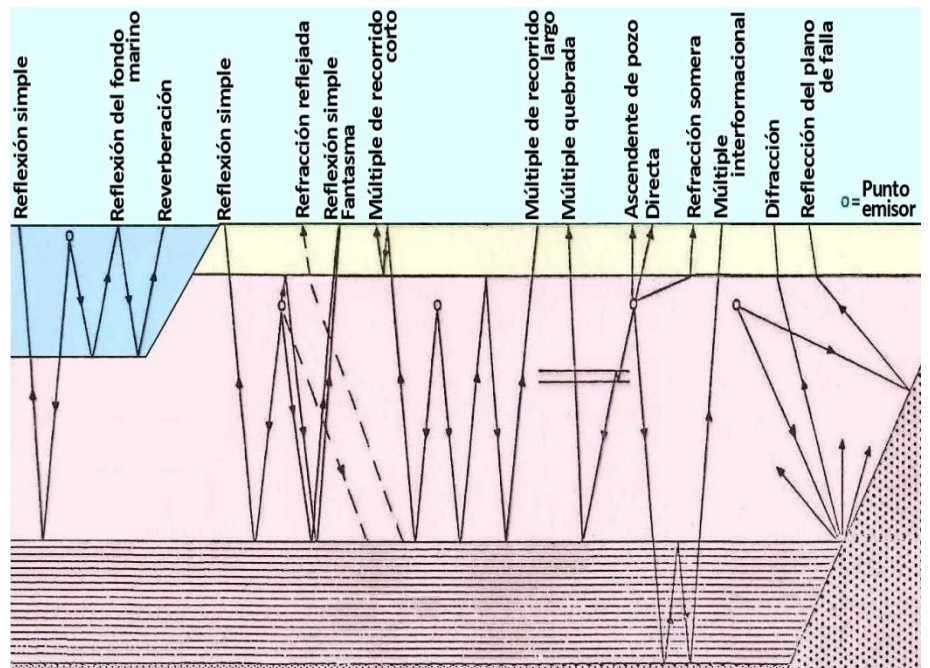
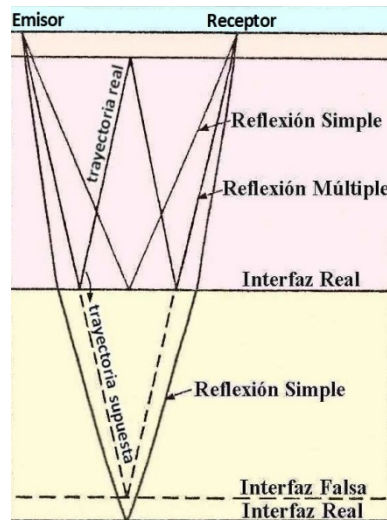


Factores que afectan la amplitud de las ondas sísmicas registradas (modificado de Sheriff & Geldart, 1995)



Atenuación de las frecuencias con la profundidad (modificado de McQuillin et al., 1985)

La figura de arriba a la derecha ilustra la ya comentada *atenuación de las frecuencias sísmicas por absorción inelástica*, tanto mayor cuanto más altos son sus valores en Hz y cuanto más distancia ha debido viajar la onda en el subsuelo. Recuérdese que por la presencia de la capa meteorizada en tierra las frecuencias máximas son menores que en el mar. Hemos referido en el Tema 14 los ruidos superficiales más comunes. Vemos ahora un esquema de los principales **ruidos de origen profundo**. La mayoría consiste en **reflexiones múltiples**, es decir eventos entretenidos por ciertas interfaces del subsuelo, que en consecuencia llegan más tarde a los receptores, superponiéndose en los registros de campo con señales procedentes de lugares más profundos, como se ve abajo. La múltiple parece haber ido más lejos, pero en verdad es como el pibe que compra en el kiosco cercano, se entretiene correteando un rato y después nos charla que se demoró porque tuvo que ir hasta el kiosco más lejano.

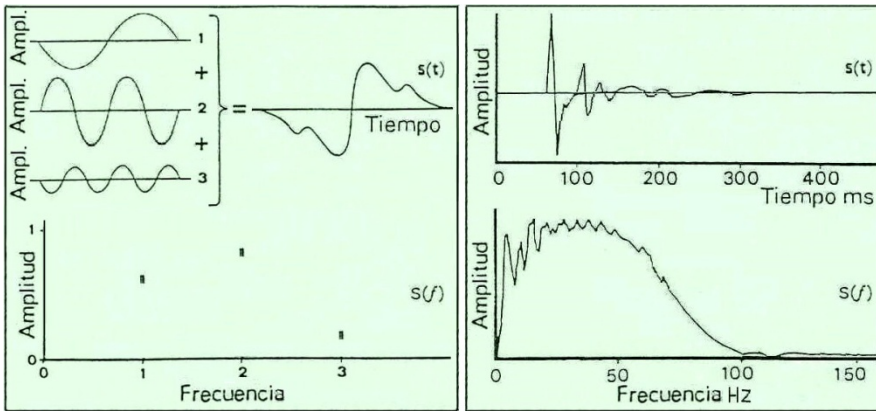


Interfaz falsa creada por una múltiple.

Reflexiones simples, múltiples y otros ruidos (modificado de Sheriff, 1991)

A las múltiples entre el pelo de agua y el fondo se las llama reverberaciones (*ringing*), onda ring-raje... La reflexión fantasma (*ghost*) es como una simple pero con un pequeño camino adicional hasta la base de la capa meteorizada y bajando; se parece al fantasma dado por la doble imagen borrosa de la tele analógica por antena. Las difracciones (*difractions*) no son múltiples, como tampoco las raras reflexiones en planos de falla. Una vez obtenidos los registros de campo (como el de la pág.370) con señales y ruidos, continúa la tarea de procesarlos digitalmente utilizando programas específicos en ordenadores con capacidad suficiente.

Un instrumento matemático esencial para este fin es la **transformada de Fourier** (publicada por el francés **Joseph Fourier** en 1822) que en sismica permite pasar del dominio del tiempo (la traza, es decir una serie de



Arriba descomposición de Fourier de una función simple y abajo espectro de amplitud de la misma.

Arriba típica traza sísmica y abajo su espectro.  $S(f)$  es la transformada de Fourier de  $S(t)$

(gráficos modificados de McQuillin *et al.*, 1985)

valores de amplitud a lo largo del tiempo) al dominio de la frecuencia: espectro de amplitud en función de la frecuencia donde podemos ver en ordenadas las amplitudes de señales y ruidos indiscriminados, correspondientes a cada frecuencia registrada con su escala desplegada en abscisas. La transformación se efectúa aproximando la forma de la traza mediante la integración de una **serie de funciones armónicas** (seno, coseno) o **serie de Fourier**, de amplitudes diversas, para poder

luego calcular y representar el citado espectro, expresable también como una integración, pero ahora de diferenciales de frecuencia. (Los métodos potenciales toman distancias y longitudes de onda para separar componentes residuales de regionales; Tema 02, pág.45).

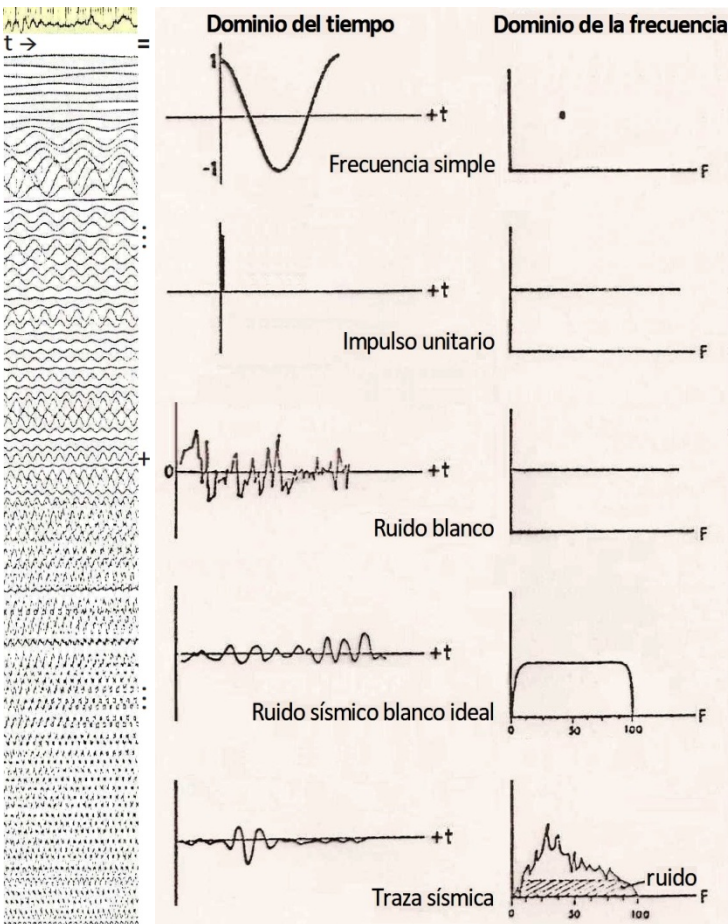
Arriba se observa simplificada cómo un fragmento de traza sísmica  $-S(t)$  en el dominio del tiempo— puede ser pensado como la suma de funciones armónicas (en este caso sólo tres, en casos reales muchisisísimas...) mediante la aplicación de una **serie de Fourier** y puede apreciarse cómo mediante la transformada puede ser luego representada en el dominio de la frecuencia  $-S(f)$ — según un espectro de amplitudes versus frecuencias. También se visualiza un ejemplo de traza sísmica típica en función de sus tiempos de arribo y de sus frecuencias integrantes. Las expresiones de  $S(t)$  y su transformada  $S(f)$  son:

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{i2\pi ft} df \quad S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

O desarrollando  $e$  en senos y cosenos:

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) \cos(2\pi ft) df + i \int_{-\infty}^{\infty} S(f) \text{sen}(2\pi ft) df$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \cos(2\pi ft) dt - i \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \text{sen}(2\pi ft) dt$$



Ondas en ambos dominios (modificado de Horizon Exploration)

La figura inmediata arriba muestra la representación en uno y otro dominio de una frecuencia simple, un impulso unitario (fuente), un ruido blanco (llamado así porque contiene todas las frecuencias, como en la luz visible), un ruido blanco sísmico ideal (con todas las frecuencias en amplitud pareja dentro del rango sísmico) y una traza sísmica (conteniendo señal y ruido). Y pegado a la izquierda se ilustra un caso real de traza (con resaltador) y abajo las  $n$  armónicas que se obtienen en su descomposición de Fourier.

### SECUENCIA DEL PROCESO EN SÍSMICA REFLECTIVA

En la siguiente lista se indican: con una **I** los pasos imprescindibles del proceso, con una **C** los comunes casi siempre realizados, aunque no sean imprescindibles, y con una **O** aquellos ocasionales, a los que se recurre para

objetivos específicos, no rutinarios. El orden en que aquí se citan es el más usual, pero algunas correcciones o reducciones no imprescindibles pueden hacerse en un orden diferente.

D) Demultiplexado (reordenamiento de la información)

-- los registros de campo son grabados en formato SEG B

D) Recuperación de Ganancia (por divergencia esférica, etc.)

D) Correlación cruzada (sólo en datos de vibro)

C) Edición de Trazas (eliminación de trazas ruidosas o muertas)

D) Correcciones Estáticas (efectos de topografía y capa meteorizada o *weathering*)

C) Deconvolución Impulsiva (*Spike*, tiende a agudizar las formas de onda)

D) Agrupamiento por Familias de Trazas de PCM (*CMP Gathers*)

D) Corrección Dinámica o por Retardo Normal (*Normal Move Out*), que incluye el Análisis de Velocidad.

D) Apilamiento o Suma (*Stack*), eventualmente antecedido por el Enmudecimiento frontal (*Mute*)

-- en esta etapa ya se tiene una sección sísmica, en formato SEG Y, que hoy se hace preliminarmente en el campo

C) Filtrados Varios (de frecuencias, de velocidades, etc.)

C) Migración (corrección de las deformaciones por buzamientos y eliminación de difracciones)

O) Migración Pre-Apilamiento (*Pre-Stack*)

O) Retardo Buzante (*Dip Move Out*) en lugar de *NMO* antes de apilamiento

O) Deconvolución Predictiva (para eliminar reflexiones múltiples)

O) Estáticas Residuales (para ajuste fino de estáticas)

O) Realce de Frecuencias (para conseguir una mayor resolución sísmica)

O) Corrimiento de Fase (generalmente a fase cero para una mejor interpretación)

O) Verdadera Amplitud (para optimizar las relaciones de amplitud entre distintos eventos)

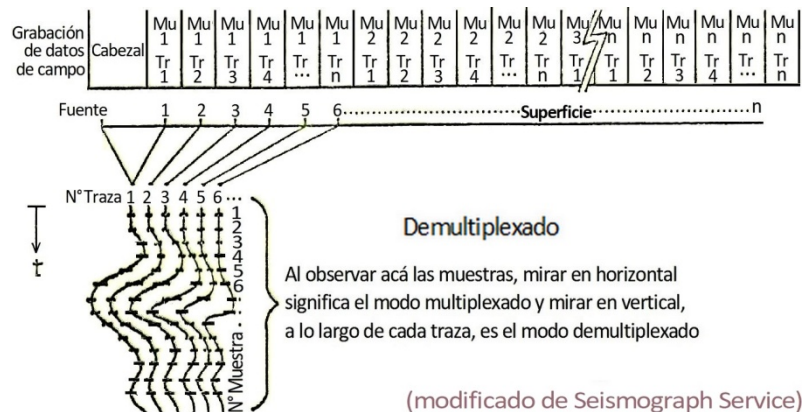
O) Conversión a Profundidad (se pasa de escala vertical en tiempo a profundidad)

O) Fusión de Cubos, sólo en sísmica 3D



Oficina de proceso (foto Western Geoph.)

