

Geotecnia-Universidad Nacional-Sede Manizales

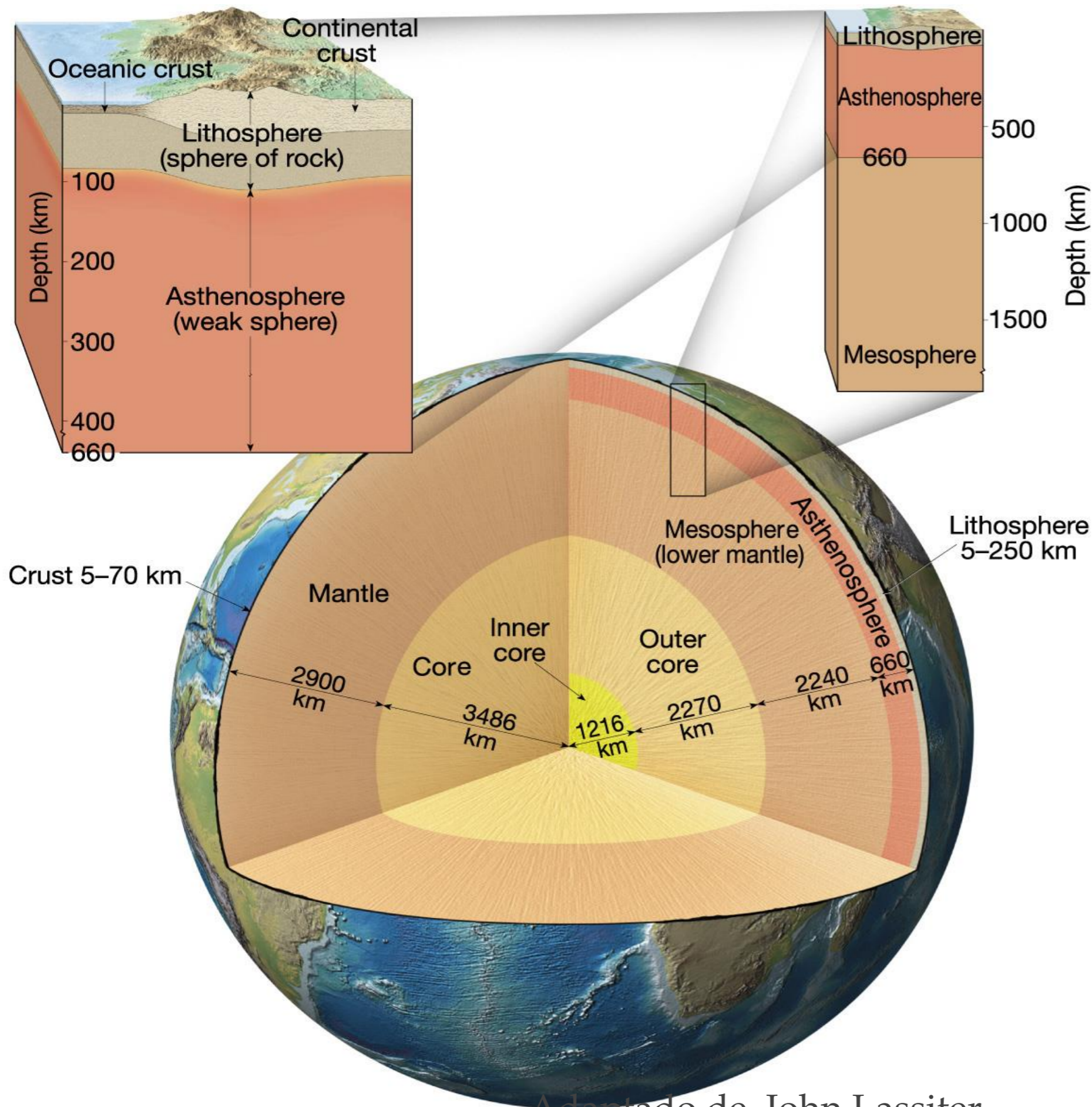
Análisis sísmico

Cristhian C. Mendoza B.

Presentación basada en el libro Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales y John Lassiter U.Texas



Figura. 9.11 Localización de deslizamientos cosísmicos en el mapa isosísmico del terremoto de Ultarkashi (Pande- 1996).



Adaptado de John Lassiter
U.Texas

Figure 12.6

Estructura de la Tierra

- ❖ Hay tres capas que están definidas por su composición
 - ❖ Corteza – *Es la piel exterior comparativamente delgada que va de 3 km en los fondos oceánicos a 70 km en algunos cinturones montañosos*
 - ❖ Manto. – *Un suelo rocoso (rico-silicio) sólida que se extiende a una profundidad de aproximadamente 2900 km (1800 millas)*
 - ❖ Núcleo -*una esfera (Rica en hierro) que tiene un radio de 3486 km (2161 millas)*

Corteza

- ❖ Más delgado de las divisiones de Tierra

Varía en espesor (excede 70 km bajo algunas regiones montañosas mientras la corteza oceánica va de 3 a espeso 15 km)

- ❖ *Dos partes : Corteza continental*

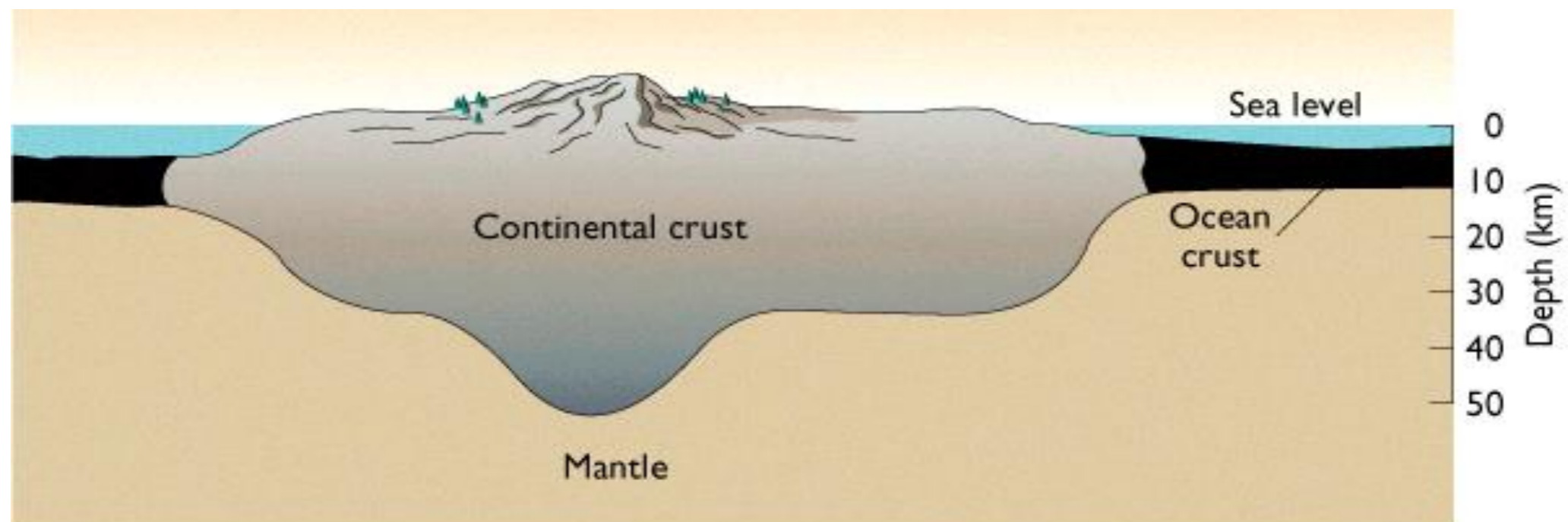
- ❖ *Densidad media de la roca 2.7 g/cm^3*

- ❖ *Composición comparable con felsic de roca ígnea Granodiorita*

Corteza oceánica

- ❖ *Densidad promedio 3.0 g/cm^3*

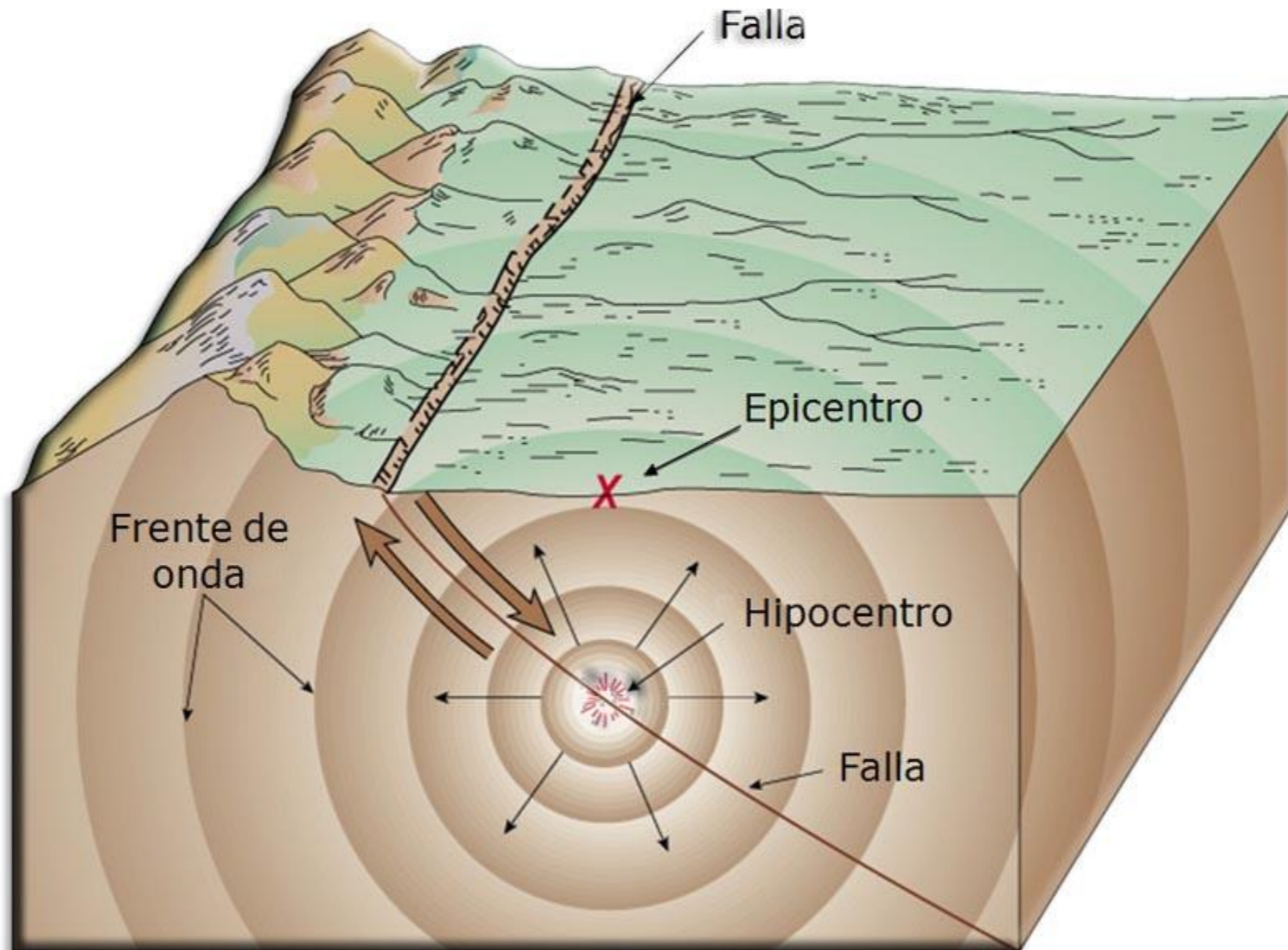
- ❖ *Compuesta principalmente de rocas ígneas basálticas*



