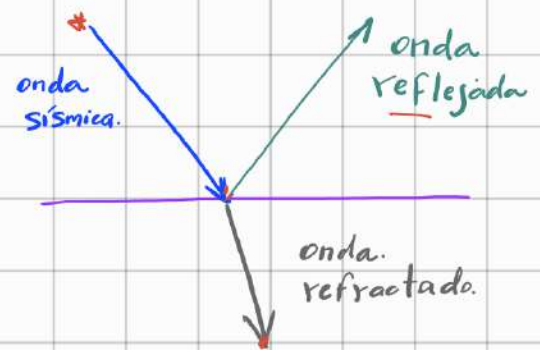
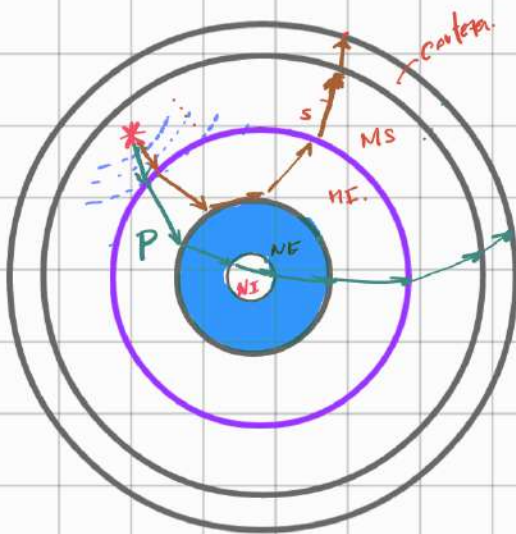
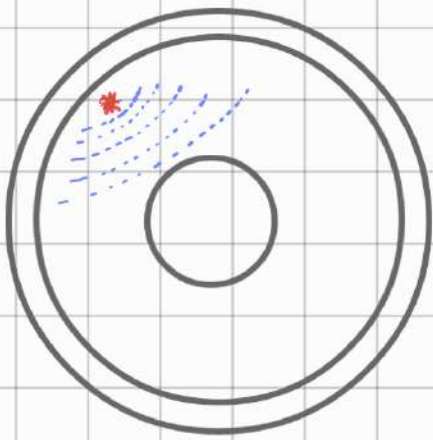
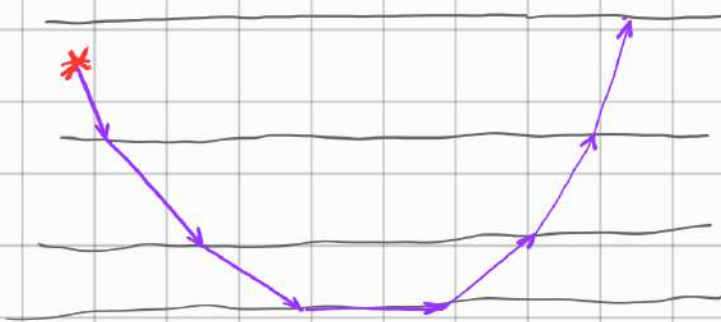


Propagación de Ondas.



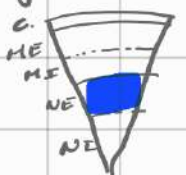
Propagación de Ondas en el Subsuelo.



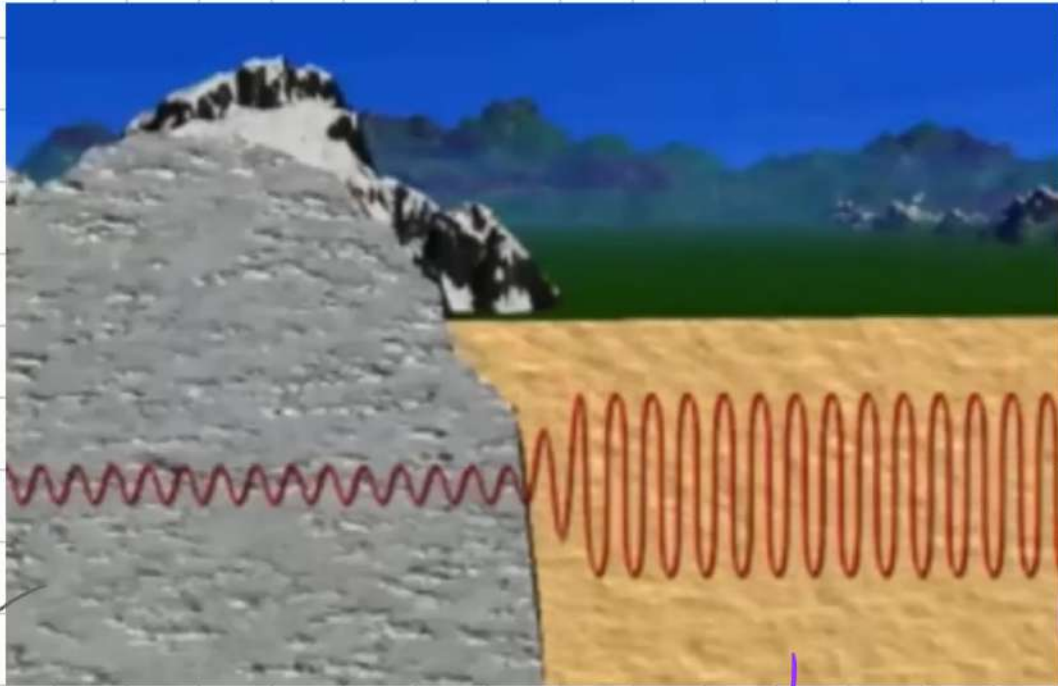
Perfil
estratigráfico.

