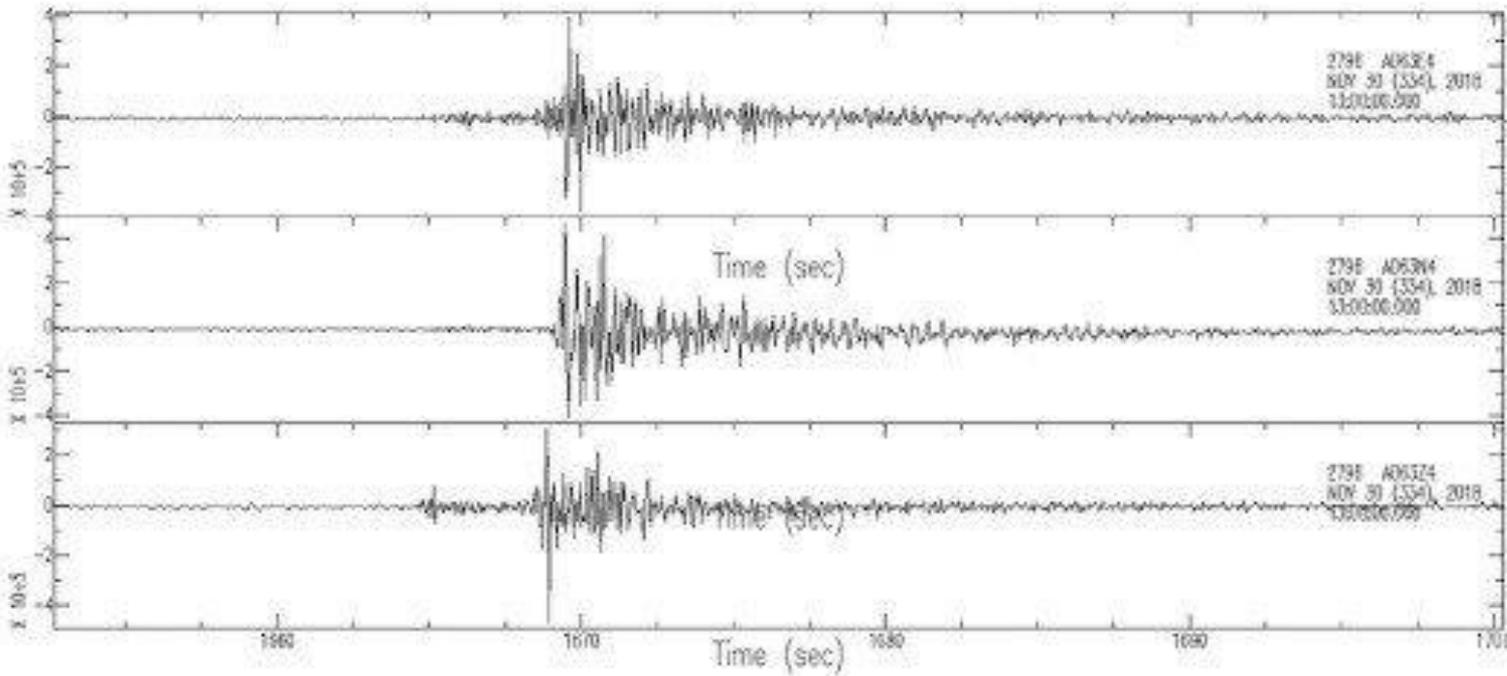


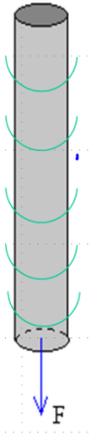
ONDAS SÍSMICAS



Terremoto
ocurrido en
cercanías de
la ciudad de
La Plata en
noviembre de
2018



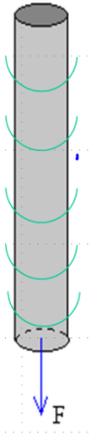
Si tomamos una barra de material elástico por un extremo y la golpeamos en el otro extremo, sentiremos que la energía del golpe se transmite a través de la barra y llega a nuestra mano. Esto sucede porque cada parte de la barra se deforma y luego vuelve a su forma original; al deformarse empuja a las partes vecinas, las cuales, a su vez, mueven a sus propias partes vecinas, lo que hace que la deformación viaje a lo largo de la barra.



La deformación es la que viaja y no las partículas de la barra, las cuales sólo se *desplazan* un poco de su posición original y luego vuelven a ella.



Si tomamos una barra de material elástico por un extremo y la golpeamos en el otro extremo, sentiremos que la energía del golpe se transmite a través de la barra y llega a nuestra mano. Esto sucede porque cada parte de la barra se deforma y luego vuelve a su forma original; al deformarse empuja a las partes vecinas, las cuales, a su vez, mueven a sus propias partes vecinas, lo que hace que la deformación *viaje* a lo largo de la barra.



La deformación es la que viaja y no las partículas de la barra, las cuales sólo se *desplazan* un poco de su posición original y luego vuelven a ella.

Terremoto de septiembre en México



Google

Fuente: USGS

BBC

Un terremoto afecta áreas muy grandes comparadas con la extensión de la fuente sísmica. Esto nos indica que existe energía, liberada en la fuente, que es transmitida a través del terreno y esta energía se propaga en forma de *ondas sísmicas*.

Anteriormente planteamos :

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \nabla \phi(\mathbf{x}, t) + \nabla \times \mathbf{\Upsilon}(\mathbf{x}, t)$$

Buscamos una solución,
que será una función u onda armónica

$$\phi(\mathbf{x}, t) = A \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_\alpha \cdot \mathbf{x})]$$

$$\Psi(\mathbf{x}, t) = \mathbf{B} \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_\beta \cdot \mathbf{x})]$$

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{\alpha^2} \ddot{\phi} = 0$$
$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{\beta^2} \ddot{\Psi} = 0,$$

$$\alpha = [(\lambda + 2\mu)/\rho]^{1/2}$$

$$\beta = (\mu/\rho)^{1/2}$$

Anteriormente planteamos :

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \nabla \phi(\mathbf{x}, t) + \nabla \times \mathbf{\Upsilon}(\mathbf{x}, t)$$

Buscamos una solución,
que será una función u onda armónica

$$\phi(\mathbf{x}, t) = A \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_\alpha \cdot \mathbf{x})]$$

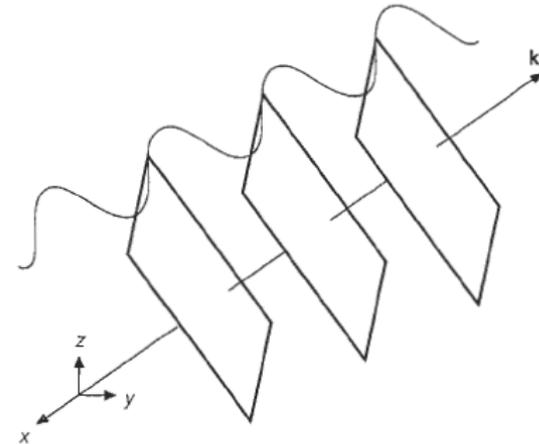
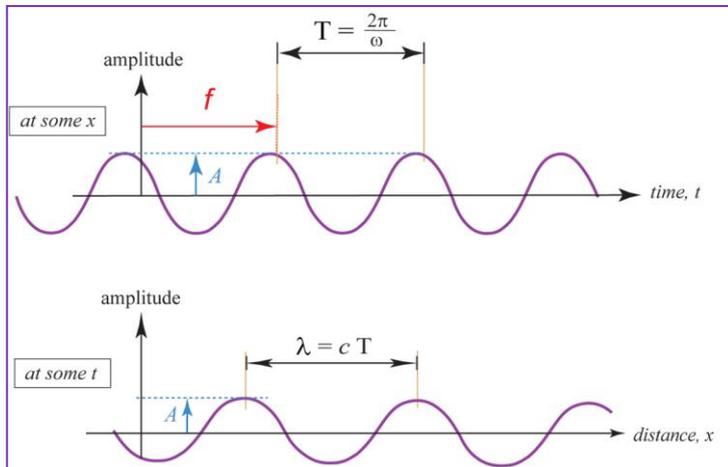
$$\Psi(\mathbf{x}, t) = \mathbf{B} \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_\beta \cdot \mathbf{x})]$$

