

# 513110 - Introducción a la Geofísica



## Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción

### Sismología

Terminología - Tipos de Fallas - Fallas Oblicuas - Ciclo Sísmico - Predicción de Terremotos - Fuentes Sísmicas - Chile 1960 - Ondas Sísmicas;  $P$ ,  $S$ , Rayleigh, Love - Estructura Interna de la Tierra - Zonas de Sombra - Conversión entre ondas  $P$  y  $S$  - Fases Sísmicas - Tiempos de Viaje - Sismograma - Magnitudes - Escala de Mercalli - Frecuencia de Terremotos - Localización de Terremotos - Peligros.

**IRIS Seismic Monitor** - <http://www.iris.edu/seismon/index.phtml>

**USGS Seismic Wave Animation** -

[http://neic.usgs.gov/neis/eq\\_depot/2002/eq\\_021103/ak\\_seismic\\_waves.html](http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2002/eq_021103/ak_seismic_waves.html)

**Servicio Sismológico, CI** - <http://www.sismologia.cl/>

**Servicio Sismológico, Tarapacá** - <http://www.uta.cl/sismologia/>

*Apuntes hechos con la ayuda de alumnos Mauricio Leiva, Álvaro Pradenas, Cristóbal Aguilera, Carlos Valenzuela, Elizabeth Godoy, Carlos Herrera y Leonardo Thomson*

# Terminología

**Sismología** es el estudio de terremotos y ondas sísmicas que se propagan dentro de y sobre la superficie de la Tierra. Un terremoto se define como un evento natural dentro de la Tierra que emite energía de tensión en forma de ondas. Tal como este estudio puede ser usado para observar terremotos y el riesgo del público, también se pueden usar las ondas que viajan por la Tierra para obtener conocimiento del interior de ésta. De esta definición también se pueden sacar las siguientes:

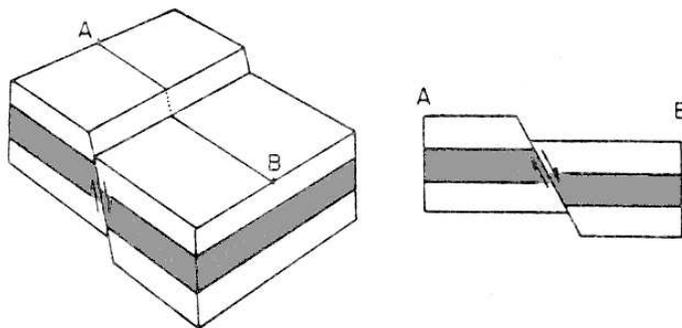
- **Sismólogo:** Científico especializado en el estudio de los terremotos.
- **Sismómetro:** Instrumento que registra los movimientos telúricos que ocurren en un cierto punto.
- **Sismógrafo:** Instrumento que toma los datos del sismómetro y lo transcribe en papel o en forma digital.
- **Sismograma:** Grabación del sismógrafo de los datos del sismómetro.



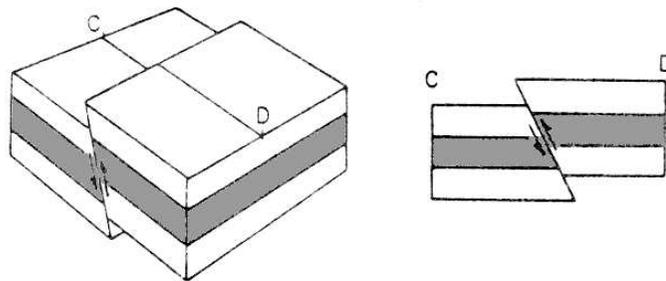
Note que en la era digital de hoy los instrumentos pueden registrar los movimientos y los transcribe en un disco duro, así que sismómetro/sismógrafo sirven igual. Acá vemos el interior de un sismómetro Güralp de tres componentes, y una comparación con un sismómetro Wood-Anderson de ~1930.

# Tipos de Fallas

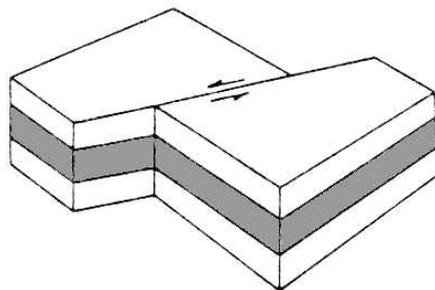
Las fallas son grietas en la corteza terrestre en las que hay movimiento relativo a ambos lados de ésta. Este movimiento puede ser vertical, horizontal, o una combinación de los dos. Estas son de varios tipos:



**Falla Normal:** Son fallas de tensión horizontal perpendicular a la falla en zonas de divergencia. (Aquí se ve una falla de dip-slip normal).



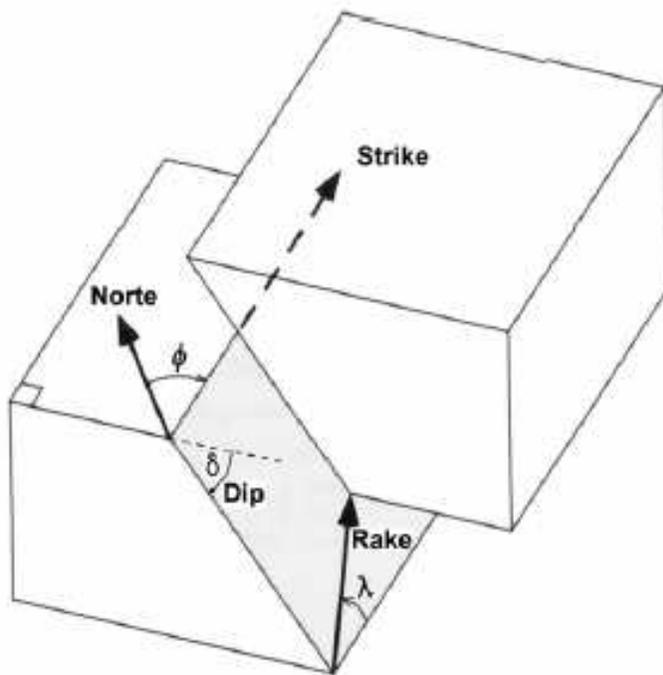
**Falla Inversa:** Son fallas de compresión horizontal perpendicular a la falla en zonas de convergencia. (Aquí se ve una falla de dip-slip inversa).



**Falla de Desgarre:** Son fallas que se mueven de forma lateral y pueden ser lateral izquierda o lateral derecha (falla strike-slip). Un ejemplo famoso es la falla de San Andrés en California.

# Fallas Oblicuas

También están las fallas oblicuas que tienen un componente de dip-slip y un componente de strike-slip. En el caso general, para determinar tanto la dirección, inclinación y movimiento durante la ruptura de la falla, se cuenta con 3 definiciones importantes: Strike, Dip y Rake:



**Strike**: Es la orientación de la falla con respecto al norte. La dirección de la falla se define por tener su inclinación hacia la derecha cuando uno camina en esta dirección, así que por eso su medida puede variar de 0 a 360 grados.

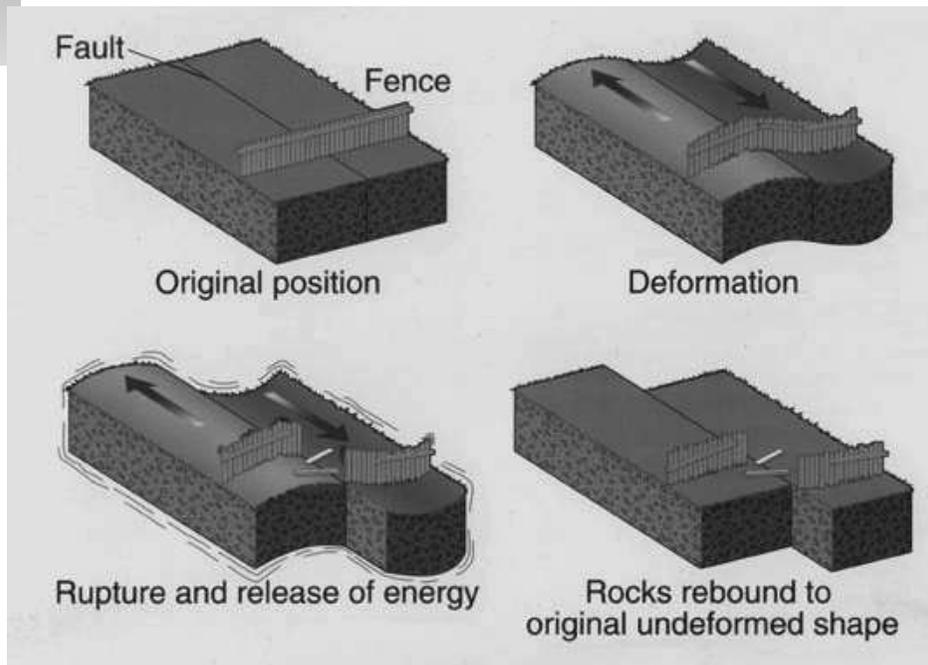
**Dip**: Es la inclinación de la falla con respecto a la horizontal. Varía de 0 a 90 grados.