Nota importante: Las ondas S no pueden refractarse en un medio líquido. Las ondas S se caracterizan por mover las partículas de material de forma perpendicular a la dirección de la propagación de la onda. Los líquidos no pueden soportar tensiones de este tipo por ende las ondas S al llegar a un líquido se reflejan.

Las ondas P son capaces de propagarse en medios líquidos.



Propagación de Ondas sísmicas superficiales



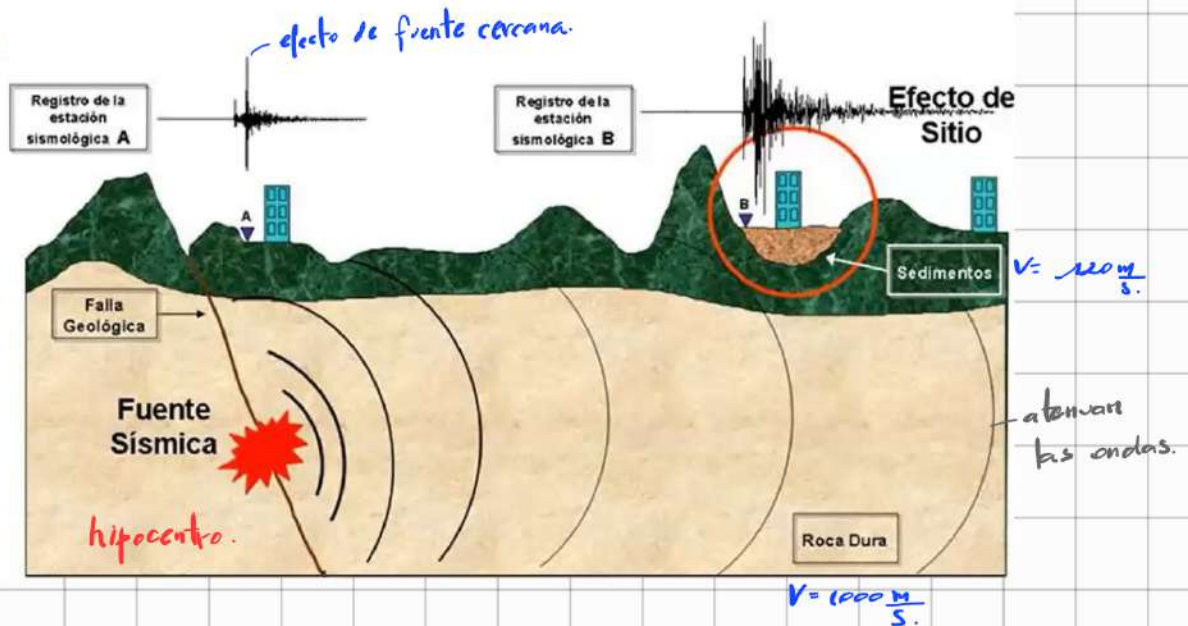
En roca
las ondas viajan más rápido
y su amplitud es baja.

En suelo blando se
desplazan más lento pero al
disminuir su velocidad aumentan
su amplitud para poder transportar
conservar la energía.

Efectos de sitio → se refiere a las características locales
del terreno.

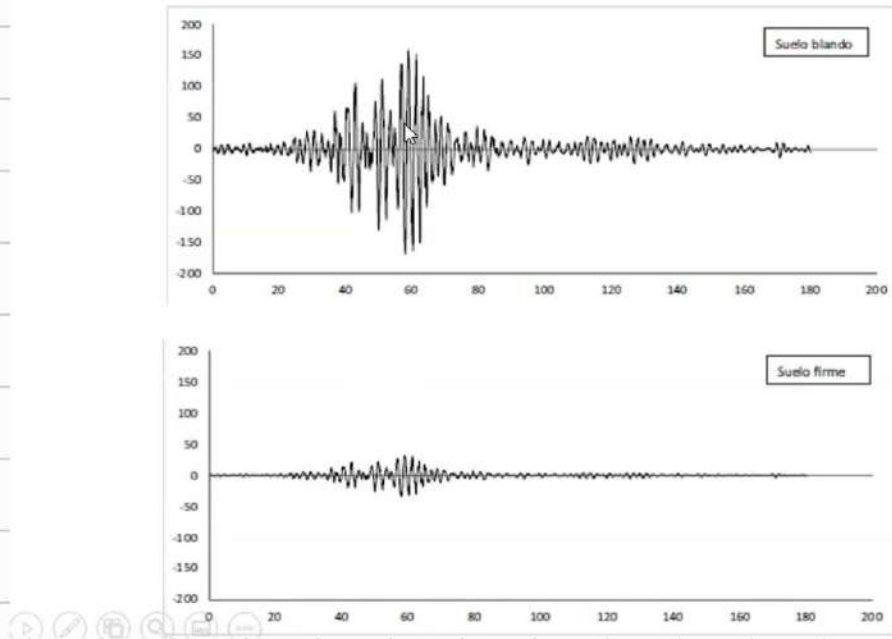
EL MOVIMIENTO DEL SUELO DEPENDE DE :
Fuente + Trayectoria + Sitio