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{\alpha^2} \ddot{\phi} = 0$$

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{\beta^2} \ddot{\Psi} = 0,$$

$$\alpha = [(\lambda + 2\mu)/\rho]^{1/2}$$

$$\beta = (\mu/\rho)^{1/2}$$



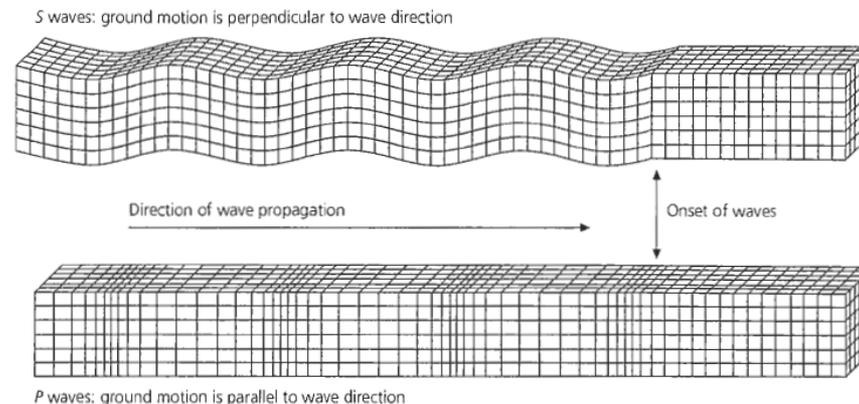
Frentes de onda para una onda armónica
plana viajando en la dirección indicada
por el vector de onda \mathbf{k} . La longitud es

$$\lambda = 2\pi / |\mathbf{k}|.$$

La teoría de la elasticidad nos dice que son posibles dos tipos de ondas elásticas que viajan a través de la Tierra, y que son conocidas como ondas de cuerpo u ondas internas, las cuales pueden ser compresionales o de cizalla.

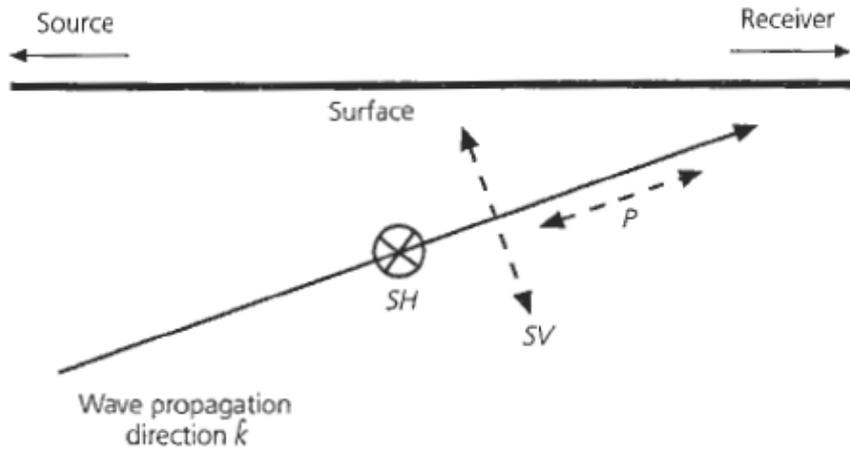
Las ondas P o *compresionales* son las que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio.

Las ondas de *corte* o de *cizalla*, llamadas *ondas S*, son aquéllas en las cuales las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación, por lo que están asociadas con deformaciones del terreno del tipo de cizalla.

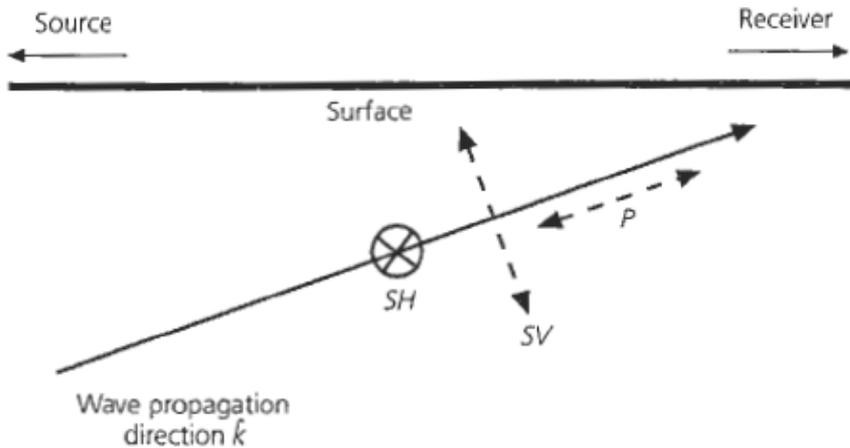


La onda S es más lenta que la onda P. En una amplia gama de rocas su velocidad, V_s , es aproximadamente igual $V_p/\sqrt{3}$ (condición de Poisson).

Como los líquidos no pueden soportar esfuerzos cortantes, las ondas S no se propagan a través de ellos.

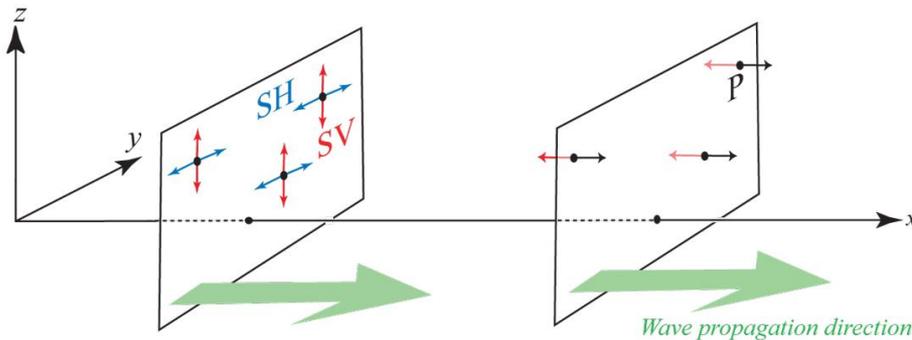


Desplazamiento para las ondas P y S propagándose en el plano x-z que contiene a la fuente y al receptor, donde el eje z es vertical. El desplazamiento de la onda P está dado por el vector de onda \mathbf{k} . La onda S se descompone en dos polarizaciones, S_V y S_H , perpendiculares al vector de onda. El desplazamiento S_H está en la horizontal (en la dirección y) mientras que el desplazamiento S_V está en el plano x-z.



Desplazamiento para las ondas P y S propagándose en el plano x-z que contiene a la fuente y al receptor, donde el eje z es vertical. El desplazamiento de la onda P está dado por el vector de onda \mathbf{k} . La onda S se descompone en dos polarizaciones, S_V y S_H , perpendiculares al vector de onda. El desplazamiento S_H está en la horizontal (en la dirección y) mientras que el desplazamiento S_V está en el plano x-z.

