



20/03/2020

Sísmica de Refracción

Asignatura: EXPLORACIÓN PETROLERA

Carrera Ingeniería de Petróleos

Alumnos 4to año – 1er semestre

Docente: Mgtr.Lic. Bibiana Castiglione

Sísmica de Refracción

Asignatura: EXPLORACIÓN PETROLERA

En la presente unidad se desarrolla la metodología de exploración sísmica de refracción. Se realiza una introducción y se resumen las expresiones matemáticas involucradas. También se detallan las etapas de la aplicación de la técnica: Recopilación de información y planificación, adquisición de datos en campo, procesamiento de datos e interpretación.

1. Introducción

La Sísmica de Refracción es una de las técnicas de Geofísica Aplicada en la Industria Petrolera. Esta técnica se basa en energizar un punto cualquiera del terreno, generando de esta manera perturbaciones que se propagan en el subsuelo y luego cumpliendo las leyes y principios de propagación de ondas, las mismas son registradas mediante receptores colocados en superficie.

Principalmente se utiliza en la etapa de exploración de hidrocarburos tanto en on shore, como off shore.

La energización en un punto del terreno, denominado shot poin (punto de tiro), se efectúa inyectando ondas elásticas que se propagan a través del subsuelo y son detectadas en receptores colocados equidistantes en la superficie terrestre, luego de refractarse totalmente en la interface.

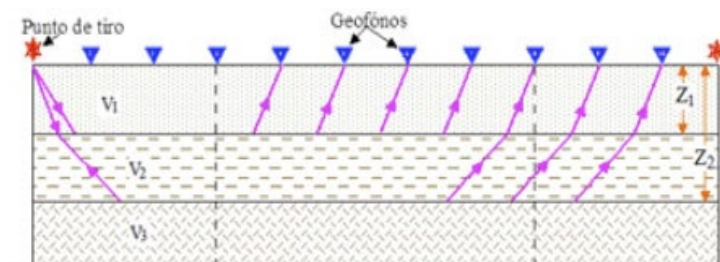
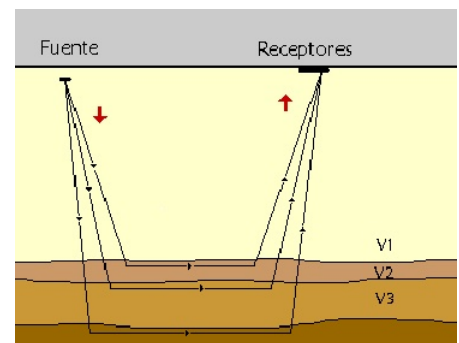


Figura N° 1: Sísmica de refracción on shore y la trayectoria de sus ondas.
Fuente de Imágenes: Modificado de Sheriff et al., 1991

1.1. Principales usos en la Exploración de Hidrocarburos

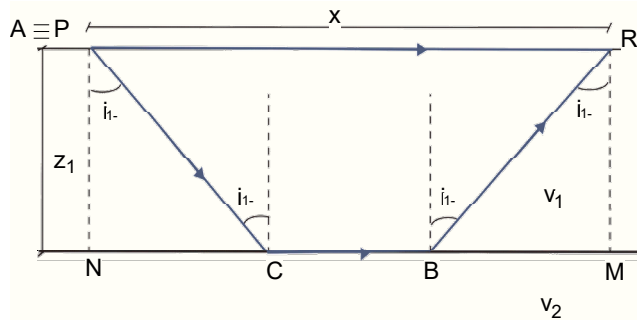
Si bien la Sísmica de Refracción es aplicable con diferentes objetivos, los principales usos en la Industria Petrolera, consiste en:

- Cálculo de espesores de capas sedimentarias y sus buzamientos.
- Cálculo del espesor de la capa meteorizada, denominada “weathering”, necesario en la corrección estática de la sísmica de reflexión.
- Identificación y localización de domos salinos y yeso.
- Determinación de falla con bajo y alto rechazo.
- Determinación del espesor aluvional en ríos y búsqueda de cauces antiguos sepultados.
- Determinación de mantos y cuerpos geológicos de rocas magmáticas.
- Identificación de intercalación de capas de alta y baja velocidad.

2. Expresiones Matemáticas

2.1. Caso de capas Horizontales

caso de 1 capa: Para obtener las expresiones matemáticas útiles en exploración sísmica de refracción es necesario estudiar el tiempo de la onda, desde su inyección en el terreno, hasta su registro en los receptores. En este caso se consideran dos medios (1 capa) homogéneos e isotrópicos, horizontales y paralelos a la superficie, como el de la gráfica, donde la velocidad de los medios para la propagación de la onda es $V_1 < V_2$.



La expresión matemática de la velocidad es desplazamiento sobre tiempo: $V = \Delta d / \Delta t$, de donde se obtiene el Δt que es el tiempo que le lleva a la onda desplazarse por: AC (en el medio 1) + CB (en el medio 2) + CR (en el medio 1).

$$T_R = \frac{\overline{AC}}{v_1} + \frac{\overline{CB}}{v_2} + \frac{\overline{BR}}{v_1} \quad (1)$$

Por lo tanto, el Δt es el " T_R " tiempo desde la

emisión de la onda hasta su llegada al receptor.

El Z_1 en la Figura corresponde a la profundidad desde la superficie, hasta la interfase de los dos medios, bajo el punto emisor (PE). Al tratarse de capas horizontales y paralelas este valor es constante para cualquier punto del terreno.

Considerando a : $\overline{AC} = \frac{Z_1}{\cos(i_{1-2})} = \overline{BR}$

$$\overline{CB} = x - \overline{NC} - \overline{BM} \quad \text{con} \quad \overline{NC} = \overline{BM} = z_1 \cdot \tan(i_{1-2})$$

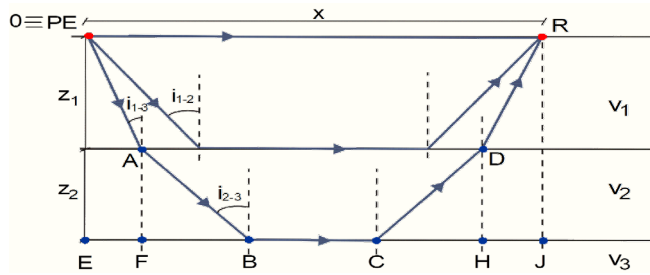
donde i_{1-2} es el ángulo de incidencia en la interfase entre los medios 1 y 2.

Reemplazando todo en la expresión matemática (1), teniendo en cuenta que por la Ley de Snell para la Refracción Total $v_2 = \frac{v_1}{\sin(i_{1-2})}$, se obtiene que el tiempo de llegada al receptor de la onda emitida en superficie y refractada en la interfase de ambos medios, es igual a:

$$T_R = \frac{x}{v_2} + \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-2}) ; \text{ llamando } \theta_2 = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-2}), \text{ se tiene que:}$$

$$\left[T_2 = \frac{x}{v_2} + \theta_2 \right] \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{lo que representa una recta cuya pendiente es } 1/v_2 \text{ y la ordenada al origen } \theta_2 \\ t = m \cdot x + d \text{ (expresión matemática de una recta).} \end{array} \right.$$

caso de 2 capas: En este caso se consideran tres medios (2 capas) homogéneos e isotrópicos, horizontales y paralelos a la superficie, como el de la gráfica, donde las velocidades de los medios para la propagación de la onda es $V_1 < V_2 < V_3$.



El tiempo de la onda desde su inyección en el terreno hasta su llegada al receptor R, será el que le lleve desplazarse por: OA (en el medio 1) + AB (en el medio 2) + BC (en el medio 3) + CD (en el medio 2) + DR (en el medio 1) y será igual a:

$$T_3 = T_R = \frac{\overline{OA}}{v_1} + \frac{\overline{AB}}{v_2} + \frac{\overline{BC}}{v_3} + \frac{\overline{CD}}{v_2} + \frac{\overline{DR}}{v_1}$$

Haciendo las mismas consideraciones que en el caso de 1 capa, se obtiene como resultado:

$$T_3 = \frac{x}{v_3} + \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-3}) + \frac{2 \cdot z_2}{v_2} \cdot \cos(i_{2-3}), \text{ llamando } \theta_3 = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-3}) + \frac{2 \cdot z_2}{v_2} \cdot \cos(i_{2-3})$$

caso de n capas: Generalizando esta expresión para n medios homogéneos, isótropos, horizontales y paralelos, con velocidades aumentando hacia los medios más profundos: $V_1 < V_2 < V_3 \dots < V_n$, la expresión matemática es:

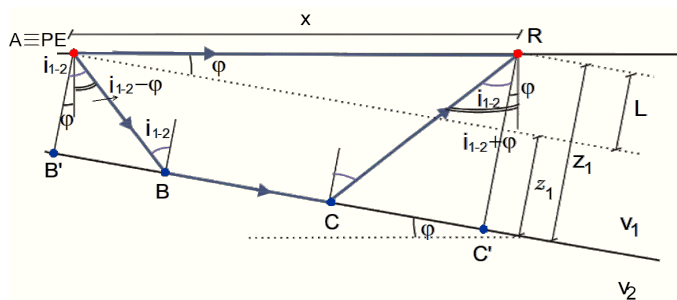
$$T_n = \frac{x}{v_n} + \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-n}) + \frac{2 \cdot z_2}{v_2} \cdot \cos(i_{2-n}) + \dots + \frac{2 \cdot z_{n-1}}{v_{n-1}} \cdot \cos(i_{(n-1)-n})$$

llamando $\theta_n = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-n}) + \frac{2 \cdot z_2}{v_2} \cdot \cos(i_{2-n}) + \dots + \frac{2 \cdot z_{n-1}}{v_{n-1}} \cdot \cos(i_{(n-1)-n})$

2.2. Caso de capas Inclinadas

caso de 1 capa: En este caso se consideran dos medios (1 capa) homogéneos e isótropos, inclinados (buzantes), como el de la gráfica, donde la velocidad de los medios para la propagación de la onda es $V_1 < V_2$.