**Rake**: Es usado para la medición de la dirección de movimiento de la ruptura cuando hay un terremoto en relación al strike de la falla; varía de -180 a 180 grados. Cabe señalar que si este ángulo es 0, el movimiento en la falla está en la misma dirección del strike.

Dip	Rake	Falla
90	0	de desgarre (izquierda)
90	180	de desgarre (derecha)
0-90	90	inversa
0-90	-90	normal

# Ciclo Sísmico

En los lugares donde hay una falla siempre hay acumulación de presión produciéndose un ligero movimiento a través de los años. Llegado el momento de un evento sísmico, ocurre una fractura y un movimiento violento.



La figura muestra inicialmente una reja construida a través de la falla. Un movimiento tectónico ocurre durante los próximos años, pero los lados de los bloques son restringidos por la fricción en la falla, y el suelo (y la reja) se doblan; la energía de deformación elástica aumenta. Después de la ruptura, los bloques rebotan a su forma original y la reja se rompe donde pasa la falla. Después de eso, empieza el ciclo de nuevo.

Note que la acumulación de la presión toma años (a una tasa de unos centímetros por año), pero la liberación de energía toma segundos (y el movimiento puede ser metros), por eso puede causar severos daños a las estructuras.

# Ciclo Sísmico

En los siguientes ejemplos están la falla Denali, Alaska, y una parte de la falla San Andrés, cerca de San Francisco. En Alaska, el oleoducto transAlaska cruza la falla, y se puede mover horizontalmente para que no se rompa con la acumulación de deformación lenta del ciclo sísmico. En la falla San Andrés, la reja que cruza la falla está separada después del famoso terremoto de 1906.

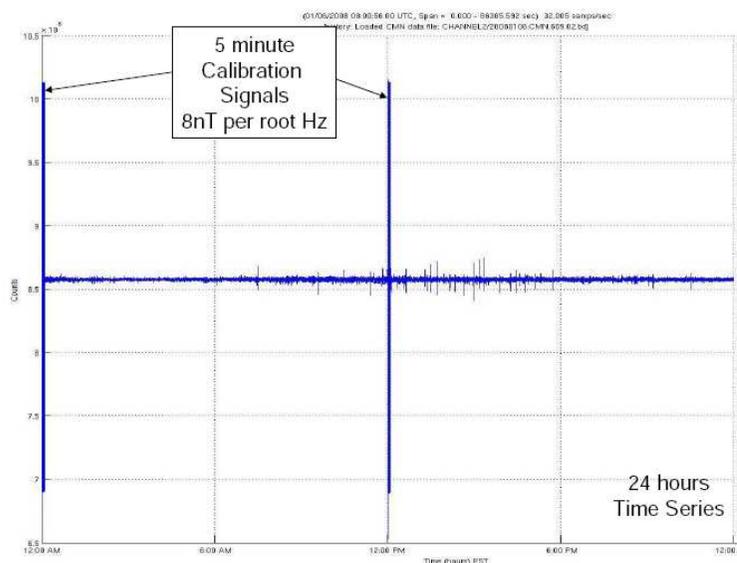


# Predicción de Terremotos

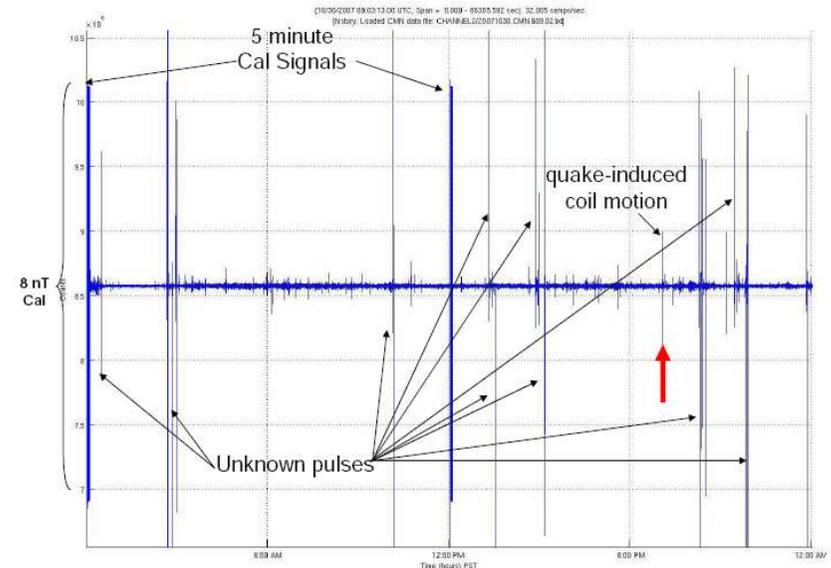
Aunque una cierta falla puede tener un terremoto característico que se repite en un tiempo característico, la predicción de los terremotos es difícil porque: **1)** Los valores pueden ser desconocidos, especialmente si el tiempo característico es muy largo. **2)** El terremoto puede ocurrir cualquier momento - el tiempo característico solamente es un promedio. **3)** Las condiciones físicas o reológicas (la deformación de la corteza) pueden cambiar en tiempo, y particularmente son afectadas por terremotos.

Interesantes nuevas técnicas están en desarrollo, basadas sobre la hipótesis que rocas bajo estrés crítico emiten ondas electromagnéticas de muy baja frecuencia unas horas antes de un terremoto, (por ejemplo <http://www.quakefinder.com/>), pero todavía existen dudas sobre el éxito de esas técnicas.

Typical "Quiet Day" at Site 609 near Alum Rock

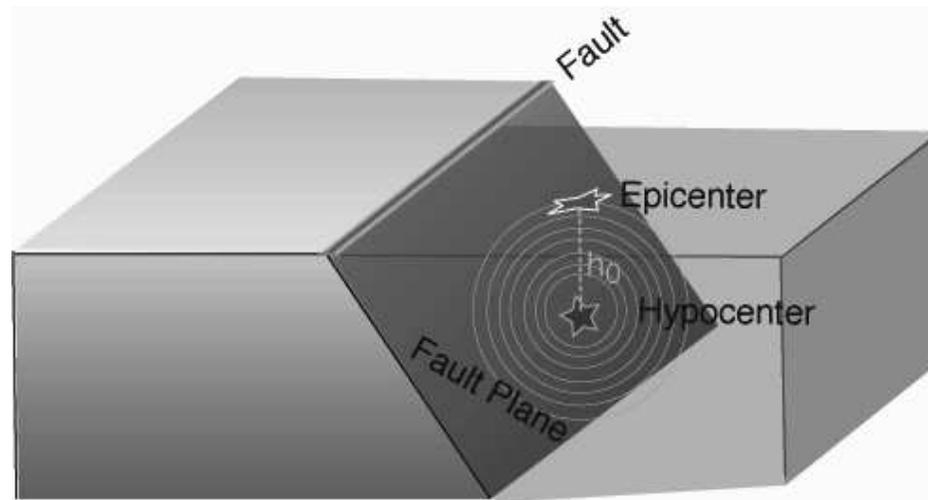


Pulsations observed on day of Quake (10/30)