Plane waves and particle motion

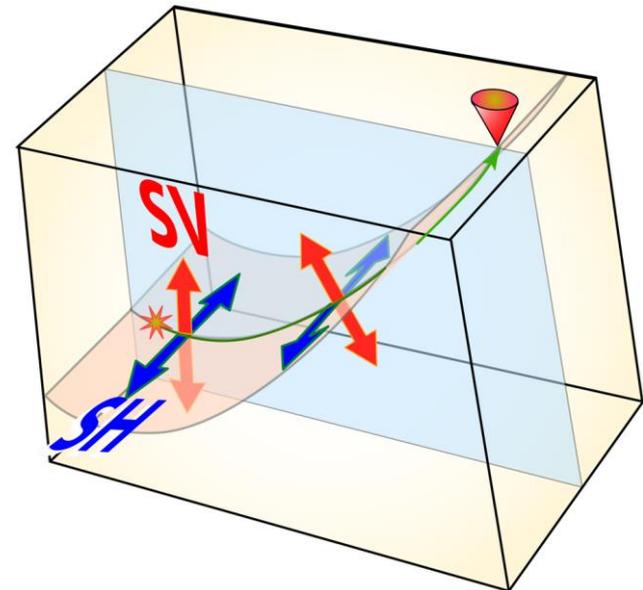


Particle motion direction for different wave types:

P = longitudinal / compressional waves: in direction of propagation direction

SH = horizontally polarized shear waves in horizontal plane, \perp to propagation direction

SV = vertically polarized shear waves: in vertical plane containing wave path, \perp to wave propagation direction



Si x_1 : Radial , x_3 : vertical

*Desplazamiento de la onda P:

$$\vec{u}^P = \vec{u}_P = \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \check{x}_1 + 0\check{x}_2 + \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} \check{x}_3 \quad \text{con } \Phi(x, t) = Ae^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)}$$

$$\vec{u}^P(x_1, x_3, t) = \vec{u}_P = -ik_1 A e^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)} \check{x}_1 - ik_3 A e^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)} \check{x}_3$$

Si x_1 : Radial , x_3 : vertical

*Desplazamiento de la onda P:

$$\vec{u}^P = \vec{u}_P = \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \check{x}_1 + 0\check{x}_2 + \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} \check{x}_3 \quad \text{con } \Phi(x, t) = Ae^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)}$$

$$\vec{u}^P(x_1, x_3, t) = \vec{u}_P = -ik_1 A e^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)} \check{x}_1 - ik_3 A e^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)} \check{x}_3$$

*Desplazamiento de la onda S:

$$\vec{u}^S = \text{rot } \Psi = \vec{u}_S = \left(\frac{\partial \Psi_3}{\partial x_2} - \frac{\partial \Psi_2}{\partial x_3} \right) \check{x}_1 + \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \Psi_3}{\partial x_1} \right) \check{x}_2 + \left(\frac{\partial \Psi_2}{\partial x_1} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial x_2} \right) \check{x}_3$$

$$\vec{u}^S = \vec{u}_S = - \frac{\partial \Psi_2}{\partial x_3} \check{x}_1 + \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \Psi_3}{\partial x_1} \right) \check{x}_2 + \frac{\partial \Psi_2}{\partial x_1} \check{x}_3$$

Si x_1 : Radial , x_3 : vertical

*Desplazamiento de la onda P:

$$\vec{u}^P = \vec{u}_P = \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \check{x}_1 + 0\check{x}_2 + \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} \check{x}_3 \quad \text{con } \Phi(x, t) = Ae^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)}$$

$$\vec{u}^P(x_1, x_3, t) = \vec{u}_P = -ik_1 A e^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)} \check{x}_1 - ik_3 A e^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_3 x_3)} \check{x}_3$$

*Desplazamiento de la onda S:

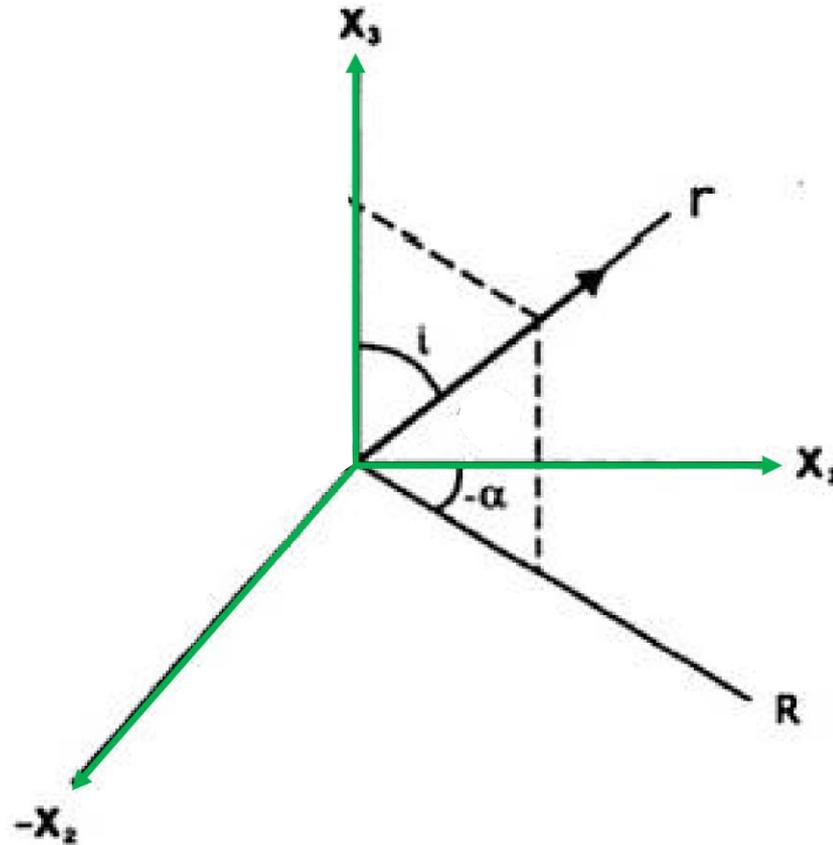
$$\vec{u}^S = \text{rot } \Psi = \vec{u}_S = \left(\frac{\partial \Psi_3}{\partial x_2} - \frac{\partial \Psi_2}{\partial x_3} \right) \check{x}_1 + \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \Psi_3}{\partial x_1} \right) \check{x}_2 + \left(\frac{\partial \Psi_2}{\partial x_1} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial x_2} \right) \check{x}_3$$

$$\vec{u}^S = \vec{u}_S = - \frac{\partial \Psi_2}{\partial x_3} \check{x}_1 + \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \Psi_3}{\partial x_1} \right) \check{x}_2 + \frac{\partial \Psi_2}{\partial x_1} \check{x}_3$$

El campo de desplazamiento total es la suma de las ondas P, SV y SH:

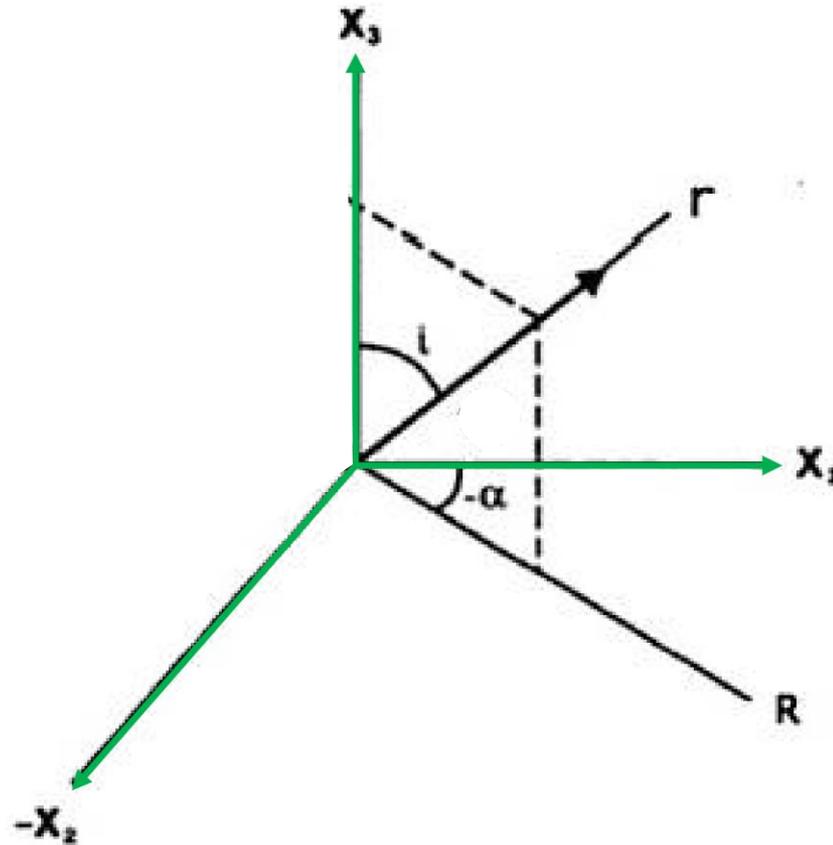
$$\vec{u} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} - \frac{\partial \Psi_2}{\partial x_3} \right) \check{x}_1 + \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \Psi_3}{\partial x_1} \right) \check{x}_2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_3} + \frac{\partial \Psi_2}{\partial x_1} \right) \check{x}_3$$