Para obtener la expresión matemática correspondiente y de aquí en adelante se define a los espesores "z" como el espacio entre dos discontinuidades, medidos desde el punto, bajo el cual se desea medir (discontinuidad superior) hasta la discontinuidad inferior de forma perpendicular a esta última.



El tiempo de la onda desde su inyección en el terreno hasta su llegada al receptor R, será el que le lleve desplazarse por: AB (en el medio 1) + BC (en el medio 2) + CR (en el medio 1) y se expresa como:

$$T_R = \frac{\overline{AB}}{v_1} + \frac{\overline{BC}}{v_2} + \frac{\overline{CR}}{v_1} \quad (2)$$

Considerando los siguientes reemplazos en la expresión (2):

$$\overline{AB} = \frac{z_1}{\cos(i_{1-2})} \quad \overline{CR} = \frac{z_1}{\cos(i_{1-2})}$$

$$\overline{BC} = x \cdot \cos(\varphi) - \overline{CC'} - \overline{B'B} \quad \overline{BC} = x \cdot \cos(\varphi) - z_1 \cdot \operatorname{tg}(i_{1-2}) - z_1 \cdot \operatorname{tg}(i_{1-2})$$

por la Ley de Snell se conoce que $\sin(i_{1-2}) = \frac{v_1}{v_2}$, por otra parte, por trigonometría se tiene que el

$\sin(\varphi) = \frac{L}{x}$ y según sea la ubicación de los receptores sobre la superficie, ya sea sobre la dirección en que la capa inclinada se profundiza (registro de bajada) o emerge (registro de subida), será la expresión del tiempo de llegada de la onda a los distintos receptores.

$$T_{2b} = \frac{x}{v_{2b}} + \theta_{2b} \quad \text{ó} \quad T_{2s} = \frac{x}{v_{2s}} + \theta_{2s}$$

Tiempo de bajada por la interfase (1-2):

$$T_{2b} = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-2}) + \frac{x}{v_1} \cdot \sin(i_{1-2} + \varphi), \text{ llamando velocidad aparente de bajada a: } v_{2b} = \frac{v_1}{\sin(i_{1-2} + \varphi)}$$

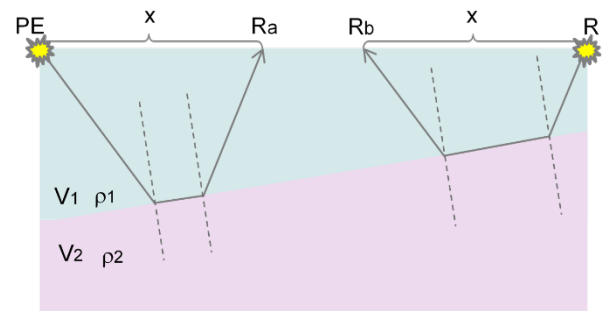
este término es θ_{2b}

Tiempo de subida por la interfase (1-2):

$$T_{2s} = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-2}) + \frac{x}{v_1} \cdot \sin(i_{1-2} - \varphi), \text{ llamando velocidad aparente de subida a: } v_{2s} = \frac{v_1}{\sin(i_{1-2} - \varphi)}$$

este término es θ_{2s}

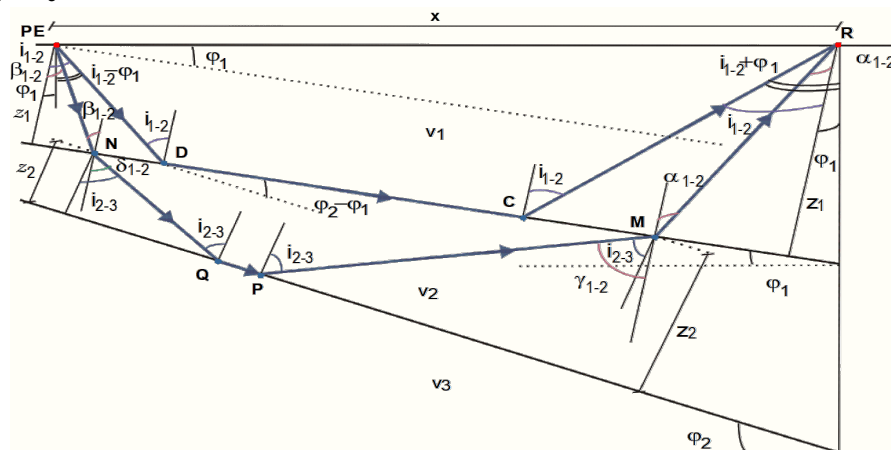
Cabe destacar que si se emiten ondas en PE y se reciben en R, como se puede ver en el gráfico, el tiempo que le llevó a la onda llegar desde su emisión es el mismo, que si se emite en R y se recibe en PE. La diferencia entre tiempos de subida o de bajada está dada por los tiempos de llegada a receptores intermedios y equidistante con respecto al punto de emisión PE o R, como se observa en la gráfica de la derecha.



La verdadera velocidad del medio 2 (velocidad real) para la propagación de la onda, estará dada por la Ley de Snell. Es decir que se dispondrá de estas tres expresiones:

$$v_{2b} = \frac{v_1}{\sin(i_{1-2} + \varphi)} < v_{2\text{Real}} = \frac{v_1}{\sin(i_{1-2})} < v_{2s} = \frac{v_1}{\sin(i_{1-2} - \varphi)}$$

caso de 2 capas: Aquí se consideran tres medios (2 capas) homogéneos e isótropos, inclinados (buzantes), como el de la gráfica, donde la velocidad de los medios para la propagación de la onda es $v_1 < v_2 < v_3$.



Es importante recordar lo antes expuesto que: *para obtener la expresión matemática correspondiente y de aquí en adelante se define a los espesores “z” como el espacio entre dos discontinuidades, medidos desde el punto, bajo el cual se desea medir (discontinuidad superior) hasta la discontinuidad inferior de forma perpendicular a esta última.*

Denominando al punto emisor PE como “O”, el tiempo de la onda desde su inyección en el terreno hasta su llegada al receptor R, será el que le lleve desplazarse por: ON (en el medio 1) + NQ (en el medio 2) + QP (en el medio 3) + PM (en el medio 2) + MR (en el medio 1), se expresa como:

$$T_R = \frac{ON}{v_1} + \frac{NQ}{v_2} + \frac{QP}{v_3} + \frac{PM}{v_2} + \frac{MR}{v_1}$$

A medida que aumenta el número de capas inclinadas o buzantes, se va complicando su expresión matemática cada vez más. Sin embargo, para lograr expresar el tiempo de la trayectoria antes mencionada, es necesario a priori resolver el sistema de dos medios (1 capa) y una vez obtenida la información sobre sus velocidades, espesores y ángulo de buzamiento ϕ_1 , recién en este momento se procede a aplicar el *Método de Reducción*, es decir a partir de ahora se considera la primer capa horizontal (la cual se elimina posteriormente), lo que permite resolver la segunda capa inclinada de la misma manera que se resolvió la primera.

Aquí es necesario tener presente como queda la expresión para las velocidades aparentes y real del medio 3:

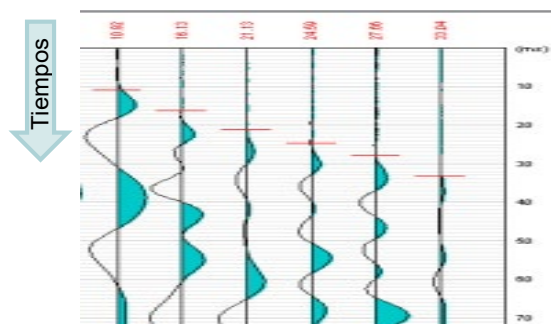
$$v_{3b} = \frac{v_1}{\sin(\alpha_{1-2} + \phi_1)} < V_{3Real} = \frac{v_2}{\sin(i_{2-3})} < v_{3s} = \frac{v_1}{\sin(\beta_{1-2} - \phi_1)}$$

2.3. Dromocrona de Refracción

Una dromocrona (del griego “dromos”, carrera, y “chronos”, tiempo) es una gráfica “distancia-tiempo”, donde en el eje de las abscisas se representan las ubicaciones de los sensores en el campo y sobre el eje de ordenadas el tiempo que le llevó a la onda, desde que se emitió hasta llegar al receptor de que se trate. Es decir que se grafican los **primeros arribos** (first break) a cada receptor. En estos primeros arribos llegarán distintas ondas:

- Directas: las que viajan a penas por debajo de la superficie del terreno.
- Reflejadas.
- Refractadas: las que alcanzaron el ángulo de incidencia crítico, para la refracción total.

Teniendo en cuenta un tendido de receptores como el de la figura, al energizar un punto de la superficie, todos los eventos llegarán hasta los receptores y de allí pasarán a ser registrados en un sismógrafo, de esta manera se obtiene un sismograma de refracción.



Luego a partir de este registro se leen los primeros eventos ó primeros quiebres (first break) en cada traza. A demás a cada traza le corresponde un x (distancia fuente-receptor).

Figura N° 2: Sección de un sismograma de refracción donde se han marcado los *first break*.

Posteriormente en un sistema de coordenadas T-x se grafican los tiempos leídos, en función de x (utilizando escalas adecuadas de tiempo y distancia). De esta manera se obtiene un conjunto de puntos, los cuales se alinearán según rectas (ya visto en el ítem de expresiones matemáticas), a esta gráfica se la denomina **Dromocrona**.

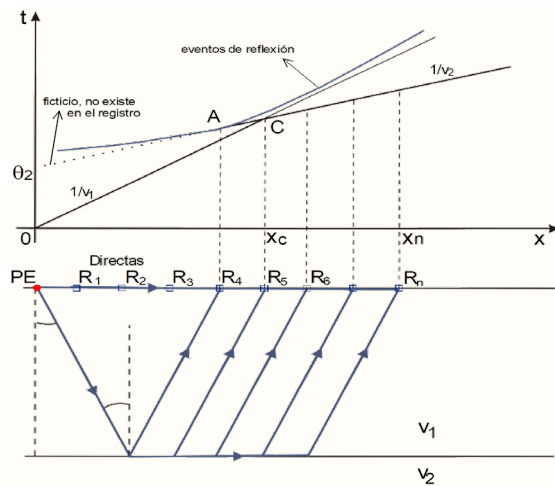


Figura N° 3: gráfica inferior, esquema de rayos que llegan a los diferentes receptores. Gráfico superior Dromocrona.