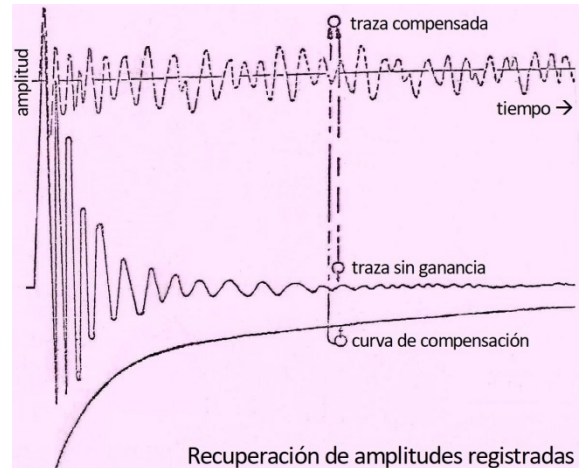
**D) Demultiplexado:** Es el reordenamiento secuencial de los datos de campo (figura contigua) desde el formato multiplexado inicial donde la primera muestra del canal 1 es seguida por la primera muestra del canal 2, luego la primera del canal 3, ... hasta el final; para luego seguir con la segunda muestra del canal 1, la segunda del canal 2, ... y así. Esta secuencia de valores de amplitud según los números de trazas o canales de cada muestra sucesiva es llevado al formato de matriz traspuesta



(secuenciado según los números de muestras de cada traza sucesiva) donde la primera muestra del canal 1 es seguida por la segunda muestra del canal 1, etc., hasta finalizar el mismo, seguido por el canal 2, ... y el resto. Esto posibilita la normal visualización de los registros de campo y la subsiguiente corrección de los datos. **Es un proceso que hace automáticamente el sistema después de grabar tras cada disparo**, al toque. Así, los datos quedan en el llamado **formato SEG B**, el de los registros de campo definido por la Society of Exploration Geophysicists de Estados Unidos en los comienzos de la era digital.

**D) Recuperación de ganancia o amplitudes:** Proceso de corrección por el efecto de la pérdida de amplitudes debido a la divergencia cuasiesférica del frente de ondas y las pérdidas por el comportamiento parcialmente inelástico del subsuelo (absorción), el desperdigamiento (*scattering*) y la partición de la energía. Un análisis iterativo permite obtener la curva de ganancia óptima que mediante una curva logarítmica creciente compensa la pérdida expresada con una curva exponencial decreciente, como se ve en la página siguiente. Se busca llegar a **trazas ecualizadas** cuyas amplitudes más bajas se alzan lo suficiente para visualizarlas e interpretarlas.

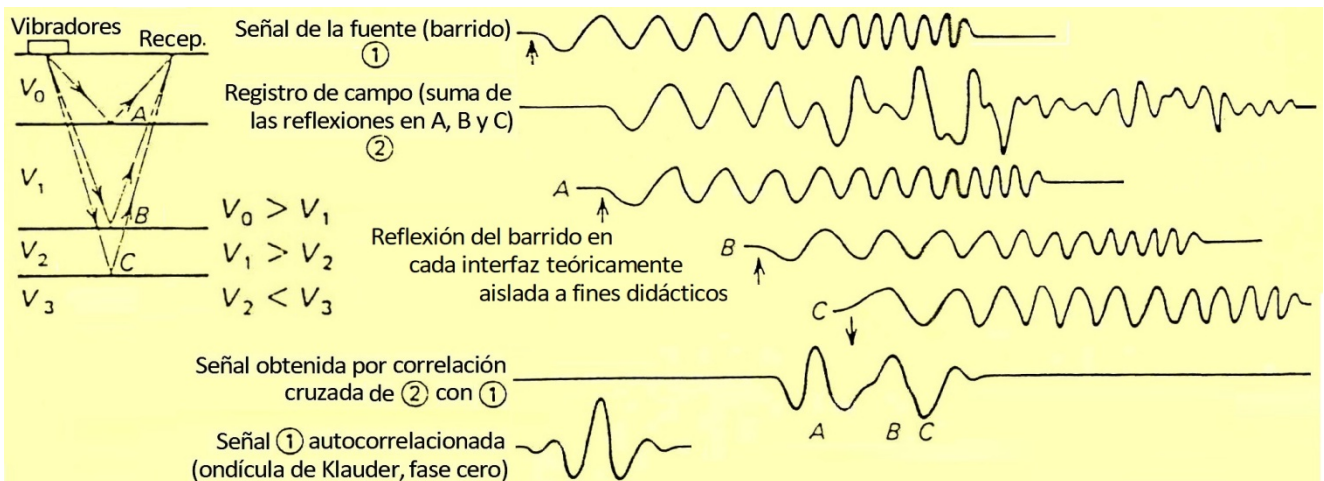
Una alternativa más lenta, y en consecuencia más costosa, es hacer un proceso de recuperación llamado de **verdadera amplitud**, que en rigor no lo es, ya que la verdadera amplitud es la que se ha registrado de campo, con primeros arribos de gran amplitud y arribos posteriores decreciendo exponencialmente. Pero acá se denomina verdadera amplitud a la que se hubiese obtenido si la divergencia esférica y demás fenómenos de pérdida de energía no hubieran sucedido y **respetando todo lo posible las amplitudes relativas de las sucesivas reflexiones**, lo cual da imágenes poco aptas para interpretación de rutina, pero útiles para otros procesos o análisis posteriores que interesan en casos especiales. Volveremos sobre esto hacia el final del Tema 15.



Recuperación de amplitudes registradas (modificado de Geofísica Exploración Y.P.F.)

**D) Correlación cruzada de vibros:** Lo hace el sistema comparando el **barrido** (*sweep*) grabado de campo y cada una de las trazas del registro. Se multiplica traza con barrido, se desplazan uno respecto al otro en una muestra temporal sin invertir (+ $\tau$ ) y se vuelve a multiplicar, y así siguiendo, y finalmente se suma o integra, lo cual se expresa matemáticamente como:

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) f_2(t+\tau) d\tau \quad \text{y si } f_1 = f_2 \Rightarrow X(t) = A(t) \text{ (autocorrelación)}$$



Esquema del proceso de correlación cruzada y de la autocorrelación; ver texto (modificado de Continental Oil)

La operación de correlación cruzada (*crosscorrelation*) opera sobre los valores digitales de la traza registrada. El tiempo total de un registro de campo de fuente vibratoria resulta de sumar los 8, 12 o 16 segundos del barrido más los 4 o 5 segundos de la ventana temporal  $T_0$  desde la superficie hasta la profundidad máxima planteada. Como se indica en la figura previa, cada trayectoria reflejada a una distinta profundidad genera un arribo extendido por un intervalo de varios segundos porque, al tener todo un barrido de frecuencias transitando el subsuelo, **en cada interfaz sucesivamente se reflejan desde las bajas hasta las altas frecuencias** del mismo. Por lo cual a cada estación receptora van llegando parcialmente superpuestas las reflexiones del barrido que provienen desde esas interfaces menos y más profundas. **La correlación cruzada** es esencialmente una medida de similitud entre dos funciones (que en nuestro caso son dos formas de onda) y aplicada a fuentes vibratorias **permite ordenar matemáticamente la información para dar como resultado que todas las frecuencias sean agrupadas como simultáneas** para cada evento reflejado, asemejándose así a las respuestas de las fuentes impulsivas donde todas las frecuencias viajan juntas, simultáneamente. Pero con una diferencia en la traza o sismograma obtenido: la ondícula generada no es de fase mínima –como en las fuentes impulsivas– sino en este caso de **fase cero**. Esto se constata al hacer la **autocorrelación del barrido** (la correlación consigo mismo, que al juntar las frecuencias evidencia la ondícula fase cero), concepto definido en 1960 por el estadounidense **John Klauder** en una aplicación de radares que emiten frecuencias que varían lineal o logarítmicamente en el tiempo (*chirp*, chirrido) como el barrido de un vibrador. Hay una variante moderna de correlación que simultáneamente opera en los dominios del tiempo y la frecuencia y da mejores resultados cuando el nivel de ruido es alto (Jiang *et al.*, 2006). Las ondículas de Klauder y de Ricker (fase mínima) tienen ambas unos 30 Hz de **frecuencia dominante**, que es su repetición aproximada (inversa del intervalo temporal entre picos o valles principales).

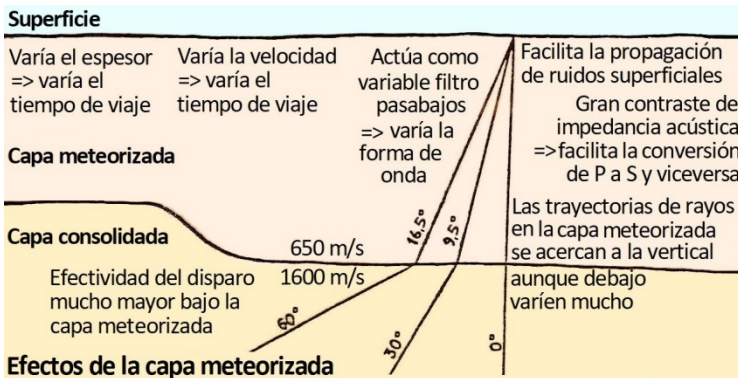
**C) Edición de trazas:** Es la supresión de trazas ruidosas (por receptores no bien acoplados al terreno o azotados por viento fuerte, ruidos de motores, etc.) o muertas (generalmente por desconexión o corte de cables por vehículos, jabalíes ansiosos, etc.) cuya participación en las siguientes etapas del proceso sería nula o incluso negativa (en el apilamiento). La edición deja únicamente las trazas que pueden considerarse publicables...

**D) Correcciones estáticas (static corrections):** Son reducciones en tiempo debido a la topografía (existencia de desniveles entre la fuente de energía y los receptores) y a las variaciones de velocidad y espesor de la **capa meteorizada** o intemperizada (*weathering*, de baja velocidad). Se establece un **plano horizontal de referencia (PR o datum)** por debajo de ésta, que es el nuevo cero de los tiempos (figura abajo) y **si el PR varía de cota se lo llama flotante**. Al tiempo total se le resta el tiempo que tarda el frente de onda en recorrer la capa meteorizada, en bajada y en subida. Se hace una corrección por emergencia y otra por incidencia, única para cada estaca o estación, de modo tal que se aplica la estática calculada a cada una de las trazas de un registro individual.

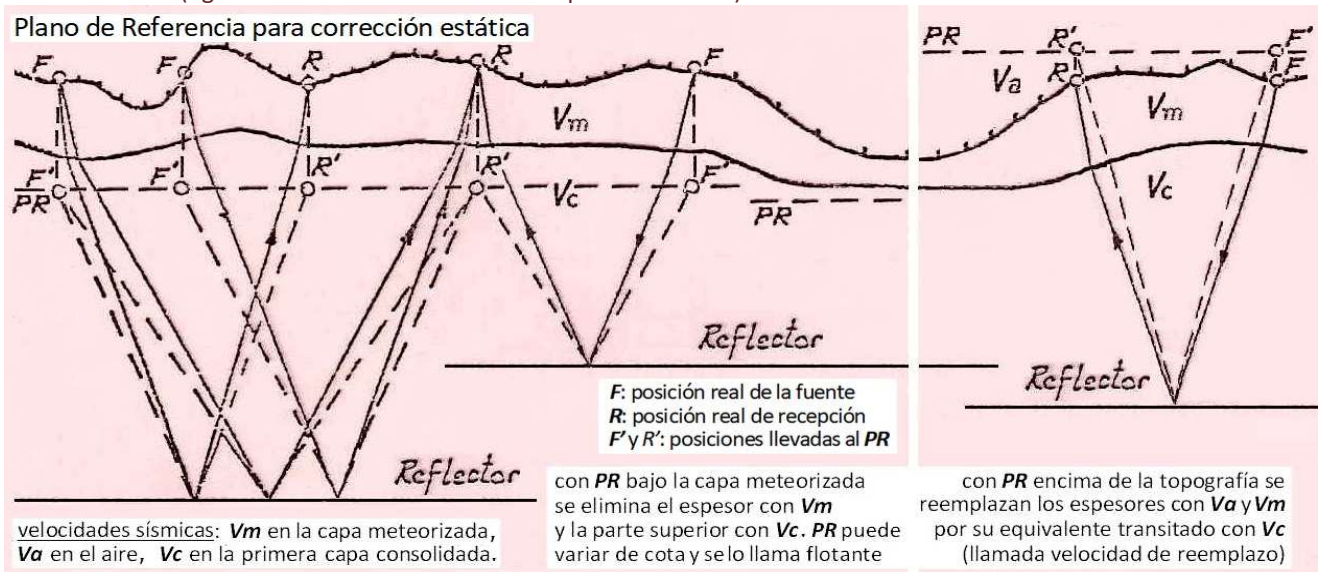
Otras veces se emplea un plano en el aire, por encima de la topografía, y matemáticamente se rellena ese espacio con una **velocidad de reemplazo** semejante a la que se estimó para la primera capa de alta velocidad  $V_c$  (la que infrayace a la meteorizada: consolidada o *subweathering*). La velocidad de la capa meteorizada  $V_m$  (del orden de 400 a 1.200 m/s) suele variar lateralmente, mientras que la capa infrayacente (de unos 1.700 a 2.000 m/s) generalmente varía menos. Los problemas que ocasiona la capa somera se resumen en la figura inmediata.

**La caída de alta frecuencia es inatajable.** Su espesor se calcula por sísmica de refracción, con **dromocronas horizontales** (suele aplicarse la técnica de sumación vista en el Tema 12, pág.323) y/o **dromocronas verticales**

(en pozos, *up* o *downholes*). Estos últimos son más costosos y por lo tanto generalmente se perforan pocos en puntos estratégicos para el control fino de las dromocronas horizontales. Si los registros de sísmica de reflexión son lo suficientemente detallados en niveles someros, pueden utilizarse para calcular dromocronas horizontales, evitándose así la necesidad de hacer sísmica de refracción, si bien es algo que acontece esporádicamente debido a su muy diferente profundidad de interés y en consecuencia su escasa confiabilidad.