Adaptado de John Lassiter U.Texas

Horizontal distance not to scale

Sismos



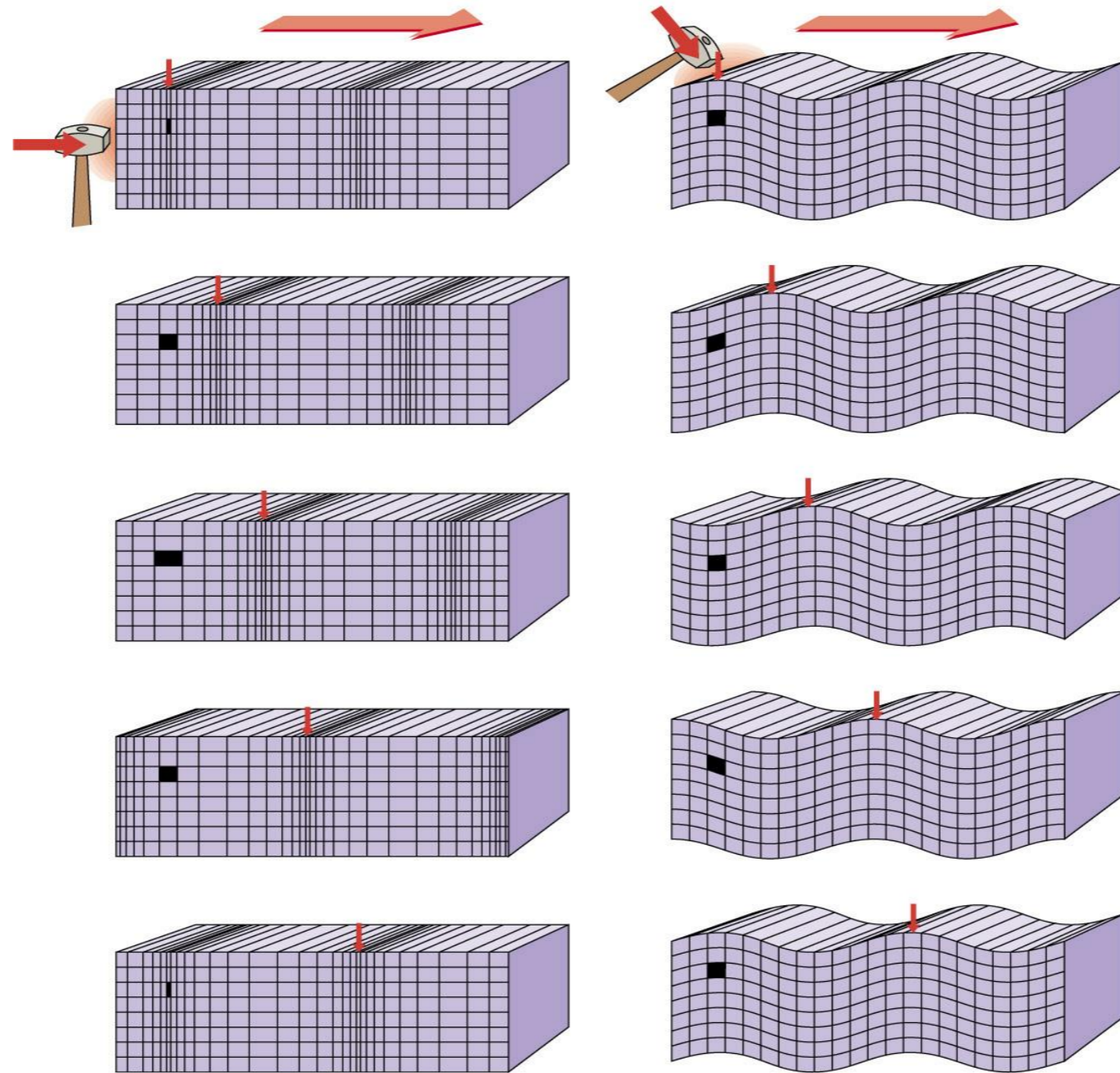
Adaptado de John Lassiter
U.Texas

Tipos de ondas

❖ La naturaleza de las ondas sísmicas

- ❖ Ondas de compresión, (ondas P), consistente en movimientos repetidos de compresión y enrarecimiento; son análogas a las ondas de sonido, en el cual la partícula se mueve en la misma dirección del movimiento de la onda.
- ❖ Ondas de cortante (Ondas S), ondas secundarias, producen deformaciones de cortante a medida que se mueven dentro del suelo o la roca. El movimiento de las partículas individuales es normal a la dirección del movimiento. Los líquidos no tienen las fuerzas de corte, para que las ondas S no propagan a través de líquidos.
- ❖ Ondas Rayleigh: son ondas que se forman en la superficie por interacción entre las ondas P y las ondas S verticales. Son similares a las que se producen en el agua cuando se lanza una piedra.
- ❖ Ondas love: son un resultado de la interacción de las ondas S horizontales con las capas superficiales de terreno. Las ondas Love no tienen componente vertical

Ondas P y S moviendo a través de un sólido

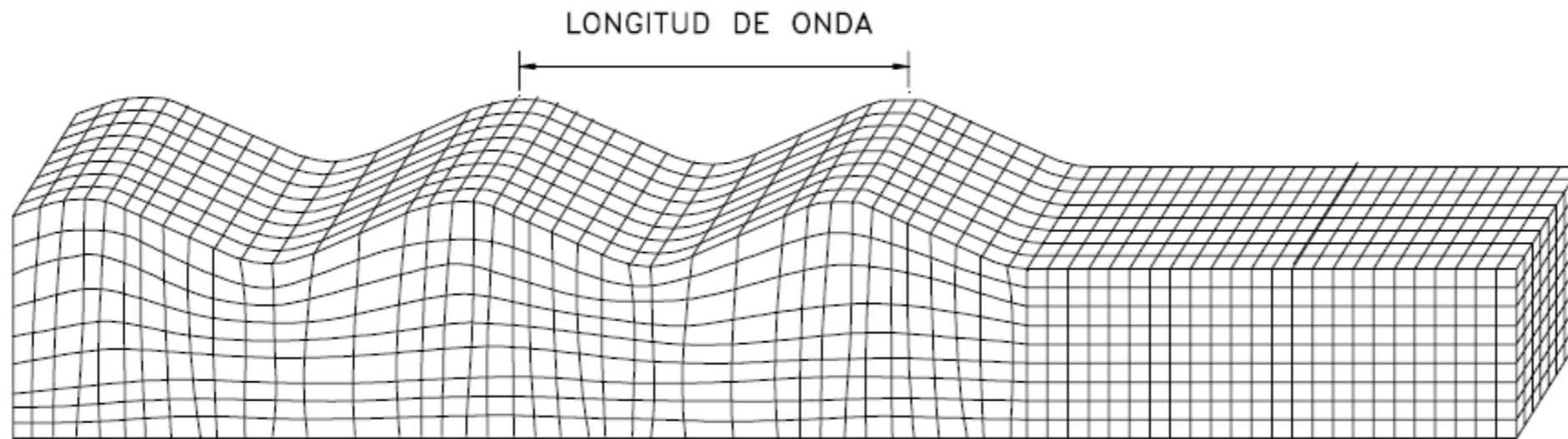


A. P waves Adaptado de John R. Lassiter
U. Texas

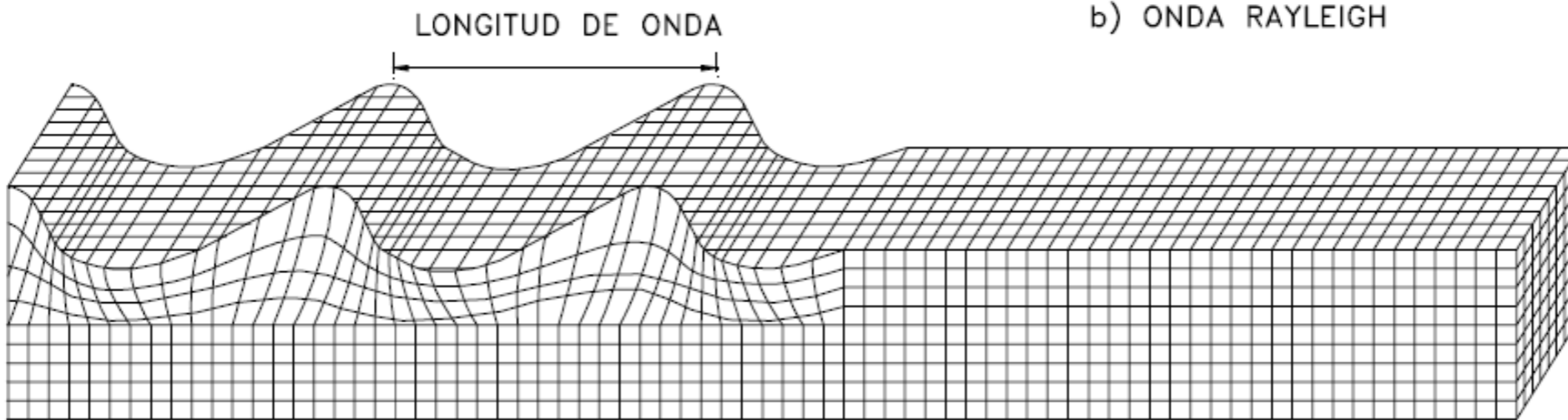
B. S waves

Figure 12.2

Ondas superficiales



b) ONDA RAYLEIGH



b) ONDA LOVE

Figura 9.5 Ondas Superficiales.

Adaptado de John Lassiter
U.Texas

El Interior de Tierra

- ❖ **La naturaleza de las ondas sísmicas**
 - ❖ **Velocidad depende de la elasticidad y la densidad del material**
 - ❖ **Dentro de una capa determinada la velocidad aumenta generalmente con profundidad debido a presión que forma un material elástico más compacto**
 - ❖ **Ondas compresionales(Ondas P) puede propagar a través de líquidos así como los sólidos**
 - ❖ **Los líquidos no tienen las fuerzas de corte, para que las ondas S no propagan a través de líquidos.**