Tiempo de la directa: $T_D = \frac{x}{v_1}$

Con ordenada al origen igual a cero.

Tiempo de la Refractada: $T_{\text{Refr}} = \frac{x}{v_2} + \frac{2 \cdot z \cdot \cos(i_{1-2})}{v_1}$

Donde θ_2 representa la ordenada al origen de la refractada dada por: $\theta_2 = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-2})$

Tiempo de la Reflejada: $T_{\text{Ref}}^2 = T_0^2 + \frac{x^2}{v_1^2}$
(esta expresión se verá en unidades posteriores).

En la dromocrona que se presenta en el gráfico superior de la Figura N°3, se representa la relación de los tiempos de llegadas entre ondas directas, reflejadas y refractadas. En ella se observa que hasta

el Punto A, las primeras en llegar a los detectores son las ondas directas, y luego las reflejadas. A partir de este punto comienzan a existir las refractadas que alcanzaron el ángulo crítico en la incidencia, lo que permite la refracción total de la onda, llegando las mismas después de las directas y antes de las reflejadas.

Luego y desde el punto C, comienzan a llegar primero las refractadas, como se observa en la dromocrona, donde se ha indicado la pendiente de la primer refractada = $1/v_2$.

Para el procesamiento de datos (cálculo de espesores, velocidades y buzamiento), así como para la interpretación se utilizarán estas dromocronas, la cual se confecciona a partir de los primeros arribos de las ondas en los receptores.

Los receptores utilizados en refracción son de compresión, por lo que lo que se leen son los primeros arribos de la onda P.

3. Etapas de la Sísmica de refracción

La aplicación de la presente técnica posee cuatro etapas bien diferenciadas:

- 1- Recopilación de información y planificación
- 2- Adquisición de datos en campo
- 3- Procesamiento de datos
- 4- Interpretación

3.1. Recopilación de Información y Planificación

Recopilación de Información: en esta etapa se obtienen todos los datos disponibles relevantes sobre la zona a explorar, ello incluye:

- mapas e informes de geología de superficie,
- mapas topográficos,
- planos de propietarios en la zona,

- registros e informes geofísicos previos
- registros e informes de perforaciones disponibles,
- informes de pozos de agua o estudio de agua en la zona,
- fotografías aéreas y/o satelital
- y toda aquella información que podría ser útil tanto en esta etapa de planificación, como es la información de un “scouting” de la zona relevando animales en la zona, zona de pastoreo, zonas de lagos, lagunas o ríos, estilo de la perimetral de los campos (alambrados con candados, por ejemplo), puestos, etc.

Planificación: con el objetivo claro de la exploración y mediante el análisis de la información antes mencionada se diseñan los parámetros de la adquisición, en los que se encuentran principalmente:

- Area a explorar, cantidad y rumbo de las líneas sísmicas
- Distancia entre líneas, entre tendidos, entre receptores y distancia fuente-primer receptor.
- Duración de registro, intervalo de muestreo.
- Tipo de fuente sísmica: si la fuente son explosivos de debe determinar la profundidad de hueco y cantidad de explosivos.

Nota: Además para todo lo antes mencionado se debe tener en cuenta que la profundidad de investigación es, aproximadamente entre $1/3$ y $1/4$ de la longitud total del tendido de receptores abiertos.

3.2. Adquisición de Datos de Campo

La adquisición de datos de campo consiste en la obtención de un registro de trazas, o varios donde cada traza es obtenida por un receptor.

Según sea el objetivo de investigación (profundidad, dimensiones del área de estudio, varias líneas trazadas en el campo o no), así como la geología, estratigrafía, topografía, etc., será la fuente de energía, los receptores a utilizar.

A continuación, se detallan las principales características de:

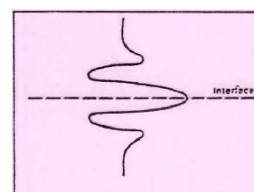
- Fuentes de energía, Receptores, cables de transmisión
- Sismógrafos
- Disposición en el campo
- Procedimiento de adquisición

Fuente de Energía: por lo antes expuesto es importante, según la geología y estratigrafía, así como la topografía como profundidad de investigación, seleccionar la fuente de energía adecuada, la cual puede ser: de impacto (trabajos muy superficiales, más que nada en obras civiles), vibroseis (camiones vibradores), cañón de aire, aquapulse, etc. Especialmente al trabajar en la exploración de hidrocarburos las fuentes de energía más características son:

- (a) Vibroseis, también llamados camiones vibradores.
- (b) Explosivos.
- (c) Cañón de aire (en el mar).

(a) Vibroseis: estos son camiones vibradores o también llamados vibros, son las fuentes más utilizadas en tierra desde la década de 1980, son seguros y producen un barrido controlado de frecuencias.

Se caracterizan por generar una forma de onda (ondícula) de fase cero, es decir, simétrica y centrada en la interfase, la cual es el resultado de la emisión



de un barrido de frecuencias y su posterior correlación cruzada con la respuesta generada en el terreno.

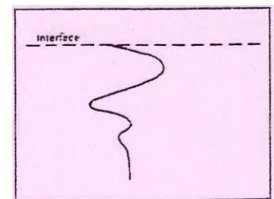


Figura N° 4: vibroseis de la industria SERCEL modelo NOMAD 65 NEO. Fuente de imagen: www.directindustry.fr/prod/sercel-inc (2018)

Estos consisten en pesadas placas metálicas de una o más toneladas suspendidas por un sistema hidráulico bajo el chasis de un camión. Este sistema suelta la placa y la levanta repetidas veces con una frecuencia variable, logrando una vibración a diferentes frecuencias, por un tiempo prolongado establecido, el cual le permita un barrido dentro de un rango de frecuencia adecuado para la profundidad de investigación establecida con anterioridad.

Explosivos: esto generalmente son cartuchos plásticos con barros explosivos con nitroglicerina o una mezcla de nitroglicerina, nitrato de amonio, etc. y detonadores eléctricos (por ejemplo: a base de fulminato de mercurio). Si bien en el pasado fueron lo más utilizados, actualmente sólo se utilizan cuando es necesaria mayor energía y/o cuando la topografía o la geología no permite el uso de vibroseis.

Se caracterizan por generar una forma de onda u ondícula (wavelet) de fase mínima, llamada así porque tiene un adelanto de fase.



Para la sísmica de refracción como técnica que permite obtener principalmente los espesores de weathering y subweathering, para las correcciones estáticas de la sísmica de reflexión, la carga se coloca en pozos de un metro o un poco más o menos.

Ahora bien, si el objetivo de la aplicación de la refracción es más amplio, posiblemente la carga será colocada, a mayores profundidades.

Cañones de Aire: se utilizan cuando se realiza sísmica en el agua, consisten de un gran pistón que recibe un golpe de presión de aire que lo hace “saltar” repentinamente, generando una gran burbuja que se propaga hasta tocar el fondo donde genera a vez la perturbación elástica deseada. Estos se encuentran sumergido a los lados o a popa del barco.

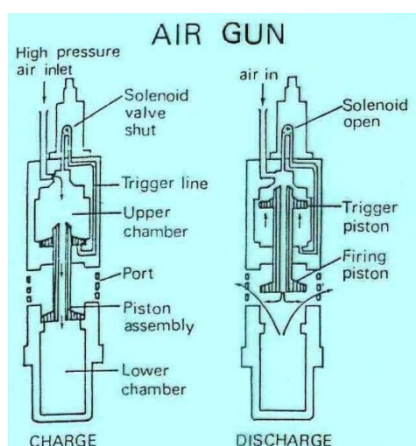


Figura N° 5: Cañones de aire, a la izquierda esquema. Fuente de la imagen: Chelotti, L et al, 2018. Arriba fotografía del cañón de aire. Fuente de la imagen: <https://guardianlv.com/tag/seismic-air-guns> (2018)

Receptores: existen dos tipos principales de receptores: geófonos e hidrófonos.

Geófonos: estos receptores o detectores se utilizan en sismica de refracción on shore, son unos transductores que convierten el movimiento vibratorio del terreno en señales eléctricas, físicamente es un oscilador mecánico simple, de un sólo grado de libertad que comprende una masa, un resorte y un amortiguador viscoso. Eléctricamente es un oscilador que constan de una bobina y un imán, siendo el imán la masa inercial.

Al paso de una onda, la bobina del geófono se mueve con relación al imán, originando por inducción una corriente eléctrica proporcional a la velocidad del movimiento relativo. El máximo voltaje que pueden generar no suele pasar de 1 v. Los geófonos detectan las componentes de un campo vectorial, como lo son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de las partículas del terreno. La mayoría de los geófonos usados en exploración sísmica son “geófonos de velocidad”; esto es, tienen una respuesta espectral plana a la velocidad de la partícula en una banda usualmente comprendida entre 10 - 500 Hz.

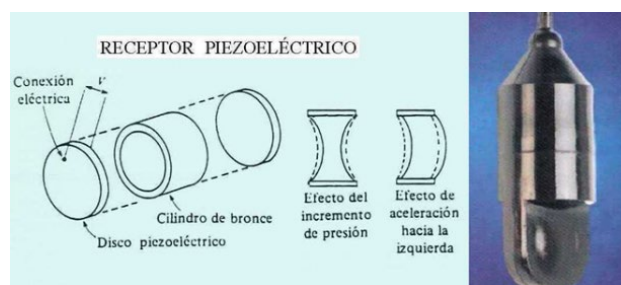
La gran mayoría de los geófonos que se fabrican, son geófonos de componente vertical, registran la onda P. Están diseñados para responder sólo a la componente vertical de la velocidad de la partícula, por eso deben colocarse lo más vertical posible para evitar que pierdan sensibilidad. Si el terreno está inclinado, como en la ladera de una montaña, de todas formas deben colocarse verticales según la gravedad, y no perpendiculares al suelo.