Er
va
pa



Ejemplo de Efectos de Sitio para la Ciudad de México. - 1985. en la estación de La UNAM.

Efectos de sitio



Tipos de perfiles para el diseño sísmico tomado de la NEC-SE-PS en base a la velocidad de onda de corte (V_s).

Tipo perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de corte, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360$ m/s

rigido $\frac{55^\circ}{1500 \text{ m/s}}$

blando 150 m/s

$\sin^{-1}(\quad)$

Tipo perfil	Descripción	Definición
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_v \geq 100 \text{ kPa}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de corte, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180$ m/s
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 < N \leq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_v \geq 50 \text{ kPa}$
	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de corte,	$V_s < 180$ m/s
E	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$H > 3$ $w \geq 40\%$ $S_v < 50 \text{ kPa}$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1—Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2—Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3—Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con índice de Plasticidad ($P > 75$)).	
	F4—Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 30$ m).	
	F5—Suelos con contrastes de impedancia o ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
	F6—Reellenos colocados sin control ingenieril.	

blando 150 m/s
vibró 1500 m/s

SIMÓGRAFO

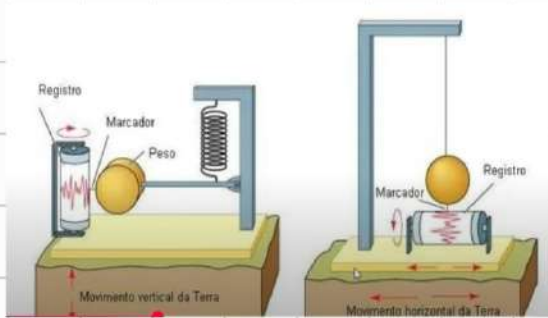
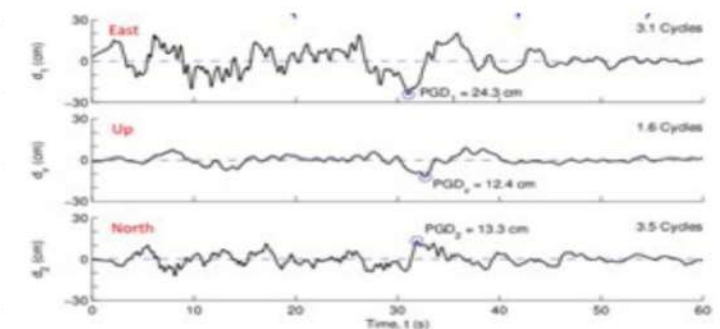
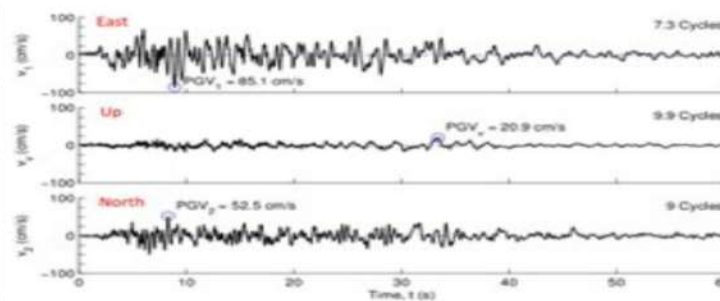
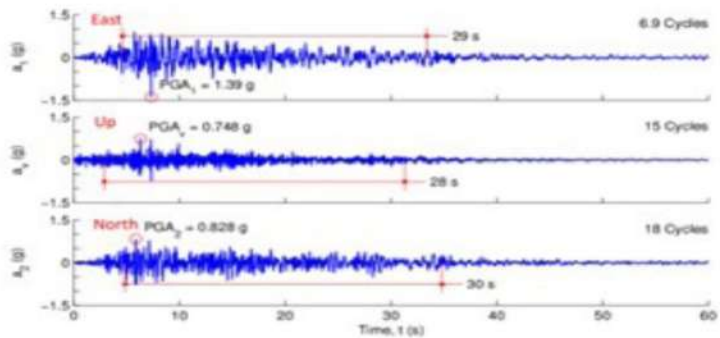
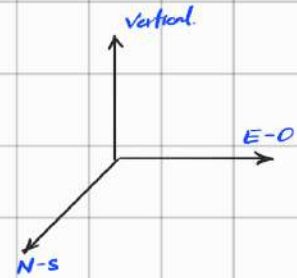