Geometría de los desplazamientos



En sismología se usa generalmente el *sistema de referencia geográfico* (N-S, E-W, Z): $x_1(+)$ Norte, $x_2(+)$ Oeste, $x_3(+)$ Vertical

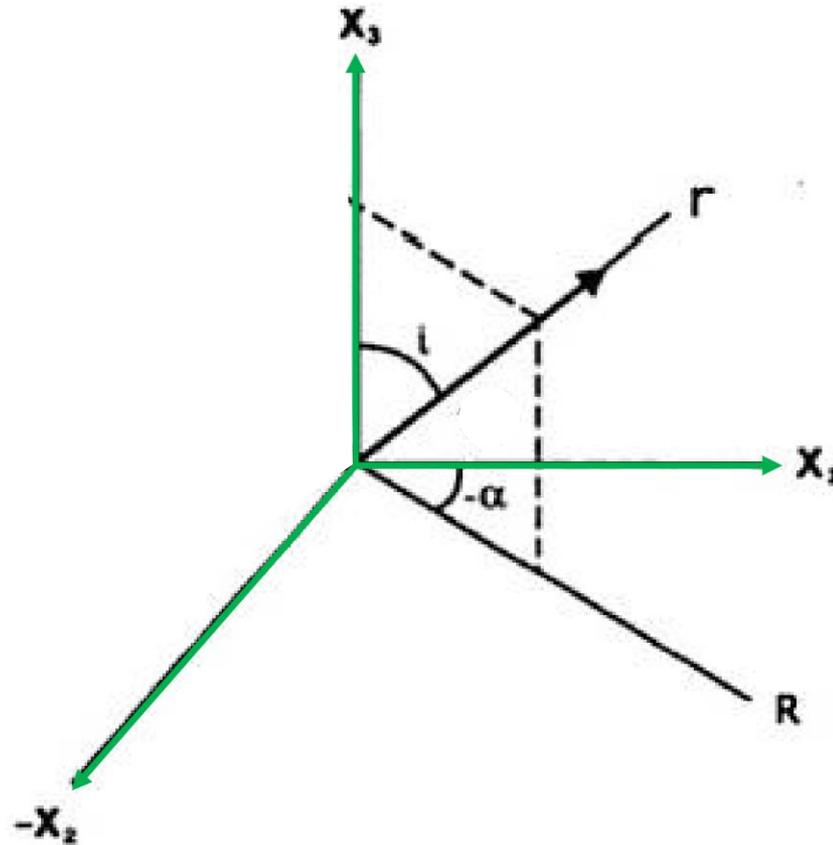
Geometría de los desplazamientos



r: dirección de propagación de la onda (determinada por el círculo máximo que comprende el camino entre la fuente y el receptor)

R: proyección de r en la horizontal

Geometría de los desplazamientos

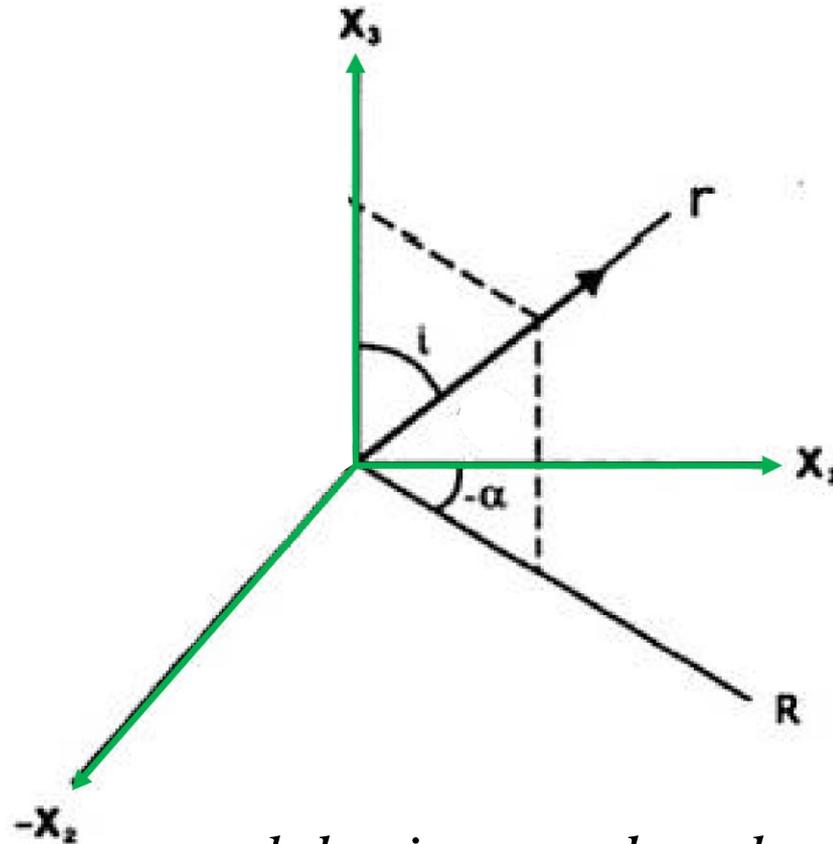


i : ángulo de incidencia: áng. formado entre la dirección \mathbf{r} y el eje x_3

e : ángulo de emergencia: $90 - i$

α : azimuth (desde el norte): ángulo entre \mathbf{R} y el eje x_1 .