Figura N° 6: Fotografía de geófonos

Existen también geófonos de componente horizontal (cuando por ejemplo se desea registrar la onda P), así como de tres componentes: una vertical y dos ortogonales. Estos tipos no suelen ser de utilidad en la sismica de refracción.

Hidrófonos: estos receptores o detectores se utilizan en sismica de refracción off shore, detectan ondas sísmicas en el agua. Al paso de una onda sísmica por el agua se producen variaciones de presión, las cuales inducen una señal eléctrica en los hidrófonos. La detección se basa en el efecto piezoeléctrico que, al comprimirse el retículo cristalino de cuarzo, produce corriente.



El campo registrado es un campo escalar (campo de variación de presión). No registran ondas S porque éstas no pueden transmitirse a través de los fluidos.

Figura N° 7: esquema de un hidrófono y foto del mismo.
Fuente de la imagen: Chelotti, L *et al*, 2018.

Cables de transmisión: la señal eléctrica generada por los geófonos o hidrófonos es transmitida mediante un conductor eléctrico hasta el sismógrafo. La señal de cada detector a una distancia dada a la fuente es independiente de la de otros detectores a otras distancias; por ello, por cada uno se requiere un par de conductores eléctricos aislados. Cada par de conductores lleva la señal a un canal de amplificación y registro en el sismógrafo. Por ejemplo, si se tienen 12 geófonos independientes,

el cable de geófonos debe tener 24 conductores aislados y el sismógrafo debe tener 12 canales, cada uno de estos canales mostrará la respuesta de cada geófono. En un sismograma es un conjunto de trazas, donde cada una de ellas corresponde al registro de cada canal.

Sismógrafos: es el sistema de registro de los datos, donde llegan los cables con la información proveniente de los geófonos o hidrófonos. Puede ir montado dentro de un camión (llamado casa blanca) o sobre un barco.

Son operados por un *Observador*, tienen una serie de dispositivos de acondicionamiento electrónico de la señal (filtros, amplificadores, etc.), un osciloscopio para monitorear la respuesta de los receptores, una computadora desde donde se opera y donde son visualizados y archivados los registros, también una impresora, un sistema de radioseñal para las fuentes de energía y, si éstas fueran vibratorias, una caja electrónica controladora de sus parámetros.

Disposición en el campo: Existen diferentes tendidos de los receptores en el campo: simétrico, asimétrico, simétrico desplazado, asimétrico desplazado, con y sin offset (distancia entre el emisor y el primer receptor), tendido en abanico, etc.

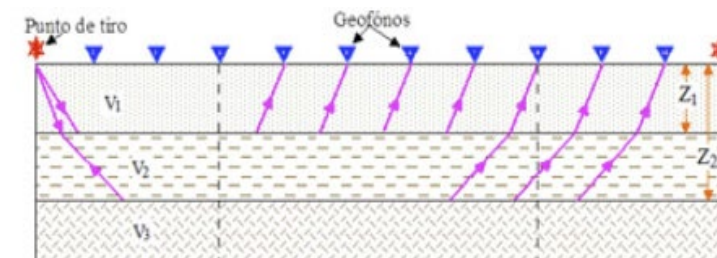
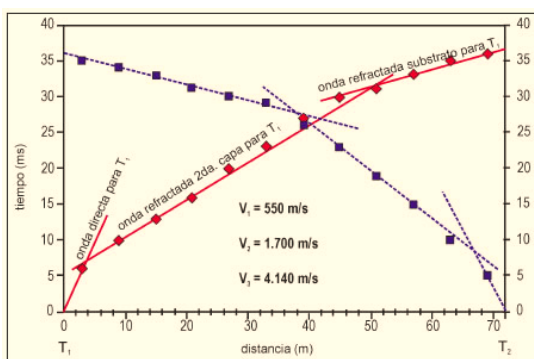


Figura N° 8: Arreglo de refracción asimétrico, con la ubicación del punto de tiro del perfil y del contraperfil. Distribución de receptores. Fuente de Imágenes: Modificado de Sheriff et al., 1991.

El tendido (dispositivo) más utilizado en la sísmica de refracción es un arreglo asimétrico sobre un perfil. Primero se ubica el punto de tiro (shot point) a uno de los lados y al otro lado del perfil se ubican los receptores equidistantes entre sí. Dependiendo de la cantidad de receptores y su equidistancia, será la longitud del arreglo.

Como se mencionó con anterioridad, generalmente el objetivo principal en la exploración de hidrocarburos, de la sísmica de refracción es una profundidad somera de algunos cientos de metros, por lo cual se utilizan dispositivos que cuentan con un promedio de 24 o 48 canales distribuidos a lo largo de los 300 m.



Finalizado el registro del perfil, se ubica el shot point en el lado contrario del perfil y se vuelve a emitir, obteniendo un nuevo registro llamado contraperfil. Estos registros de perfil y contraperfil son analizados y permiten graficar una dromocrona como la que se observa en la Figura N°9.

Figura N° 9: Dromocrona con los primeros arribos del perfil y el contraperfil, para un arreglo de 12 canales. Sólo se muestra a modo de ejemplo. Fuente de Imágenes: Sofía Pérez Luján et al, 2013. Rev. Asoc. Geol. Argent. vol.70 no.2

Procedimiento de adquisición: para la adquisición de los datos se procede, fundamentalmente de la siguiente manera:

- 1- Se ubican las líneas sobre el terreno de acuerdo a los mapas y se abren las picas o rebaja la vegetación para facilitar el movimiento de equipo, cables, detectores, etc.
- 2- Se clavan estacas en los sitios donde estarán ubicados los detectores y las fuentes.

- 3- Se efectúa un perfil topográfico de las líneas sísmicas sino se dispone de uno adecuado a partir de los mapas. Suele ser suficiente un perfil de nivelación, con valores de cota en los puntos donde estarán situados las fuentes y los detectores.
- 4- Se hacen los hoyos para las cargas sísmicas en caso de utilizarse explosivos como fuente de energía.
- 5- Se extiende el cable de detectores para el primer tendido de la línea sísmica.
- 6- Cada toma eléctrica del cable debe caer en la estaca que señala la ubicación de un detector.
- 7- Se clavan los detectores en el terreno (geófonos). Luego se conectan a la toma o conexión eléctrica del cable de detectores, que lleva la señal al sismógrafo.
- 8- Se conecta el cable de detectores al sismógrafo.
- 9- Se verifica desde el sismógrafo que no existan cortocircuitos en el cable de detectores o circuitos abiertos por geófonos estropeados o no conectados.
- 10- Se verifica el nivel de ruido ambiental.
- 11- Se colocan las ganancias y filtros adecuados en cada canal del sismógrafo.
- 12- Se entierran las cargas sísmicas en los puntos fuentes del tendido.
- 13- Se efectúa la explosión de la carga en uno de los extremos del tendido y se registran las ondas. Estas quedan almacenadas provisionalmente en la memoria electrónica del sismógrafo.
- 14- Se acomodan las amplitudes de cada traza registrada para facilitar posteriormente la lectura de los tiempos de primera llegada (primeros arribos) de las ondas.
- 15- Se graban en un medio permanente las trazas.
- 16- Se borra el registro de la memoria del sismógrafo.
- 17- Se efectúa la explosión o la energización en el otro punto fuente del tendido y se repite de forma similar el proceso de registro y grabación.
- 18- Se mueve el cable de detectores y el sismógrafo a la posición del segundo tendido. Se sacan los detectores de su posición actual y se colocan en los puntos de recepción del segundo tendido, repitiendo el proceso seguido en el primer tendido. Esta rutina se extiende a tendidos y líneas sucesivas.

Debe asegurarse que los detectores queden clavados firmemente al suelo y verticales. Debe procurarse que queden bien alineados. A veces no es posible clavar un detector en el lugar asignado, en cuyo caso se puede clavar en otro lugar, preferiblemente manteniendo la alineación del tendido y se debe anotar la nueva posición a efecto de los cálculos.

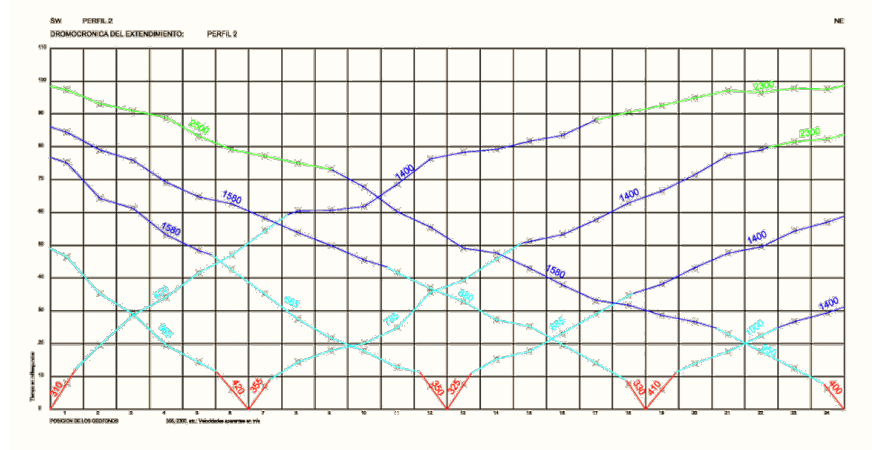


Figura N° 10: Domocronas, luego del registro de sísmica de refracción sobre una línea, con un tendido de 24 canales. Fuente de la imagen:

<http://painegeotecnia.cl/index.php/portfolio/proyectos-febrero-mayo/dromo-ps-2b/>.

3.3. Procesamiento de Datos

El procesamiento comienza con la lectura o picado de los primeros arribos: el tiempo de llegada de la primera onda a cada receptor, es decir en cada traza del sismograma (registro de campo).

Posteriormente los tiempos leídos se vuelcan en una gráfica tiempo-distancia (dromocrona) donde los alineamientos de puntos permiten distinguir las rectas correspondientes a la onda directa y las refractadas, por donde la onda se propagó.

Las pendientes de las rectas son la inversa de la velocidad en cada medio y con base en las expresiones matemáticas encontradas para las distintas ondas refractadas se procede al cálculo de los espesores de cada capa y su buzamiento.