Figure 12.3

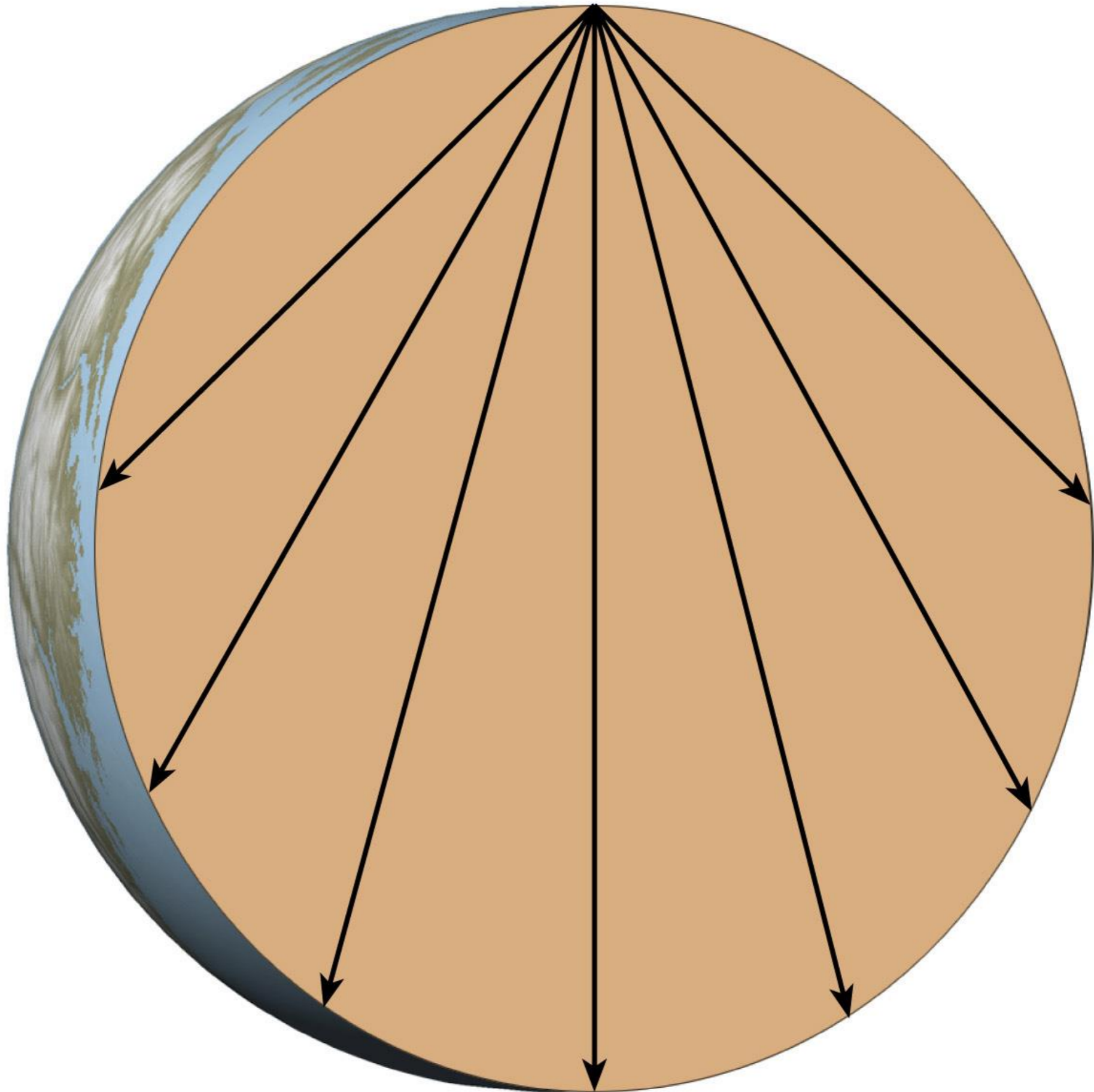
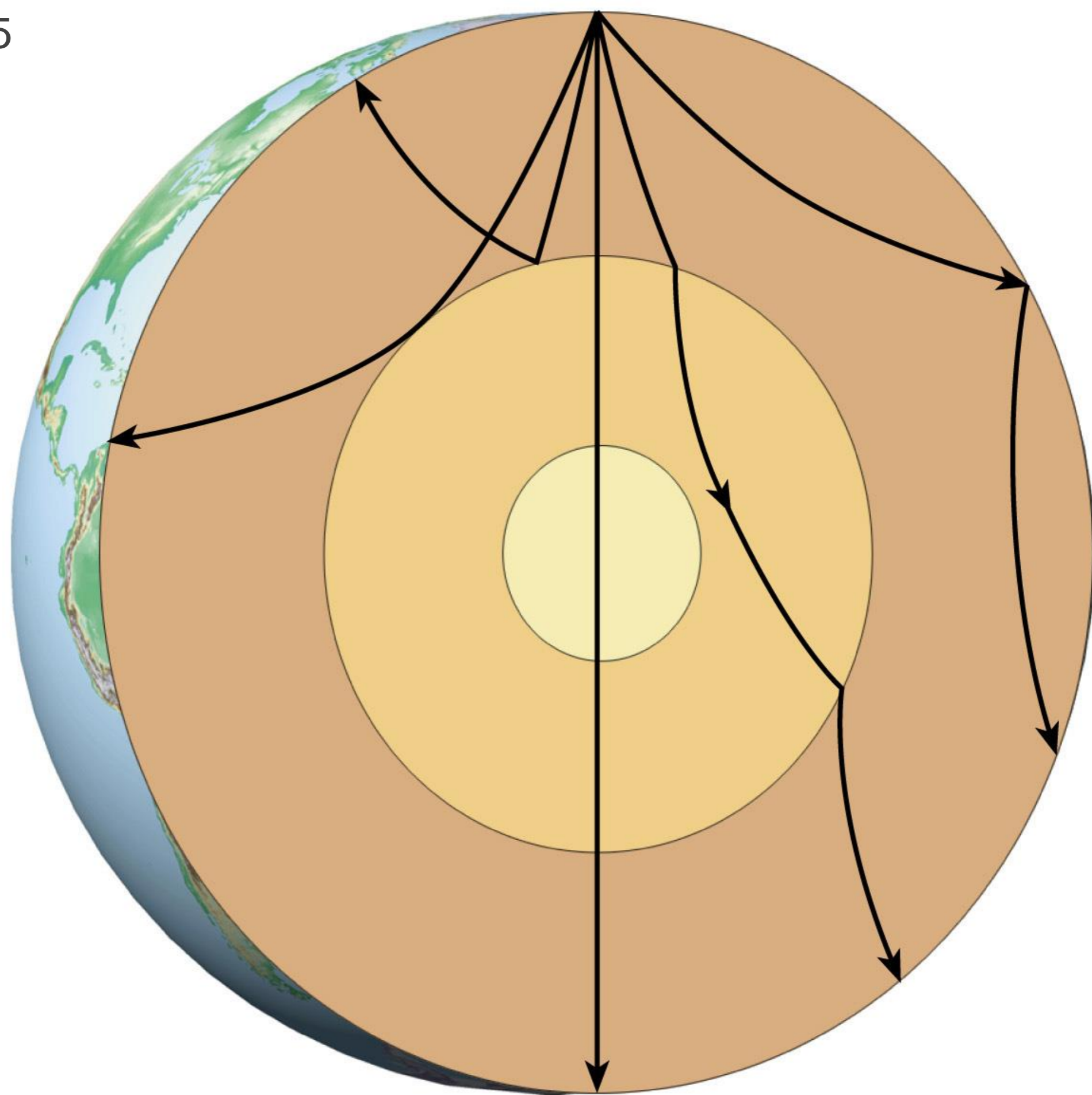
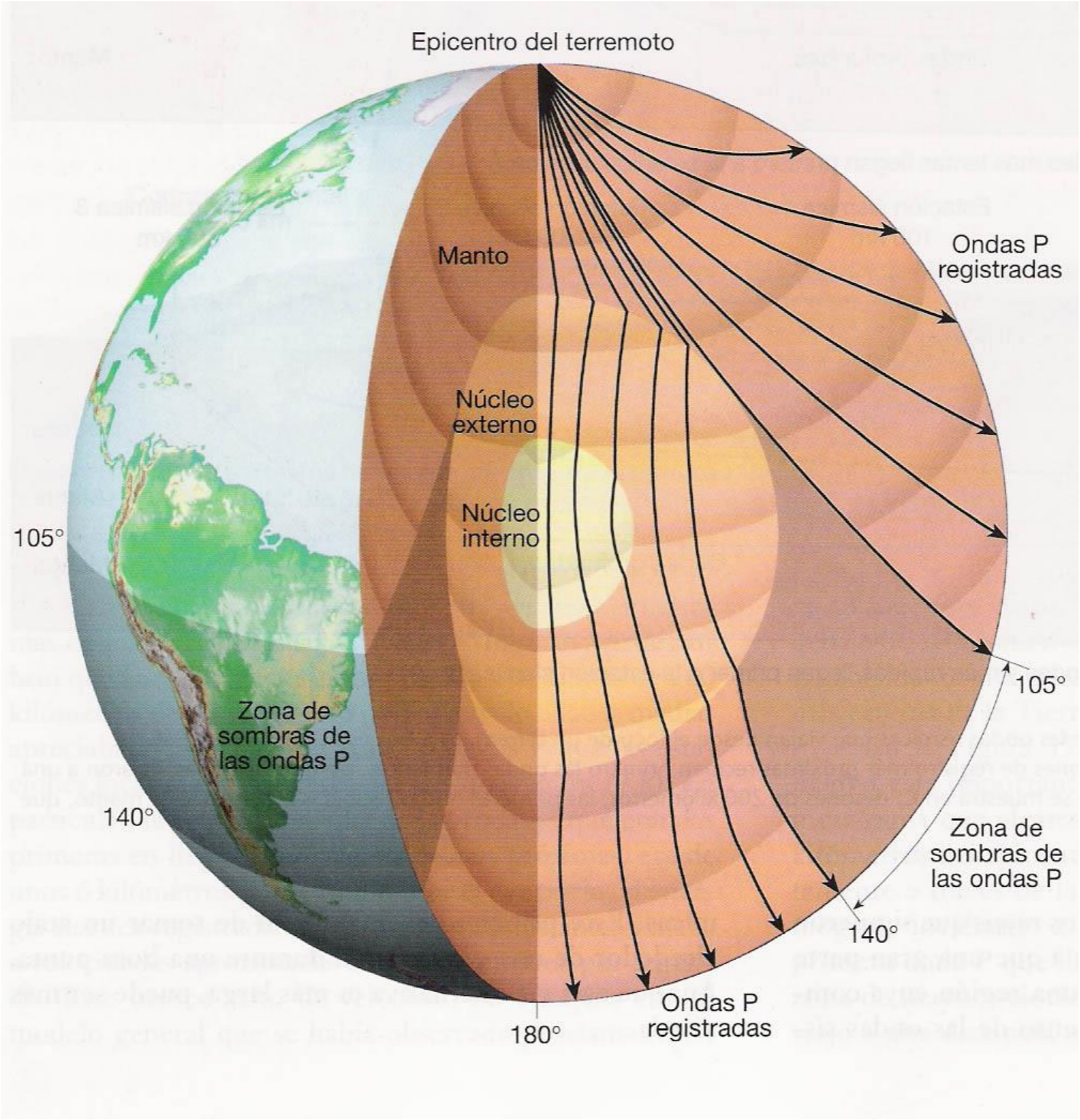
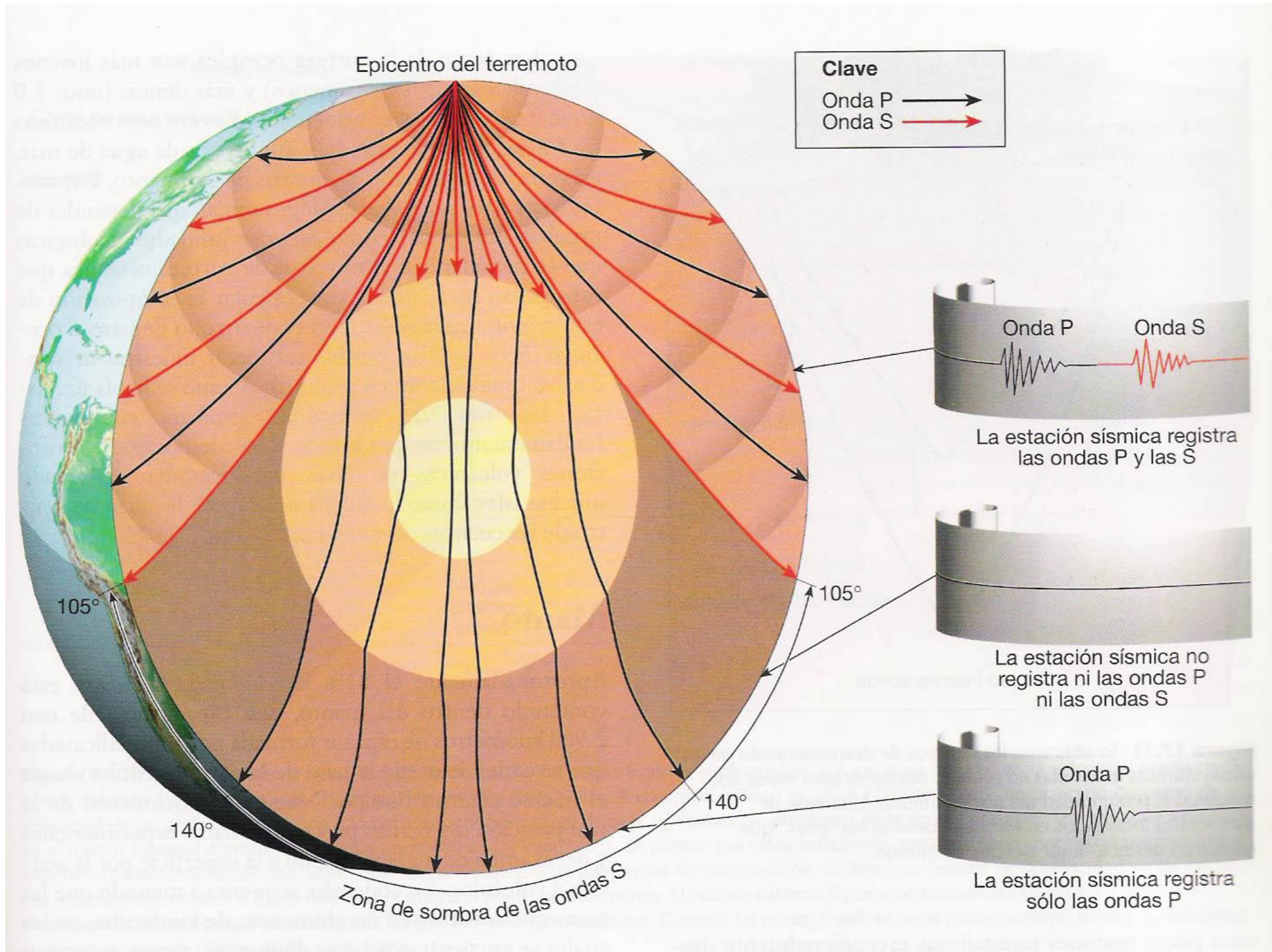