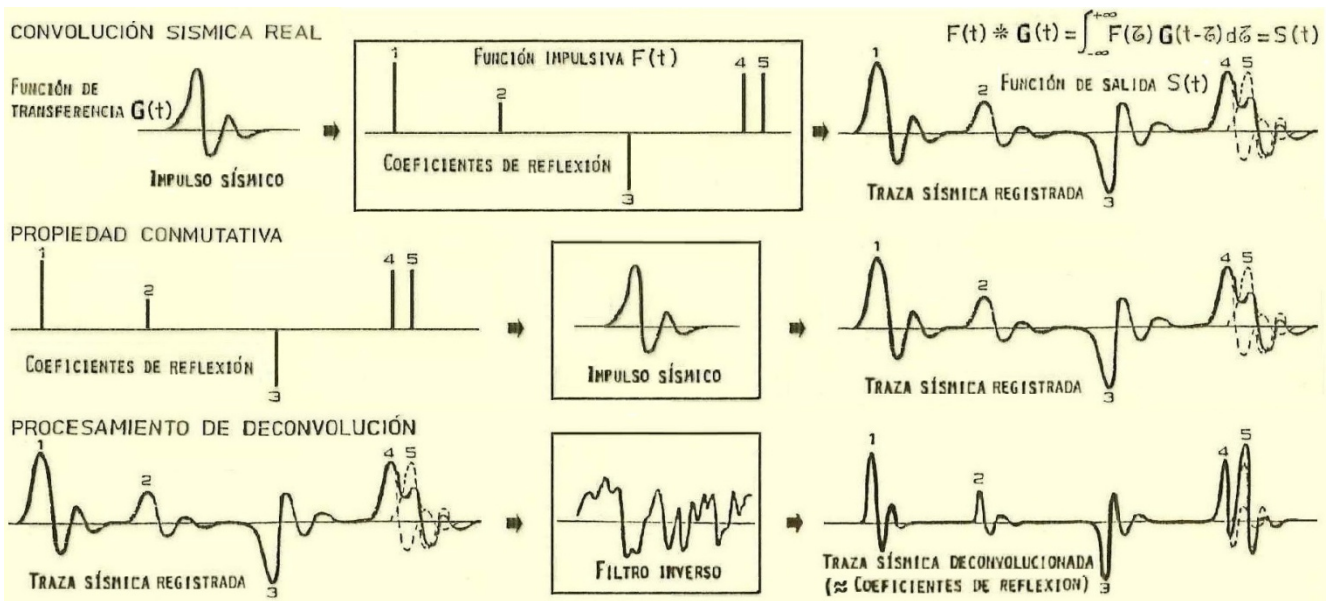
(figuras modificadas de Geofísica Exploración Y.P.F.)



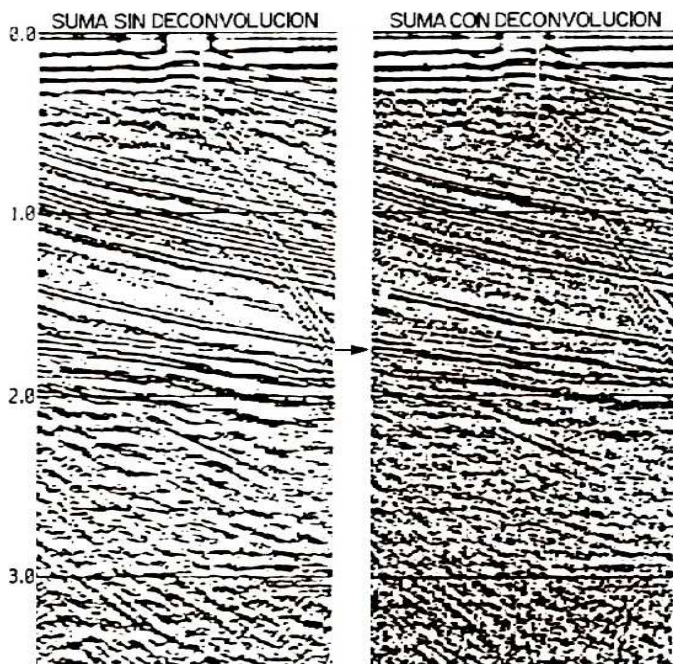
En mar o lagos únicamente debe considerarse su variación de profundidad, más el efecto de marea. **No hay bajo el agua una capa de baja velocidad como la que en tierra firme corta altas frecuencias.** La velocidad en el agua promedia 1.500 m/s y la capa de sedimentos del fondo, embebida en agua, tiene una velocidad algo mayor.

**C) Deconvolución impulsiva (spike) o filtrado inverso:** Tal como hemos ya mencionado en gravimetría y magnetimetría con relación al modelado geofísico, el concepto de deconvolución se refiere a las operaciones matemáticas empleadas en la restauración de señales para recuperar datos que han sido modificados por un

proceso físico llamado convolución. De modo que, conocidas la imagen convolucionada  $S$  (en nuestro caso la traza) y la función portadora  $G$  (la ondícula), más un modelo físico del ruido  $\varepsilon$ , se obtendría la distribución de información original  $F$  (en este caso los coeficientes de reflexión). En la práctica la resolución de esta ecuación es un complejo filtrado inverso (ideado por el estadounidense **Norbert Wiener** en 1942 en el M.I.T.) mediante elaborados algoritmos iterativos que sin embargo no logran un resultado muy cercano al ideal. No se reconstruye con detalle el esqueleto de una recién descubierta especie de anguila a partir de una foto de su cuerpo en vida. En concreto, lo que se tiende a hacer con la deconvolución impulsiva o *spike* es minimizar el efecto de la convolución —o sea, el efecto del informante—, pero éste no puede ser suprimido del todo para llegar a la información pura. El objetivo ideal de remover la forma de onda para obtener las series de coeficientes queda lejos de poder alcanzarse por el desconocimiento de los patrones de interferencia de los reflectores y porque los diversos ruidos se magnifican al intensificar el proceso iterativo de deconvolución. Aun así, se logra concentrar o colapsar la energía de cada evento reflejado, como muestra la siguiente figura, mejorando la resolución vertical, dado que con el estrechamiento de la ondícula se consigue agudizar la respuesta de los eventos reflectivos.



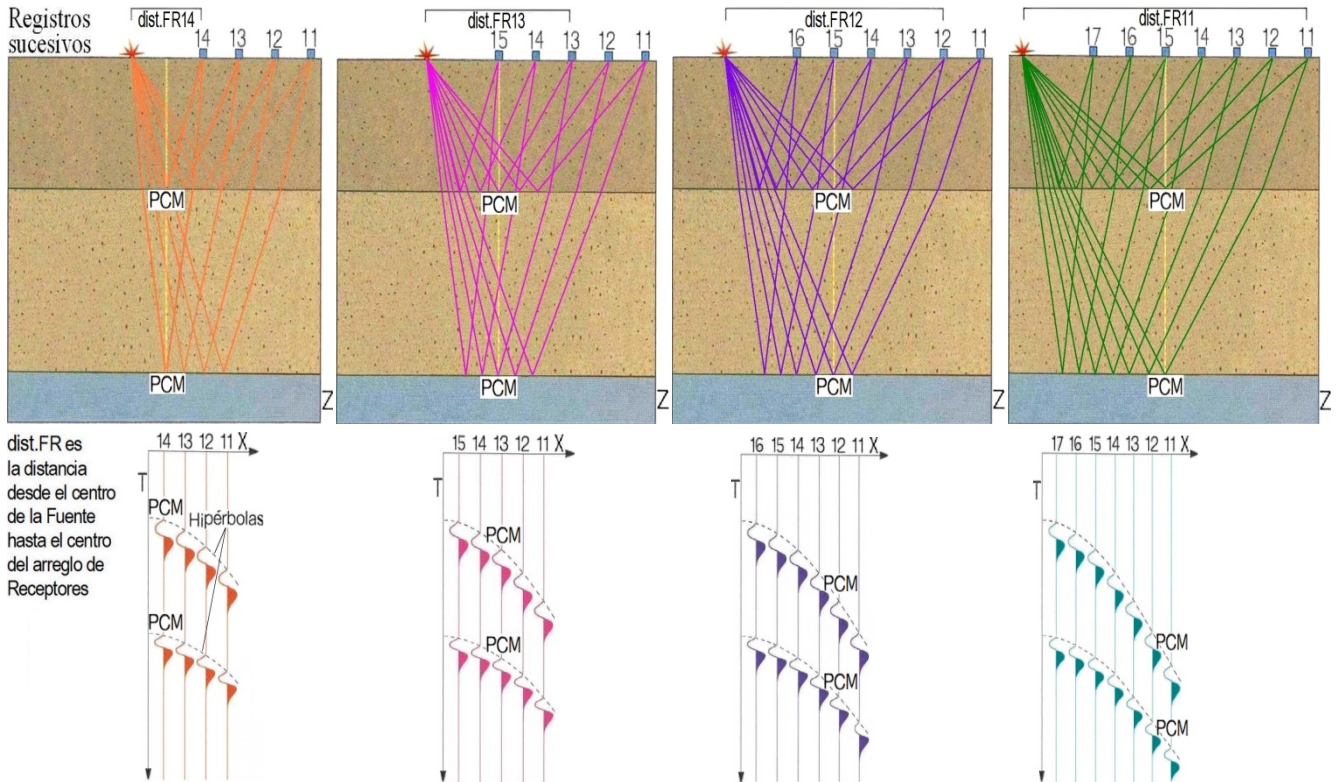
Deconvolución (figuras modificadas de Horizon Exploration)



En la práctica *el analista sísmico procura una razonable solución de compromiso entre la mejora en la definición de los reflectores —o sea, su agudización— y el aumento del nivel de ruido*. La terapia en este caso recurre a una droga con efectos secundarios que dependen de la dosis y debe entonces procurarse que el remedio no resulte peor que la enfermedad... A la izquierda se ilustra un caso real en el que se puede apreciar que la sección sísmica final (consecuente de haber aplicado todas las etapas del procesamiento, hasta el apilamiento inclusive) da como producto una sección con mejor definición de reflectores pero también más ruidosa (ese picoteo general) si se incluyó la deconvolución impulsiva, una corrección que no es obligatoria pero se aplica con asiduidad. No, por ejemplo, si son datos de fuente vibratora que fueron correlacionados por el citado método en los dominios del tiempo y la frecuencia que ya agudiza mucho el resultado final.

**D) Agrupamiento por familias de PCM (CMP gathers):** Las trazas de los distintos registros de campo han de agruparse en función de los puntos de rebote en el subsuelo, esto es reunir las trazas pertenecientes a una misma familia o serie vertical de **puntos comunes medios** (PCM o *CMP*) por más que correspondan a distintos puntos

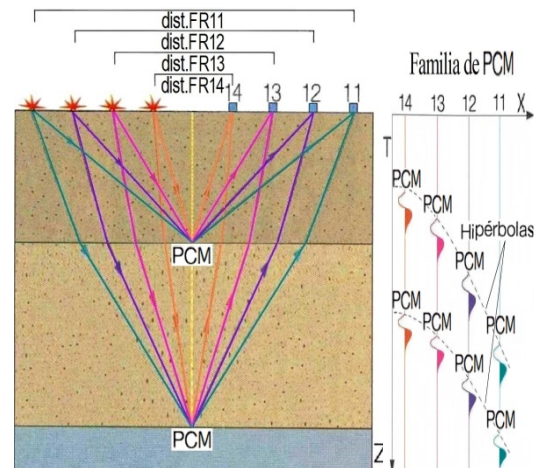
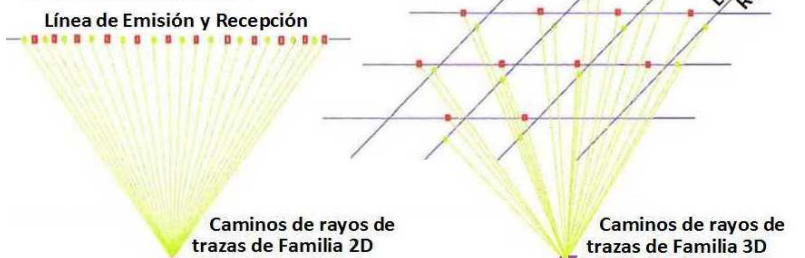
de emisión y recepción (esquemas a continuación). Esa familia de trazas es representada más abajo a la derecha, como resultado de reunir aquellos PCM que se hallan a lo largo de la línea de trazos amarillos tomada como referencia en los esquemas de arriba, y lo mismo se repite en todas las virtuales líneas verticales paralelas a ella.



Esquemas de avance en la adquisición: arriba, rayos sísmicos; abajo, trazas de los registros resultantes. La distancia entre trazas es la que hay entre PCM sucesivos, que es la mitad que entre estaciones receptoras por ser interfaces horizontales.

En la 3D se agregan trayectorias de rebote con múltiples azimuts por bin, como se ve acá abajo, tipo rebote en un tablero de básquet, pero acá eso es un doble. Y, sea en 2 o 3D, cada familia de PCM presenta un aspecto hiperbólico, análogo al de los registros de campo, en razón del creciente distanciamiento (x) que se refleja en los tiempos de tránsito (T), los cuales se incrementan en la medida que crece su oblicuidad en subsuelo.