Problemas que podrían estar presentes: El ruido metodológico surge cuando no se puede leer bien el primer arribo en algún receptor o en varios o en todos, sea por problemas eléctricos o mal acople físico del receptor (geófono no bien clavado), o interferencia de motores, oscilación por viento, etc.

También es probable que por las características del weathering los primeros arribos, que corresponden a la onda directa no estén alineadas o no partan del cero en la dromocrona. En este caso se verá más adelante como superar el mismo para que no afecte el cálculo de espesores de las siguientes capas.

3.3.1. Métodos de cálculo de Espesores - Capas Horizontales

Para el cálculo de espesores de capas horizontales y paralelas se puede proceder con la aplicación, por ejemplo de métodos distintos: uno gráfico denominado “ordenada al origen” y otro analítico llamado “punto de corte”.

Generalmente este cálculo se realiza mediante software que permiten el manejo de grandes volúmenes de datos y están basado tanto en estos métodos de resolución, como en métodos matemáticos más robustos.

En primer lugar, se construye la Dromocrona con los tiempos de los primeros arribos de las ondas a cada detector posicionado sobre el perfil y del contraperfil. Posteriormente y analizando la misma se definen los distintos lineamientos existentes en la gráfica (rectas presentes), al tratarse de capas horizontales, las rectas del perfil y contraperfil se interceptarán en el medio del tendido, por lo cual para capas horizontales, sería suficiente trabajar con el perfil.

Ordenada al origen: este es un método gráfico, el cual consiste en:

- calcular las pendientes de todas las rectas presentes en el perfil, obteniendo de esta manera el v_1, v_2, v_3 , etc.
- prolongar cada recta hasta su intersección con el eje de ordenadas y leer las ordenadas al origen de todas ellas (θ_2, θ_3 , etc.).
- reemplazar estos valores en las expresiones matemáticas que correspondan (ondas: directas, refractada en primera capa, refractada en segunda capa...etc.).
- calcular los espesores de las distintas capas interpretadas en la dromocrona.

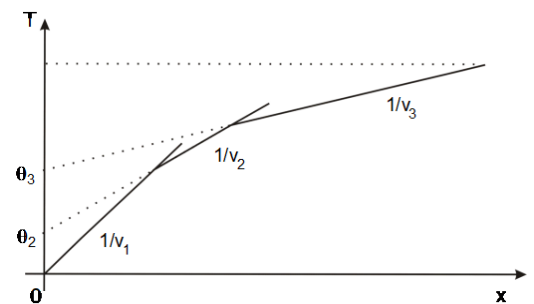


Figura N°11: Dromocrona del Perfil, para un subsuelo de tres medios (2 capas).

Según lo expresado en el ítem de expresiones matemáticas, para el caso de la primer refracta y la segunda refractada las ordenadas al origen de cada una de ellas, se escriben como:

$$\theta_2 = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-2}) \quad \text{de esta expresión se calcula el } z_1, \text{ con: } \cos(i_{1-2}) = \sqrt{1 - \sin^2(i_{1-2})} = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}},$$

Luego, para la siguiente refractada se utiliza la expresión:

$$\theta_3 = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-3}) + \frac{2 \cdot z_2}{v_2} \cdot \cos(i_{2-3})$$

De esta manera se calcula el z_2 , teniendo en cuenta:

$$\cos(i_{1-3}) = \sqrt{1 - \sin^2(i_{1-3})} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_1}{v_3}\right)^2}$$

$$\cos(i_{2-3}) = \sqrt{1 - \sin^2(i_{2-3})} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^2}$$

Y con base en la expresión para ordenada al origen generalizada, se obtiene el cálculo de los siguientes espesores, correspondientes a capa 3, 4, n.

$$\theta_n = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-n}) + \frac{2 \cdot z_2}{v_2} \cdot \cos(i_{2-n}) + \dots + \frac{2 \cdot z_{n-1}}{v_{n-1}} \cdot \cos(i_{(n-1)-n})$$

Punto de Corte (Xc): este es un método analítico, el cual se basa en el punto de intersección entre dos rectas, correspondientes a: ondas directas-ondas refractada 1 capa, ondas refractadas en 1era y 2da capa, ondas refractadas en 2da y 3era capa, etc. Este método de cálculo consiste en:

(a)- calcular las pendientes de todas las rectas presentes en el perfil, obteniendo de esta manera las velocidades correspondientes a las distintas rectas de las capas refractadas: v_1, v_2, v_3 , etc.

(b)- leer el valor de x_{c1}, x_{c2} , etc. Siendo x_c la posición correspondiente a un mismo tiempo para dos rectas.

(c)- igualar los tiempos de dos rectas para las posiciones x_{c1}, x_{c2} , etc. y se calculan los espesores (z_1, z_2 , etc.)

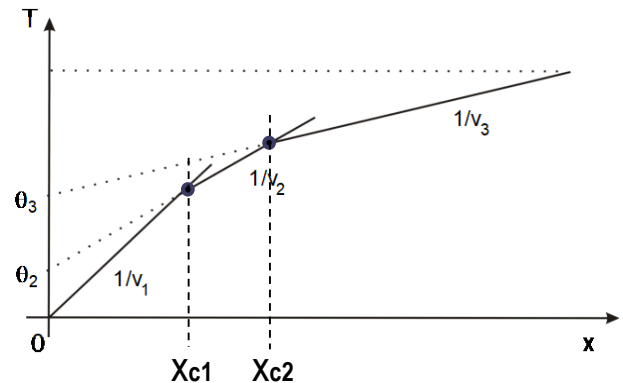


Figura N°12: Dromocrona del Perfil, para un subsuelo de tres medios (2 capas), donde x_{c1} y x_{c2} corresponde a dos puntos de intersección diferentes.

Onda directa y 1era refractada:

$$\frac{x_{c1}}{v_1} = \frac{x_{c1}}{v_2} + \frac{2 \cdot z_1 \cdot \cos(i_{1-2})}{v_1}, \quad \text{de donde se calcula el } z_1 \text{ con: } \cos(i_{1-2}) = \sqrt{1 - \sin^2(i_{1-2})} = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}$$

1era y 2da refractada:

$$\frac{x_{c2}}{v_2} + \frac{2 \cdot z_1 \cdot \cos(i_{1-2})}{v_1} = \frac{x_{c2}}{v_3} + \frac{2 \cdot z_1 \cdot \cos(i_{1-3})}{v_1} + \frac{2 \cdot z_2 \cdot \cos(i_{2-3})}{v_2}$$

De donde se calcula z_2 , teniendo en cuenta:

$$\cos(i_{1-3}) = \sqrt{1 - \sin^2(i_{1-3})} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_1}{v_3}\right)^2}$$

$$\cos(i_{2-3}) = \sqrt{1 - \sin^2(i_{2-3})} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^2}$$

Y así se continúa trabajando, con las intersecciones de las siguientes dos rectas ($n-1$ y n), para el cálculo de los z_n .

3.3.2. Métodos de cálculo de Espesores - Capas Inclinadas

En el caso de capas inclinadas y con base en el ítem de expresiones matemáticas, las pendientes de las capas refractadas corresponderán a la inversa de las velocidades aparentes de subida y de bajada, por lo cual no hay simetría en la dromocrona y es necesaria que esta gráfica posea los primeros arribos a cada detector del perfil y del contraperfil.

Para el cálculo de espesores de capas inclinadas (buzantes) se trabaja analíticamente de la siguiente manera:

Para 1 capa (dos medios)

- se calculan las pendientes de todas las rectas presentes en el perfil y contraperfil, obteniendo de esta manera la velocidad v_1 y las velocidades aparentes de bajada y de subida, para la recta correspondiente a la capa refractada: v_{2b} , v_{2s} .
- se prolongan todas las rectas hasta su intersección con los ejes de ordenadas (subida y de bajada) y se leen las ordenadas al origen en ellas (θ_{2b} , θ_{2s}).
- se reemplazan el valor de velocidad del medio 1 en las expresiones de las velocidades aparentes y se calcula: ángulo incidente y buzamiento.

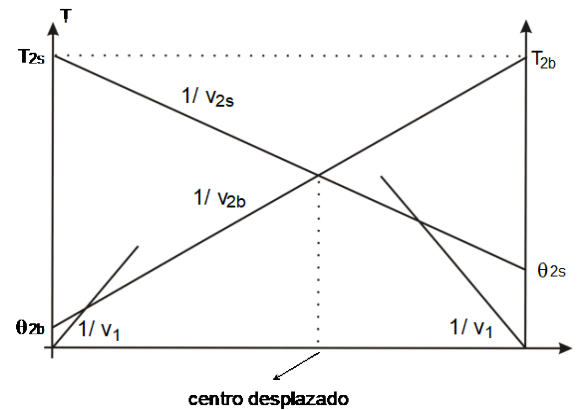


Figura N°13: Dromocrona del Perfil y contraperfil para un sistema de 1 capa inclinada.

$$v_{2b} = \frac{v_1}{\sin(i_{1-2} + \varphi)} \quad v_{2s} = \frac{v_1}{\sin(i_{1-2} - \varphi)}$$

$$\sin(i_{1-2} - \varphi) = \frac{v_1}{v_{2s}} \quad \rightarrow \quad i_{1-2} - \varphi = \arcsen\left(\frac{v_1}{v_{2s}}\right)$$

$$\sin(i_{1-2} + \varphi) = \frac{v_1}{v_{2b}} \quad \rightarrow \quad i_{1-2} + \varphi = \arcsen\left(\frac{v_1}{v_{2b}}\right)$$

Sumando y restando ($i_{1-2} - \varphi$) y ($i_{1-2} + \varphi$) se obtiene el cálculo para i_{1-2} y φ :

$$i_{1-2} = \left[\arcsen \frac{v_1}{v_{2s}} + \arcsen \frac{v_1}{v_{2b}} \right] \cdot \frac{1}{2} \quad \varphi = \left[\arcsen \frac{v_1}{v_{2b}} - \arcsen \frac{v_1}{v_{2s}} \right] \cdot \frac{1}{2}$$

- se calcula la velocidad real de la capa buzante (v_2), mediante Snell reemplazando el valor del ángulo incidente calculado.

$$v_2 = \frac{v_1}{\sin(i_{1-2})}$$

- se reemplazan los valores de ángulos incidentes en las expresiones matemáticas obtenidas de las ordenadas al origen (ítem de expresiones matemáticas) y se calculan los espesores (z_1 y z_2 , por ejemplo, bajo emisor y detector final) de la capa, bajo cada detector.

$$\theta_{2b} = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-2}) \quad \rightarrow \quad z_1 = \frac{\theta_{2b} \cdot v_1}{2 \cdot \cos(i_{1-2})}$$

$$\theta_{2s} = \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-2}) \quad \rightarrow \quad z_1 = \frac{\theta_{2s} \cdot v_1}{2 \cdot \cos(i_{1-2})}$$

Para 2 y n capa (tres o más medios): en estos casos primero se calcula la primera capa, como se ha visto anteriormente y luego se trabaja con el “*Método de Reducción*”, por el cual se elimina la primera capa y se rotan las siguientes con un ángulo, cuyo valor corresponde a la de la capa resuelta (φ_1). De esta forma la superficie de discontinuidad entre el medio 1-2 queda horizontal y la superficie de discontinuidad entre el medio 2-3 presentará un buzamiento de $\varphi_2 \pm \varphi_1$.