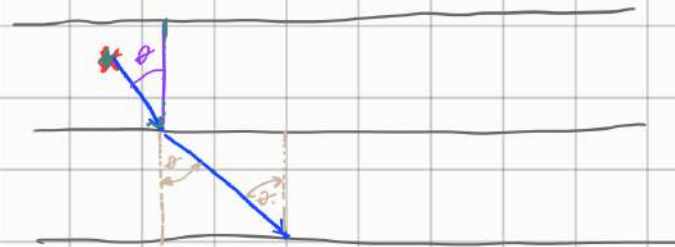
Tabla 1. Información de los registros en estudio

Terremoto	Fecha	Hora	Estación	Lugar	Dist. Epic. [km]	Comp.	PGA [g]
0Ecuador 7.8Mw	16 de abril de 2016	23h58 (UTC) 18h58 (local)	AES2	Esmeraldas	76	E-W	0.154
						N-S	0.111
			APED	Pedernales	36	E-W	1.390
						N-S	0.828
			APO1	Portoviejo	167	E-W	0.348
						N-S	0.420
			AMNT	Manta	171	E-W	0.404
						N-S	0.524

Fuente: RENAC (2016).

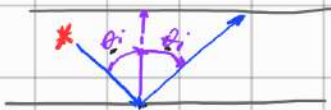


Ley de Snell: describe como una onda (luz, sonido o sísmica) cambia de dirección cuando pasa de un medio a otro.



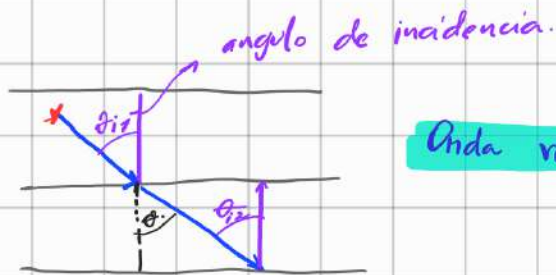
estrato 1

estrato 2

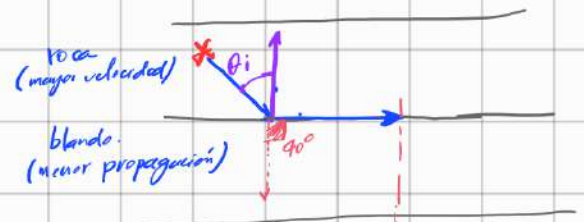


Onda reflejada

Onda refractada críticamente.



Onda refractada.

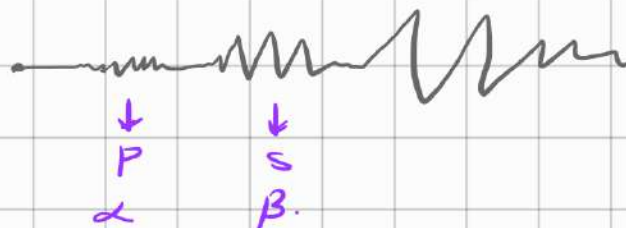


Ley de Snell $\rightarrow \frac{V_1}{\sin \theta_1} = \frac{V_2}{\sin \theta_2}$

V_i = velocidad de propagación de una onda en un medio

θ_i = ángulo en el que está incidiendo la onda sísmica

velocidad de ondas P $\rightarrow \alpha$
velocidad de ondas S $\rightarrow \beta$.



Ejemplo 1:

Cuál es el ángulo de refracción que adopta la onda al penetrar en el estrato 2.



$$\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{\sin \theta_2}$$

$$v_1 \cdot \sin \theta_2 = v_2 \cdot \sin \theta_1$$

$$\cancel{\sin} \theta_2 = \left(\frac{v_2 \cdot \sin \theta_1}{v_1} \right) \cancel{\sin}^{-1}$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{v_2}{v_1} \cdot \sin \theta_1 \right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{7000 \text{ m/s}}{4500 \text{ m/s}} \cdot \sin(20^\circ) \right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} (0.5289)$$

$$\theta_2 = 31.93^\circ$$



$$\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{\sin \theta_2}$$

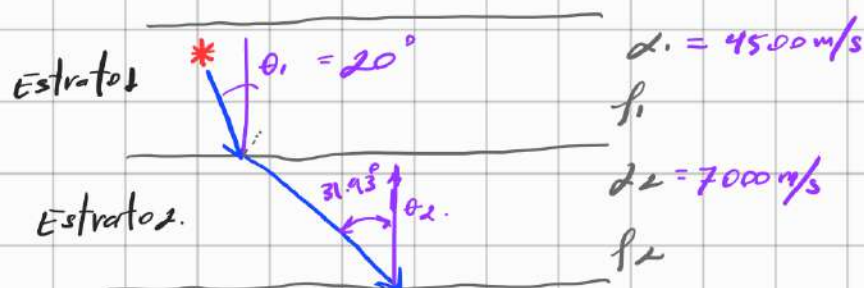
$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{v_2 \cdot \sin \theta_1}{v_1} \right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{4500}{4500} \cdot \sin 20^\circ \right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} (0.3420)$$

$$\theta_2 = 19.99^\circ$$

$$\theta_2 = 20^\circ$$



Ejemplo 2 : Si una onda sísmica viaja en el estrato 1 con un ángulo de incidencia $\theta_i = 35^\circ$

