

## Clase Práctica 3: Sísmica de refracción.

### Refracción sísmica.

Una de las más conocidas aplicaciones de la sismología es la determinación de velocidades sísmicas, y mediante tales, las propiedades elásticas en el interior de la Tierra. Esta distribución, que en el fondo define la estructura de la Tierra, entrega bases fundamentales para guiar la estimación de propiedades mineralógicas, químicas y termales de las capas de la Tierra hacia su interior. Un ejemplo de esto es que sin la sismología no se tendría certeza de que el núcleo externo es líquido, dado que esto se evidenció empíricamente analizando la propagación de ondas P y S.

Principalmente, los datos más importantes para estudios sismológicos del interior de la Tierra son los tiempos de viaje de las fases sísmicas. La información disponible corresponde al tiempo de llegada en un determinado receptor de dichas fases. Para estimar tiempos de viaje, se debe tener certeza de las coordenadas de tiempo y espacio de la fuente, es decir, una correcta determinación de la hora y lugar de origen. Luego, los tiempos de viaje nos entregarán información de la estructura que existe entre la fuente y el receptor.

El mecanismo que domina la refracción sísmica es la propiedad física de las ondas de, al pasar de un medio a otro, reflejarse y refractarse. Al analizar la trayectoria de la onda que, refractándose, llega desde la fuente al receptor, el tiempo que demora su viaje se puede expresar como:

$$T = \int_{fuente}^{receptor} \frac{d\vec{x}}{v(x)} \quad (1)$$

con  $v(x)$  el modelo de velocidad de onda en el medio.

En este caso, analizaremos el caso simple, de estratificación paralela, con capas homogéneas y límites claramente marcados, como se ve en la Figura 1, la cual entregaría una curva de tiempos de viaje como la que se aprecia en la Figura 2. Notar que las pendientes de las curvas es el inverso de las velocidades sísmicas de la onda analizada (onda P en este caso).

Entonces, pasamos de un caso continuo a un caso discreto. Considerando el caso de 2 capas, y que en el caso simple, la ecuación (1) se reduce a  $T = \frac{d}{v}$ , el tiempo de viaje del rayo puede ser planeado como:

$$t = \sum t_{trayectorias} \quad (2)$$

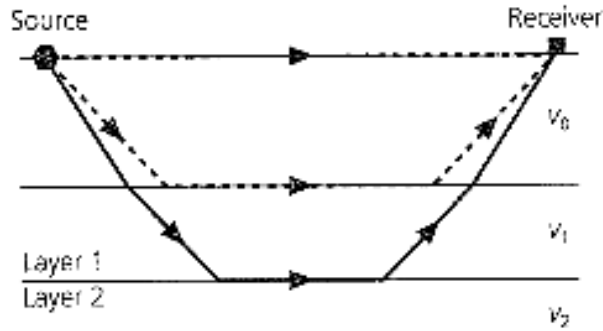


Figura 1: Estructura interna de la Tierra en el caso simple con 3 capas [Stein & Wysession, *An introduction to seismology*, Blackwell Publishing (First Edition), 2003].

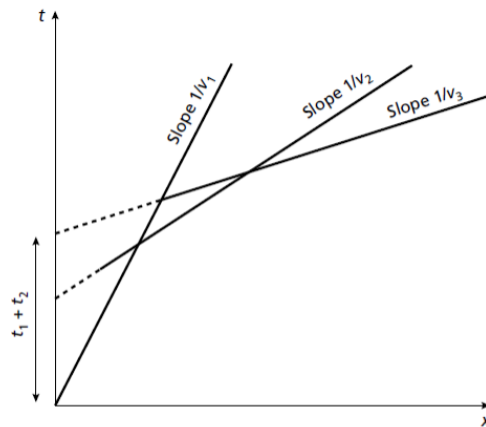


Figura 2: Curva de tiempos de viaje para el caso simple con 3 capas. [J. Virieux, *Seismic Refraction Lecture I.*, ISTERre, 2013.]

Para el caso de la FIGura 3, sería:  $t = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD}$

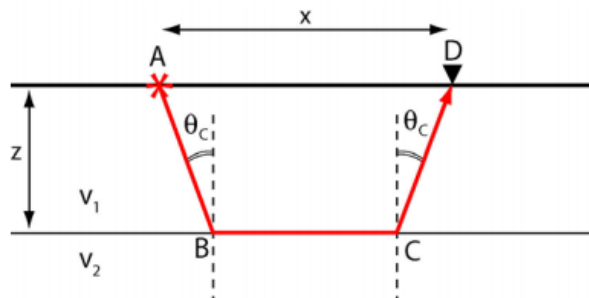


Figura 3: Modelo de 2 capas [MJU, *Geophysics*, 2006].

De la Ley de Snell:

$$\frac{\text{sen}\theta_c}{v_1} = \frac{\text{sen}90}{v_2} \Leftrightarrow \text{sen}\theta_c = \frac{v_1}{v_2} \quad (3)$$

Luego, planteamos en base a los parámetros de la estructura:

$$\begin{aligned} t &= \frac{z}{v_1 \cos\theta_c} + \frac{(x - 2z \tan\theta_c)}{v_2} + \frac{z}{v_1 \cos\theta_c} \\ t &= \frac{x}{v_2} + \frac{2z}{v_1 \cos\theta_c} - \frac{2z \tan\theta_c}{v_2} \\ t &= \frac{x}{v_2} + \frac{2zv_2 - 2zv_1 \sin\theta_c}{v_1 v_2 \cos\theta_c} \\ t &= \frac{x}{v_2} + \frac{2z - 2z \text{sen}^2\theta_c}{v_1 v_2 \cos\theta_c} \\ t &= \frac{x}{v_2} + \frac{2z \cos\theta_c}{v_1} \end{aligned} \quad (4)$$

Extendiendo la ecuación (4) a  $n$  capas,

$$t_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2z_i \cos\theta_{in}}{v_i} \quad (5)$$

donde  $\theta_{in} = \text{sen}^{-1} \frac{v_i}{v_n}$

## Ejercicio

Para un evento registrado en Valle Central, a kilómetros de las cordilleras chilenas, las estaciones de una red sísmica presentaron los siguientes tiempos para las primeras llegadas de onda P:

Tiempo llegada [s]	3.33	6.45	8.17	12.48	23.69	26.27	28.86	32.23	34.11	35.98
Dist. desde fuente [m]	5	15	25	50	110	130	145	170	185	200

Cuadro 1: Tiempo, desde el inicio del evento, de primeras llegadas identificadas, junto con la distancia a la que los instrumentos están respecto a la fuente.

1. Construya el gráfico de tiempos de llegada e identifique la cantidad de capas que refractan las ondas sísmicas en este caso.
2. Calcule las velocidades de propagación de onda sísmica para cada capa e identifique sus profundidades. ¿A qué estructura corresponden, en base a sus resultados?