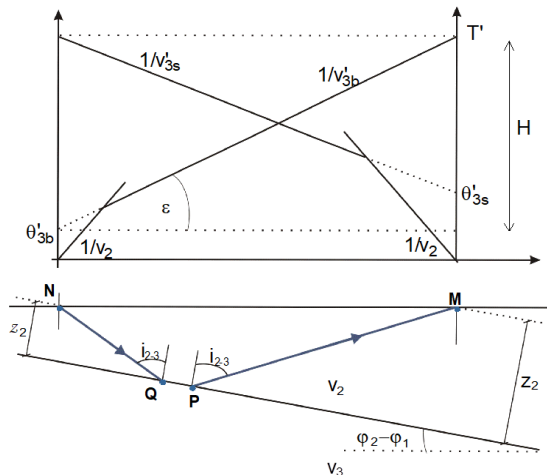


Figura N°15: Trazado de rayos y dromocrona ficticia para el sistema rotado por el *Método de Reducción*.

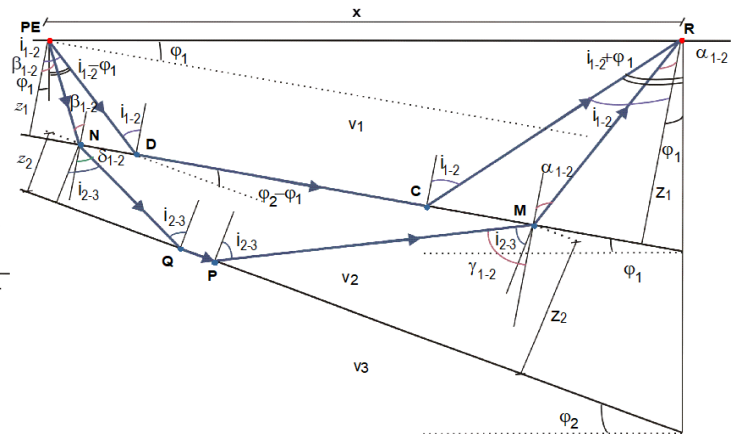


Figura N°14: Trazado de rayos para el sistema original de 2 capas (tres medios) inclinadas.

3.3.3. Correcciones

Corrección por influencia del weathering: con base en el comportamiento pobremente elástico que puede poseer la capa meteorizada (weathering), puede ocurrir que los primeros arribos de la onda directa no puedan alinearse en una recta, dentro de la dromocrona o la recta no se encuentre alineada con el cero, es decir que su ordenada al origen no sea cero, es necesario realizar los cálculos de espesores de las capas subyacentes, despreciando esta capa meteorizada.

Si se considera la intersección, en la dromocrona, de la recta de las ondas directas y de la onda refractada en la primera discontinuidad (medio 1-2) se tiene que:

$\frac{x_{2-3}}{v_2} + \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-2}) = \frac{x_{2-3}}{v_3} + \frac{2 \cdot z_1}{v_1} \cdot \cos(i_{1-3}) + \frac{2 \cdot z_2}{v_2} \cdot \cos(i_{2-3})$ donde x_{2-3} corresponde a la posición dentro de la dromocrona donde los tiempos de ambas rectas son iguales.

A partir de esta igualdad se puede expresar a z_2 en función de:

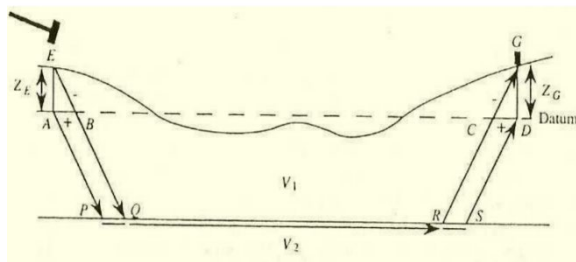
$$z_2 = \frac{x_{2-3}}{2} \cdot \sqrt{\frac{(v_3 - v_2)}{(v_3 + v_2)}} + z_1 \cdot \frac{[\cos(i_{1-2}) - \cos(i_{1-3})]}{\sin(i_{1-2}) \cdot \cos(i_{2-3})} \quad (A)$$

Donde el término (A) representa, dentro de la expresión, la influencia de la capa meteorizada (weathering), en el cálculo de z_2 . Si este término, bajo esta forma de cálculo puede ser despreciado y el error en el cálculo de z_2 será despreciable.

Nota Importante: la expresión para z_2 , antes expresada, ha sido obtenida mediante el método de punto de corte (para cálculo de espesores), pero si en lugar de obtener esta expresión se obtiene otra a partir de la expresión de la ordenada al origen θ_3 : $z_2 = \frac{\theta_3 \cdot v_2}{2 \cdot \cos(i_{2-3})} - \frac{2 \cdot z_1 \cdot v_2 \cdot \cos(i_{1-3})}{v_1 \cdot \cos(i_{2-3})}$ y

considerando por Snell que: $\frac{v_1}{v_2} = \sin(i_{1-2})$, el error que se comete al despreciar el término que representaría al weathering es significativo, por lo cual esta metodología no es la apropiada para el cálculo de z_2 , bajo las circunstancias expresadas al comienzo de este apartado.

Corrección por nivel topográfico: estas correcciones resultan necesarias para eliminar el efecto de las irregularidades topográficas y variaciones de velocidad de la capa meteorizada, Para



ello se elige un plano de referencia llamado *datum*, al cual se referirán los tiempos de primeros arribos, para luego continuar con el procesamiento ya visto.

Figura N°16: Trazado de rayos original y corregido según el plano de referencia (*datum*).

Fuente de la imagen: Chelotti, L *et al*, 2018

3.4. Interpretación

La interpretación de la sismica de refracción está basada, fundamentalmente en el análisis de las dromocronas. El mismo proporciona información valiosa sobre los estratos del subsuelo, como de posibles estructuras presentes, las cuales merecen especial atención por ser éstas causantes de malas interpretaciones en la sismica de reflexión.

En exploración de hidrocarburos el principal objetivo de la refracción es el cálculo de los espesores del weathering en la zona donde se realizará la sismica de reflexión, permitiendo su corrección estática y en segundo lugar interpretar diferentes estructuras presentes que podrían impactar en la interpretación de las secciones sísmicas de reflexión.

A continuación, se presentan la interpretación de distintos casos:

3.4.1. Velocidades Invariantes Lateralmente.

Este es el caso donde las capas no presentan variación lateral de la velocidad. No presenta impedimento alguno para su resolución y es el más fácil de interpretar. Las velocidades de las capas del subsuelo aumentan con la profundidad.

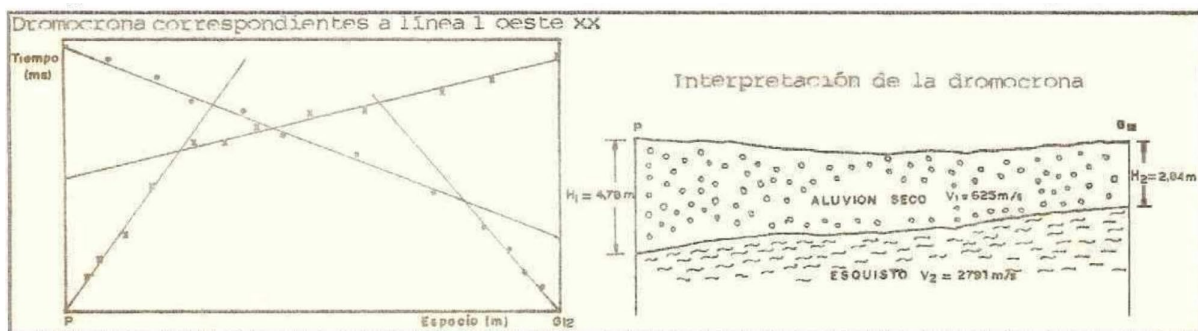


Figura N°17: Caso de 1 capa (dos medios) buzante, su dromocrona e interpretación. Fuente de la imagen: Colombo, A *et al*, 1990. XI Congreso Geológico Argentino.

3.4.2. Variación Lateral de la Velocidad.

La dromocrona de la Figura N° 18 no presenta simetría, a pesar de que sus capas son horizontales, sino que se debe a la variación lateral de la velocidad de las mismas.

Para poder diferenciarlo de un caso de buzamiento es importante calcular la pendiente de las rectas refractadas, las cuales presentarán las mismas pendientes, pero en orden distinto. En el ejemplo de la Figura N°18, la recta de la primera capa refractada en el perfil (v2) es la misma que la pendiente de la segunda capa refractada del contraperfil y viceversa.

Para interpretar, lateralmente donde termina el medio 2 y donde comienza el medio 3, se observa la intersección del perfil y contraperfil de la dromocrona entre las rectas de estos dos medios (2da y 3er recta), el punto medio indicará la posición de la discontinuidad vertical (interfase entre medio 2 y 3).