- ¿ Con qué ángulo se refleja en el estrato 1 ?
- ¿ Con qué ángulo se refracta en el estrato 2 ?
- ¿ Con qué ángulo tendría que incidir para que exista refracción crítica ?



a) los rayos sísmicos se reflejan con el mismo ángulo con el que inciden $\theta_i = 35^\circ$.

b)
$$\frac{\alpha_1}{\sin \theta_1} = \frac{\alpha_2}{\sin \theta_3}$$

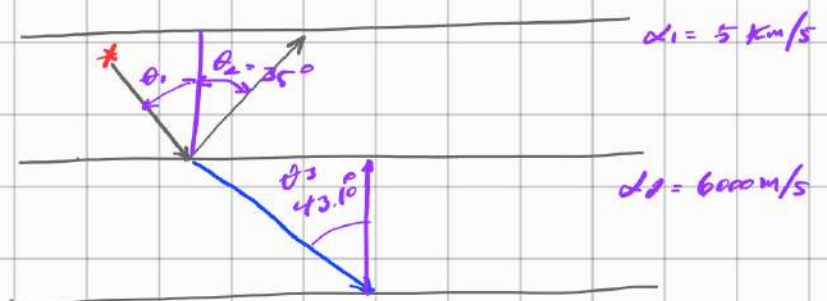
$$\alpha_1 \cdot \sin \theta_3 = \alpha_2 \cdot \sin \theta_1$$

$$\theta_3 = \frac{\alpha_2 \cdot \sin \theta_1}{\alpha_1}$$

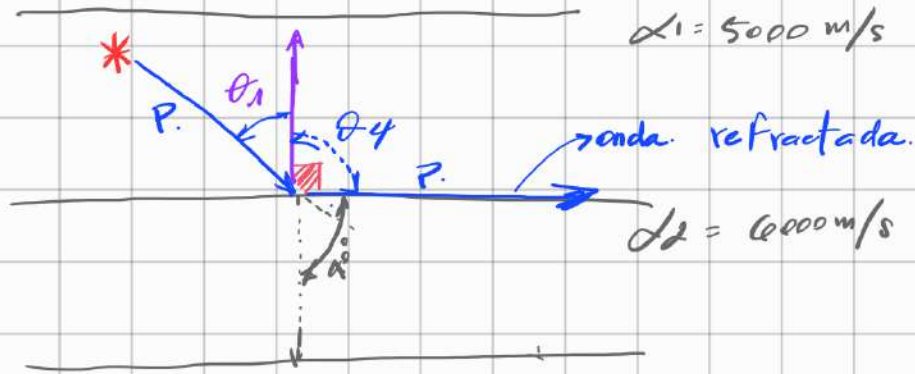
$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{6000 \text{ m/s} \cdot \sin 35^\circ}{5000 \text{ m/s}} \right)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} (0.6883)$$

$$\theta_3 = 43.10^\circ$$



g)



$$\theta_2 = 90^\circ$$

$$\frac{c_1}{\sin \theta_1} = \frac{c_2}{\sin \theta_2}$$

$$c_1 \cdot \sin \theta_2 = c_2 \cdot \sin \theta_1$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \cdot \frac{c_1 \cdot \sin \theta_2}{c_2}$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \cdot \frac{5000 \text{ m/s}}{6000 \text{ m/s}} \cdot \sin(90^\circ)$$