Figure 12.5



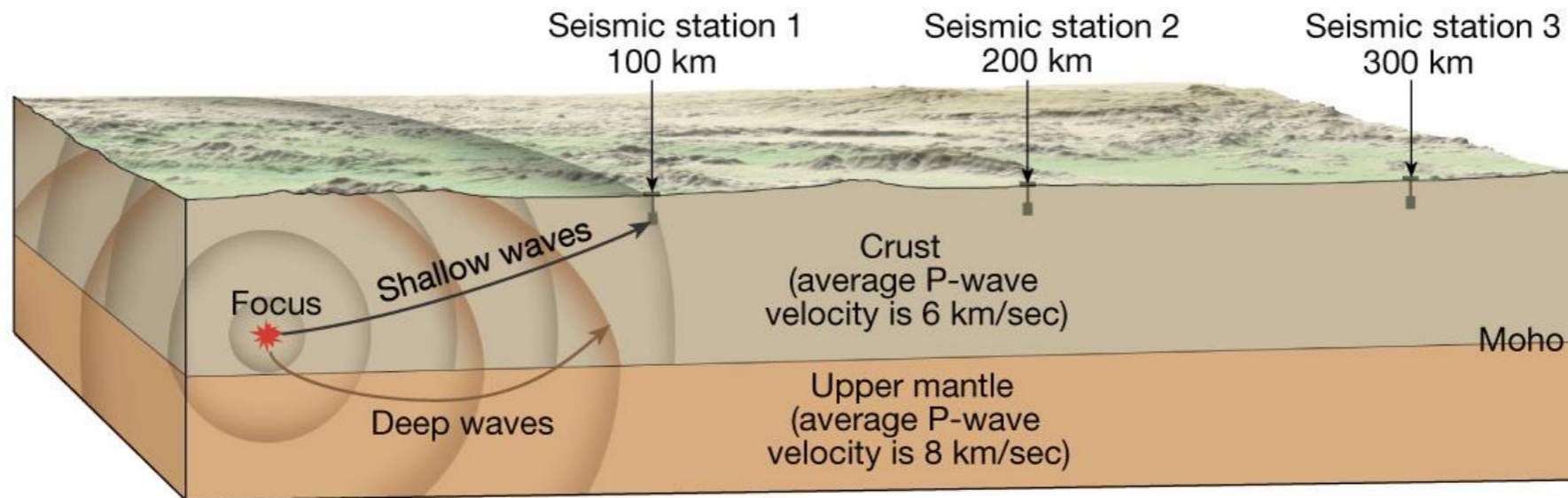




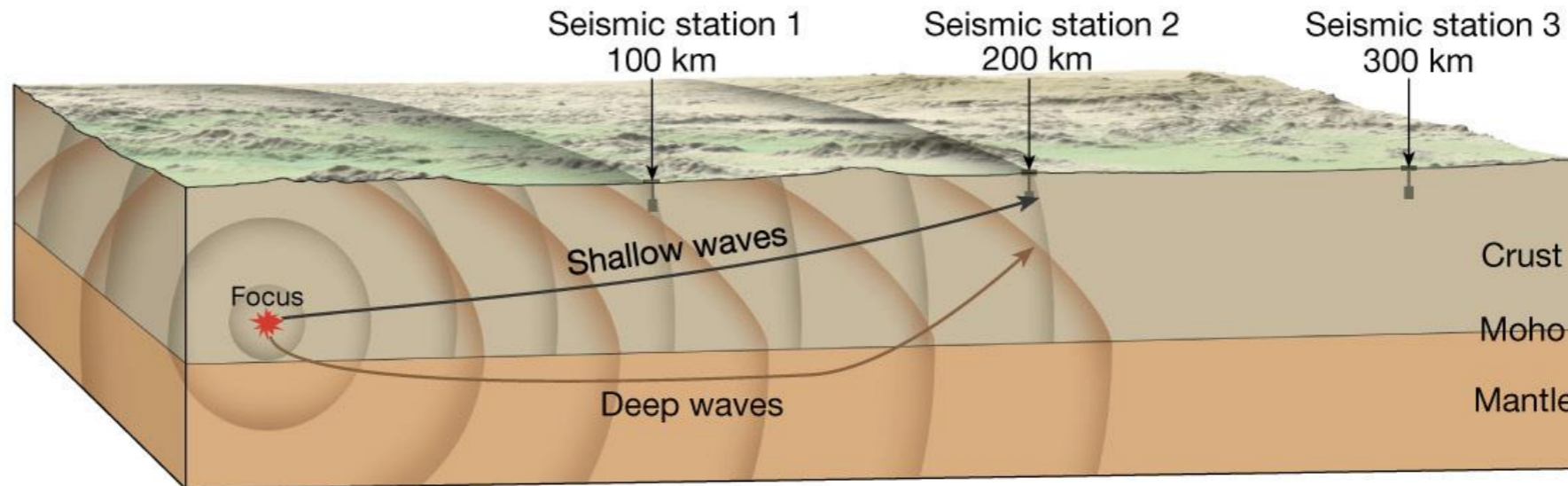
Discontinuidades de la tierra muy abundantes

- ❖ **El Moho (Discontinuidad de Mohorovicic)**
 - ❖ **Descubierta en 1909 por Andriaja Mohorovicic**
 - ❖ **Separa los materiales de la corteza del manto subyacente**
 - ❖ **Identificada por los cambios de velocidad en las ondas P**

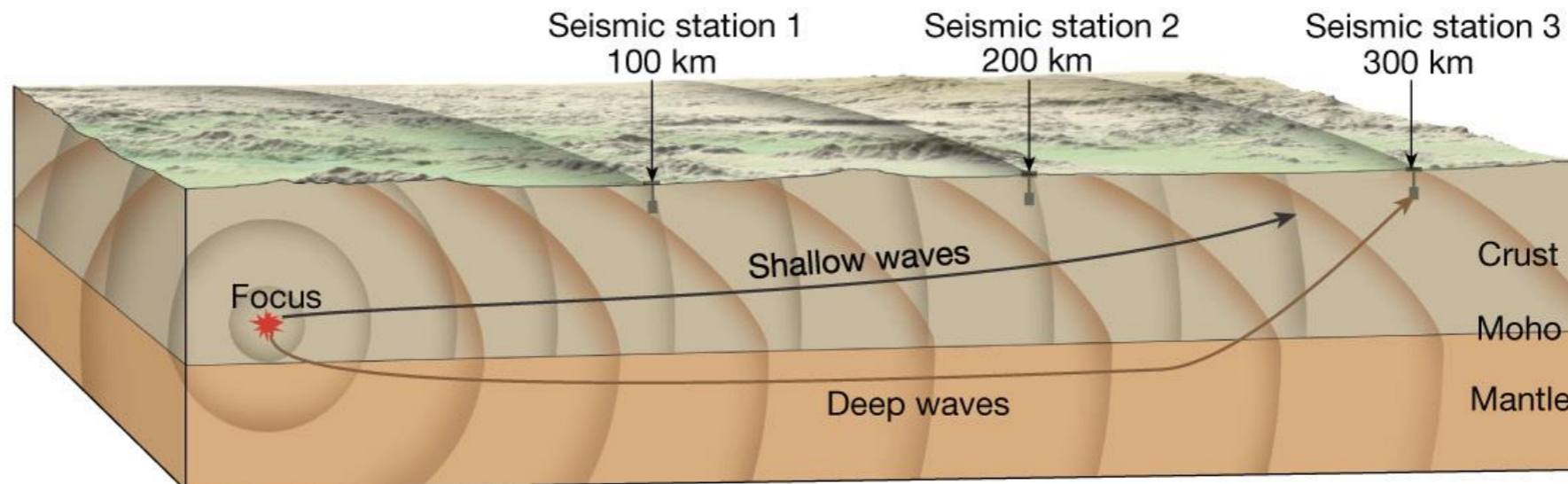
Figure 12.7



A. Time 1 – Slower shallow waves arrive at seismic station 1 first.



B. Time 2 – Slower shallow waves arrive at seismic station 2 first



C. Time 3 – Faster deeper waves arrive at seismic station 3 first

Intensidad

- ❖ **La intensidad sísmica es un concepto que se aplica a la identificación del grado de destrucción o efectos locales de un terremoto.**
 - ❖ La escala de intensidad fue propuesta por primera vez en Italia por el científico Giuseppe Mercalli. La escala original constaba de diez grados y la que se usa actualmente, que se llama escala de Mercalli modificada, consta de doce grados.
 - ❖ A diferencia de la magnitud, la intensidad se relaciona con los efectos sobre las personas y el grado de daño sobre las estructuras. Los valores bajos por lo general están asociados con la forma como las personas sintieron el sismo, mientras que los valores altos con la forma como fue afectado el paisaje o las construcciones hechas por el hombre.
 - ❖ Luego de la ocurrencia de un terremoto, se realiza una encuesta, generalmente por vía telefónica, preguntando a las personas como fue percibido el sismo. Dependiendo de las respuestas y de acuerdo a la siguiente tabla, es como se le asigna un valor de intensidad específico al sitio donde se hace la consulta

Medir el grado de intensidad

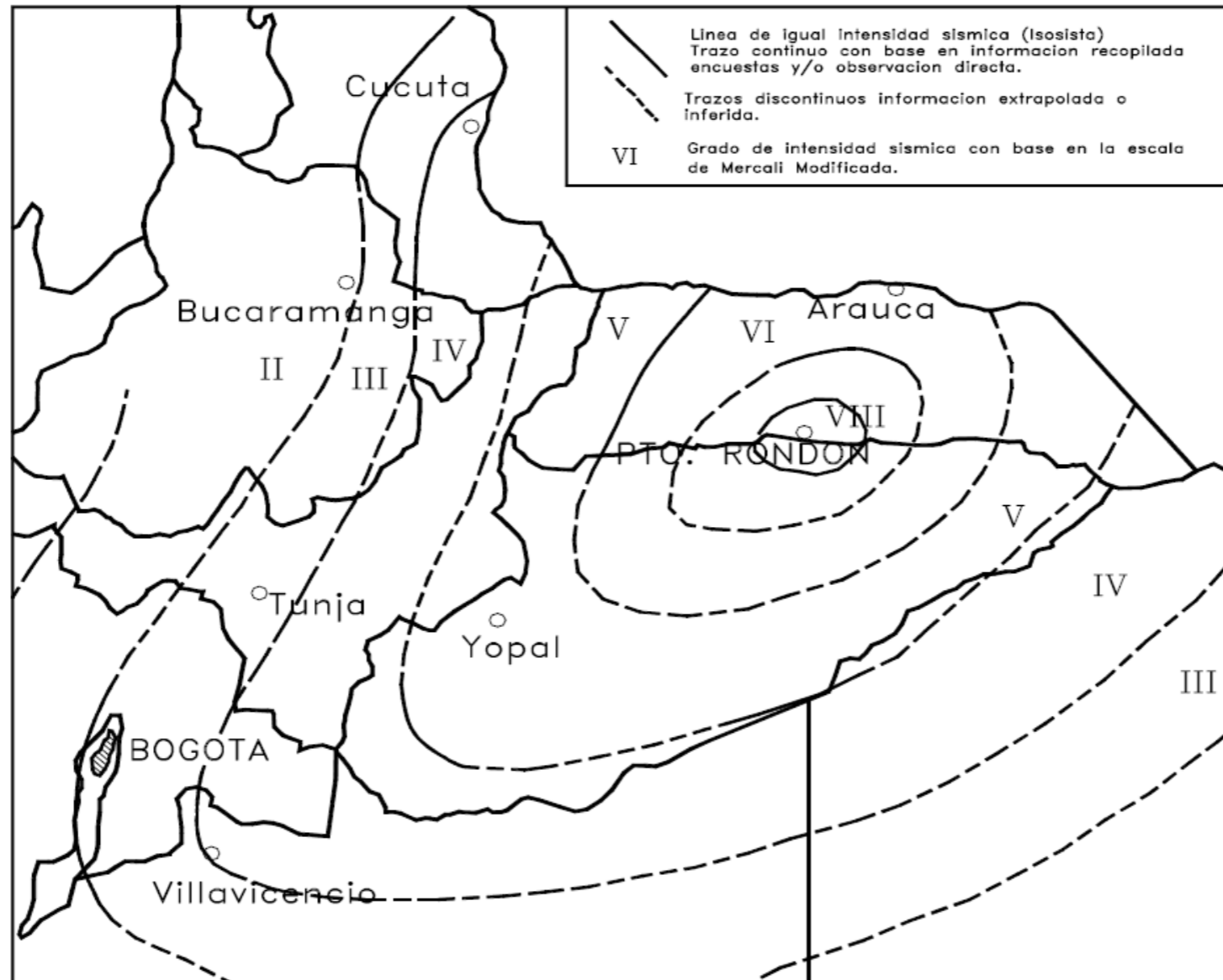


Figura 9.2 Mapa de Isosistas del Sismo de Puerto Rondón Colombia 1993 (Romero y otros 1994)