# Fuentes Sísmicas

En todo estudio sísmico se deben tener los conocimientos de los siguientes términos que se relacionan con un terremoto en el momento que éste ocurre:

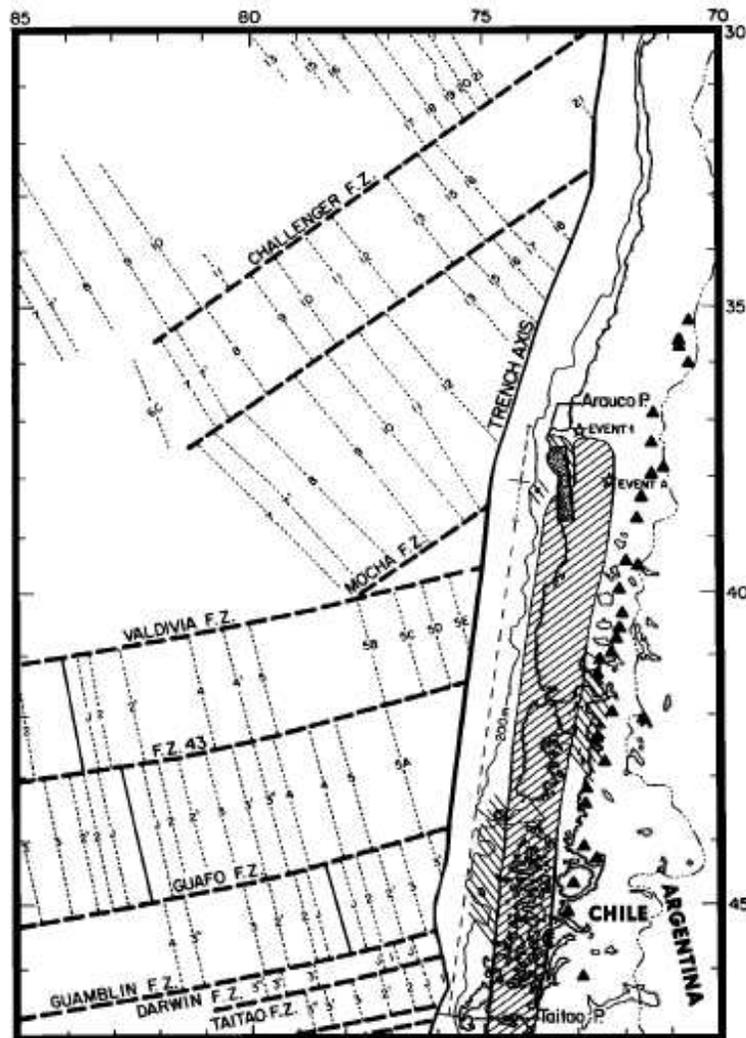


- Hipocentro o Foco: es el punto inicial del terremoto debajo de la Tierra. Éste posee latitud, longitud y profundidad.
- Epicentro: Proyección del hipocentro hacia la superficie. Posee latitud y longitud.
- Área de ruptura: Es el sitio donde ocurre la deformación en la falla.
- Momento sísmico: Está dado por la siguiente fórmula:

$$M_0 = \mu \times A \times u$$

donde  $A$  es el área de ruptura,  $u$  es el desplazamiento promedio en  $A$ , y  $\mu$  es el módulo de deformación (el de las rocas es aproximadamente 30 GPa).

# Área de Ruptura - Chile 1960

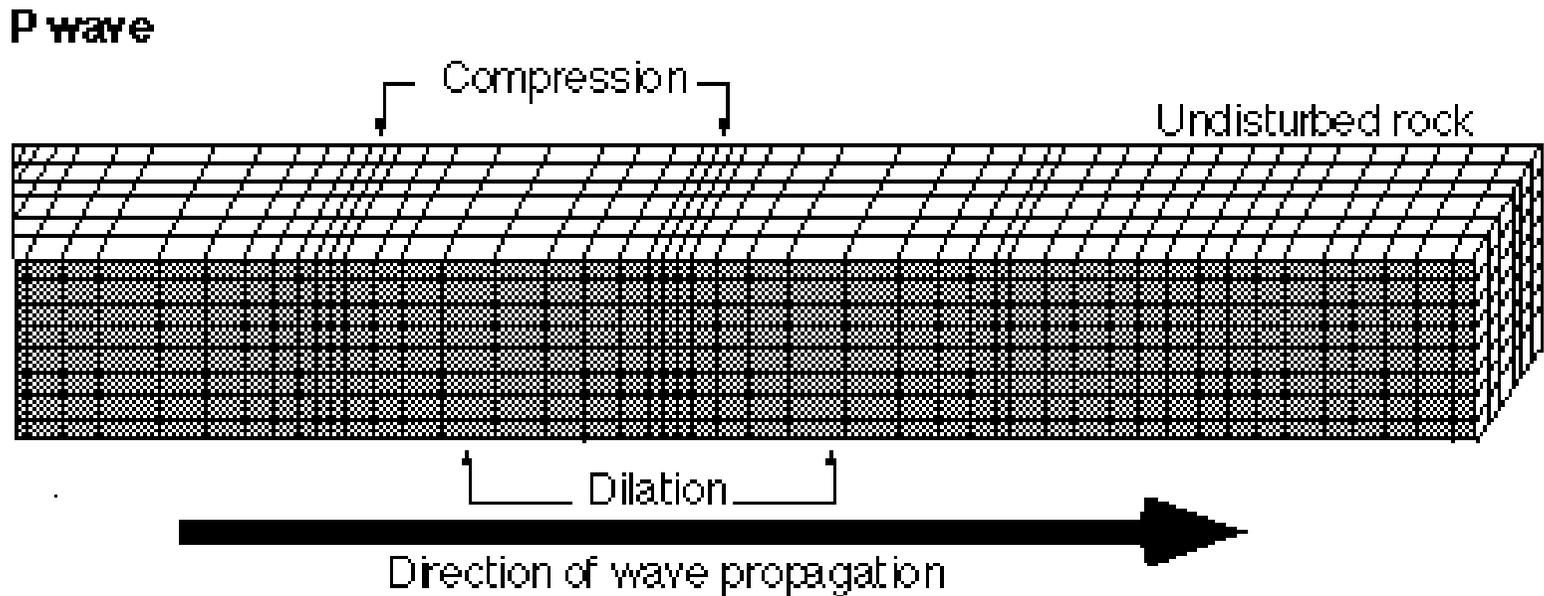


En 1960, en Chile, ocurrió un gran terremoto cuyo epicentro fue en las cercanías de Valdivia, y la deformación llegó hasta Aisén. El desplazamiento en promedio fue  $\sim 17$  metros, y la área de ruptura fue  $\sim 850 \times 130$  km. Terremotos de esta magnitud también ocurrieron en Alaska (1964) y Sumatra (2004). Chile es un país de naturaleza sísmica, y existe la potencia para más terremotos de esta magnitud en el futuro. Para el terremoto de Chile,

$$M_0 = 30 \times 10^9 \times 8.5 \times 10^5 \times 1.3 \times 10^5 \times 17$$
$$= 5.6 \times 10^{22} \text{ Nm}$$