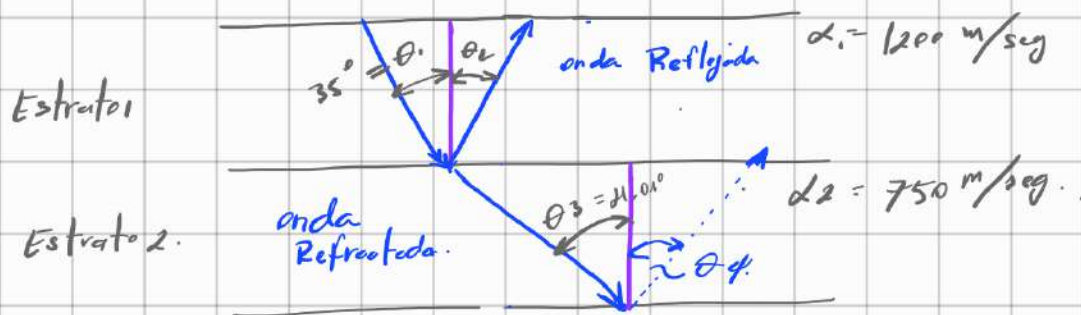
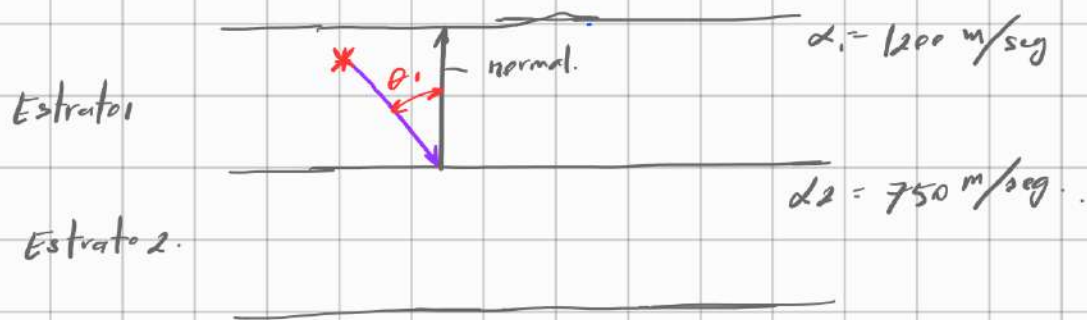
$$\theta_1 = \sin^{-1}(0.8333)$$

$$\theta_1 = 56.43^\circ$$

Para que haya refracción crítica el ángulo de incidencia debe ser de 56.43° .

Ejercicio 3

Dibuje la dirección de las ondas reflejadas y refractadas en cada estrato del perfil de suelo mostrado. Supóngase una onda P a 35° en el estrato superior.



$$\frac{\alpha_1}{\sin \theta_1} = \frac{\alpha_2}{\sin \theta_2}$$

$$\frac{\alpha_1}{\sin \theta_1} = \frac{\alpha_1}{\sin \theta_2}$$

$$\alpha_1 \cdot \sin \theta_2 = \alpha_1 \cdot \sin \theta_1$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1} \cdot \sin(35^\circ) \right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}(0.5736)$$

$$\theta_2 = 35^\circ$$

$$\frac{\alpha_1}{\sin \theta_1} = \frac{\alpha_2}{\sin \theta_2}$$

$$\alpha_1 \cdot \sin \theta_2 = \alpha_2 \cdot \sin \theta_1$$

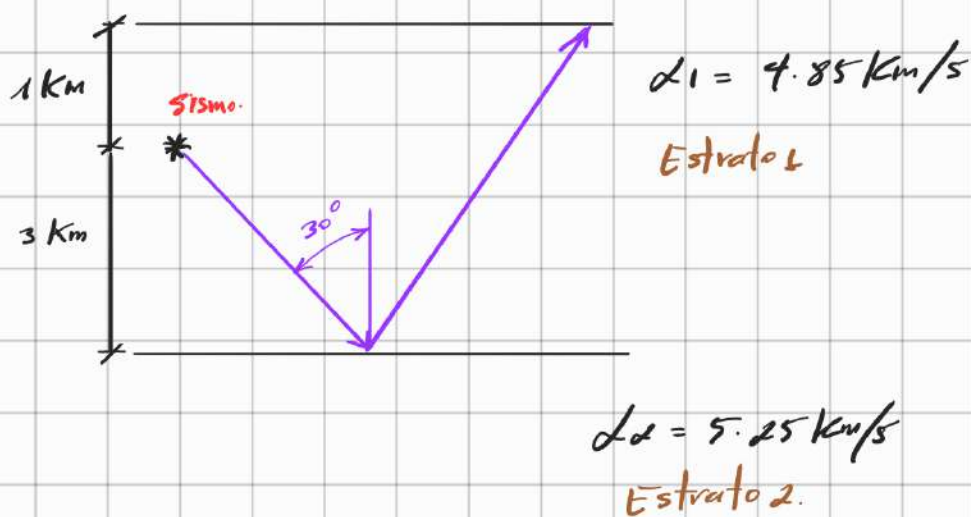
$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \sin \theta_1 \right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{780}{1200} \cdot \sin(35^\circ) \right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}(0.3585)$$