Adaptado de John Lassiter
U.Texas

Medir el grado de intensidad

Tabla 9.2 Escala de intensidad Mercalli Modificada

Grado	Descripción
I	No es sentido por las personas, registrado por los instrumentos sismográficos.
II	Sentido solo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos superiores, objetos suspendidos pueden oscilar.
III	Sentido en el interior de las edificaciones, especialmente en pisos superiores, pero muchos pueden no reconocerlo como temblor, vibración semejante a la producida por el paso de un vehículo liviano, objetos suspendidos oscilan.
IV	Objetos suspendidos oscilan visiblemente, vibración semejante a la producida por el paso de un vehículo pesado, vehículos estacionados se bambolean, cristalería y vidrios suenan, puertas y paredes de madera crujen.
V	Sentido aún en el exterior de los edificios, permite estimar la dirección de las ondas, personas dormidas se despiertan, el contenido líquido de recipientes y tanques es perturbado y se puede derramar, objetos inestables son desplazados, las puertas giran y se abren o cierran, relojes de péndulo se paran.
VI	Sentido por todas las personas, muchos sufren pánico y corren hacia el exterior, se tiene dificultad en caminar establemente, vidrios y vajillas se quiebran, libros y objetos son lanzados de los anaqueles y estantes, los muebles son desplazados o volcados, el revoque y enlucido de mortero de baja calidad y mampostería tipo D se fisuran, campanas pequeñas tañen.
VII	Se tiene dificultad en mantenerse parado, percibido por los conductores de vehículos en marcha, muebles se rompen, daños y colapso de mampostería tipo D, algunas grietas en mampostería tipo C, las chimeneas se fracturan a nivel de techo, caída del revoque de mortero, tejas, cornisas y parapetos sin anclajes, algunas grietas en mampostería de calidad media, campanas grandes tañen, ondas en embalses y depósitos de agua.
VII	La conducción de vehículos se dificulta, daños de consideración y colapso parcial de mampostería tipo C, algún daño a mampostería tipo B, ningún daño en mampostería tipo A, caída del revoque de mortero y de algunas paredes de mampostería, caída de chimeneas de fábricas, monumentos y tanques elevados, algunas ramas de árboles se quiebran, cambio en el flujo o temperatura de pozos, grietas en terreno húmedo y en taludes inclinados.
IX	Pánico general, construcciones de mampostería tipo D totalmente destruidas, daño severo y aún colapso de mampostería tipo C, daño de consideración en mampostería tipo B, daño a fundaciones, daños y colapso de estructuras aporticadas, daños de embalses y depósitos de agua, ruptura de tubería enterrada, grietas significativas visibles en el terreno.
X	La mayoría de las construcciones de mampostería y a base de pórticos destruidas, algunas construcciones de madera de buena calidad dañadas, puentes destruidos, daño severo a represas, diques y terraplenes, grandes deslizamientos de tierra, el agua se rebasa en los bordes de ríos, lagos y embalses, rieles de ferrocarril deformados ligeramente.
XI	Los rieles de ferrocarril deformados severamente, ruptura de tuberías enterradas que quedan fuera de servicio
XII	Destrucción total, grandes masas de roca desplazadas, las líneas de visión óptica distorsionadas, objetos lanzados al aire.

Medir el grado de intensidad en taludes

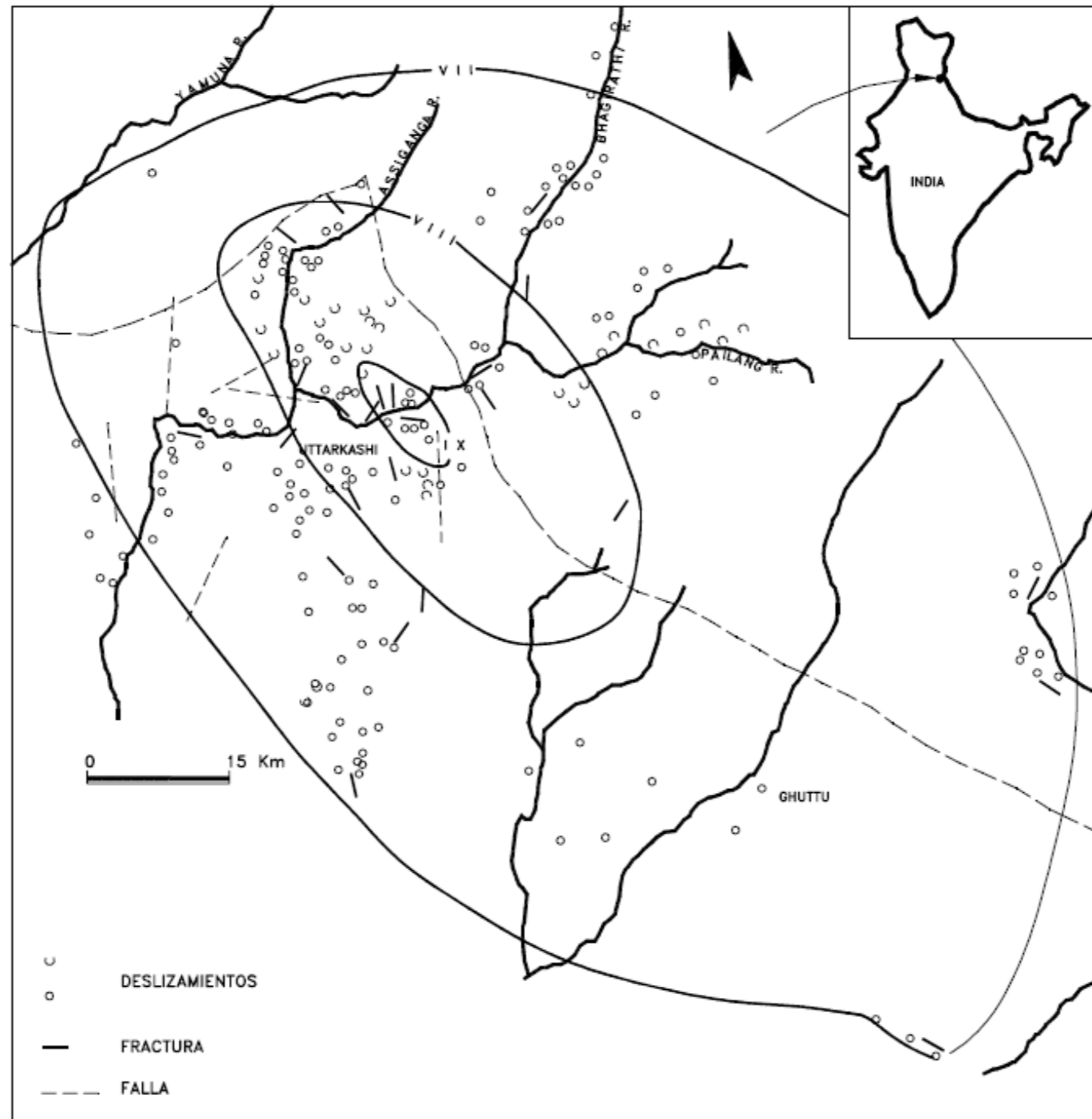


Figura. 9.11 Localización de deslizamientos cosísmicos en el mapa isosísmico del terremoto de Ultarkashi (Pande- 1996).

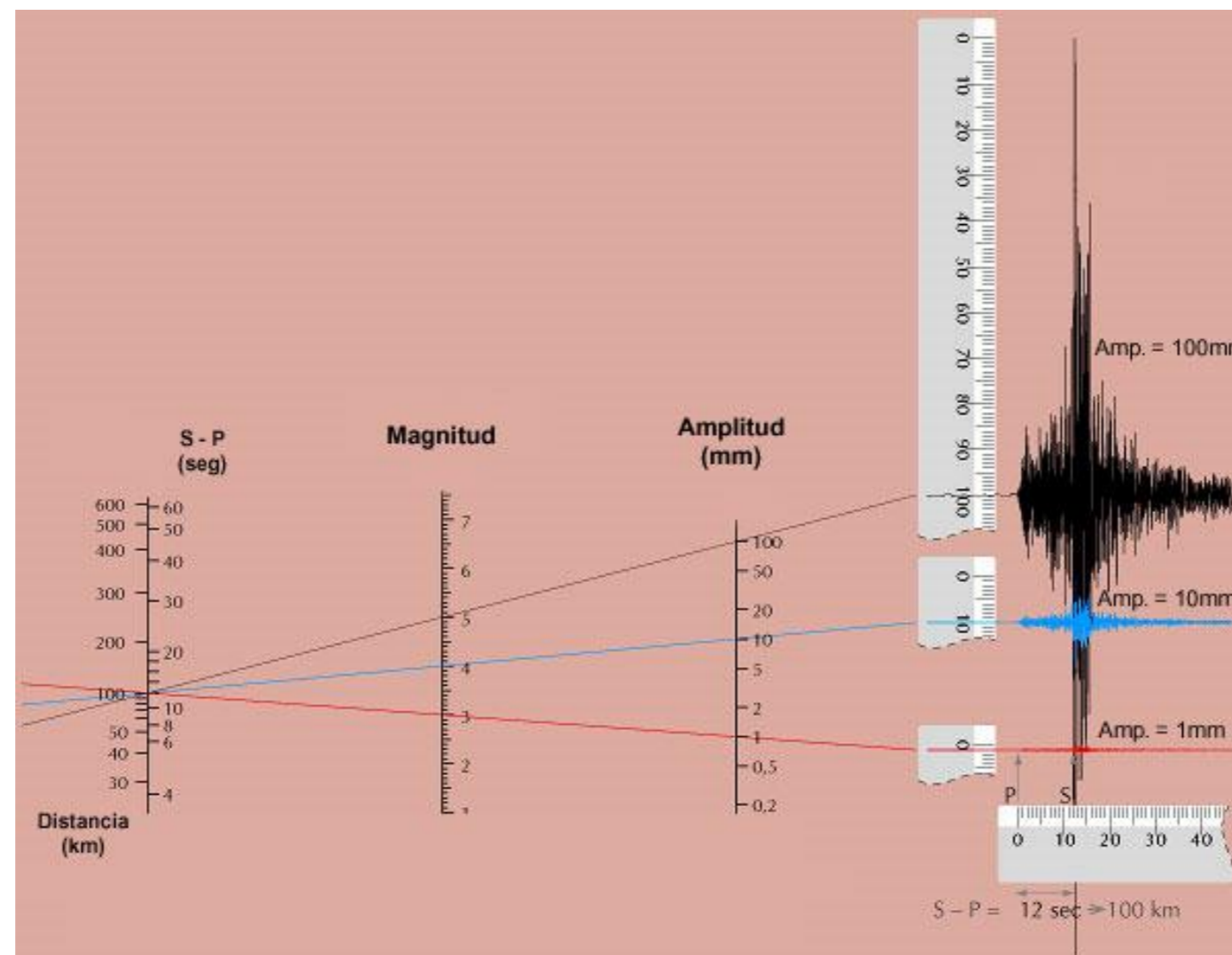
Magnitud

- ❖ La magnitud más conocida es la propuesta por Charles Richter y lleva su nombre. Richter fue un científico que observó que la amplitud de las ondas sísmicas tendía a disminuir en forma predecible con la distancia. Él elaboró una ecuación para relacionar tanto la distancia como la amplitud de la onda S en un tipo de sismógrafo ampliamente utilizado en California y así fue como nació la “Escala de Richter”.
- ❖ La magnitud es una medida cuantitativa e instrumental del tamaño del evento, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura en la falla. La magnitud es una constante única que se asigna a un sismo dado y es independiente del sitio de observación.
- ❖ Richter definió la magnitud de sismos locales como: El logaritmo en base 10 de la máxima amplitud de la onda sísmica, expresada en milésimas de milímetro (micrones), registrada en un sismómetro estandar a una distancia de 100 kilómetros del epicentro del evento.