Geometría de los desplazamientos



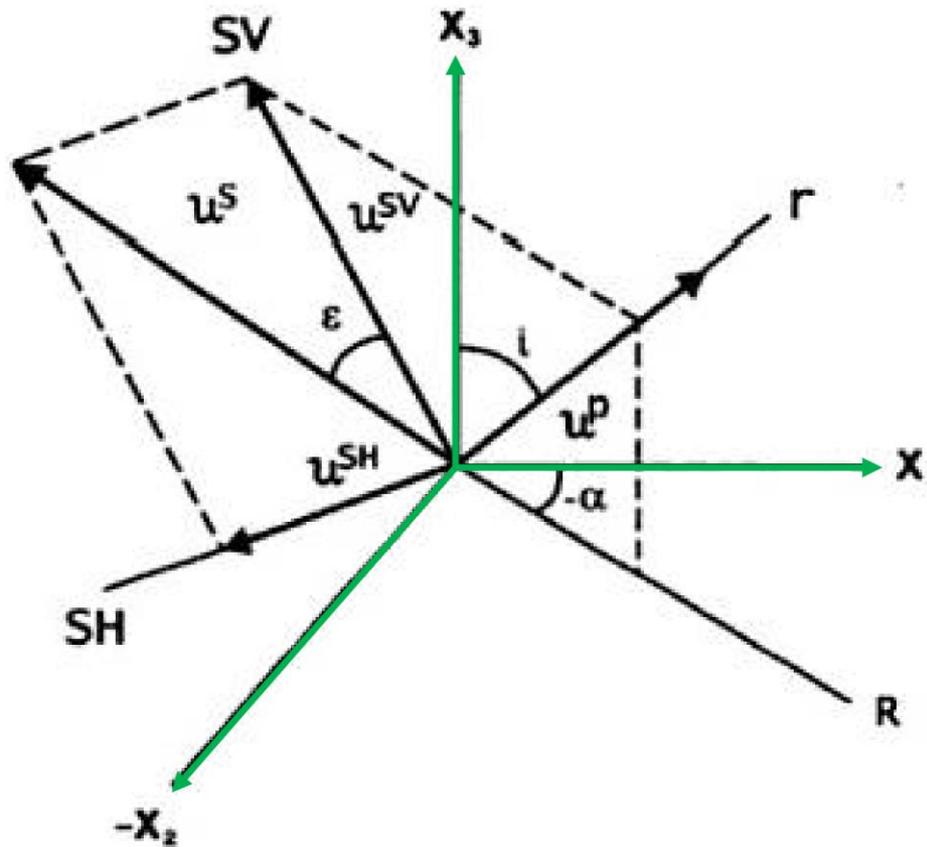
Definimos un *sistema ortogonal de ejes coordenados* $(\mathbf{R}, \mathbf{T}, \mathbf{Z})$ en referencia a la dirección del rayo \mathbf{r}

\mathbf{R} : componente horizontal de \mathbf{r}

\mathbf{T} : componente normal a \mathbf{r} en el plano horizontal

\mathbf{Z} : vertical

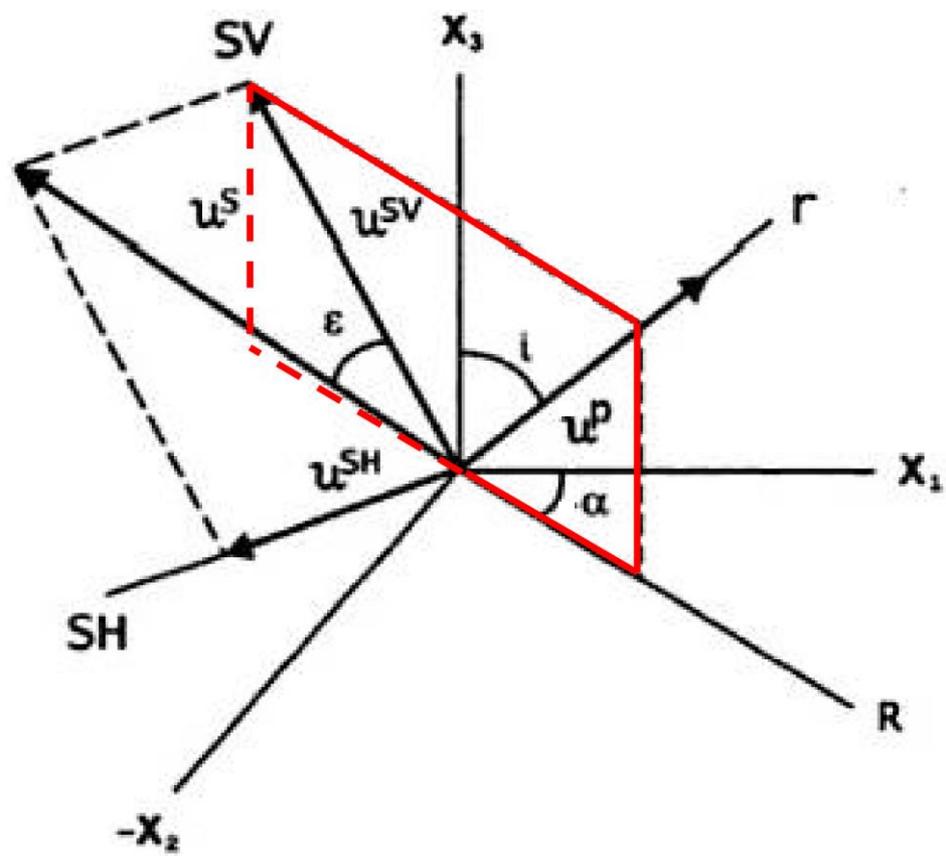
Geometría de los desplazamientos



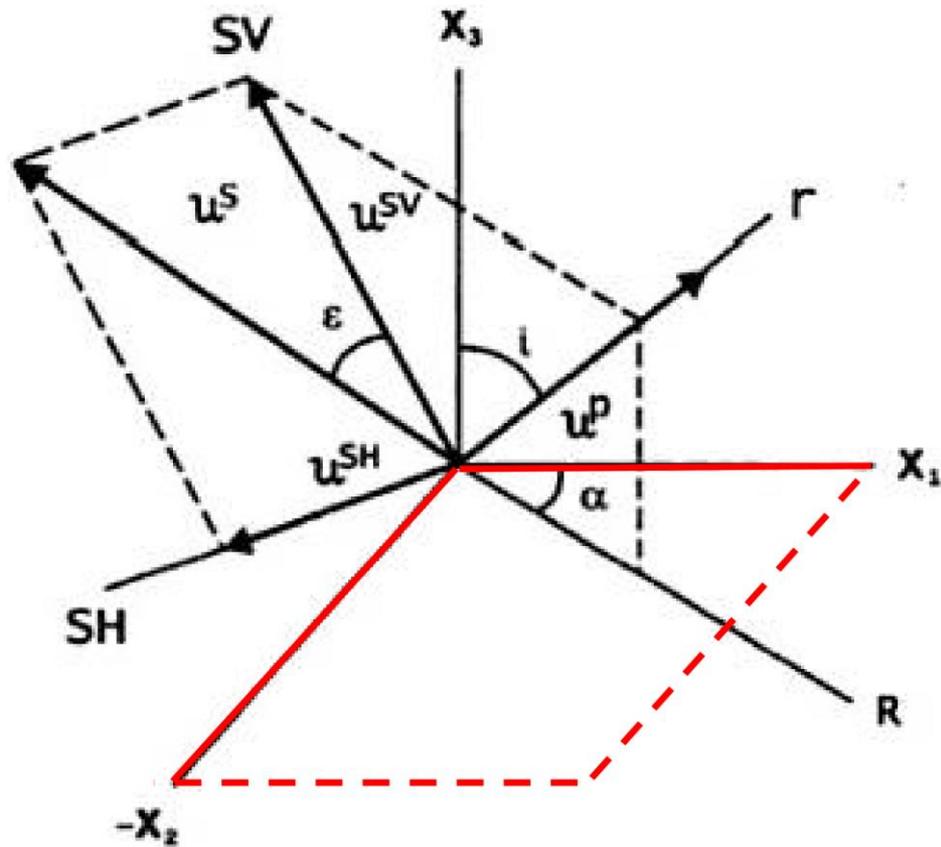
El desplazamiento generado por la onda P tiene 3 componentes con respecto a los ejes geográficos (u_1^P, u_2^P, u_3^P) y 2 con respecto a los ejes de propagación $(u_R^P, 0, u_Z^P)$.