# Ondas Sísmicas - Ondas de Cuerpo

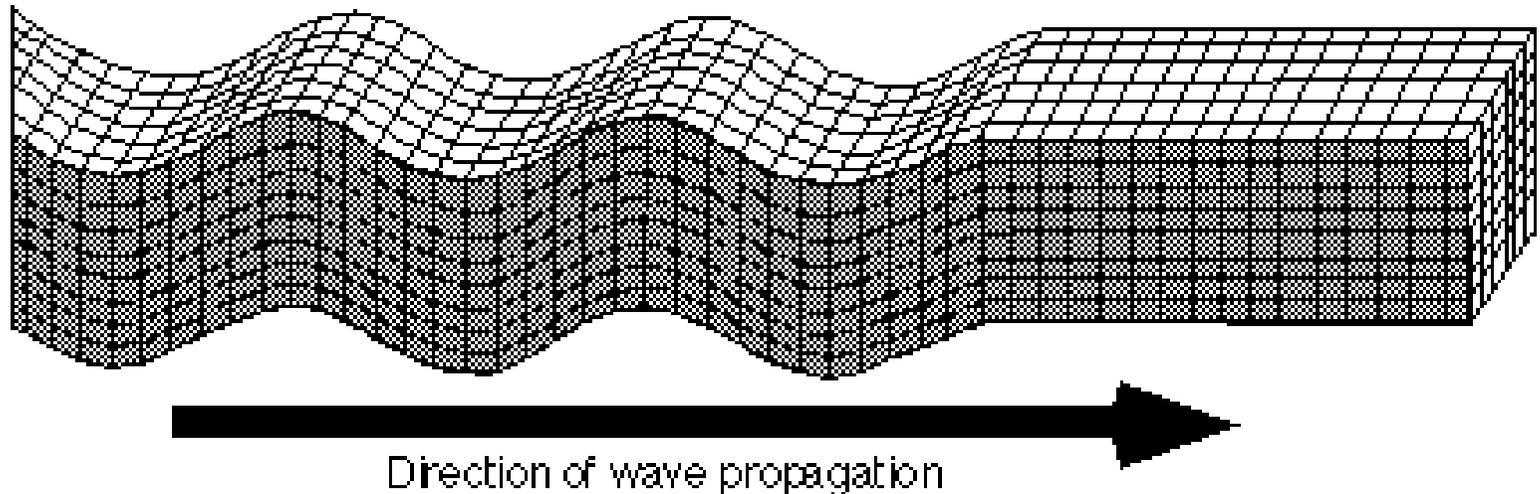
En la Tierra se pueden propagar varios tipos de ondas, las que viajan a diferentes velocidades. Los dos tipos de ondas que se propagan dentro de la Tierra son las ondas  $P$  y  $S$ .



Las ondas  $P$  son ondas cuyo movimiento es de compresión y dilatación, con el movimiento en la misma dirección que la propagación de la onda. Se conocen como ondas longitudinales. La fórmula para calcular su velocidad es  $v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$ , donde  $K$  es el módulo de volumen,  $\mu$  es el módulo de deformación, y  $\rho$  es la densidad. Cerca de la superficie de la Tierra la velocidad aproximada de una onda  $P$  es  $\sim 6$  km/s, y es la primera onda que se siente después de un terremoto.

# Ondas Sísmicas - Ondas de Cuerpo

**S wave**

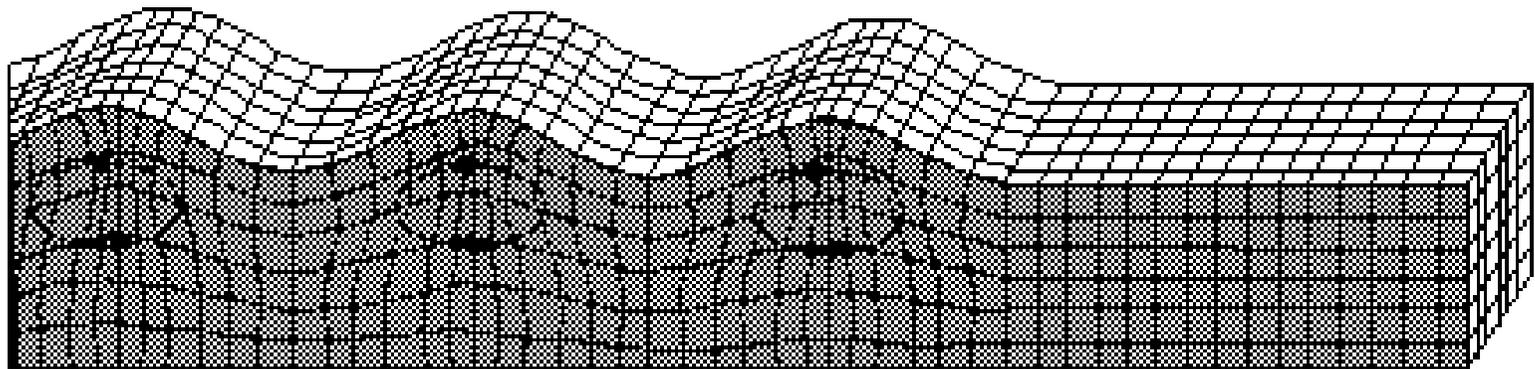


Las ondas  $S$  son ondas que tienen su movimiento particular perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Se conocen como ondas transversales. Su fórmula de velocidad es  $v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ , y por eso las ondas  $S$  viajan sólo a través de medios sólidos (en un líquido  $\mu = 0$ ). Cerca de la superficie de la Tierra la velocidad aproximada de una onda  $S$  es  $\sim 4$  km/s, y llega después de la onda  $P$ .

# Ondas Sísmicas - Ondas Superficiales

Existen dos tipos de ondas superficiales que se pueden propagar en la superficie de la Tierra (es decir, la energía de la onda es atrapada en la superficie). Se conocen como ondas Rayleigh y Love. Son esas ondas las que producen los daños en un terremoto, y llegan después de las ondas  $P$  y  $S$ .

## Rayleigh wave

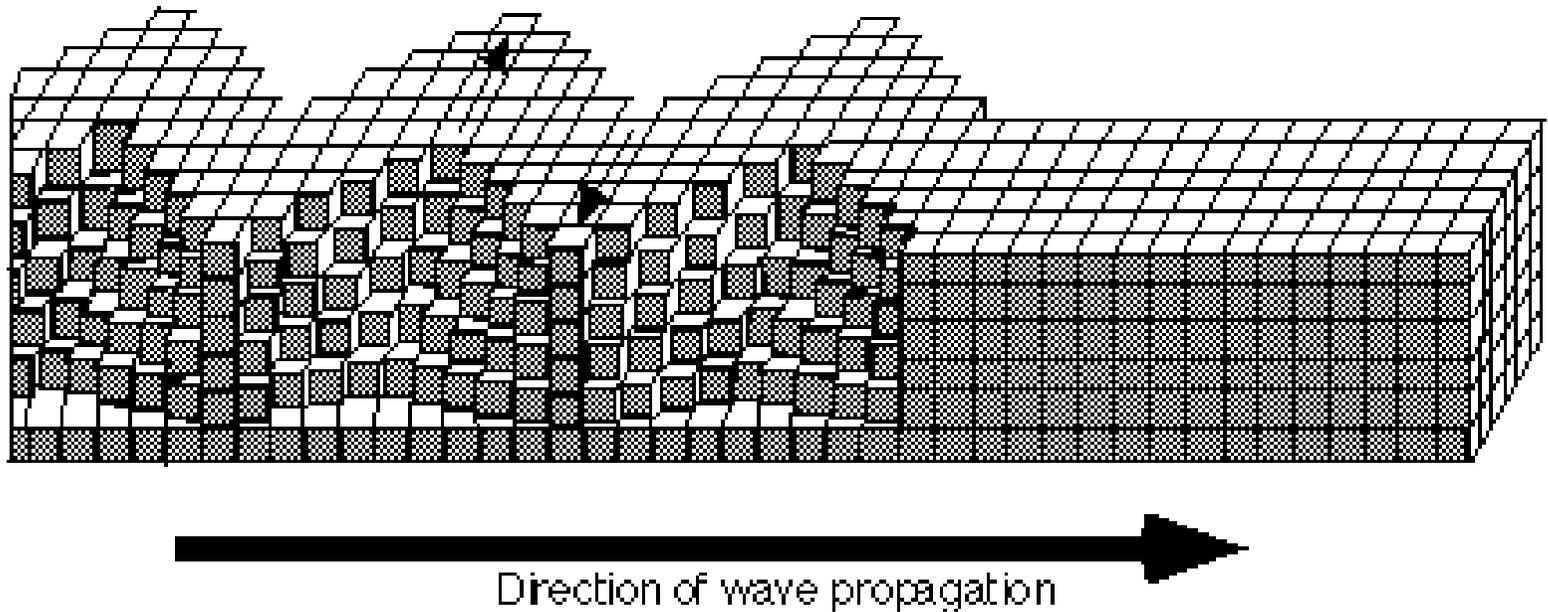


Direction of wave propagation

Las ondas **Rayleigh** están formados por la interacción de ondas  $P$  y  $S$  en la superficie de la Tierra, y poseen un movimiento elíptico. La velocidad de una onda Rayleigh es  $\sim 0.9v_s$ .