Magnitud

Tabla 9.1 Posibilidad de deslizamientos causados por sismos (Keefer, 1984)

Magnitud del sismo	Tipo de deslizamiento producido
4.0	Caídos de roca, deslizamientos de roca, caídos de suelo y alteración de masas de suelo.
4.5	Deslizamiento de translación, rotación y bloques de suelo.
5.0	Flujos de suelo, esparcimientos laterales, deslizamientos subacuáticos.
6.0	Avalanchas de roca.
6.5	Avalanchas de suelo



Relación *Magnitud e intensidad*

- ❖ Existen fórmulas para relacionar la magnitud y la intensidad en el área epicentral como la propuesta por Gutenberg y Richter (1954). Esta fórmula no es precisa porque no tiene en cuenta la profundidad de los sismos, pero muestra que existe una relación entre las dos formas de medir los movimientos sísmicos.

$$Magnitud = 1 + \frac{1}{3} intensidad$$

Coeficiente de Intensidad de Arias es para analizar la amenaza de deslizamientos de tierra se utiliza con frecuencia la “Intensidad de Arias”, la cual es una función de la magnitud del sismo y la distancia al foco (Arias,1970; Wilson y Keefer, 1985). El modelo simplificado de intensidad de Arias se utiliza para zonificar la amenaza a deslizamientos empleando SIGs

$$\log I_a = M - 2 \log R - 4.1 + 0.44P$$

Donde:

Ia = “Intensidad de Arias” en metros por seg.

M = Magnitud del sismo.

R = Distancia al foco en Kilómetros

P = Probabilidad de que el Ia real exceda el Ia calculado.

Aceleración Pico (PGA)

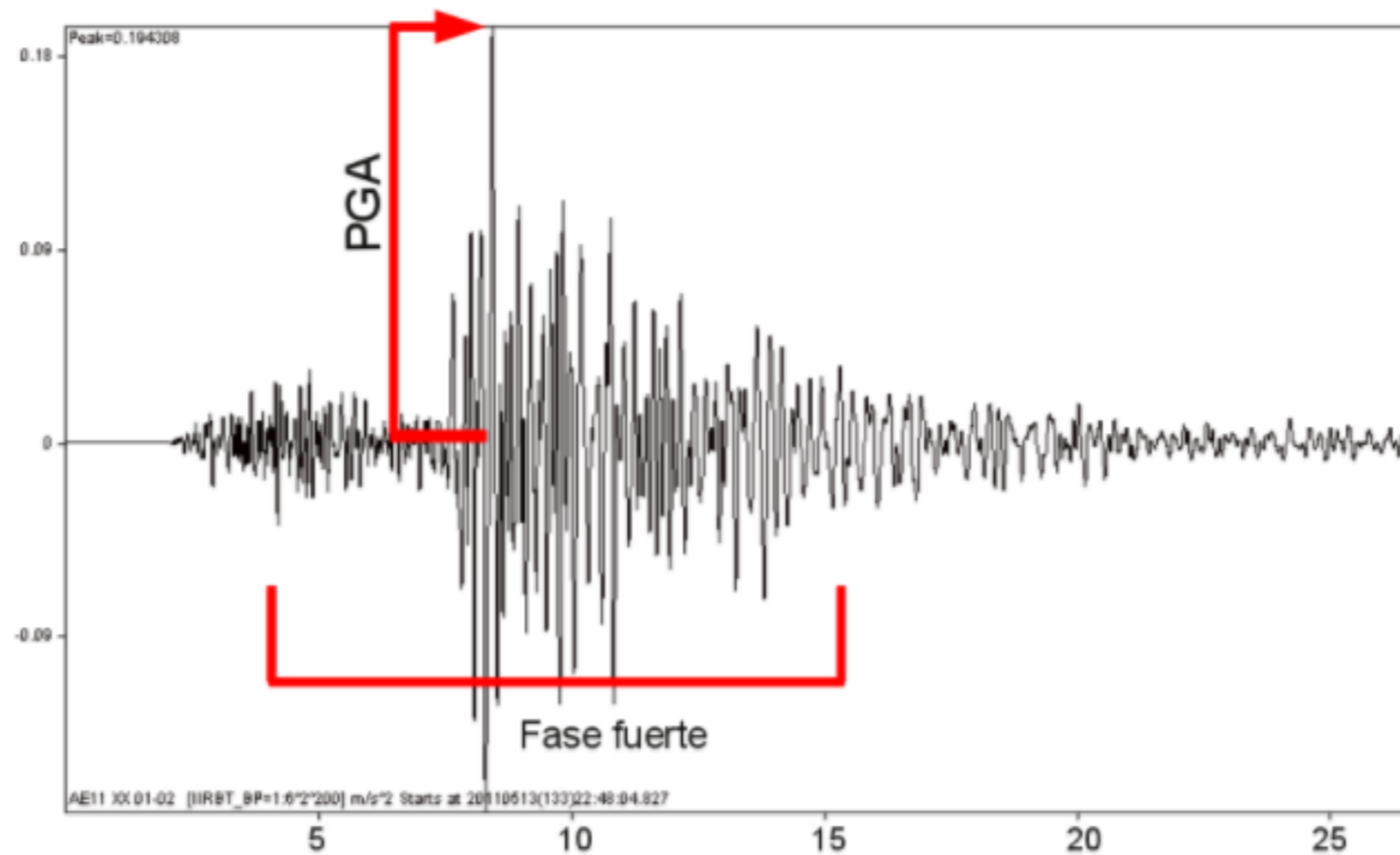
- ❖ La aceleración máxima (PGA) horizontal es el valor absoluto de la aceleración horizontal obtenida de un acelerograma tomando la suma de dos componentes ortogonales. La aceleración producida por un sismo, la cual está relacionada con la intensidad del movimiento en un determinado sitio, es el parámetro más comúnmente utilizado para determinar los parámetros que se van a utilizar en el análisis sísmico de taludes.
- ❖ Usualmente, se utiliza el parámetro PGA para la evaluación sísmica de taludes. Sin embargo, la capacidad de un sismo para activar deslizamientos depende no solamente de la amplitud de la onda, sino también, de su contenido de frecuencias y la duración del sismo.
- ❖ Los movimientos con picos altos de aceleración no son necesariamente más destructivos que aquellos con picos menores, debido a que el tiempo de ocurrencia del sismo interviene en forma importante en el comportamiento tanto de las estructuras como de los suelos .

Tabla 7.3 Aceleración máxima y duración de sismos
(Housner, 1970)

Magnitud (M)	Duración (segundos)	Aceleración máxima (%g)
5.0	2	9
5.5	6	15
6.0	12	22
6.5	18	29
7.0	24	37
7.5	30	45
8.0	34	50
8.5	37	50

Aceleración Pico (PGA)

La aceleración pico efectiva es considerada por diversos autores como una aceleración más representativa de la sacudida del sismo que la aceleración máxima o aceleración pico (llamada también PGA). La aceleración pico o máxima (que es la que reportamos nosotros) solamente se da en un instante muy corto de tiempo como lo muestra la figura siguiente.



Amplificación de onda en el sitio

- ❖ La importancia de la respuesta de la onda en cada sitio ha sido demostrada en los sismos de los últimos años. Los resultados de esos estudios han servido para desarrollar recomendaciones de clasificaciones y espectro de diseño para utilización en los códigos.
- ❖ Seed y Bray (1997), recomiendan una tabla de clasificación de sitio para tener en cuenta en el análisis sísmico. De acuerdo con la clasificación del sitio, hay una amplificación de la onda de la roca al suelo (Tabla 7.4).
- ❖ Para la clase de sitio A no existe amplificación y para las clases de sitio E y F la amplificación es muy grande.
- ❖ La amplificación está relacionada con la formación de ondas superficiales (Raleigh y Love) las cuales son de mayor amplitud en suelos blandos.
- ❖ De la misma forma, la presencia de niveles freáticos produce una amplificación de la onda sísmica, un aumento de la aceleración y la amplitud de las deformaciones.

Amplificación de onda en el sitio

Tabla 9.5 Sistema de clasificación de sitio para sismos Seed y Bray (1997)

Clase	Condición	Descripción	Características
(A ₀)	A ₀	Roca muy dura	$V_s > 5000$ pies / seg. En los 50 pies + sub-superficiales
A	A ₁	Roca competente con muy poco o ningún suelo	2500 pies / seg. $\leq V_s \leq 5000$ pies / seg. Y espesor del suelo + roca meteorizada < 40 pies con $V_s > 800$ pies / seg.
AB	AB ₁	Roca blanda fracturada o meteorizada	$V_s \leq 800$ pies / seg. 40 pies $\leq H$ suelo + roca meteorizada ≤ 150 pies
	AB ₂	Suelo delgado duro sobre roca o roca meteorizada	
B	B ₁	Suelos principalmente no cohesivos profundos	No hay arcilla blanda H suelo cohesivo < 0.2H suelo no cohesivo
	B ₂	Suelos duros cohesivos poco profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos	$V_s > 500$ pies /seg. H de suelos ≤ 200 pies
C	C ₁	Suelos duros cohesivos poco profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos y pequeñas capas de arcilla blanda	Igual a B ₂ excepto 0 pies < H arcilla blanda ≤ 10 pies
	C ₂	Suelos principalmente no cohesivos muy profundos	Igual a B ₁ excepto Espesor de suelo > 300 pies
	C ₃	Suelos cohesivos duros profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos sin arcilla blanda	H suelo > 200 pies $V_s > 500$ pies /seg.
	C ₄	Suelos cohesivos blandos sometidos a niveles pequeños a moderados de vibración	10 pies $\leq H$ arcilla blanda ≤ 100 pies $A_{max.roca} \leq 0.25 g$
D	D ₁	Suelos cohesivos blandos sometidos a niveles medios a fuertes de excitación	10 pies $\leq H$ arcilla blanda ≤ 100 pies $0.25 g < A_{max.roca} \leq 0.45 g$ o $0.25 g < A_{max.roca} \leq 0.55 g$ y $M \leq 7.25$
(E) ^d	E ₁	Suelos blandos cohesivos muy profundos	H arcilla blanda > 100 pies
	E ₂	Suelos blandos cohesivos y excitaciones muy fuertes	H arcilla blanda > 10 pies y/o $A_{max.roca} > 0.55 g$ o $A_{max.roca} > 0.45 g$ y $M > 7.25$
	E ₃	Arcillas de muy alta plasticidad	H arcilla > 30 pies con IP > 75% y $V_s < 800$ pies / seg.
(F) ^f	F ₁	Suelos altamente orgánicos o turbas	$H > 20$ pies
	F ₂	Sitios susceptibles de sufrir fallas del terreno debido a licuefacción u otros modos de inestabilidad general	

Amplificación de onda en el sitio

Seed y Bray (1997) sugieren evaluar el nivel de respuesta de diseño para un sitio determinado, en tres pasos.

- Primero, determinar la aceleración que ocurriría si el sitio fuera roca competente (sitio A), basándose en la sismicidad regional.
- Luego, modificar la aceleración obtenida por un factor de amplificación que depende de las características del sitio.
- Finalmente, se determina el espectro respuesta para este valor de aceleración. Al producirse la amplificación, también se modifica la frecuencia (Figura 7.10). Para la clase de sitio A no existe amplificación y para las clases de sitio E y F la amplificación es muy grande.