3.4.3. Capas Delgadas.

En la Figura N° 19 se muestra un modelo de capas horizontales y paralelas, con velocidades crecientes con la profundidad.

En la dromocrona se presentan dos rectas, una correspondiente a la onda directa y la otra a las ondas refractadas en el medio 3, mientras que los primeros arribos no muestran la recta correspondiente a las ondas refractadas en el medio 2, puesto que estos estarían llegando más tarde, como se ejemplifica en el ejemplo.

Las ondas que se refractan en el medio 3, llegan antes a los receptores que las ondas que viajan por la superficie del medio 2. Esto se debe al poco espesor de la capa 2 y a que la $v_3 > v_2$, por lo cual a la onda le lleva menos tiempo viajar por el medio 3, que por el medio 2.

También se observa un fuerte cambio de pendiente entre la recta de la onda directa y de la segunda recta presente en la dromocrona (correspondiente al medio 3). Esto, de alguna manera, está indicando la posibilidad de la presencia de una capa delgada, que no es detectada con los primeros arribos.

Trabajando con las expresiones matemáticas de sismica de refracción, se llega a que si se cumple la siguiente ecuación, quiere decir que la segunda capa no aparece en la Dromocrona, para que ésta aparezca el z_2 debe ser mayor que el miembro de la derecha de dicha expresión matemática:

$$z_2 \leq \frac{z_1}{v_1} \cdot \frac{v_2 \cdot (v_3 - v_1)}{\sqrt{(v_3 + v_2)} \cdot \sqrt{(v_3 - v_2)}} \cdot \left[\frac{\sqrt{(v_2 + v_1)}}{\sqrt{(v_2 - v_1)}} - \frac{\sqrt{(v_3 + v_1)}}{\sqrt{(v_3 - v_1)}} \right]$$

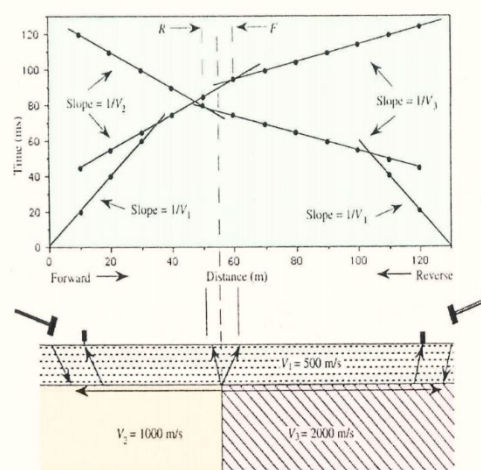


Figura N°18: Interpretación de variación lateral de la velocidad. Fuente de la imagen: Estrada Luis, 2008 y modificada por Chelotti, L et al, 2018

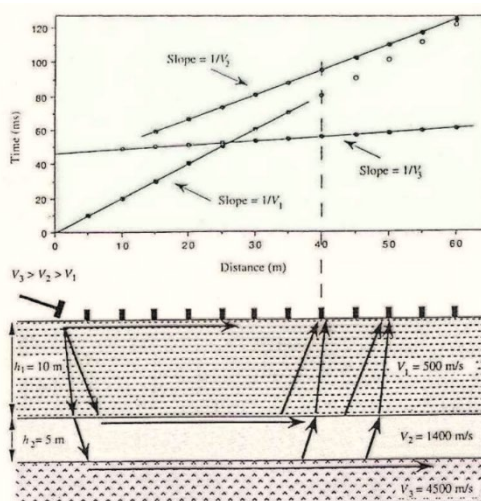


Figura N°19: Interpretación de capa delgada. Fuente de la imagen: Estrada Luis, 2008 y modificada por Chelotti, L et al, 2018

Para que la capa delgada pueda ser interpretable deberá ser mayor o igual a este espesor mínimo, el que dependerá de las velocidades propias de la capa, relacionada con las velocidades por encima y por debajo, así como de los espesores por encima de la misma.

3.4.4. Intercalación de Capa de Menor Velocidad.

Como se observa en la Figura N°20, no se cumple la secuencia normal de velocidades $v_1 < v_2 < v_3$, presentando un modelo geológico donde $v_1 > v_2 < v_3$.

En este caso, no existirá refracción total en la interfase entre los medios 1 y 2 (superficie del medio 2), por lo cual la onda refractará en el medio 2 hasta llegar a la siguiente interfase (superficie del medio 3) donde se realizará la refracción total. Por lo tanto, la dromocrona sólo mostrará dos rectas, la de las ondas directas y la de las refractadas en la última interfase.

Observando la dromocrona, no se interpretaría la capa de 500 m/s, sino que se interpretaría una capa con velocidad de 4000 m/s, y el cálculo del z_2 , presentaría un error por exceso ya que los arribos de esta refracción llegarían retardados en la dromocrona comparada a como llegaría si sólo viajara por el medio 3.

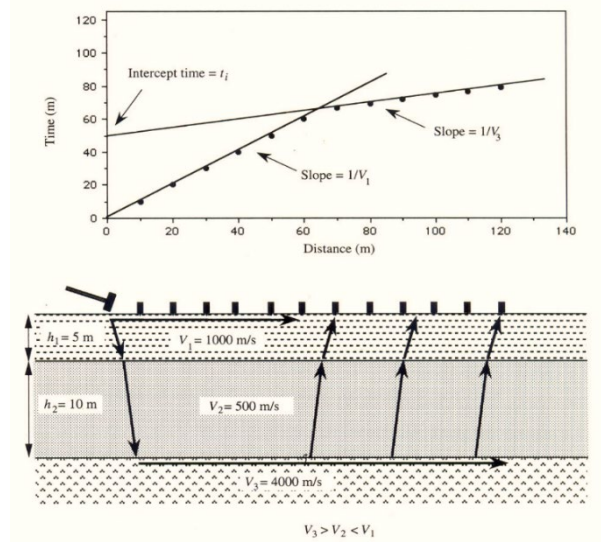


Figura N°20: Interpretación de intercalación de capa de menor velocidad. Fuente de la imagen: Estrada Luis, 2008.

3.4.5. Fallas Geológicas.

Falla de pequeño rechazo: en presencia de una falla geológica de pequeño rechazo los rayos que llegan por la interfase (1-2) generan en ella nuevos centros secundarios de emisión de energía (principio de Huygens), desde los cuales los rayos que nacen se dirigen hacia la superficie. Los rayos provenientes de la interfase hacia la superficie son detectados y sus primeros arribos son dibujados en una dromocrona.

Los primeros arribos de las ondas refractadas en el perfil, muestran una recta de pendiente $1/v_2$, hasta que el viaje de la onda sobre la superficie de la interfase llega al final del bloque levantado, allí se produce una difracción de la onda. Las ondas que siguen su viaje por el bloque hundido, siendo detectadas en superficie a distancia mayores a la zona de difracción.

Estas últimas ondas aparecen en la dromocrona como una recta desplazada paralelamente a la antes mencionada, con su misma pendiente ($1/v_2$), con un tiempo de retardo. Mientras que la

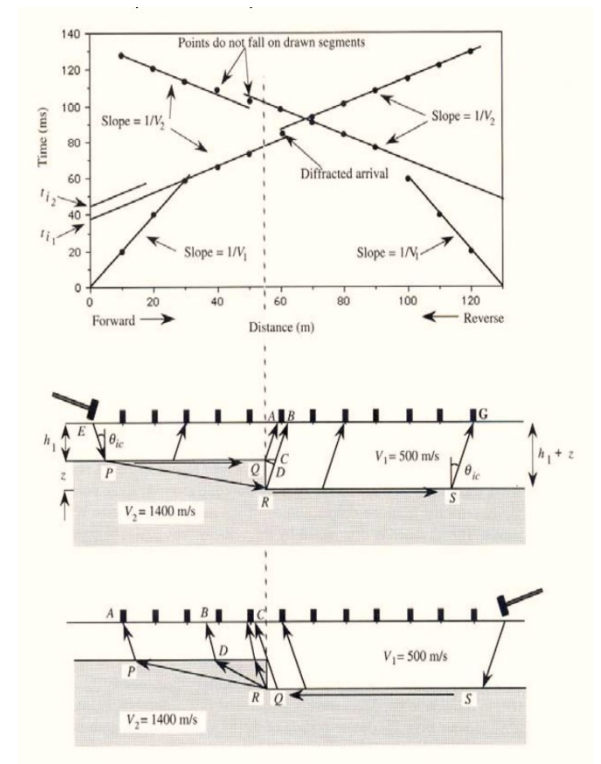


Figura N°21: Interpretación de falla de pequeño rechazo. Fuente de la imagen: Estrada Luis, 2008.

dromocrona del contraperfil muestra también ese desplazamiento de las rectas, debido a la zona donde se produce la difracción, pero el desplazamiento presente para la llegada de las ondas más lejanas a la zona de difracción, en este caso se encuentra con un adelanto en el tiempo.

Con la diferencia de las ordenadas al origen para ambas rectas desplazadas, por ejemplo del perfil de la Figura N° 21, se puede calcular el Δt de retardo (o adelanto en el contraperfil), es proporcional al rechazo de la falla.

$\Delta t = \frac{\Delta z \cdot \cos(\theta_{ic})}{v_1}$, siendo θ_{ic} el ángulo crítico de incidencia crítico y Δt la diferencia entre ordenadas al origen (en la gráfica denotados por t_{i1} y t_{i2}). Con base en lo antes mencionado y considerando que: $\cos(\theta_{ic}) = \sqrt{1 - \sin^2(\theta_{ic})} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2}$, entonces se puede escribir el rechazo de

falla (Δz) como:

$$\Delta z = \frac{\Delta t \cdot v_1 \cdot v_2}{\sqrt{(v_2^2 - v_1^2)}}$$

Falla de gran rechazo: en el presente caso, se observa en la Figura N°22, que hasta el receptor R, la dromocrona muestra las rectas de las ondas directas y de las ondas refractadas en la interfase de ambos medios. Más a la derecha de este punto R, los rayos que provienen de B forman un arco de difracción en la dromocrona y ya no se detectan las ondas que deberían provenir del bloque hundido de la falla, puesto que éste se encuentra muy profundo.