Para entender la **geometría de los planos de P y S** en coordenadas cartesianas definimos 4 planos:

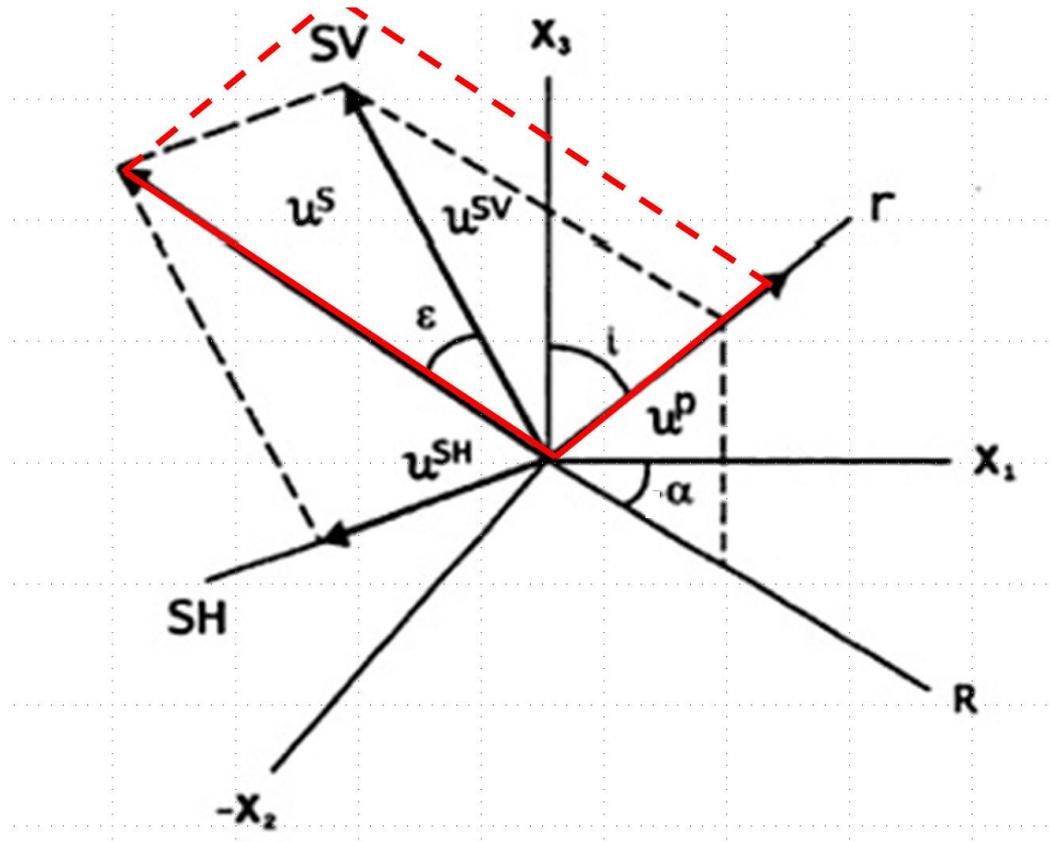
- Plano vertical o de incidencia
- Plano horizontal
- Plano de movimiento de la onda S
- Plano de polarización



Plano vertical o de incidencia: contiene a r , R y Z



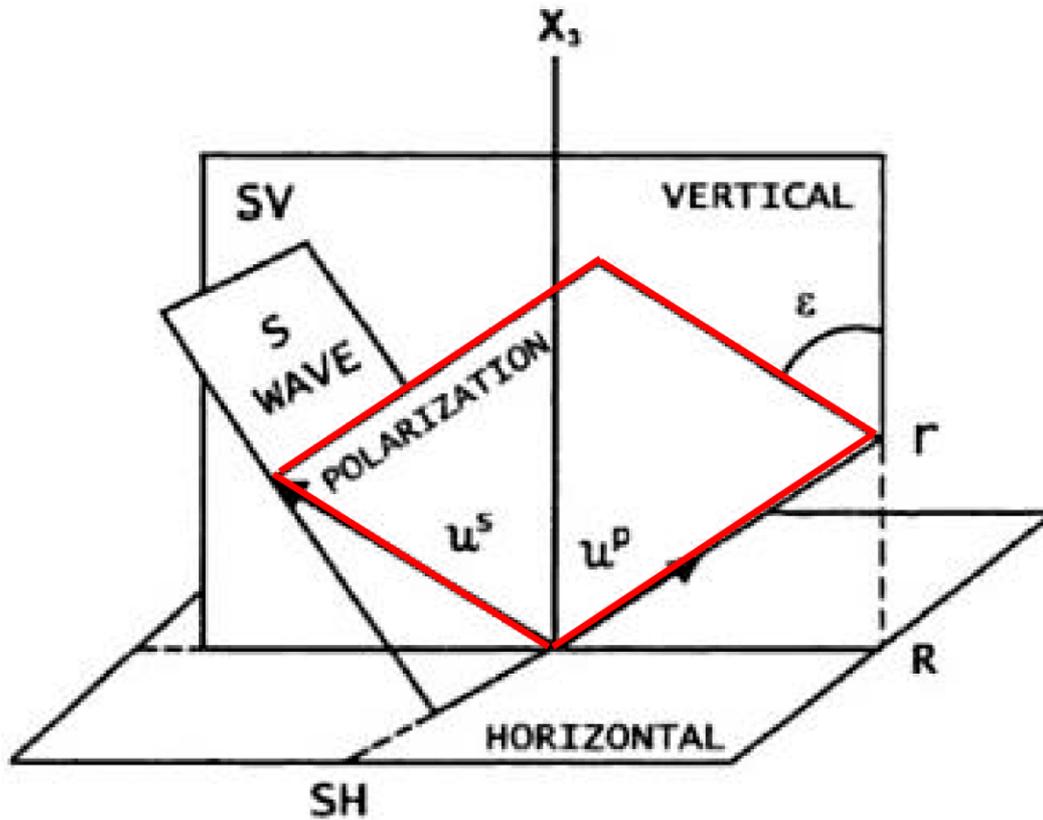
Plano horizontal: contiene a \mathbf{R} , N-S y E-W



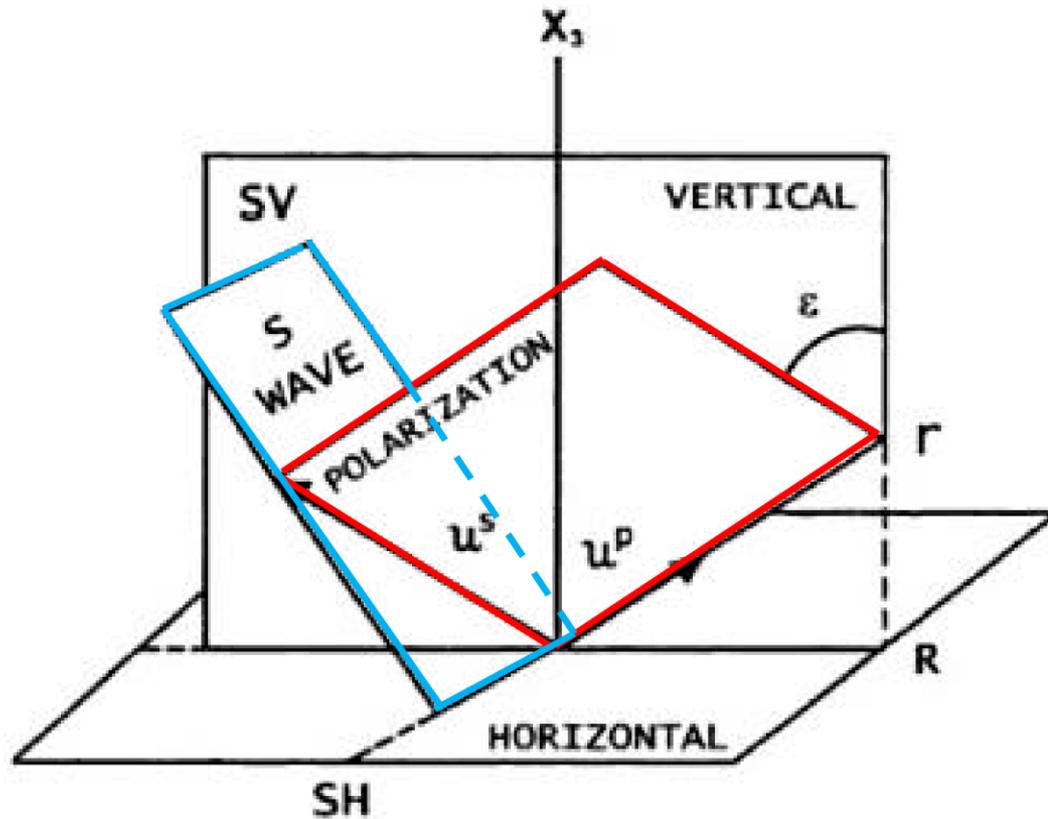
Plano de polarización: contiene a u^S y r .