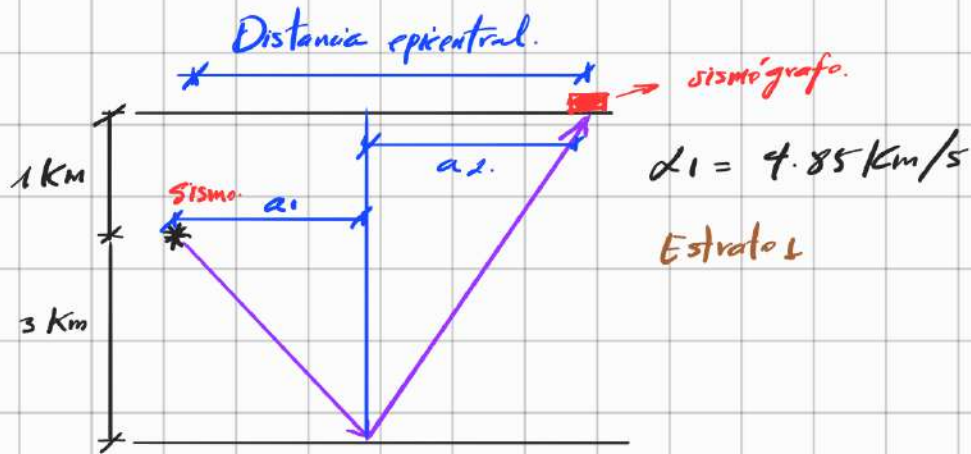
$$\theta_2 = 21.01^\circ$$

Ejercicio 4:

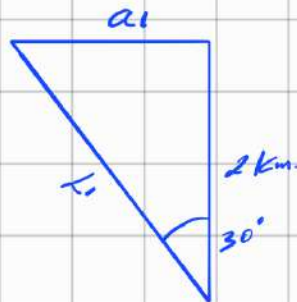


- 1.- Calcular la distancia epicentral.
- 2.- Calcular la distancia hipocentral.
- 3.- Calcular el tiempo de arribo de la onda P del rayo directo
- 4.- Calcular el tiempo de arribo de la onda S del rayo directo conociendo que la relación $v_p/v_s = 1.7$
- 5.- Calcular el tiempo de arribo de la onda P y S del rayo reflejado
- 6.- ¿Con qué ángulo debe incidir el rayo para que se refracte críticamente?

1) Distancia epicentral = proyección en superficie de la distancia que recorre el rayo desde su origen hasta su registro.



$$D_{\text{epicentral}} = a_1 + a_2$$



$$\tan 30^\circ = \frac{a_1}{2 \text{ km}}$$

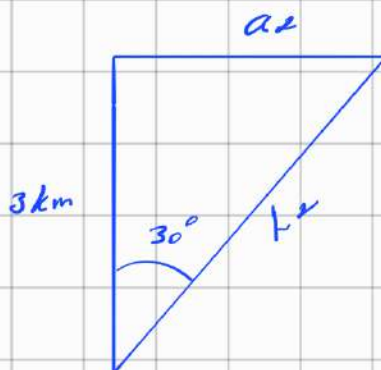
$$a_1 = 2 \text{ km} \cdot \tan 30^\circ$$

$$a_1 = 1.1547 \text{ km.}$$

$$\cos 30^\circ = \frac{2 \text{ km}}{L_1}$$

$$L_1 = \frac{2 \text{ km}}{\cos 30^\circ}$$

$$L_1 = 2.3094 \text{ km.}$$



$$\tan 30^\circ = \frac{a_2}{3 \text{ km}}$$

$$a_2 = 3 \text{ km} \cdot \tan 30^\circ$$

$$a_2 = 1.732 \text{ km}$$

$$\cos 30^\circ = \frac{3 \text{ km}}{L_2}$$

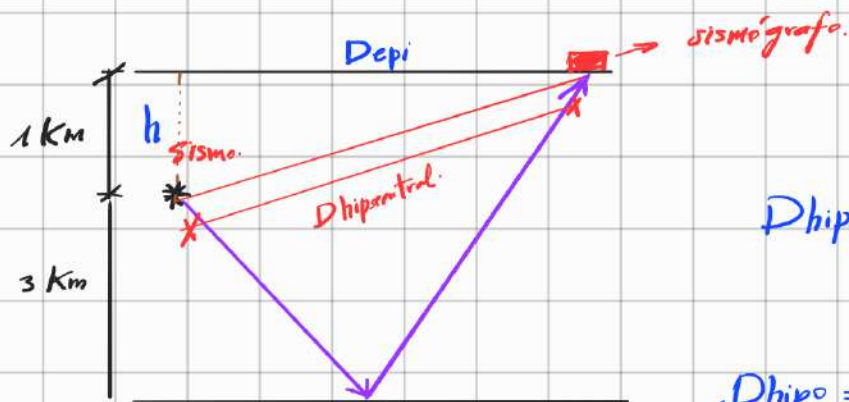
$$L_2 = \frac{3 \text{ km}}{\cos 30^\circ} = 3.464 \text{ km.}$$

$$\cos = \frac{\text{cateto}}{\text{hipotenusa}}$$

$$\text{Distancia epicentral} = 1.1547 \text{ Km} + 1.732 \text{ Km}$$

$$\text{Distancia epicentral} = 2.89 \text{ Km}$$

2) Distancia hipocentral = distancia desde el origen del sismo hasta la estación de registro.