Para la detección de las ondas que viajan por la superficie del bloque hundido, es necesaria la colocación de detectores, en posiciones más lejanas que R_i . En estos nuevos detectores se recibirán las ondas refractadas, pero al haber viajado mucho más tiempo en el medio 1, que en el 2, los primeros arribos se alinearán en la dromocrona con una pendiente igual a $1/v_1$.

Falla en capa buzante: si la interfase de ambos medios (superficie refractora) posee buzamiento similar a ambos lados de la falla, las dromocronas de uno de los perfiles (perfil o contraperfil) poseerá dos rectas paralelas separadas un intervalo de tiempo Δt en función del rechazo vertical del plano de falla. Y en el otro, el tramo final mostrará una velocidad muy alta, la que será falsa por el efecto difractor del extremo del bloque alto (con un frente de ondas saliendo en abanico y tirando rayos virtuales hacia cada punto de la superficie). Estos casos son de muy difícil interpretación.

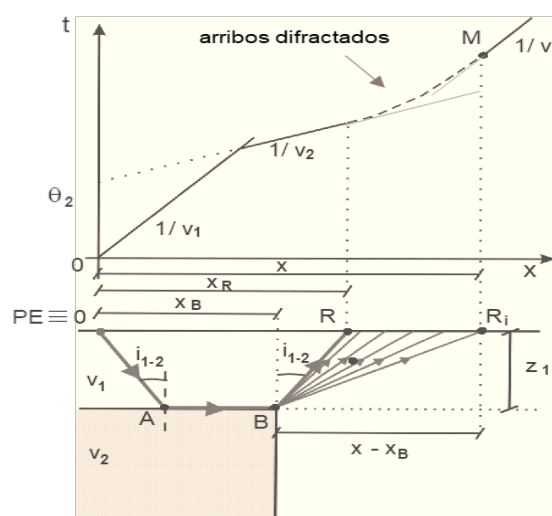


Figura N°22: Interpretación de falla de gran rechazo.

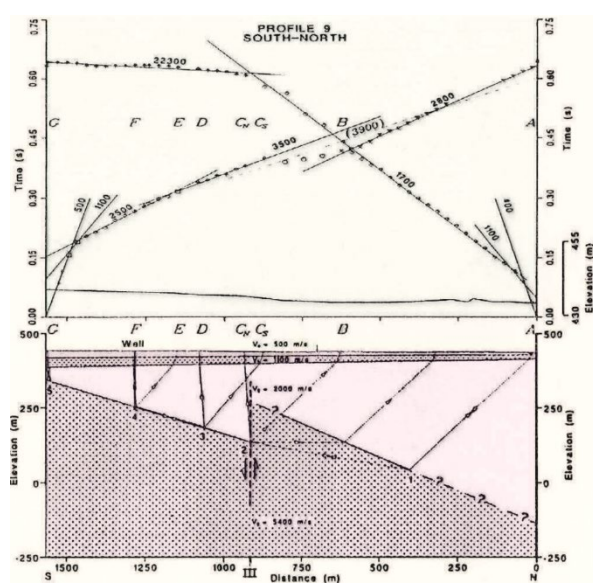


Figura N°23: Interpretación de falla en capa buzante. Fuente de la imagen: Lee *et al*, 1996. Geophysics V.61, N°5.

Todo lo expuesto de este caso se observa claramente en el ejemplo de la Figura N° 23, donde, bajo unas capas subhorizontales, se presenta una falla compresional que desplaza una interfase bastante inclinada.

3.4.6. Domo Salino.

Para la interpretación de domos salinos, como de intrusiones, resulta necesario el registro de sismica de refracción en abanico. Este tipo de registro también es utilizado en la localización de canales areno-acuíferos y para la interpretación de su geometría.

El método consiste en cubrir, con varias direcciones de radios de 8 a 16 km, la supuesta intrusión ó domo, por ejemplo. Estas direcciones convergen al punto de emisión y origen del sistema cartesiano de referencia (x,y). Cada una de estas direcciones, forman con la línea x de referencia, un cierto ángulo de abanico (α_i). Los receptores se disponen en arco, como muestra la Figura N° 24.

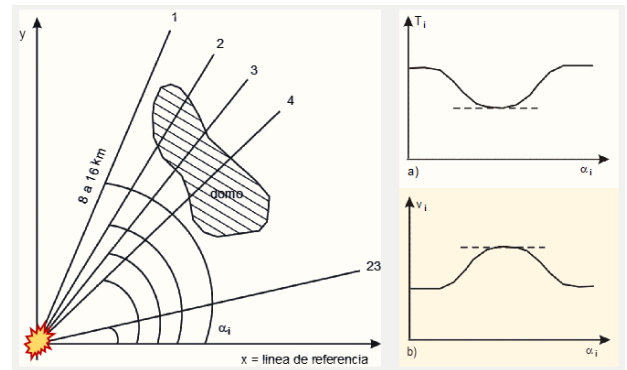


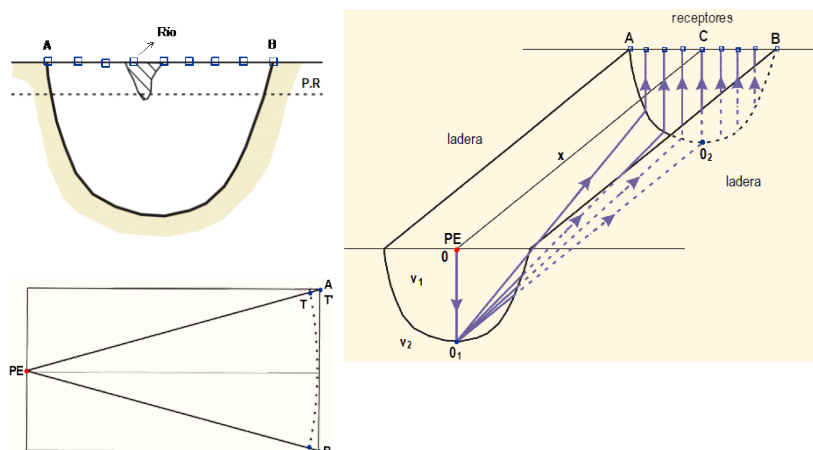
Figura N°24: Interpretación de domo salino, para refracción sísmica en abanico.

En cada uno de los receptores se registran los tiempos de llegada (primeros arribos), los cuales se representan en un gráfico $T_i - \alpha_i$, donde estos α_i se miden a partir de una línea de referencia arbitraria. En este gráfico se observa el adelanto de la señal, para el caso en que la onda viaja por el domo. Si se graficara las v_i en función de los α_i , presentaría un aumento de la velocidad al pasar por el domo (para los mismos α_i). Esto es posible, puesto que una anomalía tipo domo salino, presenta altas velocidades para la propagación de ondas (4000-6000 m/s).

3.4.7. Canal Areno-Acuífero.

Para la interpretación de la geometría del canal areno-acuífero se realizan registros de refracción sísmica en abanicos y se grafican los primeros arribos de las ondas a cada receptor en un gráfico $T_i - \alpha_i$.

Para la correcta interpretación de la geometría del mismo, resulta necesario colocar el punto emisor, lo suficientemente lejano al tendido de los geófonos y en el probable eje del canal, a fin de despreciar las diferencias de tiempos que podrían existir entre los distintos recorridos de las ondas en su base, como se muestra en la Figura N°25.



Para la determinación del espesor del aluvión, se hacen algunas simplificaciones, como se ve a continuación:

Figura N°25: Disposición de receptores y trazados de rayos en la aplicación de refracción sísmica para la localización de canal areno-acuífero.

- Se acepta que existen dos medios, cuando por lo general hay tres medios: roca-aluvión seco-aluvión saturado.
- Se considera al aluvión un medio homogéneo e isótropo, de esta manera los frentes de ondas son considerados verdaderas superficies esféricas. A pesar de que el aluvión contiene diferentes partes de gran tamaño que distorsionan la trayectoria ideal de los rayos, produciendo adelantos de tiempos.
- Se considera gran contraste de velocidades entre v_1 y v_2 , por lo tanto $\cos(i_{1-2}) \cong 1$. Por ello la trayectoria del rayo es vertical en la incidencia y en la emergencia.

Los receptores se colocan transversal al aluvión y perpendicular a su eje, se los ubica sobre la misma roca de la ladera y los restantes sobre el aluvión. La diferencia de tiempo de los primeros arribos de las ondas a estos últimos receptores, entre las posiciones A y B, permite el cálculo de los espesores del mismo, pudiendo de esta forma inferir su geometría.

Se deberá tener en cuenta dos clases de correcciones:

- Corrección por topografía*: se llevan todos los tiempos a un plano de referencia, como si los receptores y emisor, estuviesen allí.
- Corrección por curvatura*: esta se debe a que por cuestiones operativas los receptores se colocan en una línea recta transversal al eje del canal, cuando en realidad la metodología de registro en abanico es una curva. (como se muestra en la Figura N° 25).

Índice

1. Introducción	2
1.1. Principales usos en la Exploración de Hidrocarburos.....	2
2. Expresiones Matemáticas.....	4
2.1. Caso de capas Horizontales	4
2.2. Caso de capas Inclínadas.....	5
2.3. Dromocrona de Refracción	7
3. Etapas de la Sísmica de refracción	8
3.1. Recopilación de Información y Planificación	8
3.2. Adquisición de Datos de Campo	9
3.3. Procesamiento de Datos	14
3.3.1. Métodos de cálculo de Espesores – Capas Horizontales	14
3.3.2. Métodos de cálculo de Espesores – Capas Inclínadas.....	16
3.3.3. Correcciones.....	18
3.4. Interpretación	18
3.4.1. Velocidades Invariantes Lateralmente.	19
3.4.2. Variación Lateral de la Velocidad	20
3.4.3. Capas Delgadas	20
3.4.4. Intercalación de Capa de Menor Velocidad	21
3.4.5. Fallas Geológicas.....	22
3.4.6. Domo Salino.....	24
3.4.7. Canal Areno-Acuífero	24