Forma un ángulo ε (de polarización) con el plano vertical ($\text{tg } \varepsilon = U^{SH}/U^{SV}$).

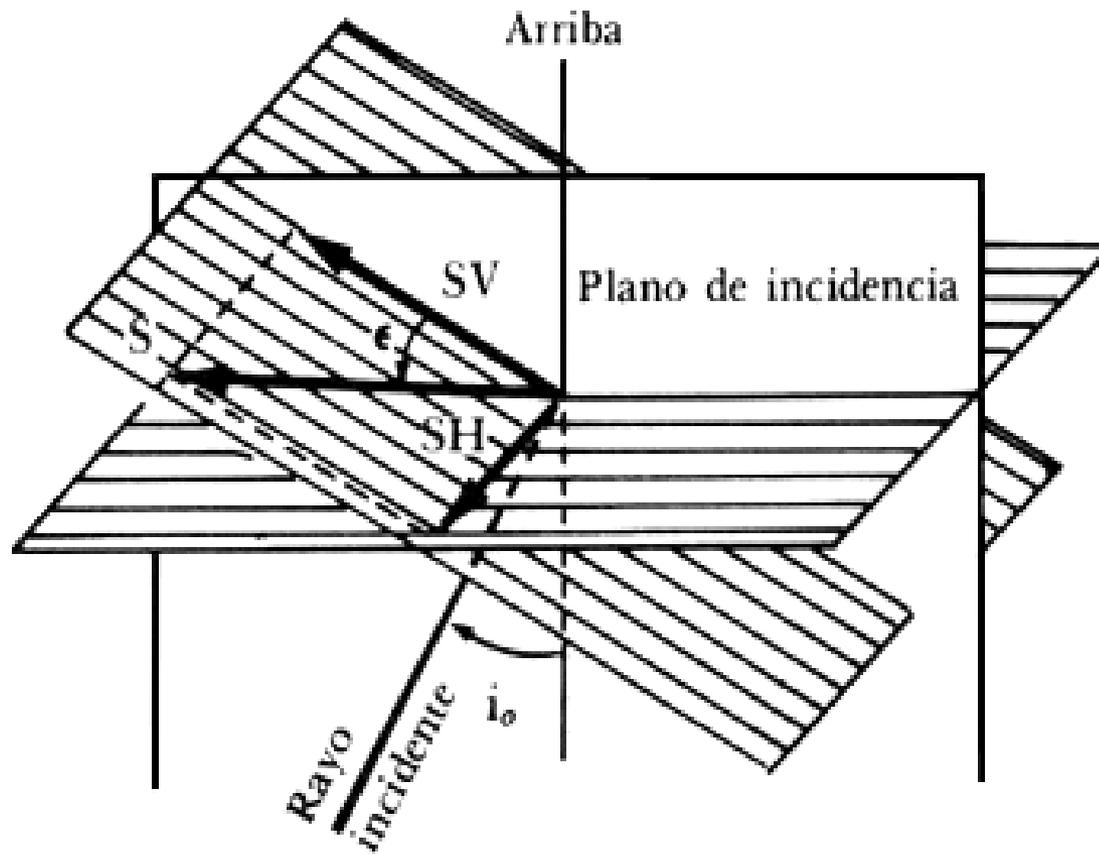
El ángulo γ entre U^{SV}_H y U^S_H es la proyección de ε en la horizontal ($\text{tg } \varepsilon = \text{tg } \gamma \cdot \cos i$)



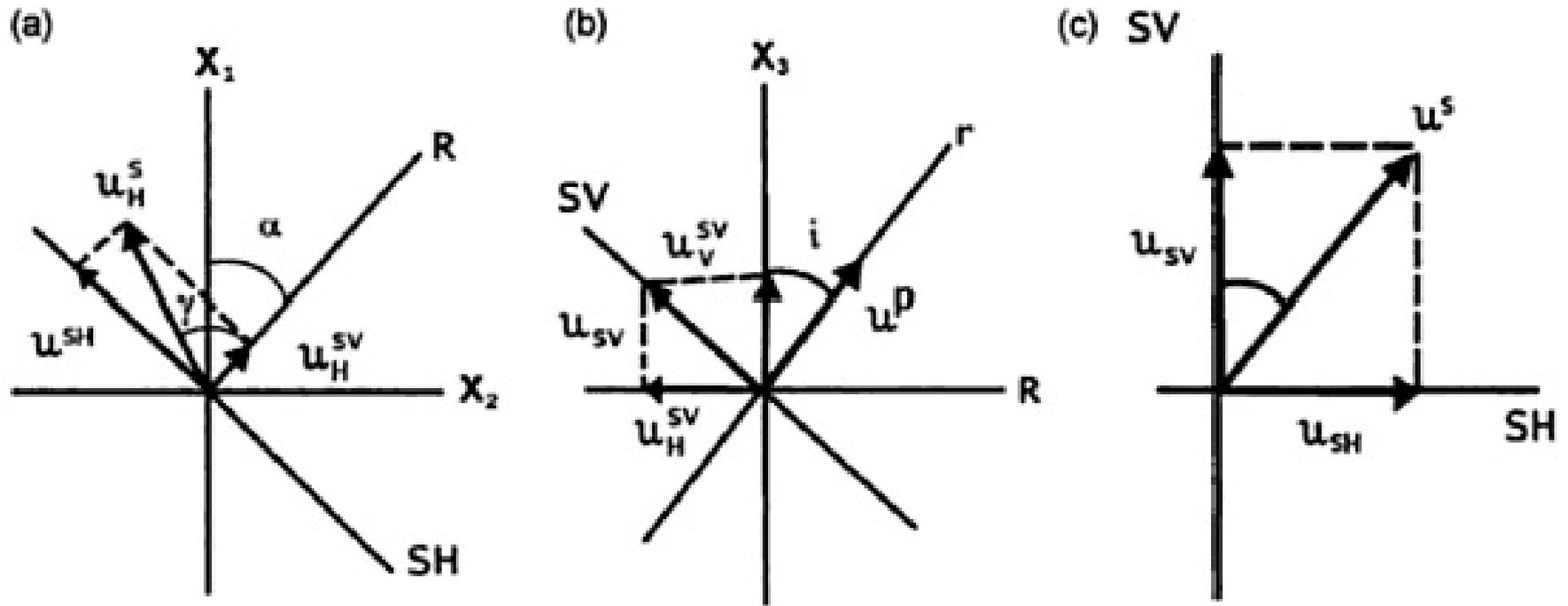
Geometría de los desplazamientos de las ondas P y S respecto a la vertical o plano de incidencia, horizontal y planos de movimiento y de polarización de la onda S



Geometría de los desplazamientos de las ondas P y S respecto a la vertical o plano de incidencia, horizontal y planos de movimiento y de polarización de la onda S