Diferencia conceptual de punto común profundo con adquisición en 2 ó 3 dimensiones

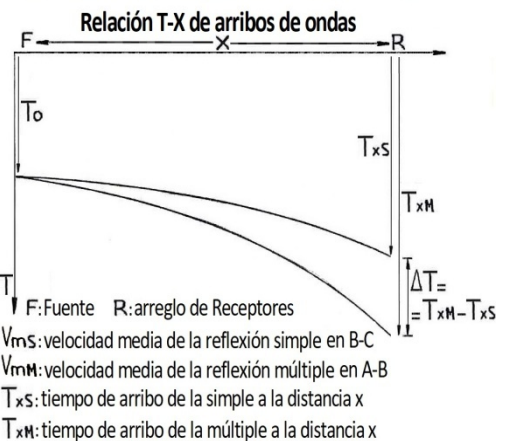
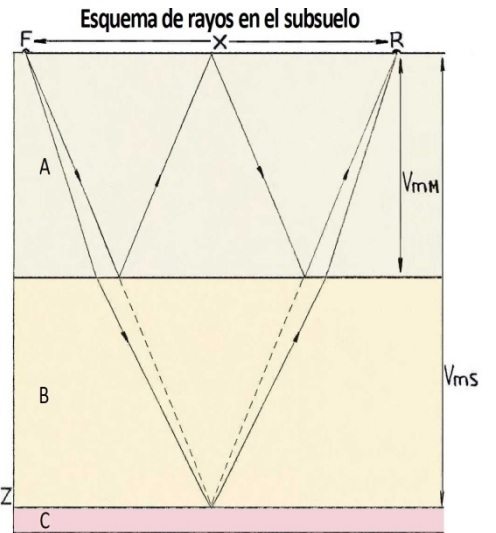
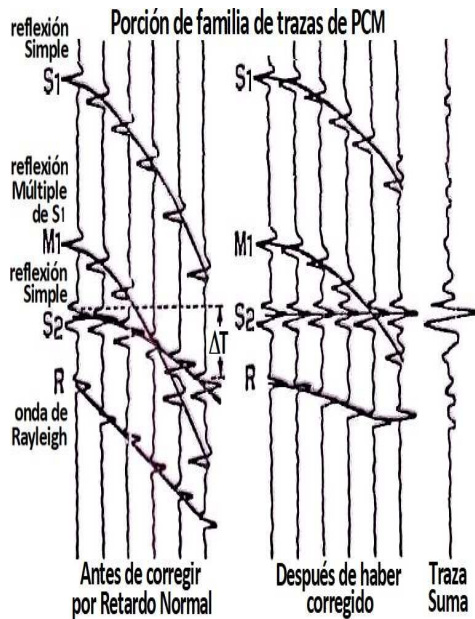
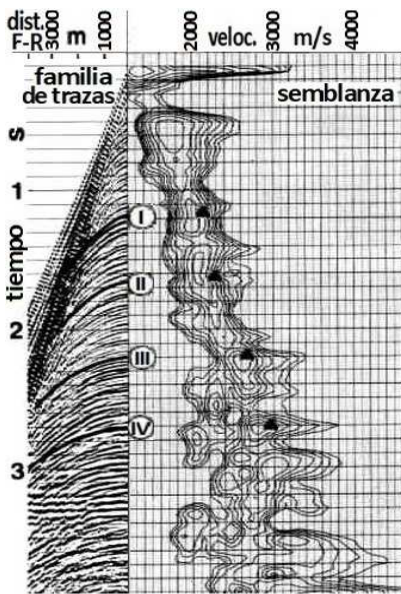
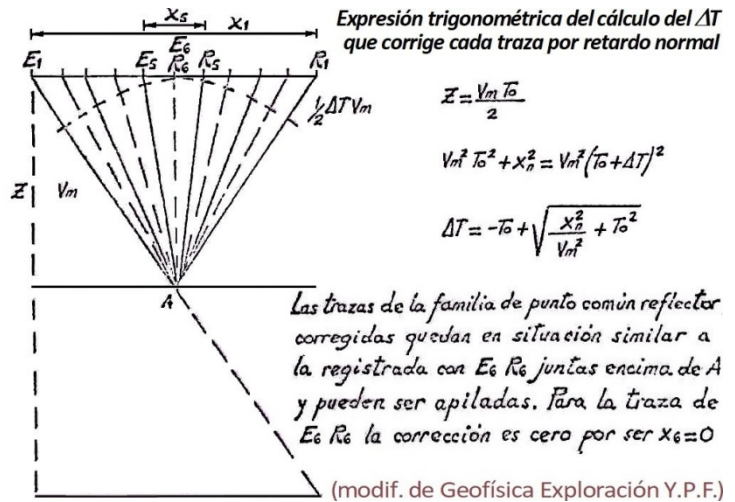


Trayectorias de rayos y trazas reunidas en una familia de puntos comunes medios, sólo 4 en este ejemplo, pero suelen ser 36, 48 ó 96.

**I) Correcciones dinámicas por retardo normal (Normal Move Out, NMO):** Son necesarias para horizontalizar las hipérbolas y dejar en fase los picos y valles equivalentes entre las distintas trazas de cada familia de punto común profundo. Hay que llevar todos los registros a tiempos de ida y vuelta (TWT) correspondientes a  $x = 0$  ( $T_0$ ) y para eso se deben calcular las diferencias de tiempo ( $\Delta T$ ) entre cada trayectoria oblicua y la normal a la capa, lo que constituye la corrección por retardo normal (NMO), tal como matemáticamente se expresa en el gráfico arriba de la página sucesiva. Para diferentes tiempos, la velocidad que cancela el retardo normal es diferente. Para cada intervalo temporal establecido se aplica una velocidad media  $V_m$  tal que el cálculo anule dicho retardo. Son velocidades crecientes para tiempos de tránsito cada vez más largos y configuran la llamada

ley de velocidad de apilamiento (*stacking*) que logra optimizar a la familia o *gather* y atenúa las reflexiones múltiples debido a que estas últimas provienen de una profundidad menor que las reflexiones simples (sean de onda P o S, aunque casi siempre se trabaja con las primeras). Es decir, **al venir las múltiples de una profundidad menor, tienen una velocidad media  $V_{mM}$  de corrección menor –y por tanto una curvatura hiperbólica mayor–** a la  $V_{mS}$ , que es la velocidad media que corrige a las reflexiones simples con las cuales tienden a superponerse. Existe, por ende, una diferencia de tiempo  $\Delta T$  entre uno y otro alineamiento hiperbólico (indicado abajo a la derecha), siendo la línea de rebote en trazos por la capa B algo inexistente, porque la onda se mantiene dentro de A y es el error de interpretación al que podría llevarnos la múltiple (superpuesta en este ejemplo con otro reflector real, lo cual no tiene por qué ser así).

El bosquejo central muestra que el  $\Delta T$  de corrección dinámica apropiado para la reflexión simple S2 resulta insuficiente para la múltiple M1 (repetición de S1) y en consecuencia sus eventos siguen quedando un tanto desfasados, con un **retardo** o *move out residual*. Y se ve que un ruido superficial alineado recto, como la onda de Rayleigh (*ground roll*) u otros, también queda desfasado tras aplicar esta corrección.



Corrección dinámica; ver texto (figuras modif. de Geofísica Exploración Y.P.F.)

La simple S1 corregirá su  $\Delta T$  con una velocidad menor que se aplicará en una ventana temporal que la contenga. Entonces las velocidades medias  $V_{mS}$  que anulan el retardo (crecientes con el tiempo) permiten obtener la **ley de velocidad** que mejor corrige dinámicamente los datos en cada ventana temporal que se defina, algo que en la práctica resulta de un **análisis de velocidades** interactivo de prueba y error auxiliado por algoritmos de correlación; a la izquierda una familia con las curvas de semblanza para resaltar las reflexiones simples I a IV. Estas  $V_{mS}$  suelen no diferir en más del 5% de la que se podría obtener con precisos datos de sísmica de pozo. Con esta ley podemos luego calcular los espesores (Z) de cada capa, así como sus velocidades interválicas. Para ello ha de saberse que las velocidades medias reales –que se han intentado aproximar mediante el análisis de velocidades de apilamiento– no resultan adecuadamente estimadas por las medias aritméticas ( $V_{ma}$ ), sino por las **raíces de las medias cuadráticas** ( $V_{rmc}$ , o  $V_{rms}$  en inglés por *root mean square*) en función de que las

trayectorias de rayos no son totalmente verticales –en cuyo caso efectivamente una media aritmética podría aplicarse sin error–. Aquí sus expresiones analíticas:

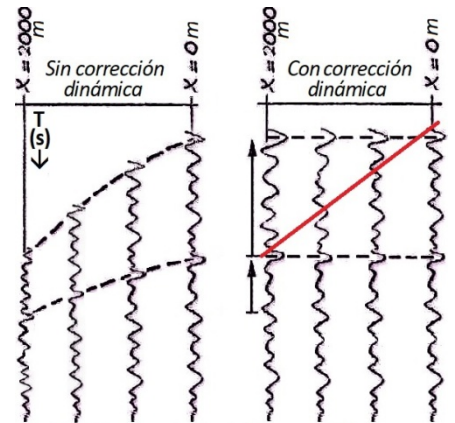
$$V_{\text{rmc}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n V_i^2 \Delta T_i}{\sum_1^n \Delta T_i}} \neq V_{\text{ma}} = \frac{\sum_1^n V_i \Delta T_i}{\sum_1^n \Delta T_i}$$

Desde las sucesivas  $V_{\text{rmc}}$  estimadas interactivamente puede obtenerse la sucesión de *velocidades interválicas*  $V_i$ , eventualmente con intervalos de variable espesor en el subsuelo. A cada espesor le corresponde un cierto intervalo de tiempo de ida y vuelta vertical, llamado  $\Delta T_i$ , que no debe confundirse con los  $\Delta T$  vistos para la corrección del retardo normal. Estos conceptos fueron publicados en Estados Unidos por **Hewitt Dix** en 1955.

**D) Apilamiento o suma (stacking):** Es la culminación de la corrección dinámica, tal como se ve en la figura central de la página previa. Al haber conseguido dejar en fase las reflexiones simples o primarias y desfasados los ruidos superficiales –los que hayan sobrevivido a las estrategias de adquisición– y también desfasados los ruidos profundos (esencialmente ondas múltiples varias) al sumar o apilar lo que se está haciendo es atenuar ruidos y resaltar la señal, es decir, *obtener una traza suma que consigne mejorar la relación señal/ruido (signal/noise), la esencia del método de stacking o apilamiento.*

Las reflexiones múltiples se suelen atenuar a 1/3 o 1/4 de la amplitud de la reflexión simple, aunque en ciertos casos en que las velocidades de eventos simples y múltiples se asemejan, estos últimos pueden llegar a sobrevivir al apilamiento y podría entonces propender a confusiones en la interpretación. De ser así, existe una alternativa posterior en la secuencia de procesamiento sísmico para lograr su eliminación, la *deconvolución predictiva*, que luego referiremos.

**C) Enmudecimiento frontal (mute):** es una operación complementaria previa al apilamiento, cuyo fin es eliminar de una familia la porción más somera de las trazas con mayor apartamiento, dado que el estiramiento producido por la corrección dinámica hace perder definición a ese tramo superior de las trazas (donde el  $\Delta T$  es mayor) como se ilustra a la derecha. Definiendo un límite gradual en rampa para esos tiempos superficiales de las trazas más lejanas a la fuente, sus amplitudes se multiplican por cero evitando así apilar porciones con bajas frecuencias que contribuirían negativamente a la suma. Cuando en un coro alguien desafina, lo mejor es hacerlo callar.

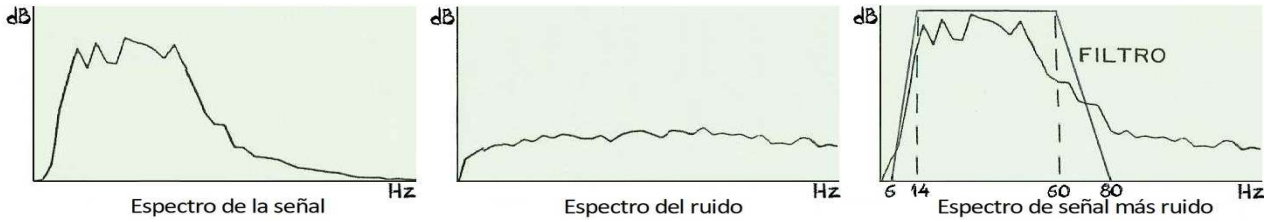


Efecto del estiramiento de las trazas lejanas para los reflectores someros por la corrección dinámica; en rojo la rampa de corte elegida para enmudecer los tramos de las trazas por encima de ella.

- En esta etapa del procesamiento sísmico de reflexión ya se posee una sección sísmica –o un cubo– interpretable, en un formato digital denominado **SEG Y** que (como el SEG B) también estableció la Society of Exploration Geophysicists de los Estados Unidos tras probar otras opciones. Una *sección o cubo sísmico está constituido de trazas-suma, cada una de las cuales es una serie temporal ( $T_0$ ) de valores de amplitud, muestreados en general cada 2 ms, o menos en trabajos someros de muy alta resolución.*

**C) Filtrados:** En el Tema 14 hemos referido el **filtro ranura (notch filter)**, para suprimir un ruido de frecuencia específica en el registro de campo), el **filtro antialias** (para evitar frecuencias que podrían aliarse erróneamente) y varias estrategias del dispositivo de campo para minimizar arribos superficiales no deseados. Pero muchos ruidos igual son registrados en conjunto con las señales. Se los intentará ahora separar haciendo uso de filtros de frecuencias, de velocidades, de coherencia u otros. Si no se los borra –o al menos reduce– podrían obtenerse imágenes sísmicas procesadas de confusa interpretación. Pero *siempre se debe tratar de evitar la pérdida de parte de la señal que podría suceder como daño colateral a causa de un desmedido afán por suprimir ruidos.* *Attenti* que demasiado quitamanchas nos puede dejar la camisa agujereada mal...

**Filtrado de frecuencias:** puede hacerse parcialmente ya en la adquisición, pero la mayor parte se filtra en el procesamiento. Permite eliminar los ruidos cuyas frecuencias difieren de las que contiene la señal. Se aplica en forma de trapecio con dos rampas como corta-bajos y corta-altos para suprimir, respectivamente, las bajas y altas frecuencias temporales. En los extremos izquierdo y derecho del espectro (en el dominio transformado de Fourier) las frecuencias son eliminadas por completo, mientras que en la zona central son preservadas. Y en las rampas se las va cortando gradualmente desde 0 a 100% (figura al inicio de la próxima página) para así evitar la aparición del **fenómeno de Gibbs** (descrito en 1899 por el estadounidense **Willard Gibbs**, que además fue uno de los pioneros de la termodinámica). Se hace así porque, si hubiera un corte abrupto vertical, tipo cajón, se generaría ruido por el problema de sobrepaso residual de las formas de onda de las series de Fourier.

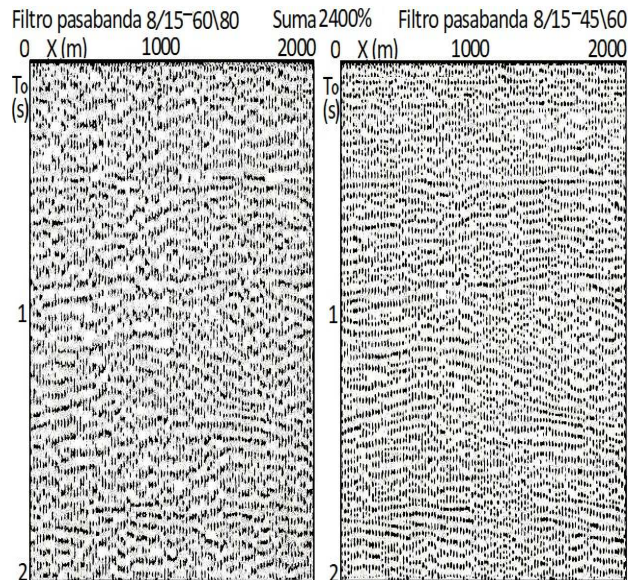


Espectros de frecuencia de la contribución teórica de la señal y el ruido (que en la práctica no pueden conocerse *a priori*), espectro conjunto (el realmente registrado) y filtro trapezoidal elegido, con rampas en este caso entre 6/14 y 60/80 Hz.