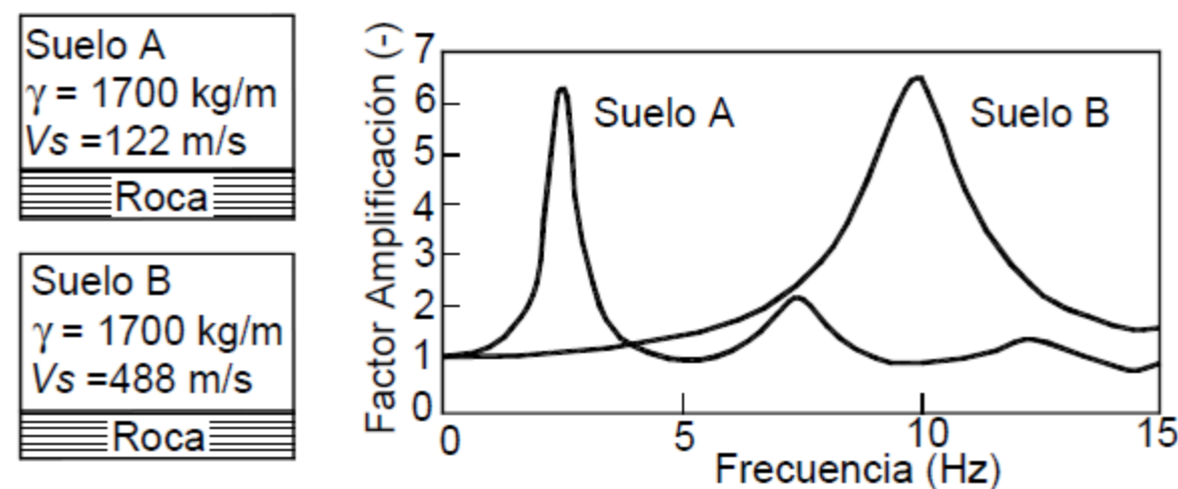


Figura 7.10 Amplificación de la onda sísmica en dos suelos diferentes (Kramer, 1996).

En el talud

- ❖ **Los sismos activan los deslizamientos**
 - ❖ **a. El valor de las fuerzas sísmicas aplicadas sobre las masas de suelo potencialmente deslizables.**
 - ❖ **b. La disminución de la resistencia debida a las cargas vibratorias, las cuales inducen**
 - ❖ **deformaciones cíclicas, esta resistencia puede disminuirse en más del 50% en suelos sensitivos y en la mayoría de los casos, la disminución de resistencia puede llegar a un 20% durante el sismo (Makdisi y Seed, 1978).**

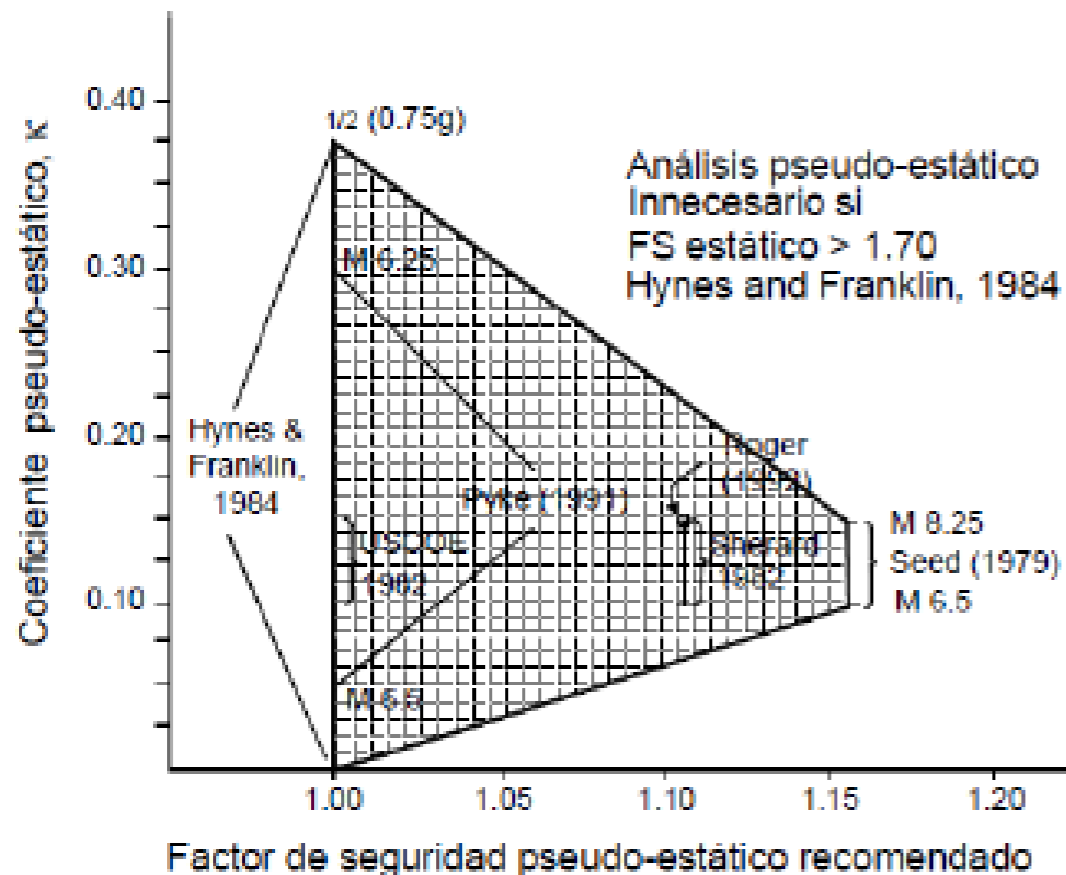
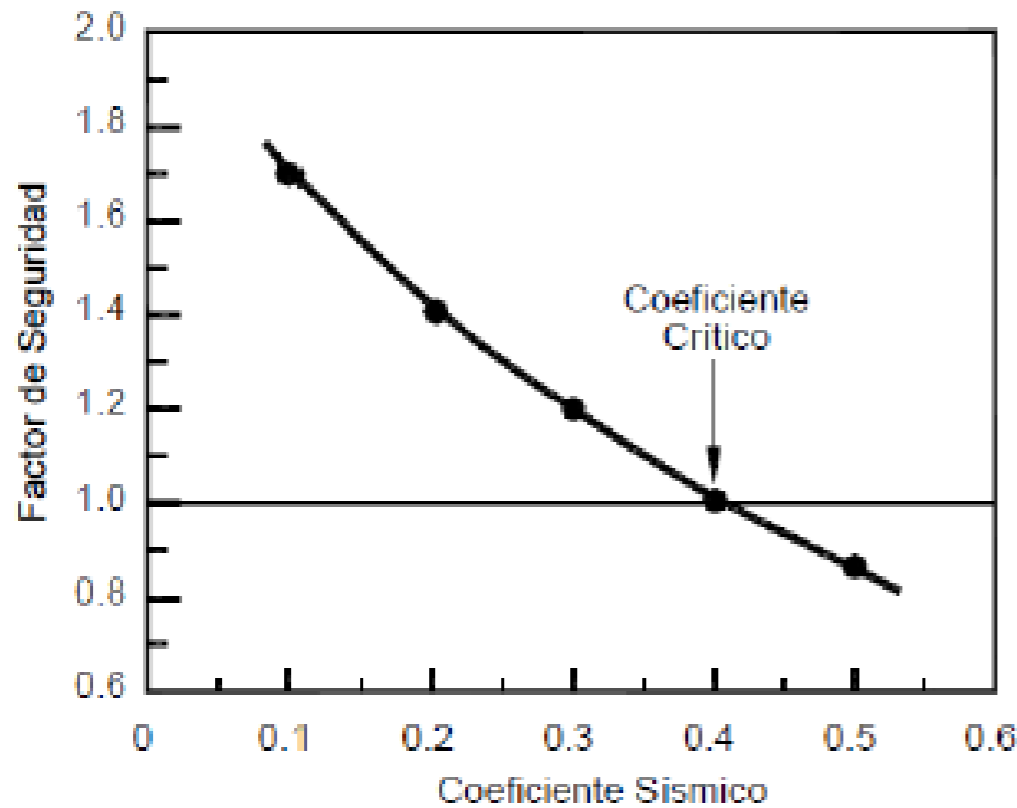
En el talud

- ❖ **Los sismos activan los deslizamientos**
 - ❖ **c. El aumento de presión de poros especialmente, en suelos limosos y arenas finas, en los cuales se puede producir una disminución de resistencia tal que produzca el fenómeno de licuación.**
 - ❖ **d. El aumento de fuerza sísmica generado por la amplificación en los mantos de suelos blandos.**
 - ❖ **e. La posibilidad de ocurrencia de fenómenos de resonancia relacionados con la similitud entre la frecuencia natural de vibración del talud y la del evento sísmico.**
 - ❖ **f. La magnitud de las deformaciones en la masa de suelo.**

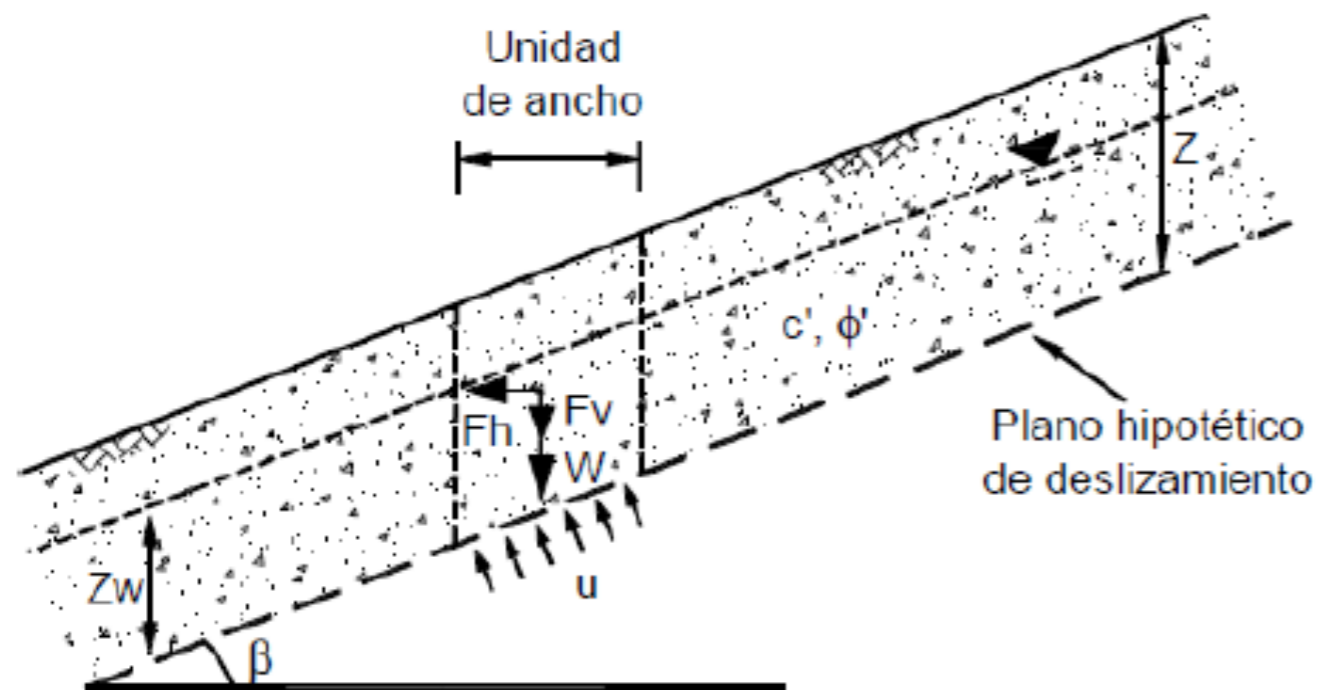
Calculo de coeficiente sísmico

análisis seudoestático (Abramson y otros, 2002).

Coeficiente Sísmico k	Observaciones
0.10	Sismo importante, FS > 1.0.
0.15	Sismo de gran magnitud, FS > 1.0.
0.15 a 0.25	Japón FS > 1.0
0.05 a 0.15	Estado de California
0.10 para $\mu = 6.5$ 0.15 para $\mu = 8.5$	(Seed, 1979) con FS > 1.15
1/3 a 1/2 de la aceleración pico superficial	(Marcuson y Franklin, 1983) FS > 1.0
1/2 de la aceleración pico superficial	(Hynes, Griffin y Franklin, 1984) FS > 1.0 y un 20% de reducción de resistencia.



Talud infinito



$$FS = \frac{c + \{[(1 + K_v) \cos \beta - k_h \sin \beta] \gamma\} - \{(1 + K_v) \gamma_w m \cos \beta\} z \cos \beta \tan \phi'}{[(1 + K_v) \sin \beta + K_h \cos \beta] \gamma z \cos \beta}$$

Donde:

m = Parámetro del nivel de agua.