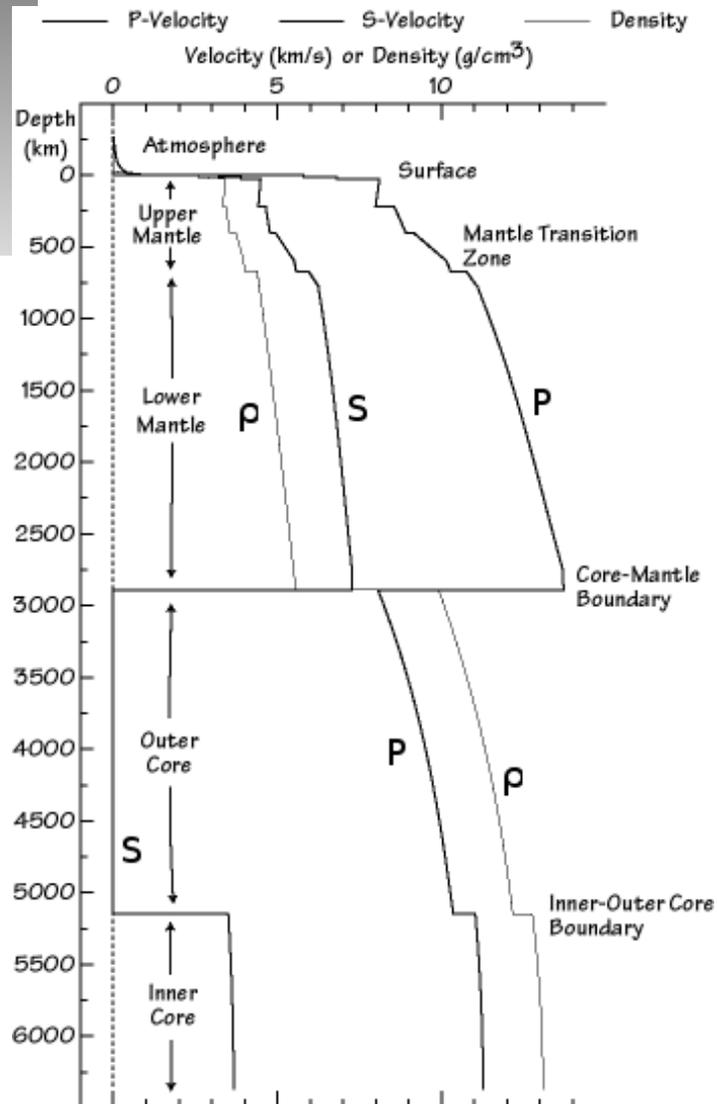
# Ondas Sísmicas - Ondas Superficiales

Love wave



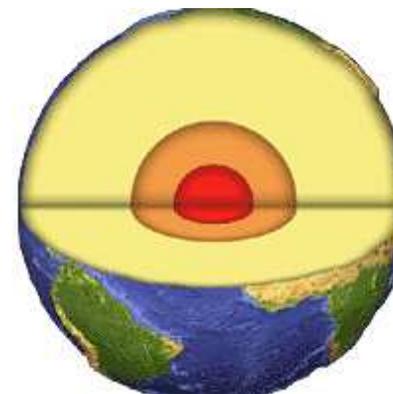
Las ondas **Love** están formadas por la interacción de una onda  $S$  con una capa de baja velocidad en la superficie de la Tierra. La energía de la onda es atrapada en esa capa delgada, y por eso propaga en la superficie. Su movimiento es de forma transversal, perpendicular a la dirección de propagación en el plano horizontal. Note que la amplitud de la onda disminuye con la profundidad. Las ondas Love son más rápidas que las ondas Rayleigh, alrededor de  $v_s$ .

# Estructura Interna de la Tierra

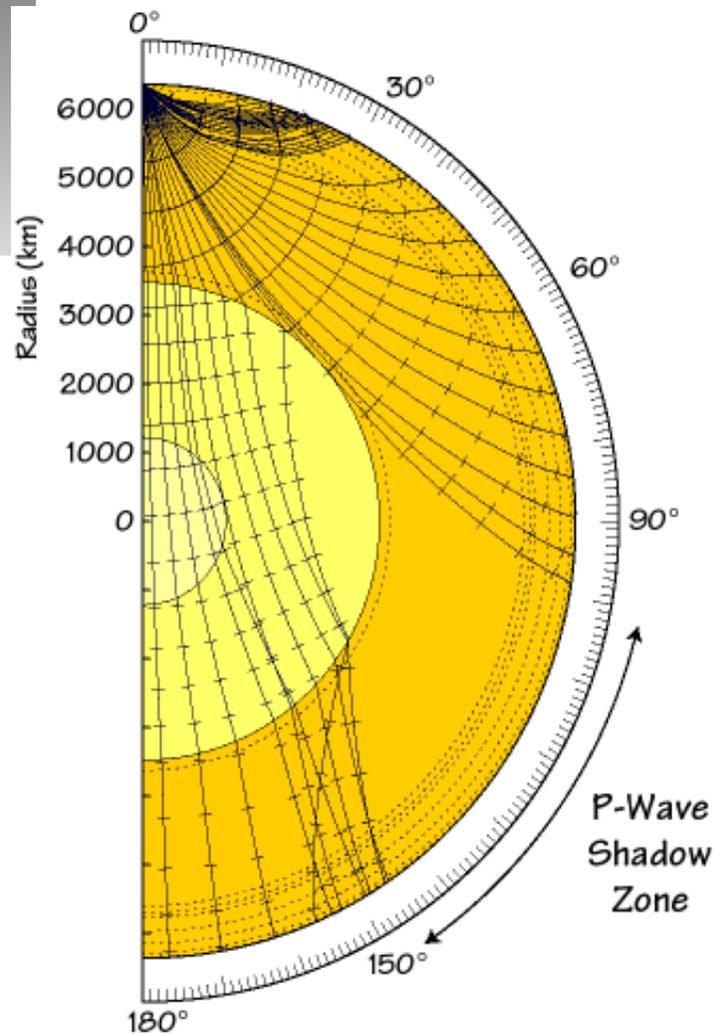


Midiendo los tiempos de llegada de las ondas  $P$  y  $S$  que pasan por la Tierra, se puede obtener la estructura de velocidad con profundidad de la Tierra. La figura muestra las velocidades de las ondas  $P$  y  $S$  y un cálculo para la densidad dentro de la Tierra. Se puede ver que la Tierra se divide en algunas capas distintas. Las fronteras mayores donde hay un cambio en las velocidades sísmicas son:

- Corteza-Manto (La discontinuidad Mohorovičić o Moho)
- Manto-Núcleo Externo
- Núcleo Externo-Núcleo Interno

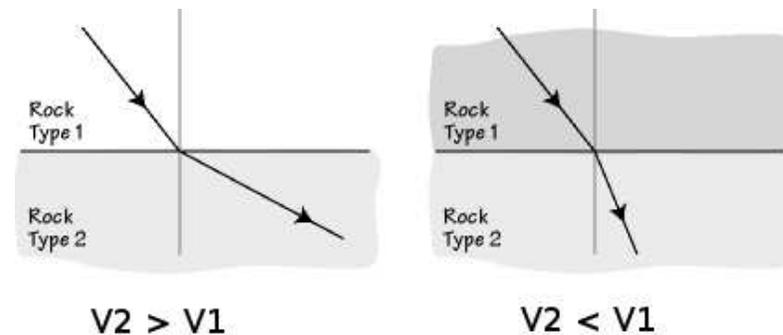


# Zonas de Sombra

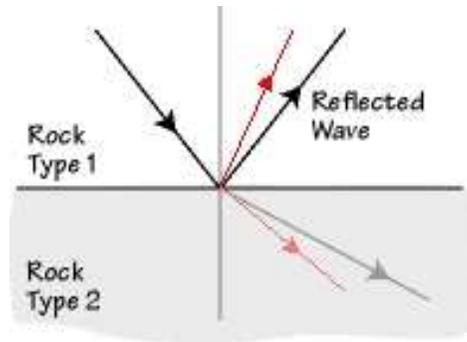


Las discontinuidades de velocidad indican un cambio en el medio de las diferentes capas de la Tierra - es decir, las diferentes capas tienen diferentes  $K$ ,  $\mu$  y  $\rho$ . Estas discontinuidades en la velocidad son las que hacen que los rayos cambien su ángulo abruptamente (debido a la ley de Snell). Por eso hay una zona de sombra de las ondas  $P$  debido a la baja velocidad  $P$  en el núcleo externo; es decir que las ondas  $P$  no llegan entre distancias angulares de  $\sim 104^\circ$  a  $\sim 140^\circ$  de un terremoto.