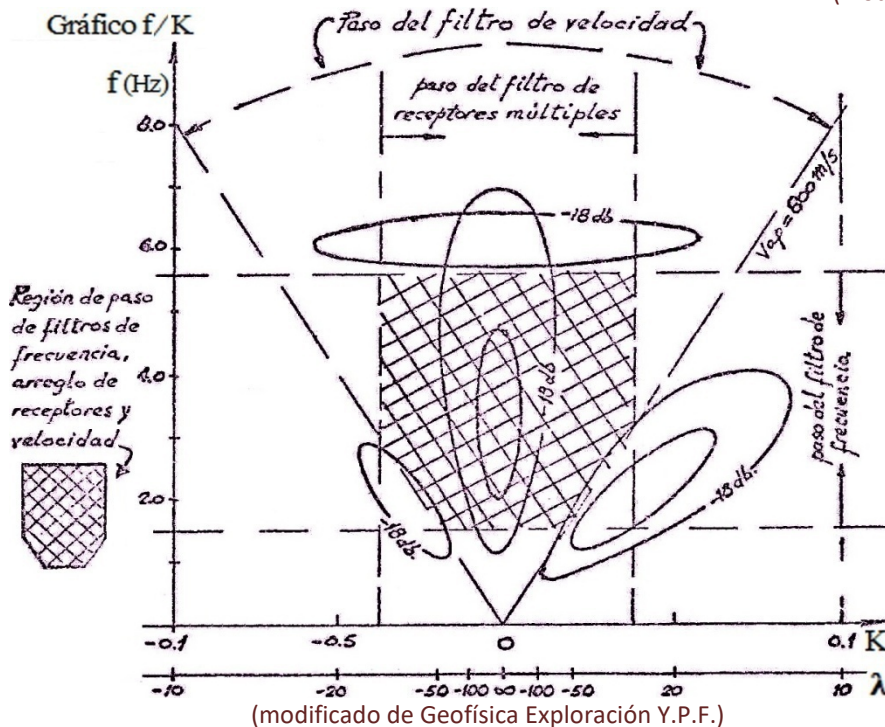
Se pueden calcular varias magnitudes útiles para caracterizar señal y ruido al registrar y procesar sísmica de reflexión: la frecuencia media (*mean*) o promedio, la frecuencia dominante (*dominant*; la cantidad de repeticiones de un pico o valle principal de la onda por unidad de tiempo), el ancho de banda (*band width*, que surge de hacer la resta entre frecuencia máxima y mínima) y el número de octavas (*octaves number*) donde  $N^{\circ}oct = \log_2 [f_{max}/f_{mín}]$ . Por ejemplo, un espectro de 10 a 80 Hz contiene tres octavas: 10-20, 20-40, 40-80.

La palabra octava en música refiere a los armónicos de una nota, o sea sus múltiplos de frecuencia; por ejemplo la 1° octava de Do es 261,6 Hz y la 2° es 523,2 Hz. Y un tono es una diferencia de altura (frecuencia) de 1/6 de octava –aunque en acústica tono es sinónimo de frecuencia fundamental–; el conjunto de armónicos da el timbre de la música o la voz (oscilaciones de menor período contenidas por la onda fundamental o de mayor período). Do surge de *Dominum* (el Señor) y re, mi, fa, sol, la, si (490 Hz su 1° octava) son las iniciales de las sucesivas estrofas de un himno del año 770 del monje, historiador y poeta longobardo Paulus Diaconus, escrito en el norte de la actual Italia en honor a San Juan el Bautista.

A la derecha un ejemplo real de aplicación de un **filtro pasabanda** (*bandpass filter*) sobre una sección sísmica antigua, de escaso recubrimiento (2400%), cuya pobre calidad mejora cuando se reduce la entrada de altas frecuencias, en este caso mayormente ruido. Si pintamos un mural a varias manos, puede no ser bueno el aporte que de onda nos dé gente hiperkinética sin motricidad fina.



(modificado de Geofísica Exploración Y.P.F.)



(modificado de Geofísica Exploración Y.P.F.)

**Filtrado de velocidades:** se basan en representar la información sísmica en gráficas  $f/K$  (frecuencia/número de onda), que se realiza a través de la aplicación de una doble transformada de Fourier: primero desde la traza (amplitud/tiempo) hacia el espectro de frecuencias (amplitud/frecuencia) y luego a la gráfica  $f/K$ . Entonces pueden eliminarse los ruidos que se presentan como eventos lineales de velocidades distintas a la de la señal. Y después se recorre el camino matemático inverso para volver a la traza sísmica. En la figura a la izquierda puede verse el sector de aplicación del filtro de velocidades junto con los sectores del filtro de frecuencias y del filtrado que ejerce el arreglo de recepción en el campo. Los valores de signo negativo en abscisas

responden a frentes de onda que han arribado con sentido opuesto.

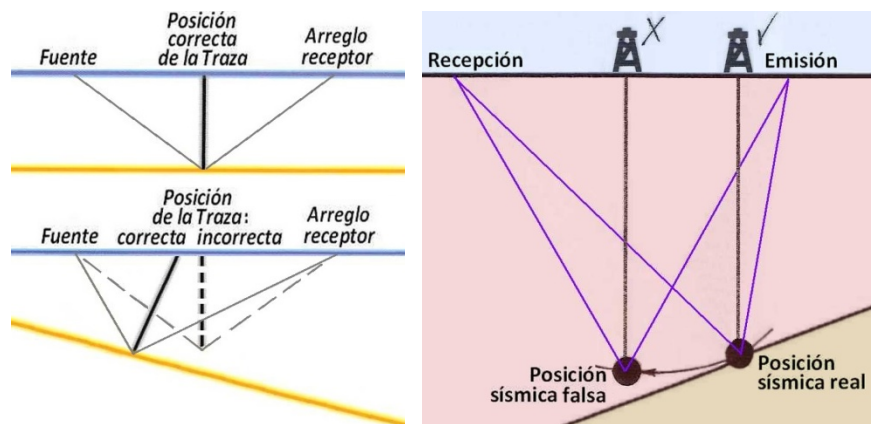
**Filtrado de coherencia:** la eliminación de ruido se realiza en función de algoritmos de coherencia o semblanza que se aplican a partir de la comparación de trazas sucesivas, de donde se deducen tendencias de alineamientos de eventos, considerados como ruidos presuntos que han de suprimirse. Sin embargo, la aplicación de este tipo de filtrado ha de ser muy cuidadosa, ya que se corre alto riesgo de borrar también parte de la señal.

**Otras técnicas:** existen numerosas opciones sofisticadas, a veces más efectivas, como los filtrados recursivos o de retroalimentación, donde parte de la salida se agrega a la siguiente entrada para buscar mejorar el resultado. Una alternativa reciente es el filtrado de curtosis espectral (curtosis mayor implica distribución estadística más dispersa, con colas pesadas) para generar un filtrado pasabanda adaptativo (Ma *et al.*, 2019). Otra opción es el filtrado acotado a partir de la descomposición de vectores y magnitudes singulares considerando el buzamiento local de cada evento y distinguiendo características como salto, pulso y uniformidad para luego aplicar algún tipo de suavización que preserve las terminaciones de tales eventos (Wang & Wang, 2021). Y hay más.

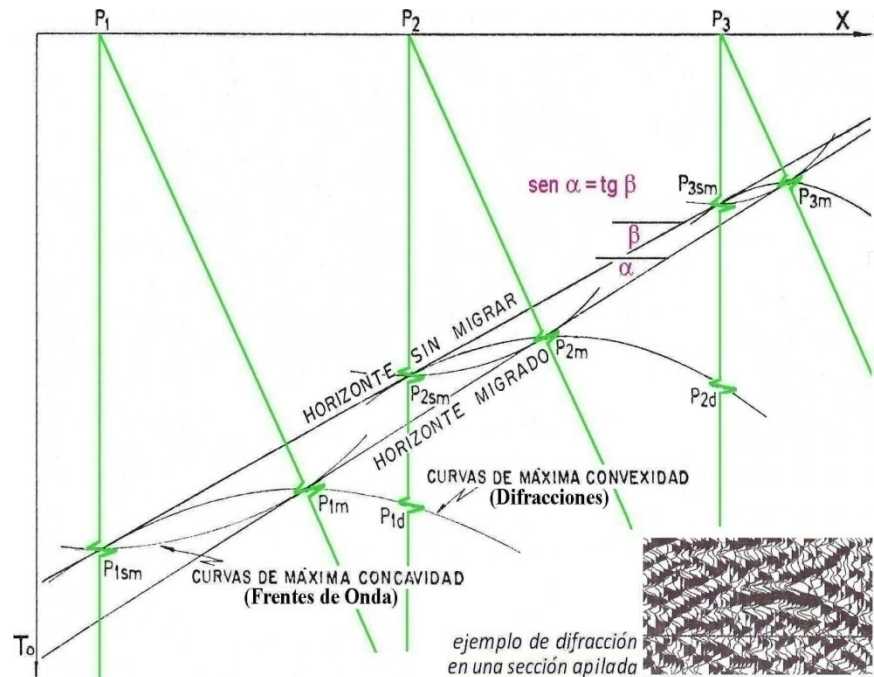
**C) Migración:** Esta fase del proceso de la sección sísmica **permite llevar cada PCM a su verdadera posición** respecto de los puntos de emisión y recepción, algo que no es necesario hacer cuando las interfaces del subsuelo son horizontales, pero que se torna tanto más importante cuanto más pronunciados son los buzamientos, tal como se ilustra a la derecha. Es esencial para una buena interpretación del subsuelo y súper crítico en la localización de un pozo. Consecuentemente resulta de gran importancia migrar cada evento a su posición sísmica verdadera, sobre todo cuando hay fuertes inclinaciones y en verdad la migración ha pasado a ser una etapa rutinaria del procesamiento sísmico desde hace tres décadas merced a la reducción de costos que afortunadamente han conllevado los progresos informáticos.

Al migrar se deben determinar los  $\Delta x$  y  $\Delta y$  para cada PCM que no se halle sobre un plano horizontal. Una forma manual de realizarla, empleada en viejas épocas, es la que se ilustra a la derecha, útil para poder entender geoméricamente de qué se trata.

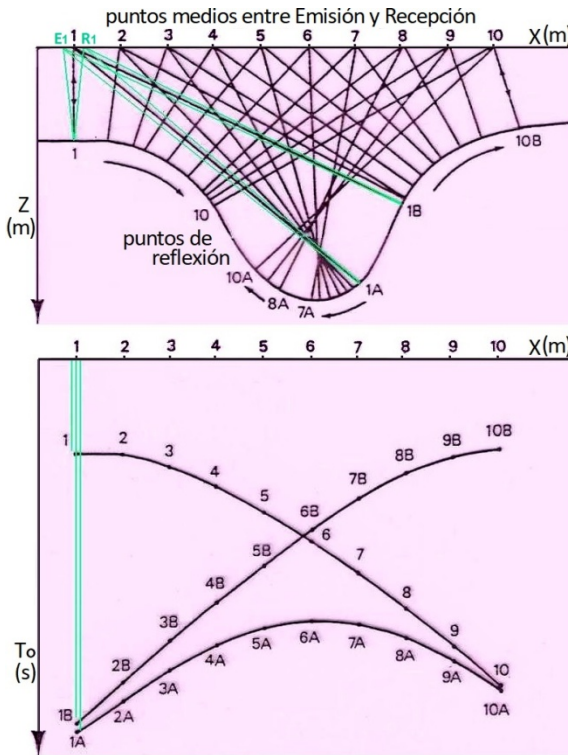
La primera figura de la página siguiente ilustra un caso extremo, sin embargo frecuente en áreas plegadas, donde una interfaz geológica de un sinclinal puede generar tres reflectores sísmicos, dos en X y uno en forma de anticlinal profundo: el **efecto de foco enterrado**. Las consecuencias interpretativas que esto acarreo en viejas épocas fueron nefastas: hubo pozos buscando esas potenciales trampas de hidrocarburos y penosamente se descubrió que sólo eran trampas que la sísmica no migrada tendía a los incautos que así sólo hallaban la ira del jefe...



Migración de cada punto común medio a su ubicación real; ver texto.

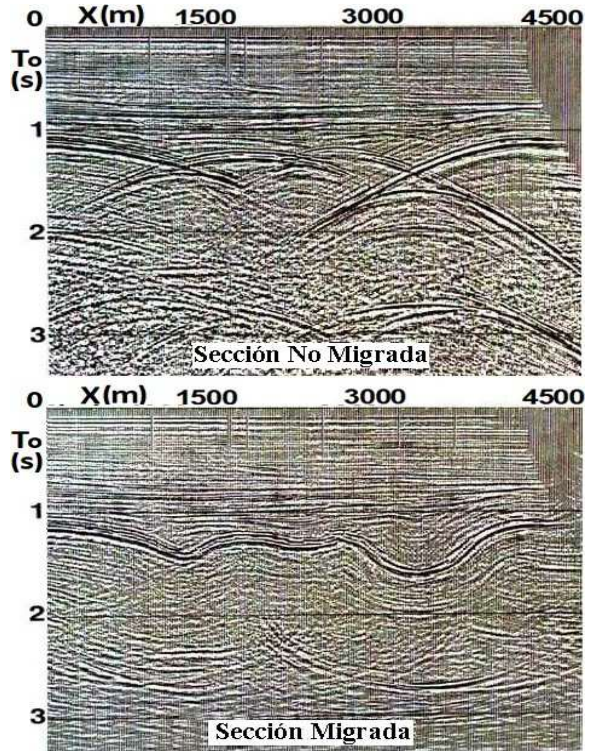


Migración manual: P1sm (sin migrar) es llevado al ápice P1m (migrado) de una hipérbola de difracción visible en la sísmica apilada, que es un punto a lo largo del frente de onda que podría tirarse con compás pinchando en P1; P1d es parte de la difracción que convergerá hacia P1m cuando se migre la sección; lo mismo para P2 y P3; la relación entre los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  permite corroborar la inclinación del horizonte migrado, siempre menor que la del no migrado.