$$D_{hipo} = \sqrt{D_{epi}^2 + h^2}$$

$$D_{hipo} = \sqrt{(2.89 \text{ Km})^2 + (1 \text{ Km})^2}$$

$$D_{hipo} = 3.055 \text{ Km.}$$

3... Calcular el tiempo de arribo de la onda P del rayo directo



$$V = \frac{d}{t}$$

$$d = \frac{d}{t_p}$$

$$t_p = \frac{d}{v} = \frac{3.055 \text{ Km}}{1.85 \text{ Km/s}} = 0.63 \text{ seg.}$$

4.- Calcular el tiempo de arribo de la onda S del **rayo directo** conociendo que la relación $V_p/V_s = 1.7$

$$\frac{V_p}{V_s} = 1.7$$

$$V_p \rightarrow 2$$

$$V_s \rightarrow B.$$

$$\frac{2}{B} = 1.7$$

$$B = \frac{2}{1.7} = \frac{4.85 \text{ Km/s}}{1.7}$$

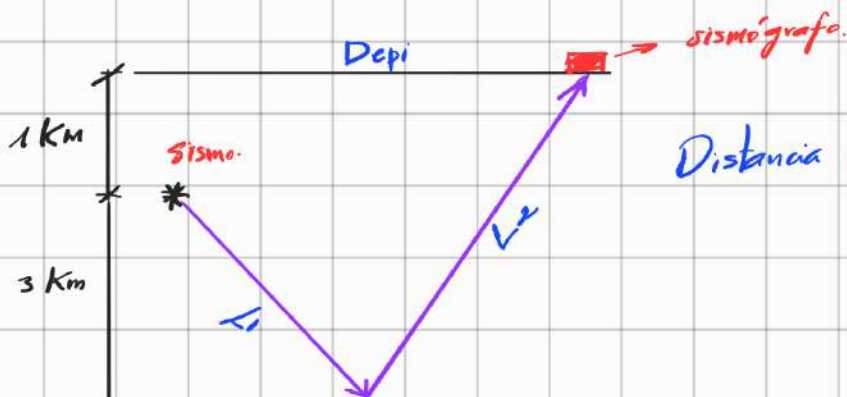
$$B = 2.85 \text{ Km/s}$$

$$V_s = \frac{d}{t_s}$$

$$t_s = \frac{d}{V_s} = \frac{d_{\text{hipo.}}}{B} = \frac{3.055 \text{ Km}}{2.85 \text{ Km/s}} = 1.07 \text{ seg.}$$

5.- Calcular el tiempo de arribo de la onda P y S del rayo reflejado

6.- ¿Con qué ángulo debe incidir el rayo para que se refleje críticamente?



$$\begin{aligned} \text{Distancia reflejada} &= L_1 + L_2 \\ &= 2.3094 \text{ Km} + 3.464 \text{ Km} \\ &= 5.7734 \text{ Km.} \end{aligned}$$

$$t_p = \frac{D_{\text{reflejada}}}{V_p} = \frac{5.7734 \text{ Km}}{V_p}$$

$$t_p = \frac{5.7734 \text{ Km}}{4.85 \text{ Km/s}}$$

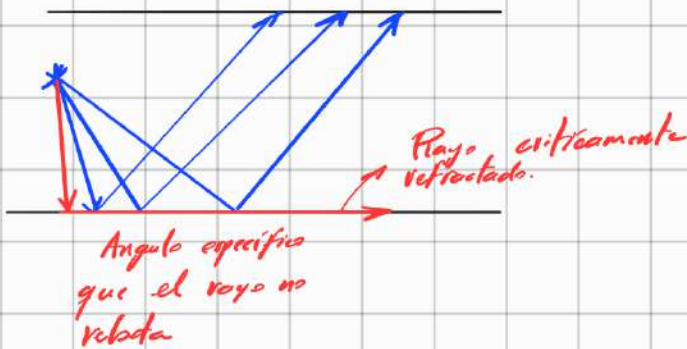
$$t_p = 1.19 \text{ seg.}$$

$$\beta = \frac{D_{\text{reflejada}}}{t_s}$$

$$t_s = \frac{5.7734 \text{ Km}}{2.85 \text{ Km/s}}$$

$$t_s = 2.025 \text{ seg.}$$

¿...? Con qué ángulo debe incidir el rayo para que se refracte críticamente?



Ley de Snell $\rightarrow \frac{v_1}{\text{sen } \theta_1} = \frac{v_2}{\text{sen } \theta_2}$

$$\frac{d_1}{\text{sen } \theta_1} = \frac{d_2}{\text{sen } \theta_2}$$

$$\frac{4.85 \text{ Km/s}}{\text{sen } \theta_c} = \frac{5.25 \text{ Km/s}}{\text{sen } 90^\circ}$$

$$\text{sen } \theta_c = \frac{\text{sen } 90^\circ \times 4.85 \text{ Km/s}}{5.25 \text{ Km/s}}$$

$$\theta_c = 67.49^\circ$$

* si el ángulo es menor se va hacia
a reflejar

* si el ángulo es mayor el rayo
se va hacia las capas inferiores