Las ondas  $S$  no viajan en el líquido núcleo externo, y entonces tienen una zona de sombra entre  $\sim 105^\circ$  y  $180^\circ$ .

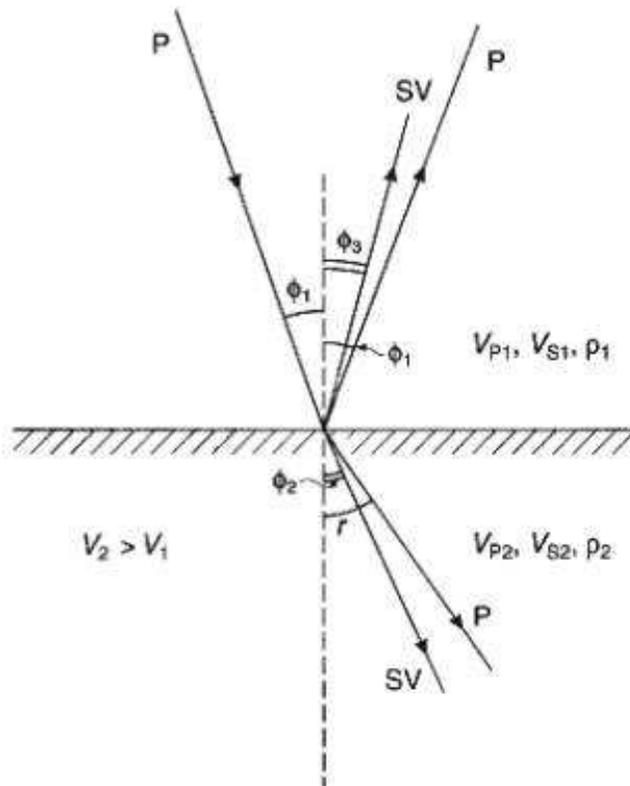


# Conversión entre ondas $P$ y $S$



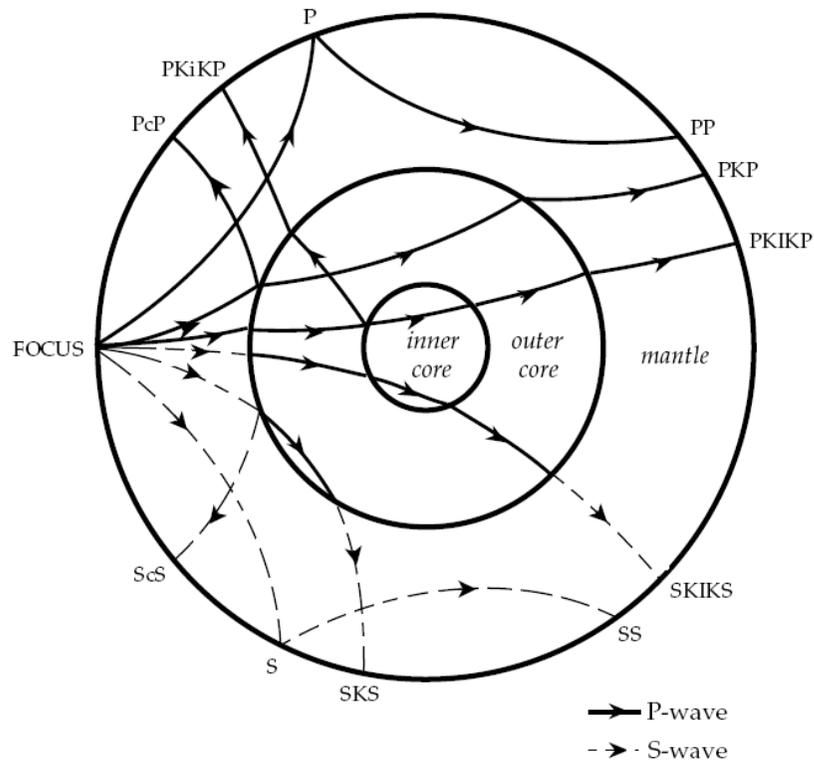
A las discontinuidades de velocidad, en adición de la transmisión de la onda, tenemos conversión entre ondas  $P$  y  $S$ , y reflexión de ondas también. Para una onda  $P$  incidente en una discontinuidad, genera una onda  $P$  transmitida, una onda  $S$  transmitida, una onda  $P$  reflejada, y una onda  $S$  reflejada. Todos los ángulos dependen sobre la ley de Snell:

$$\frac{\sin \phi}{v} = \text{constante}$$



Entonces un sismograma es una mezcla de varias fases sísmicas que llegan a diferentes tiempos después de un terremoto. Por ejemplo, se puede tener una fase de un terremoto que empieza como una onda  $S$  en el manto, cambia a una onda  $P$  en el núcleo externo, cambia a una onda  $S$  en el núcleo interno, pasa el centro de la Tierra, y después pasa por el núcleo externo en forma de una onda  $P$  de nuevo, llegando a la superficie en forma de una onda  $S$  en el manto. (Esta fase se conoce como la fase SKJKS - ver la próxima página).

# Fases Sísmicas



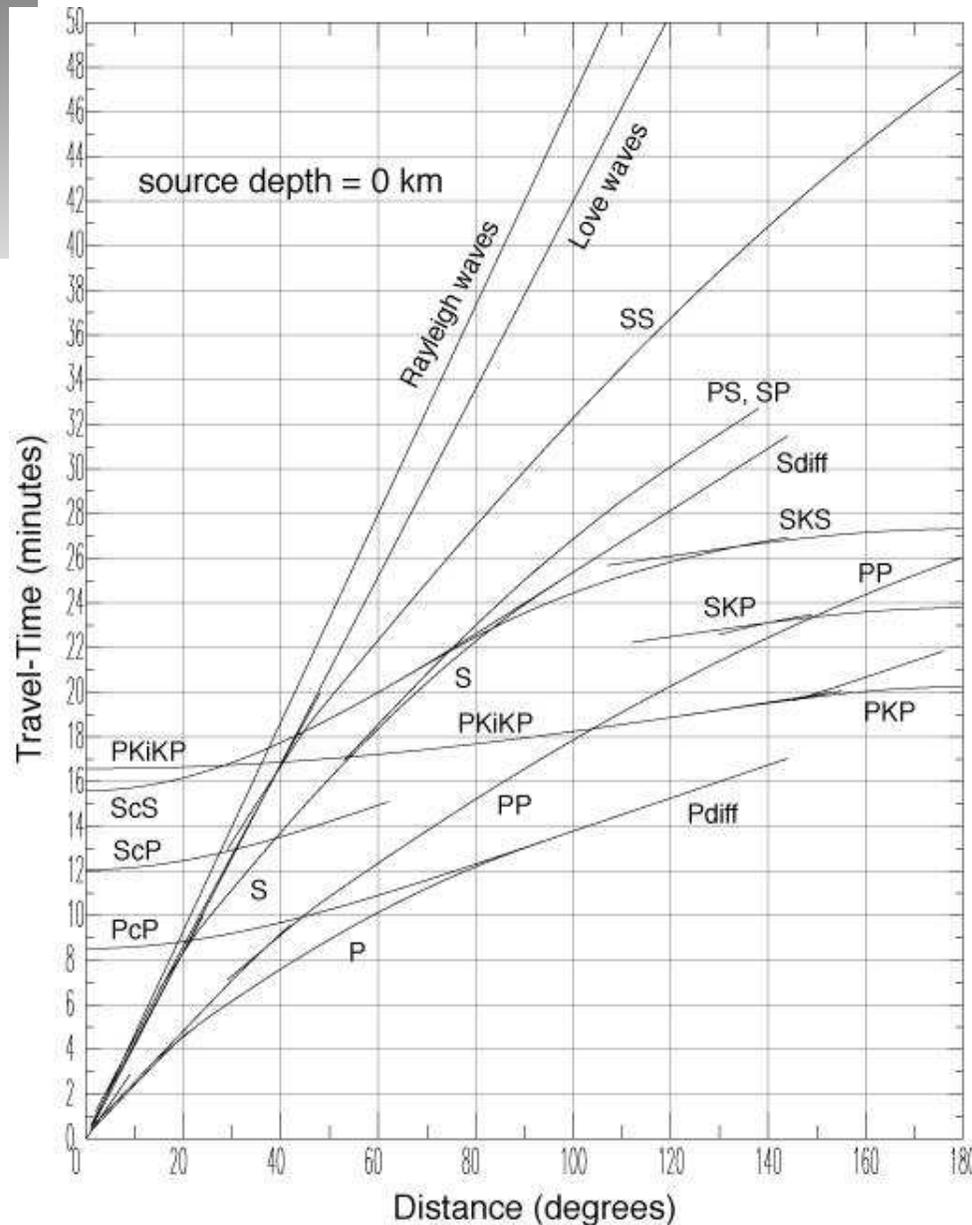
- **P**: Onda *P* en el manto
- **K**: Onda *P* en el núcleo externo
- **I**: Onda *P* en el núcleo interno
- **S**: Onda *S* en el manto
- **J**: Onda *S* en el núcleo interno
- **c**: Reflexión de la frontera manto - núcleo externo
- **i**: Reflexión de la frontera núcleo externo - núcleo interno