Efecto de foco enterrado; en verde se indica el detalle de Emisión y Recepción de 1, que es análogo para los otros puntos medios; ver texto (modificado de McQuillin et al., 1985)

Caso real: sección sin y con migración (modificado de Sheriff & Geldart, 1995)

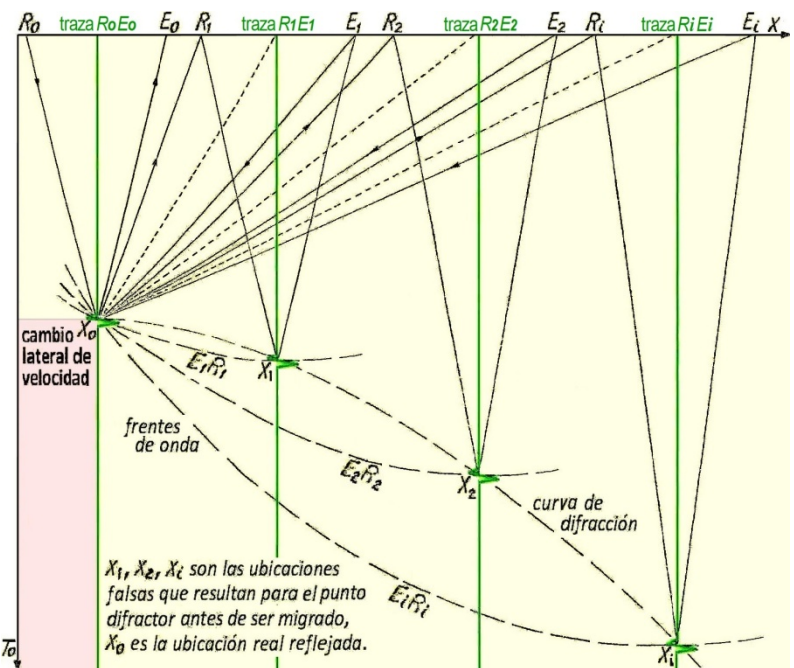


En la figura izquierda obsérvese que si desde E1 parte un frente de onda, éste puede volver reflejado a R1 desde 1, 1A y 1B (rayos en verde) y esas tres reflexiones se asignarán al punto medio como si viniesen derecho desde abajo. Lo mismo sucederá para los puntos 2, 3, etc. (donde sólo están indicados los puntos medios entre E y R). Un ejemplo real puede apreciarse a la derecha, en el que la sección sísmica migrada reconstruye bien la configuración estructural que estaba muy distorsionada en la versión no migrada.

Otra forma de comprender lo que hace el proceso de migración es ver cómo éste opera sobre las hipérbolas de difracción que están siempre presentes en toda sección sísmica no migrada. La figura siguiente esquematiza cómo son asignados los puntos de tales curvas de difracción, a partir de puntos de emisión desde cada uno de los cuales sale un rayo que llega a un punto difractor, que a su vez genera rayos en todas direcciones que van a parar a todos los puntos receptores. Esas localizaciones erróneas, en los puntos medios entre cada emisión E y recepción R, resultan como consecuencia de asumir que los estratos son horizontales y que no existen puntos difractores en subsuelo. La migración lo que hace es mover cada uno de ellos, llevándolos al lugar de donde surge tal energía.

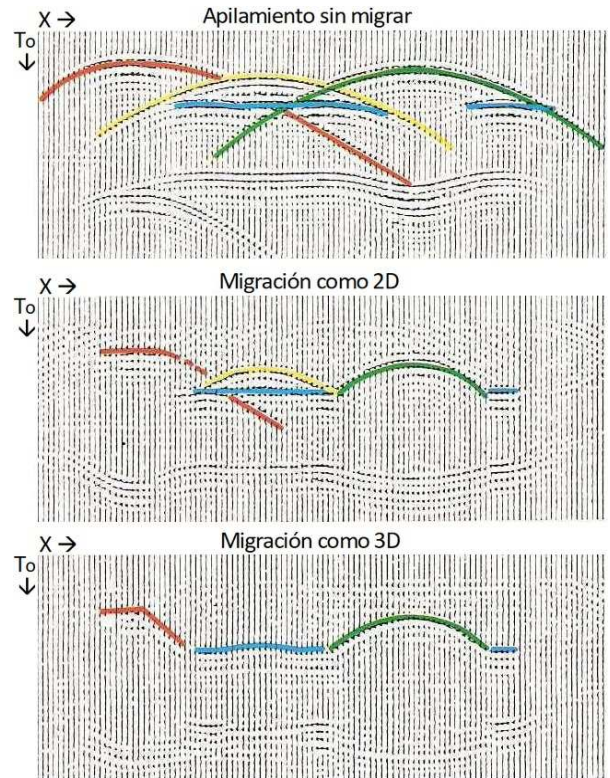
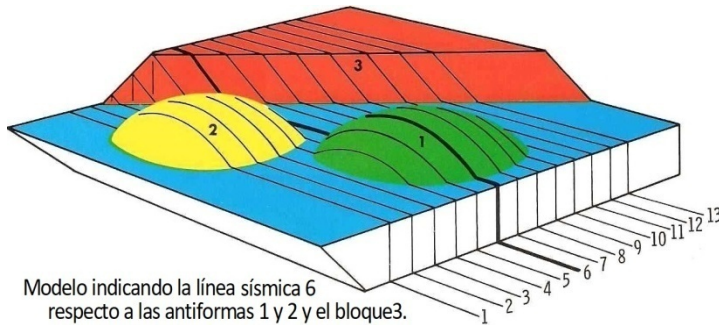
**Un modo de verificar que la migración ha sido apropiada es ver que las deflexiones de las trazas que conforman estos arcos converjan hacia el ápice (de donde en verdad provienen)** haciendo desaparecer las difracciones. Empero, si la corrección se pasa de rosca, la curvatura de las difracciones se invierte llevando a que parezcan sonrisas (acaso burlonas) en lugar de caras tristes, lo cual suele ocurrir en sectores profundos sin interés, tras haber privilegiado profundidades menores. Una forma de migrar a mano es operar sobre las difracciones que se ven en la sección sísmica apilada, no migrada, que es algo complementario del procedimiento manual que comentamos antes.

En la sísmica 2D suele haber algún grado de



Origen de un arco de difracción (modific. de Geofísica Exploración Y.P.F.)

incertidumbre en los parámetros de migración por el desconocimiento de las componentes de inclinación laterales a la línea de registro de campo, y por ello las secciones migradas pueden resultar desenfocadas. Es el caso de la línea 6 en el modelo de abajo, que a la derecha vemos sin migrar (*stack*) y luego migrada como 2D, donde se alcanza a visualizar el anticlinal amarillo que está al costado de la misma, porque no puede pretenderse que desde la superficie del terreno el frente de onda baje y suba sin mirar al costado, como caballo con anteojeras. Esto no ocurre con la sísmica 3D –salvo en los bordes de un cubo– ya que se obtienen registros que dan una visualización completa del espacio circundante que permite ubicar cada cosa en su lugar, tal lo ilustrado en el modelo sintético de abajo, donde ya no aparecen eventos laterales.



Línea 6, resultado de cada modelo de procesamiento. (figuras modificadas de French, 1974)

Ya sea para sísmica bi o tridimensional, hay varios métodos de migración, de los cuales los más conocidos son:

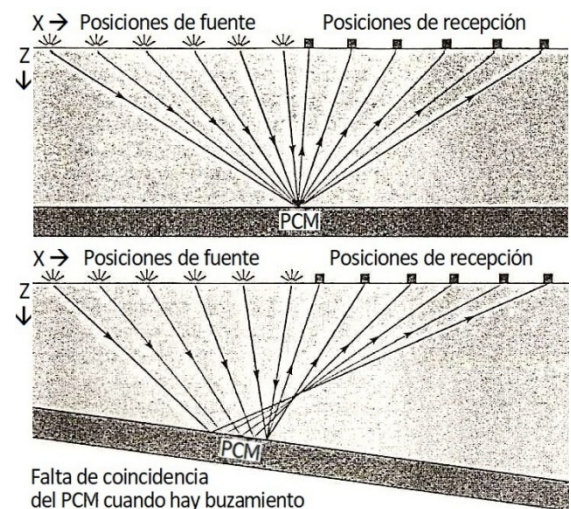
Métodos manuales:

- a) en tiempo, por *envolventes* o bien por *difracciones* (el que más se usó en las primeras épocas del método de *stacking*, como hemos ilustrado)
- b) en profundidad por *envolventes* o bien por *rayos sísmicos*.

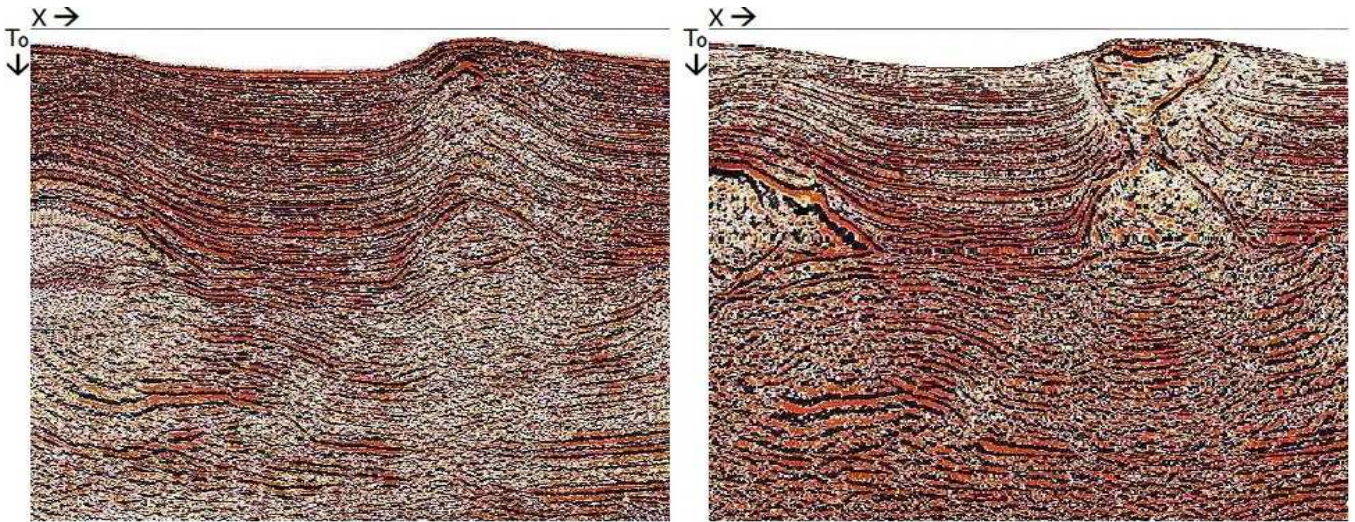
Métodos automáticos:

- a) en tiempo
  - por el método de *difracción o integral de Kirchhoff* (una aproximación de índole estadística)
  - mediante integración de diferencias finitas por *ecuación de onda* (de tipo determinístico, por continuación analítica descendente), más preciso pero más lento que el anterior
  - en el dominio de las frecuencias por *doble transformada de Fourier* (también determinístico y por ecuación de onda), con mejores resultados que los anteriores en altos buzamientos
- b) en profundidad
  - por *trazado de rayos*, más costoso pero con buena resolución de los cambios laterales de velocidad.

**O) Migración pre-apilamiento (*pre-stack*):** Es una opción sólo utilizada en situaciones tectónicas complejas dado su costo, debido a que *el proceso de migración se aplica a cada una de las trazas que va a formar la familia de PCM, en lugar de hacerse sobre la traza suma o apilada*. El método acá aplicado puede ser cualquiera de esos mismos que citamos arriba para migración convencional después de suma o *post-stack*. Al hacer la migración sobre cada traza individual de la familia, se consigue una mejor traza-suma y en definitiva un mejor resultado en la sección a interpretar. El fundamento de esta ventaja puede visualizarse en el gráfico al lado, donde se observa cómo los rebotes de las distintas trayectorias fuente-receptor que han de conformar la familia de trazas de PCM no proceden de un único punto sobre el horizonte reflector si éste inclina. Es decir, *si se apila antes de migrar, se están sumando*



eventos que no coinciden bien y por ende la traza apilada no es tan buena y la posterior migración tampoco lo será. En cambio, si primero se migra, luego el apilamiento será de punto común reflector o profundo (PCR o PCP, sinónimos), o sea mejor. A continuación un ejemplo extremo de cuánto puede llegar a cambiar una imagen procesada de sísmica de reflexión (en este caso 3D) si se aplica migración antes de suma (*pre-stack*). Otras veces la diferencia con la migración después de suma (*post-stack*) no es tan evidente, pero siempre la hay. Migrar es lo más caro del proceso. **Migrar antes de apilar es hacer ese laburo caro 48 o más veces.** Por eso se hace sólo en casos justificados, aunque los progresos informáticos están bajando costos y se pone más fácil.



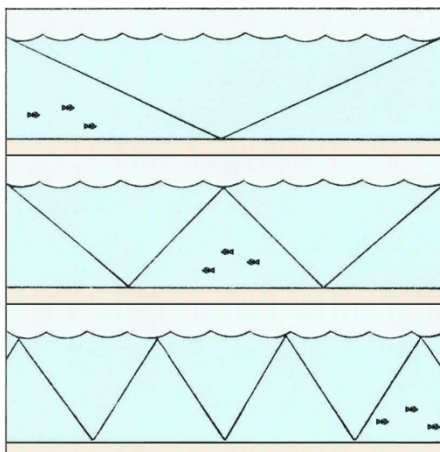
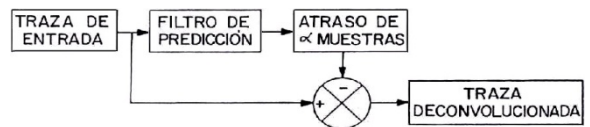
Golfo de México: izquierda, migración post-apilamiento; derecha, pre-apilamiento (modificado de Veritas Geophysical)

**O) Correcciones dinámicas o por retardo buzante (*Dip Move Out, DMO*):** Pergeñadas por **Franklyn Levin** en 1971 en los Estados Unidos, consisten en calcular el retardo buzante (*DMO*) en lugar del retardo normal (*NMO*), lo cual implica contemplar las eventuales variaciones de las velocidades medias cuadráticas ( $V_{rmc}$ ) por efecto de inclinaciones del horizonte reflector, cosa que no hace la corrección por retardo normal. Esto consigue obtener un corrimiento más correcto de los  $\Delta t$  entre las trazas de cada familia al estimar un posicionamiento más adecuado en el subsuelo. Existen programas con diversos algoritmos a tal fin.