La onda S y sus componentes SV y SH



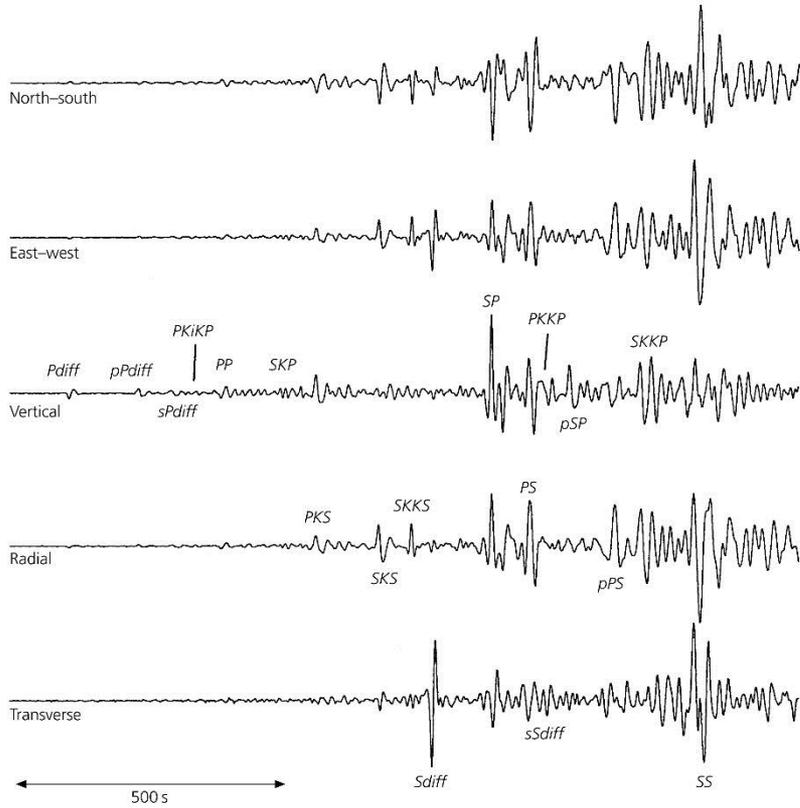
Componentes del desplazamiento de las ondas P y S

(a) Plano horizontal

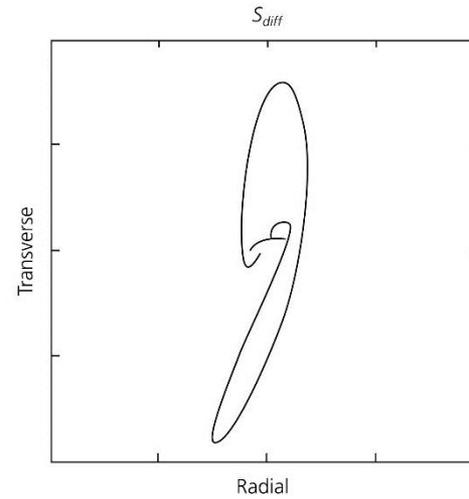
(b) Plano vertical o de incidencia

(c) Plano de movimiento de la onda S

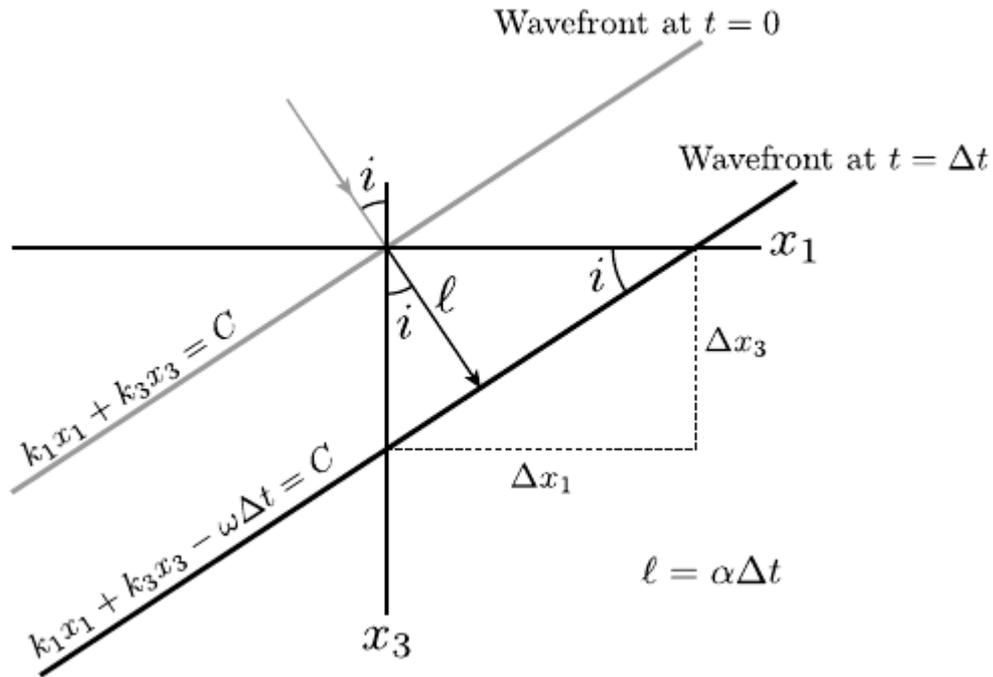
Figure 2.4-5: Seismograms for a deep earthquake recorded at a distance of 110°.



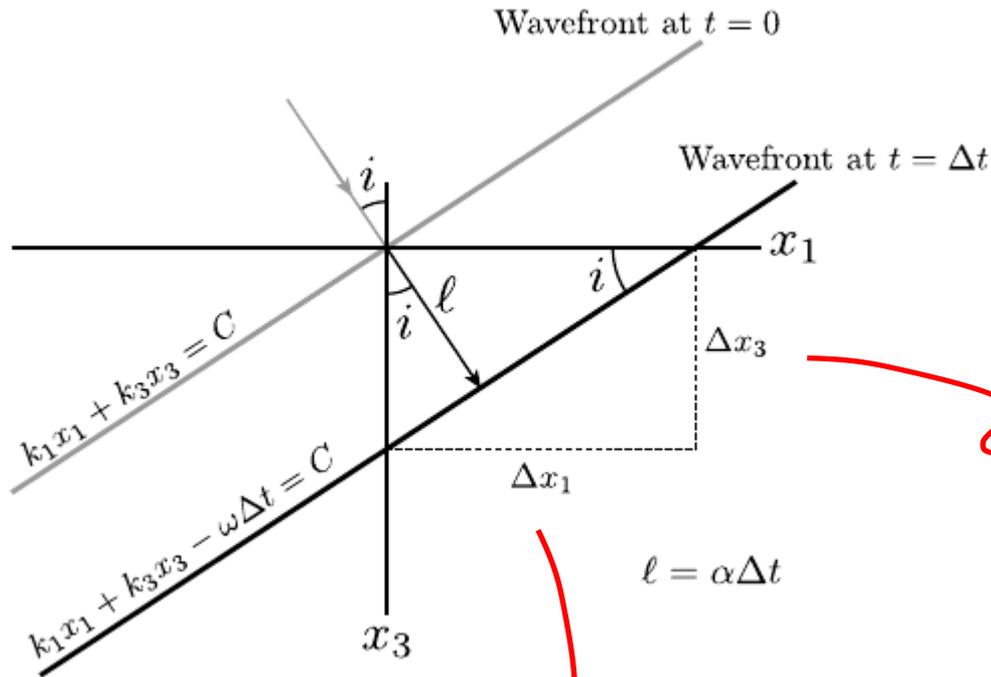
Movimiento de partículas de onda S



Velocidad aparente



Velocidad aparente



$$\frac{\Delta x_3}{\Delta t} = \frac{\ell / \cos i}{\Delta t} = \frac{\alpha}{\cos i}$$

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta t} = \frac{\ell / \sin i}{\Delta t} = \frac{\alpha}{\sin i}$$

Espectro sísmico - frecuencias