**PP** es una onda *P* que viaja en el manto, refleja en la superficie, y tiene otra excursión como onda *P* en el manto;

**SKS** es una onda *S* en el manto, que luego cruza el núcleo externo en la forma de onda *P*, para finalmente cruzar el manto en la forma de una onda *S*;

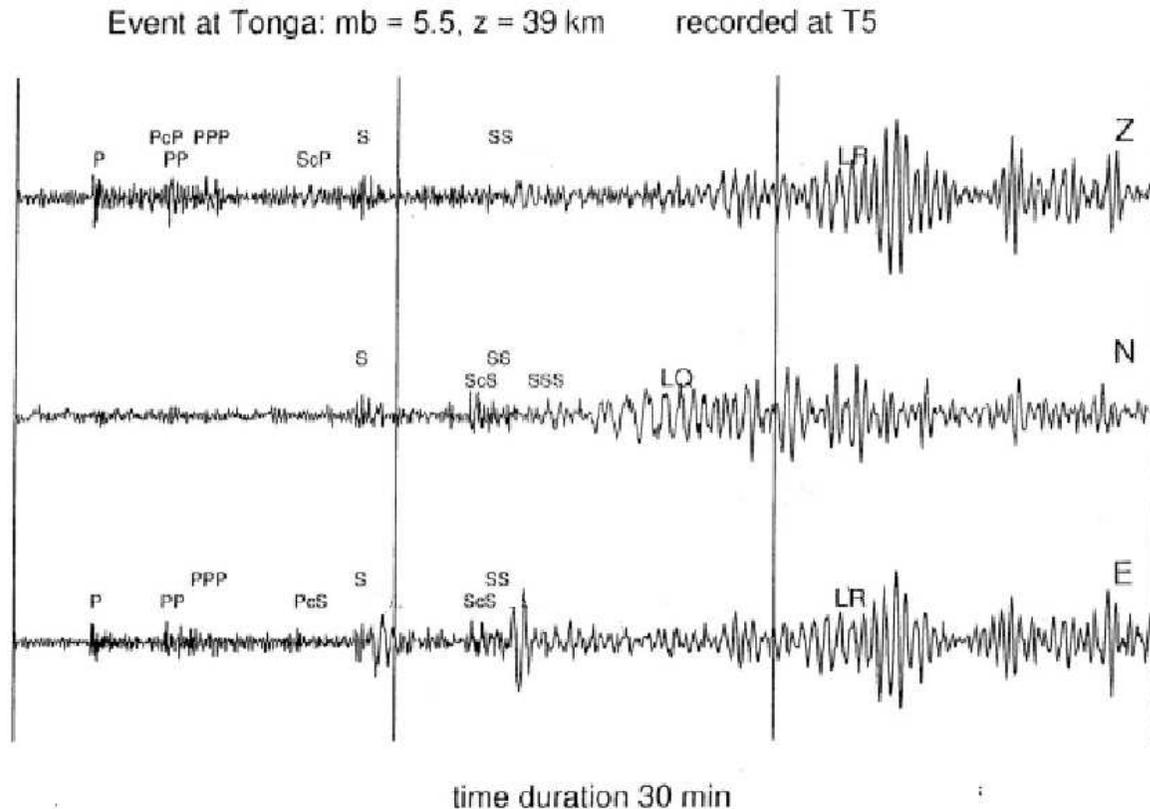
**PKiKP** es una onda *P* en el manto, que cruza el núcleo externo produciéndose luego una reflexión en la frontera núcleo externo - núcleo interno, cruzando nuevamente el núcleo externo y manto, para finalmente llegar como onda *P* a la corteza. Etc.

# Fases - Tiempos de Viaje



La figura muestra los tiempos de viaje de unas fases sísmicas; IASP91 es un modelo de velocidad para la Tierra. La distancia en grados es la separación entre el epicentro y el sismómetro. Un grado es  $\sim 111$  km. Pdiff es una onda *P* con difracción al largo de la frontera manto - núcleo. Éste nos dice que, si hay un sismómetro a una cierta distancia del epicentro, las fases que va a registrar y cuánto tiempo después del terremoto ellos llegan.

# Ejemplo de un Sismograma



Aquí está el registro de un terremoto en un sismógrafo de 3 componentes: vertical (Z), norte-sur (N), este-oeste (E). Varias fases son marcadas, y LR = onda Rayleigh, LQ = onda Love. El registro es de amplitud versus tiempo. Note que la onda *P* es la que llega primero, y las ondas de superficie son las últimas en llegar con amplitudes relativamente grandes. La duración en total del registro es de 30 minutos. La distancia entre el terremoto y el instrumento es  $\sim 50^\circ$ , o alrededor de 5.500 km, así que las amplitudes aquí son muy pequeñas.

# Magnitud de Terremotos

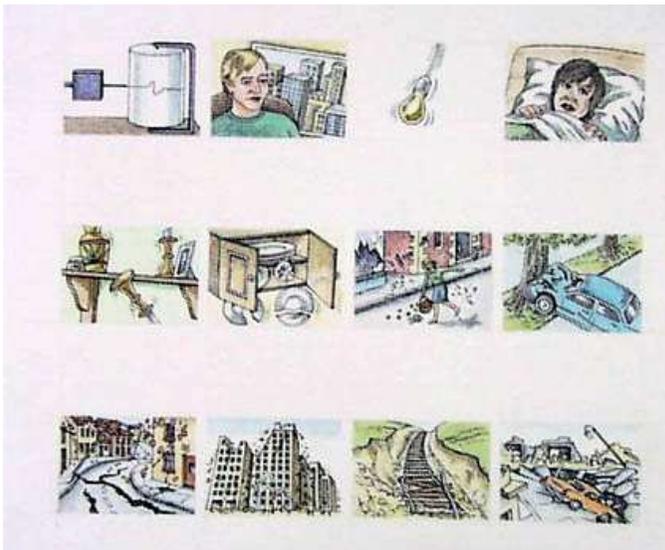
La magnitud de los terremotos se mide en variadas escalas entre las cuales tenemos:

- **Escala de Richter o de Magnitud Local:** Se calcula la magnitud usando la amplitud máxima de la onda  $S$ . La magnitud del terremoto dependerá del logaritmo de la amplitud, entonces un terremoto de magnitud 4 tiene una amplitud 10 veces mayor a la de un terremoto de magnitud 3. Se usa esa escala para calcular la magnitud de terremotos locales con magnitud menor a 6.5.
- **Magnitud de ondas de cuerpo:** Para calcular la magnitud en este caso, se saca la amplitud máxima de la onda  $P$ , esto es de manera similar a la de la escala de Richter. Se usa en terremotos de magnitud menor a 6.5 en la escala de Richter, y que estén a no más de 104 grados del epicentro.
- **Magnitud de ondas superficiales:** Se calcula la magnitud máxima de la onda Rayleigh y también se usa el logaritmo de la amplitud, ésta se usa en terremotos de poca profundidad, y de 20 a 180 grados del epicentro para terremotos de magnitud menor a 7.5
- **Magnitud de momento sísmico:** La magnitud se calcula usando el momento sísmico, y es utilizada para terremotos muy grandes (como el de Chile en 1960). La fórmula es:

$$M_W = 2/3[\log(M_0) - 9.1]$$

# Escala de Mercalli

Esta escala evalúa los daños que causa un terremoto, los cuales son medidos en grados (del I a XII):



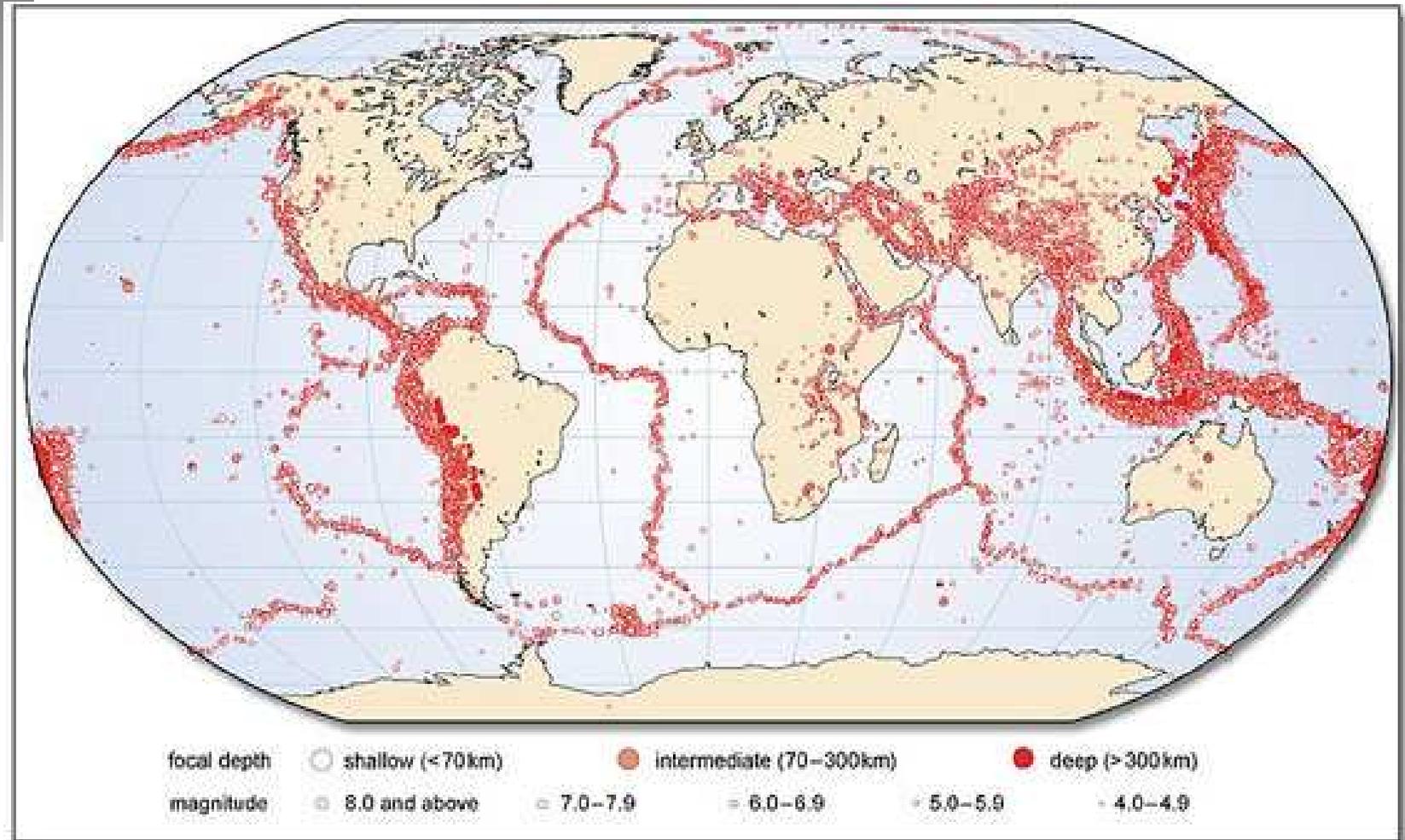
- I - Instrumental
- II - Débil
- III - Leve, pero se sienten, especialmente adentro
- IV - Moderado, la gente se despierta
- V - Fuerte, las ventanas se pueden romper
- VI - Bastante fuerte, los muebles caen
- VII - Muy fuerte, hay daños en algunas estructuras
- VIII - Destructivo, hay colapso de algunas estructuras
- IX - Ruinoso, hay mucho daño y pánico
- X - Desastroso, destrucción de muchas estructuras
- XI - Muy desastroso, pocas estructuras se mantienen en pie
- XII - Catastrófico, destrucción total

# Frecuencia de Terremotos

La frecuencia de los sismos depende de la magnitud del mismo, los de menor intensidad son más constantes y a medida que la intensidad aumenta la frecuencia disminuye. Siendo los más débiles más de 900,000 al año mientras que los catastróficos sólo se presentan una vez cada diez años.

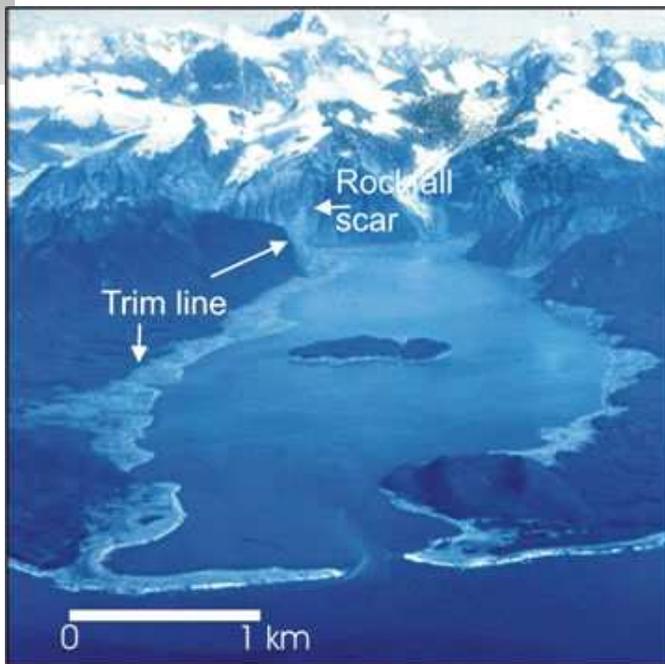
Magnitud	Efectos	# cada año
< 2.5	Instrumentales	900,000
2.5 a 5.4	Daños chicos	30,000
5.5 a 6.0	Daños de consideración	500
6.1 a 6.9	Daños serios	100
7.0 a 7.9	Gran terremoto	20
> 8.0	Catastrófico	0.1

# Localización de los Terremotos



Los terremotos ocurren en zonas donde existe contacto entre placas tectónicas, sobre todo en zonas de subducción como es el caso de Chile. Pero tectónica de placas esta otra historia y otro clase...

Existen varios peligros asociados con terremotos:



- Fuego, como en San Francisco, 1906
- Colapso de edificios, como en Bam, Irán, 2003
- Tsunamis, como en Sumatra, 2004
- Derrumbes, como en Lituya Bay, Alaska 1958 (mostrado en la foto)
- Licuación de la tierra, como en Ciudad de México, 1985