Puede recurrirse al *DMO* como una **alternativa más económica a la migración pre-apilamiento**, aunque no tan efectiva. **Otras veces se lo aplica como complemento de la migración antes de suma, a fin de optimizarla.**

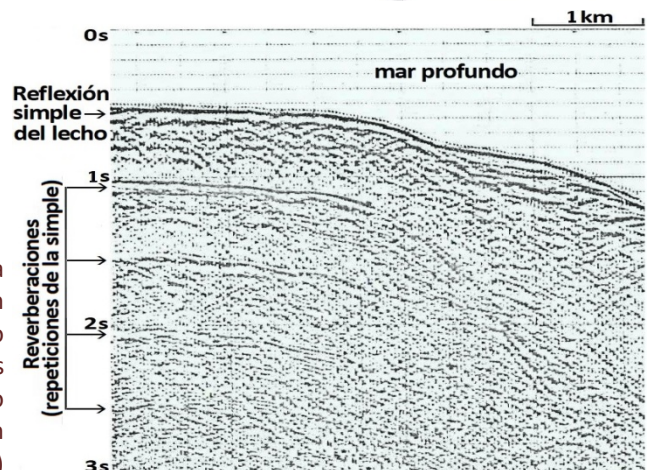
**O) Deconvolución predictiva:** Utilizada **para eliminar reflexiones múltiples** si éstas hubieran sobrevivido al apilamiento. Es un muy buen pesticida. Está formulado con un algoritmo semejante a la deconvolución impulsiva (filtro de Wiener) que busca la repetición de formas reflectoras a tiempos múltiplos enteros del más somero –de la reflexión simple– atacándolas sanitariamente. Acá el esquema operativo de la corrección aplicada:

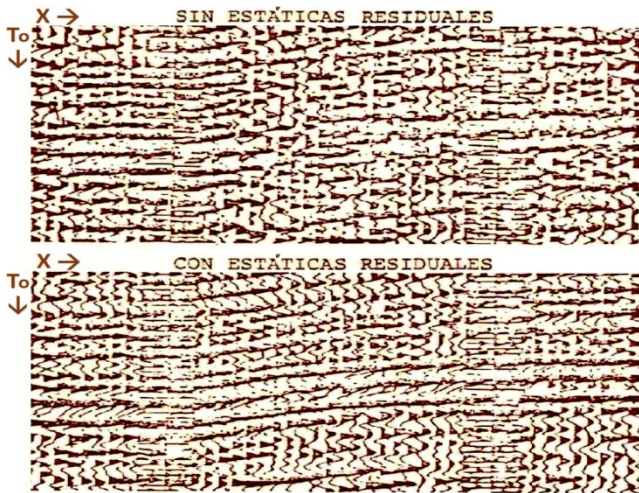
Abajo, ejemplo clásico de múltiples en el espesor de agua de un mar o lago, conocido como reverberación o *ringing*. Su presencia podría causar errores de interpretación. Esta deconvolución las predice, localiza y fumiga letalmente.



Esquemas de reflexión simple –arriba– y sus reverberaciones o múltiples del fondo marino –centro y abajo–.

Sección sísmica con la reflexión del fondo marino y sus múltiples (modificado de Western Geophysical)



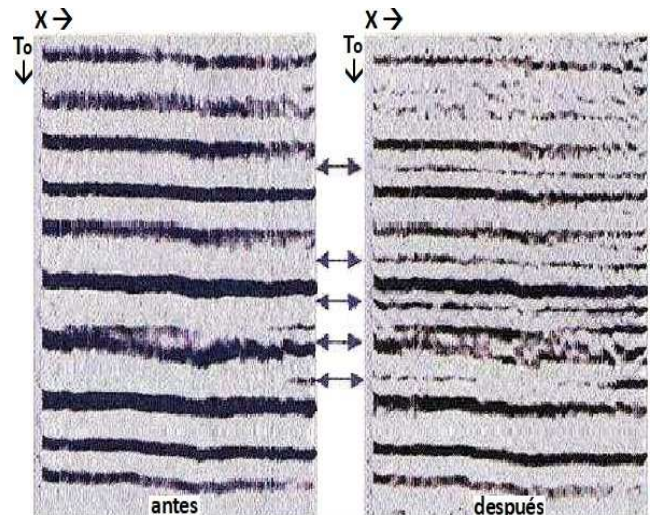


(modificado de Geofísica Exploración Y.P.F)

**O) Realce de frecuencias (*frequency enhancement*):** Es una alternativa para mejorar el aspecto de la sísmica, en este caso buscando obtener una mejor resolución de los eventos. Para ello se emplean algoritmos que permiten recuperar altas frecuencias casi perdidas ya desde el registro de campo, lo cual tiene el alto riesgo de intercalar falsos horizontes si el proceso se aplica en exceso y por eso se recomienda comparar con buenos datos sísmicos de pozo. La figura de la derecha es un ejemplo de esta aplicación.

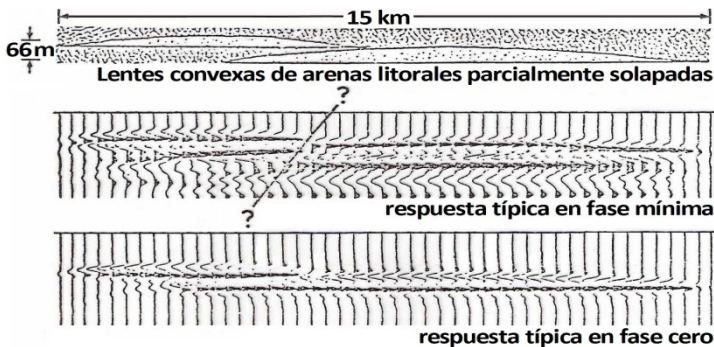
**O) Correcciones estáticas residuales:** Recurso de ajuste fino de las correcciones estáticas, si éstas no hubieran sido muy buenas por las carencias en los datos de las estáticas de campo. Es un proceso que se hace por comparación de trazas contiguas, donde el algoritmo busca eventuales saltos de tiempo constante a lo largo de toda una traza respecto a sus vecinas y, de haberlo, los corrige. En su aplicación debe cuidarse de mejorar la consistencia en el colgado de los tiempos de las trazas, pero sin atenuar los verdaderos rasgos estratigráficos o estructurales del área. Como con toda cosmética, tampoco emocionarse y que termine pareciendo una mascarita de carnaval.

A la izquierda un ejemplo de este proceso opcional.



Sección extraída de un cubo sísmico. Realce de altas frecuencias. (modificado de Chopra et al, 2003)

**O) Corrimiento de fase (*phase shift*):** Esta es otra opción cosmética, para correr la fase de las trazas sísmicas, de fase mínima a fase cero –lo más habitual– o bien a la inversa. El primer caso suele hacer más fácilmente interpretables las secciones sísmicas. Al verres sólo se aplica si una sísmica de



Corrimiento de fase (modific. de Geofísica Exploración Y.P.F.)

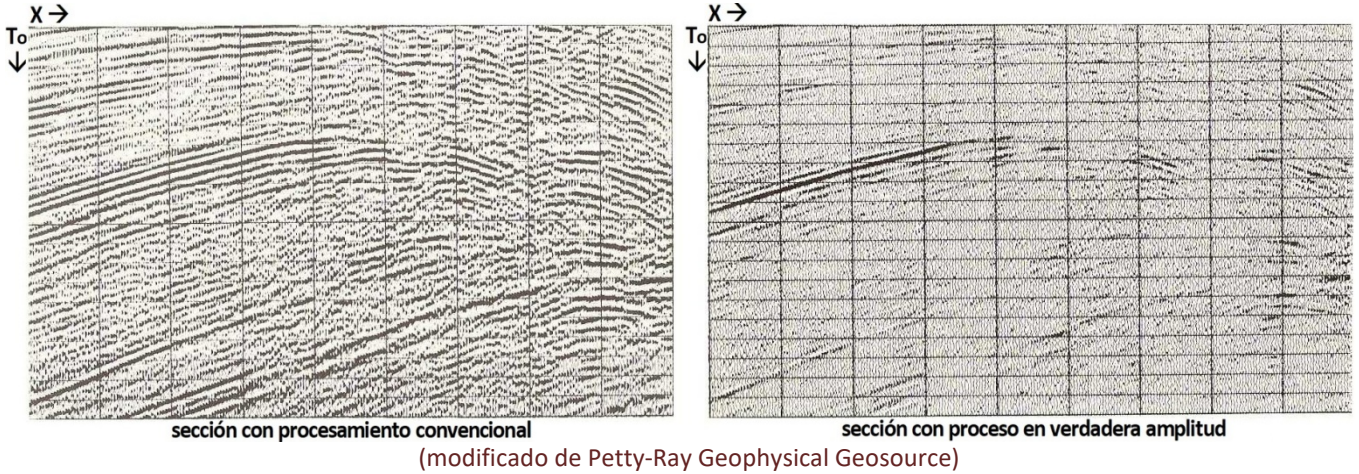
vibro debe ser comparada con sísmica aledaña que ha sido registrada con una fuente impulsiva. Inmediatamente arriba a la izquierda vemos un modelo sintético de arenas con el efecto que produce el corrimiento de fase.

Igual debe saberse que **algunos procesos dan fase mixta** (intermedia entre cero y mínima) y siempre hay que cotejar con datos reales de fase cero (de pozo o sísmica de superficie) para no hacer la gran Pinocho...



**O) Recuperación de verdaderas amplitudes:** Como adelantamos, es un proceso sólo aplicado en casos particulares en los que el objetivo no es visualizar mejor, sino la aplicación posterior de otros procesos especiales, tales como la **inversión de trazas**, el **método AVO** o **aplicaciones sismoestratigráficas** que se abordan en los Temas 17 y 18. Las que acá definimos como verdaderas amplitudes (*true amplitudes*) son las más parecidas posibles a las que se hubieran registrado si la divergencia esférica y un sinnúmero de etcéteras no hubiesen acaecido, **respetando en todo lo posible las amplitudes relativas de las sucesivas reflexiones que resultan de sus coeficientes de reflexión**, porque computar las diferencias de magnitud de tales coeficientes es esencial para poder luego efectuar esos otros procesos sobre bases firmes. Para hacerlo, el método consiste en optimizar la recuperación de ganancias con este otro criterio que es más analítico que visual y que requiere más tiempo de trabajo de parte de los analistas, lo cual se efectúa mediante cálculos de áreas relativas involucradas en el viaje del frente de onda según sea la profundidad y distancia fuente-receptor de los

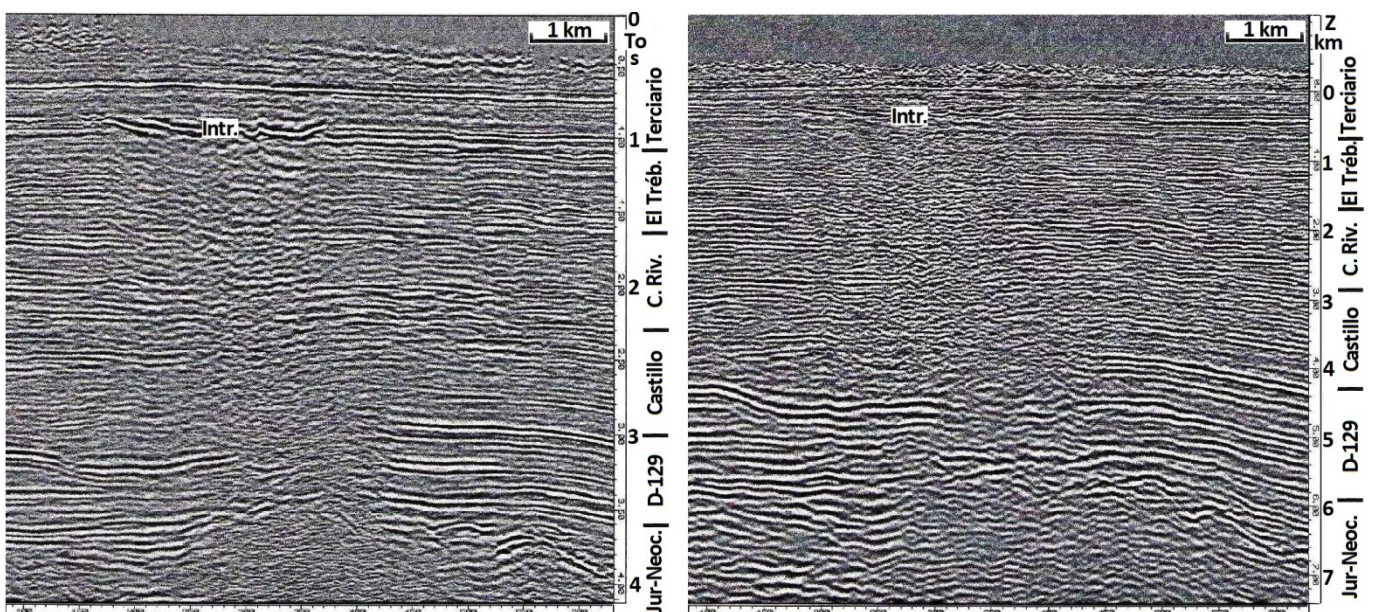
eventos registrados. A continuación ilustramos un caso real: en verdadera amplitud resaltan sólo unos pocos reflectores de gran contraste acústico, mientras que la sección convencional aumenta la amplitud de muchos otros reflectores a fin de visibilizar mejor su continuidad para poder hacer su seguimiento para la interpretación.



**O) Conversión a profundidad (*depth conversion*):** Conversiones las hay de todo tipo (religión, género, estado civil, política, nacionalidad, etc.), salvo convertirse en hinchita de otro equipo: ¡eso nunca! Convertir viene del latín *convertere* (*con*: junto; *vertere*: verter, girar). Convertir la sísmica de milisegundos a metros fue medio como un tabú para los geofísicos de la vieja guardia. Los avances tecnológicos nos han vuelto más flexibles.

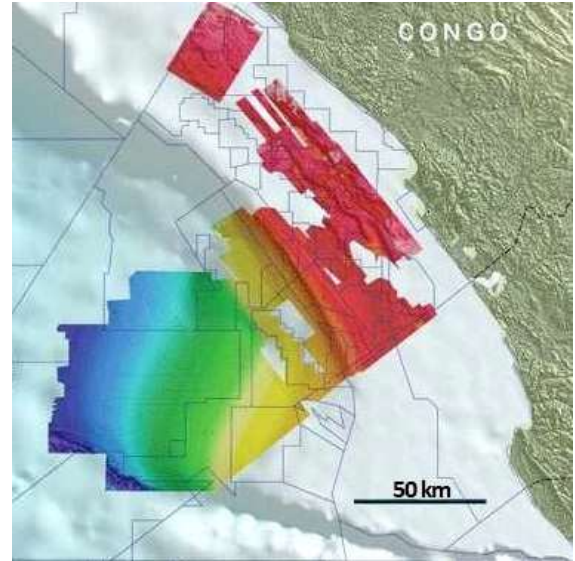
Hay varios métodos para convertir a profundidad Z la escala vertical de la sísmica de reflexión (tiempos  $T_0$  de ida y vuelta verticalizados). **Puede hacerse con leyes de velocidad obtenidas en pozos** (cuantas más en el área de trabajo, mejor) **o bien con datos calculados desde el procesamiento**. En este último caso lo más efectivo es hacerlo migrando los datos en profundidad. Si el proceso está poco controlado es preferible manejarse con la sísmica en tiempo y calcular las profundidades en los puntos de interés prospectivo. Un exceso de confianza en una sísmica con escala vertical métrica podría derivar en interpretaciones y prospectos de profundidad errónea.

El ejemplo siguiente, en el flanco Norte de la cuenca Golfo San Jorge, obtenido por migración por trazado de rayos en profundidad antes de suma, muestra cómo **se altera la escala vertical en términos relativos**. Las secuencias más altas, del Terciario, se ven más delgadas en la escala Z, mientras que lo contrario ocurre con las secuencias profundas de la Fm. Pozo D-129, rocas madres del Cretácico, más delgadas en escala de  $T_0$ . Se debe recordar que las velocidades sísmicas en general se incrementan con la profundidad, como la densidad, por efecto de la creciente sobrecarga y consecuente compactación, expulsión de fluidos y diagénesis, tendencia que se revierte sólo en intervalos relativamente delgados cuyas características litológicas son particulares.



Sección sísmica E-O tomada de una 3D, en escalas de  $T_0$  y de Z, se evidencia el cambio de espesores relativos; intr. indica fuertes reflexiones por intrusiones ígneas; las cuatro intermedias son formaciones del K en Chubut (gentileza Tecpetrol)

**O) Fusión de cubos (merge):** Los cubos sísmicos –en rigor volúmenes de variadas formas– registrados contiguamente (en general en distintos años) pueden ser unidos o fusionados promediando los parámetros del proceso en la franja limítrofe o reprocesando todo en conjunto. También puede vincularse sísmica 3D con uno o varios programas 2D preexistentes y parcialmente solapados, tras reprocesar los registros más antiguos con los parámetros de la 3D. Las fusiones facilitan interpretaciones regionales, así como de estructuras de borde de una 3D. A la derecha un ejemplo del África atlántica.



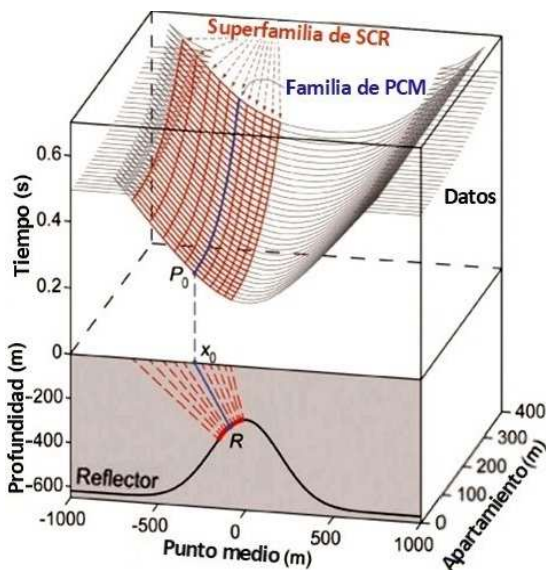
3D fusionadas en la cuenca marina de Congo; mapeo de un reflector de interés petrolero en el subsuelo con To más someros en rojo y más profundos en azul (modificado de congomhc.com)

**PROGRESOS RECIENTES**

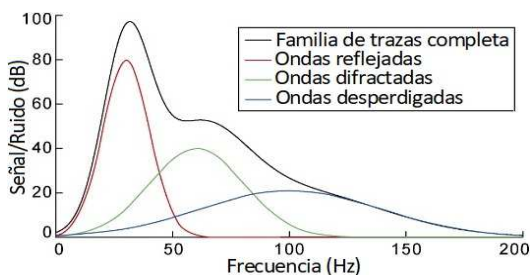
El procesado de datos (sísmicos o de lo que sea) es uno de los campos de evolución más veloz, como bien sabemos.

Entre otros avances de estos años, hay métodos como los de **separación ciega de fuentes (blind source separation)** en general asumidas como estadísticamente independientes. Son eficaces para eliminar ondas múltiples y otros ruidos coherentes, como el *ground-roll*.

También se han desarrollado nuevas funciones transformadas a fin de optimizar determinadas correcciones. Las **curvículas**



Esquema de ubicaciones de reflexión que generan una familia de trazas de punto común medio (PCM) versus una superfamilia de superficie común reflectora (SCR) sobre una interfaz plegada; todos los datos de PCM o SCR se asignan al punto  $P_0$  con  $x_0$  y  $t_0$  (modificado de Helmann & Deidda, 2024)



Espectros de sísmica de onda completa (modificado de Li & Qu, 2022)

(*curvelets*) resultan de la extensión del concepto de ondícula para la representación no adaptativa (cuya fase no es constante) de objetos a múltiples escalas. Generalizan la transformada de Fourier recurriendo a una base que representa tanto la ubicación como la frecuencia espacial difiere de la transformada de una ondícula en que el grado de localización en la orientación varía con la escala. Son muy útiles para representar imágenes (u otras funciones) que son lisas salvo singularidades angulosas donde los objetos tienen una escala de longitud mínima, estableciendo que las curvas de mayor resolución sean más alargadas que las de menor resolución. De este modo las discontinuidades son aproximadas mediante funciones localmente lineales, algo que aplica bien a la sísmica y otros campos (pero no por ejemplo a las fotografías u otras imágenes que tienen detalles variables en cada escala). Se las emplea para reconstruir tramos de trazas sin datos registrados, eliminación de múltiples y como auxilio en programas de inversión o modelado sísmico (Tema 18, pág.461).

Otro abordaje de años recientes es el apilamiento de trazas ya no de familias de PCM o PCR, sino de megafamilias de **superficie común reflectora (SCR o CRS, common reflection surface, figura al lado)**, útil para resolver capas inclinadas, reducir ruido y mejorar la estimación de velocidades interválicas. Parte de modelar el conjunto de capas en base a datos previos, lo cual se puede ir ajustando, y es posible por la enorme capacidad de cálculo hoy disponible.

En el Tema 14 (pág.365) hemos comentado dos innovaciones en adquisición. Una es la **sísmica de banda ancha** que, luego de procesada, ofrece ventajas interpretativas (véase Tema 17, pág.434).

La otra es la **adquisición de onda completa (full wave)** que incluye las ondas reflejadas, las difractadas y las desperdigadas (*scattered*). Discretizada en familias de trazas de punto común medio y analizada a escala múltiple y en los dominios del tiempo y la frecuencia, logra realzar la energía de las señales débiles dadas por difracciones y desperdigamiento, y elimina ruidos. El análisis geométrico y de ondas, orientado a cada objetivo particular perseguido, consigue imágenes de resolución horizontal más alta que la convencional.

Asimismo debe citarse la **interpolación 5D**. Recuérdese que a este propósito las cinco dimensiones consideradas de un cubo son: ubicaciones de recepción en líneas y transversas, tiempos de registro, y distancias y azimuts desde la fuente. La transformada rápida de Fourier aprovecha las propiedades matemáticas y las simetrías de las ondas seno y coseno para reducir la cantidad de cálculos requeridos. Su empleo permite la reconstrucción de trazas en posiciones en las que no pudieron ser registradas por dificultades topográficas. Es una herramienta informática también útil para estimar anisotropía horizontal (Tema 18, pág.477).

Estas alusiones en absoluto agotan el elenco de innovaciones actualmente disponibles, como tampoco aquellas referidas para otros capítulos de sísmica, ni para las demás prospecciones geofísicas abordadas.

En fin, en algún momento se trabajará con ordenadores cuánticos. Pero ya ahora, sea con ultimísima tecnología digital o no tanto, una vez finalizado el procesado sísmico, las secciones individuales, o bien los volúmenes resultantes de un proyecto, ingresarán a la fase de interpretación con finalidades geológicas y aplicadas diversas, de exploración o desarrollo.

*Processing* no calcula fechas de eclipses u olimpíadas, pero hace que una mole de datos físicos se transforme en imágenes de lo invisible.

## CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Qué cosas le sucede a la onda sísmica durante su viaje por el subsuelo?
- ¿Cuál es el objetivo del procesado sísmico de reflexión?
- Esquematizar los pasos esenciales del procesamiento de la sísmica de reflexión y explicar cuál es el objetivo de cada uno de dichos pasos.
- Mencionar las etapas no imprescindibles pero muy comunes del procesado.
- ¿A qué metodología sísmica se recurre para la corrección estática y por qué?
- ¿Qué ventajas da el uso de la transformada de Fourier?
- ¿Cuál es el significado de la convolución y cuál el de la deconvolución en el procesado sísmico?
- Describir la corrección dinámica y el apilamiento.
- ¿Qué tipos de filtrado pueden hacerse y cuál es su utilidad?
- ¿Qué objetivo tiene el proceso de migración y en qué consiste hacerlo antes de suma?
- Citar etapas ocasionales del proceso y su eventual utilidad.
- ¿Cuáles son los requerimientos para convertir fiablemente a profundidad?
- ¿Cómo y para qué se fusionan adquisiciones sísmicas colindantes?

## BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Balch, A. & Smolka, F., 1970. Plane and spherical transient Voight waves. *Geophysics*, V.35 (p 745-761)
- Burger, H., 1992. *Exploration geophysics of the shallow subsurface* (p 134-196, 208-225). Prentice-Hall.
- Brown, A., 1991. Interpretation of three dimensional seismic data (p 6-11). A.A.P.G., Memoir 42.
- Cantos Figuerola, J., 1972. *Tratado de geofísica aplicada* (p 235-305). Librería de Ciencia e Industria.
- Carter, M., 1989. Depth conversion using normalized interval velocities. *The Leading Edge*, V.8 N°1 (p 15-16).
- Chopra, S., Alexeev, V. & Sudhakar, V., 2003. High-frequency restoration of surface seismic data. *The Leading Edge*, V.22 N°8 (p 730-738).
- Coffeen, J., 1984. Interpreting seismic data (p 62-78). PennWell.
- Dobrin, M., 1976. *Introduction to geophysical prospecting* (p 148-253). McGraw-Hill.
- Duarte, L., Donno, D., Lopes, R. & Romano, J., 2014. Seismic signal processing: some recent advances. En *Proceedings ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (5p).
- Fowler, C., 1990. *The solid Earth* (p 133-147). Cambridge University Press.
- French, W., 1974. Two-dimensional and three-dimensional migration of model-experiment reflection profiles. *Geophysics*, V.39 (p 265-277).
- Gyger, L., Malehmir, A., Manzi, M., Vivin, L., Lepine, J., Kaslilar, A., Valishin, O., Marsden, P. & Hamerslag, R., 2023. Broadband seismic acquisition and processing in hardrock environment: a case study from Blötberget, Sweden. E.A.G.E. 29th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (p 1- 5).

- Hardy, R. & Hobbs, R., 1991. A strategy for multiple suppression. *First Break*, V.9 N°4 (p 139-144).
- Helmann, & Deidda, , 2024. Common-reflection-surface stack with global simultaneous multi-parameter velocity analysis - A fit for shallow seismics. *Applied Sciences*, V.14 N°6748 (19 p).
- Jiang, Z., Qiu, X., Lin, J. & Chen, Z., 2006. Extracting reflection with wavelet transform in vibroseis signal processing. *Journal of Geophysics and Engineering*, N°3 (p236-242).
- Klauder, J., Price, A., Darlington, S. & Albersheim, W., 1960. The theory and design of chirp radars. *Bell System Technical Journal*, N°39 (p 745-807).
- Li, J., Wang, C., Li, J., Li, G., Wang, Y., An, R. & Zhang, J., 2011. The recent overseas development of pre-stack migration of seismic data. *Progress in Geophysics*, V.26 N°3 (p 966-982).
- Li Z, & Qu, Y., 2022. Research progress on seismic imaging technology. *Petroleum Science*, V.19, N°1 (p 128-146).
- Ma, H., Qian, Z., Li, Y., Lin, H., Shao, D. & Yang, B., 2019. Noise reduction for desert seismic data using spectral kurtosis adaptive bandpass filter. *Acta Geophysica*, V.67 (p. 123-131).
- Marsden, D., 1989. Layer cake depth conversion. *The Leading Edge*, V.8 N°1 (p 10-14).
- McQuillin, R., Bacon, M. & Barclay, W., 1985. An introduction to seismic interpretation (p 37-57, 185-188). Gulf Publishing.
- Ricker, N., 1940. The form and nature of seismic wavelets and the structure of seismograms. *Geophysics*, V.5 (p 348-366).
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. Basic exploration geophysics (p 163-199). John Wiley & Sons.
- Schultz, P. & Sherwood, J., 1980. Depth migration before stack. *Geophysics*, V.45 N°3 (p 376-393).
- 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 134-171, 178-190, 275-318, 457-458). Cambridge University Press.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 351-362 y 370-395). Cambridge University Press.
- Trad, D., 2008. Five dimensional seismic data interpolation. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* (4 p).
- Wang C. & Wang, Y., 2021. Robust singular value decomposition filtering for low signal-to-noise ratio seismic data. *Geophysics*, V.86 (p 233-244).
- Yilmaz, O., 2001. Seismic data processing (2065 p). Society of Exploration Geophysicists.

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