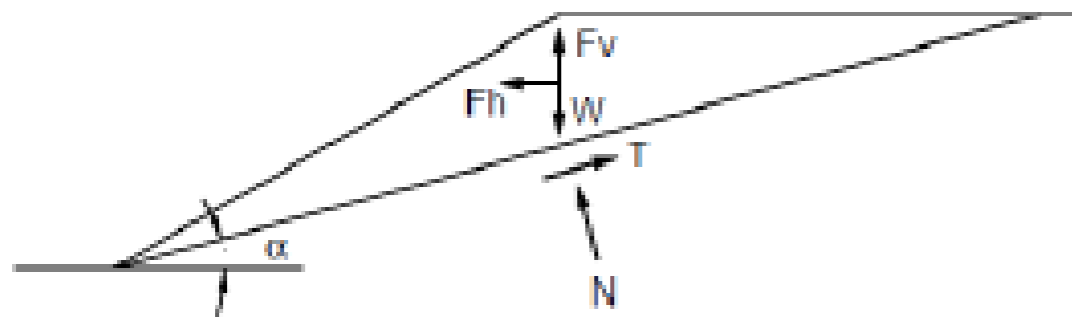
Para talud seco $m = 0$

Para talud saturado $m = 1.0$

K_h = Coeficiente sísmico horizontal

K_v = Coeficiente sísmico vertical

Talud falla plana



$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

Donde:

F_h y F_v = Fuerzas pseudo-estáticas horizontales y verticales

a_h y a_v = Aceleraciones máximas horizontales y verticales

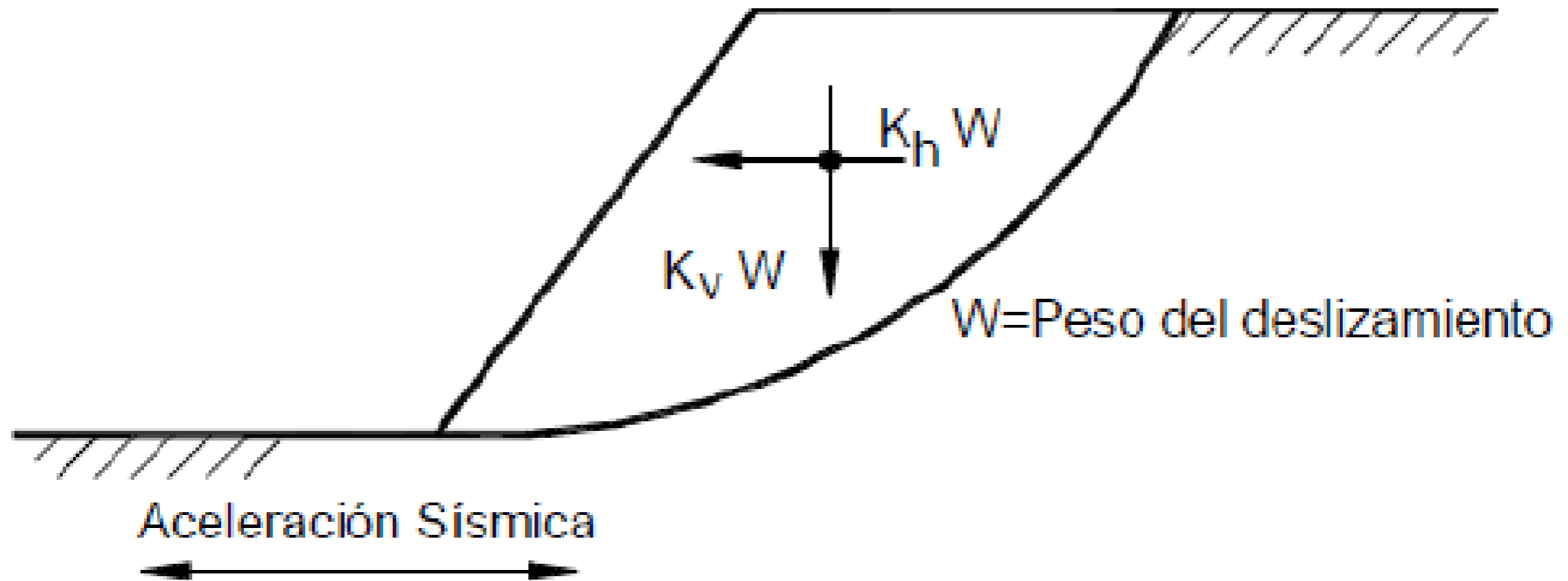
k_h y k_v = Coeficientes pseudo-estáticos

El factor de seguridad para una falla plana de longitud L es igual a:

$$FS = \frac{\text{fuerza resistente}}{\text{fuerza actuante}}$$

$$FS = \frac{cl + [(W - F_v) \cos \alpha - F_h \operatorname{sen} \alpha] \tan \phi}{(W - F_v) \operatorname{sen} \alpha + F_h \cos \alpha}$$

Talud falla curva



$$F_{sd} = \frac{\sum [w \tan \phi + c_d l \cos \alpha] \div [\cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \times \tan \phi \div F_d)]}{\sum \left[w \tan \alpha + \frac{a_{\max}}{g} w \right]}$$

NSR-2010-12

H.5.2.5 — SISMO DE DISEÑO — Para efectos del análisis y diseño de taludes, se debe emplear la aceleración máxima del terreno, a_{\max} obtenida bien sea de un espectro (aceleración del espectro de diseño para periodo cero) o por medio de análisis de amplificación de onda unidimensionales o bidimensionales, correspondiente a los movimientos sísmicos definidos en el Capítulo A.2, particularmente en los numerales A.2.1, A.2.2, A.2.3, A.2.4 Y A.2.5. En caso de que el sitio objeto de análisis haga parte de un estudio de microzonificación sísmica aprobado, se utilizará la aceleración máxima superficial del terreno establecida en el espectro de diseño respectivo en lugar de lo estipulado en la sección A.2. El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes KST tiene valor inferior o igual al de a_{\max} y se admiten los siguientes valores mínimos de K_{ST}/a_{\max} , dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis.

Tabla H.5.2-1
Valores de K_{ST}/a_{\max} Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes

Material	K_{ST}/a_{\max} Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Método de Mononobe Okabe para presión activa de tierras en condiciones sísmicas

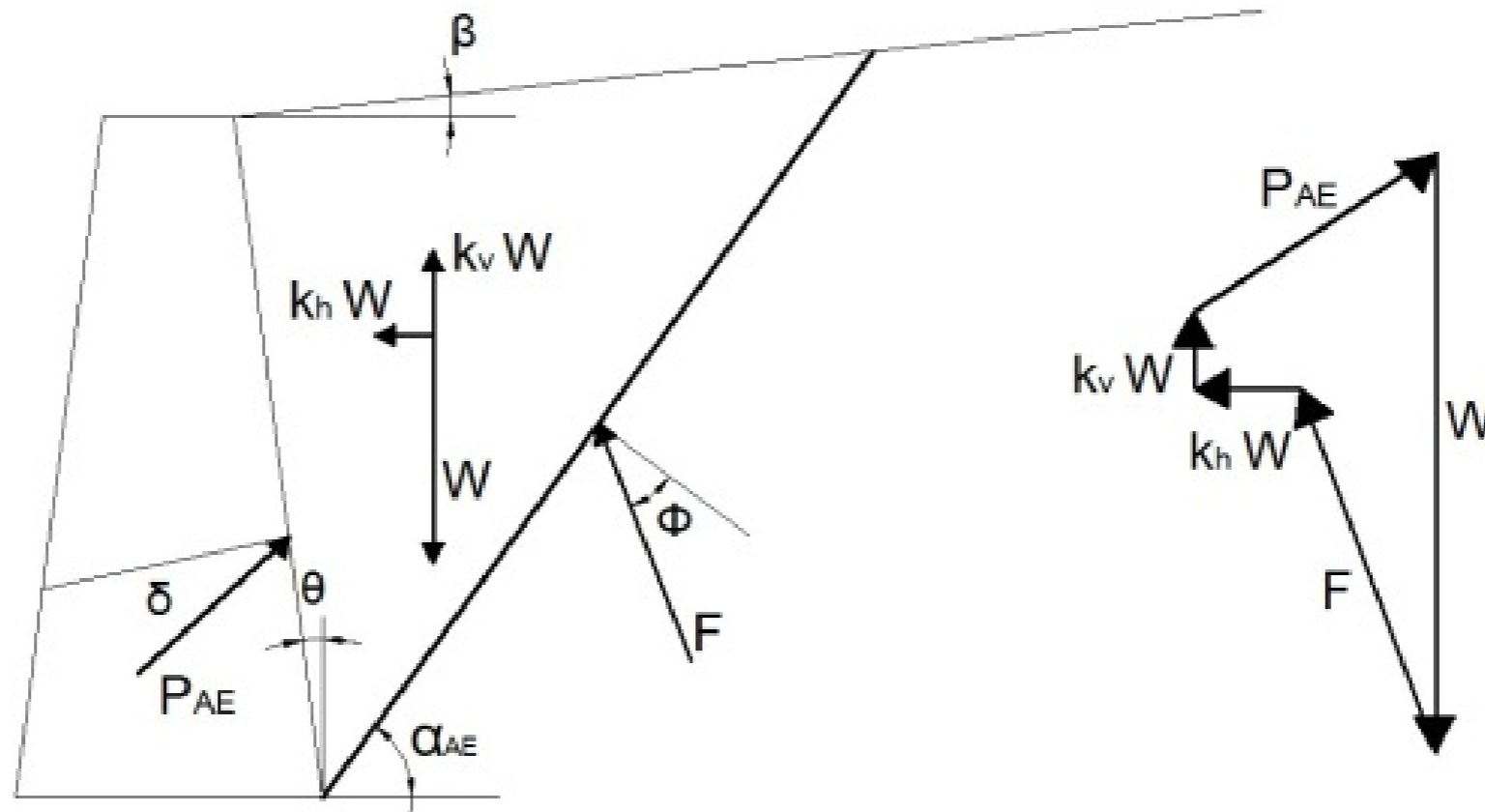


Fig. 2. Fuerzas actuando sobre la cuña activa en el análisis M-O, y polígono de fuerzas indicando el equilibrio de fuerzas actuando en la cuña activa. (Kramer, 1996).

Método de Mononobe Okabe para presión activa de tierras en condiciones sísmicas

La teoría de presión activa de tierras puede ser extendida para tener en cuenta las fuerzas causadas por sismo. Para tener en cuenta las fuerzas sísmicas de manera pseudoestática es necesario adicionar los factores k_h y k_v en dirección horizontal y vertical respectivamente. k_h y k_v pueden ser definidas como:

$$k_h = \frac{\text{Componente de la aceleración horizontal}}{\text{aceleración debido a la gravedad, } g} \quad (29)$$

$$k_v = \frac{\text{Componente de la aceleración vertical}}{\text{aceleración debido a la gravedad, } g} \quad (30)$$

En términos generales, el valor de la presión activa de tierras debido a movimientos sísmicos va ser determinado por [Das \(1998\)](#):

$$P_{AE} = \frac{1}{2} K_{AE} \cdot \gamma \cdot H^2 (1 - K_v)$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \psi)}{\cos\psi \cdot \cos^2\theta \cdot \cos(\delta + \theta + \psi) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi)\sin(\phi - \beta - \psi)}{\cos(\delta + \theta + \psi)\cos(\beta - \theta)}} \right]}$$

$$\text{Donde } \phi - \beta \geq \psi \quad \text{con } \psi = \arctan\left(\frac{K_h}{1 - K_v}\right)$$

$$P_{AE} = P_A + \Delta P_{AE}$$

Método de Mononobe Okabe para presión activa de tierras en condiciones sísmicas

A diferencia del caso estático, es decir sin fuerzas sísmicas, la resultante de la aplicación de la presión lateral de tierras no está aplicado a una profundidad $H/3$, sino que varía. Das (1998) propone que el ΔP_{ae} sea aplicado a una altura de $0.6H$, en tanto que en Bowles (1996) se muestra que esa altura varía entre 0.45 y $0.63H$ basados en pruebas realizadas en mesa vibratoria. En este caso se aplicó a $0.6H$. Por lo tanto, la resultante de las fuerzas aplicadas en el muro está ubicado a una distancia \bar{z} :

$$\bar{z} = \frac{(0,6H)\Delta P_{ae} + \frac{H}{3}P_a}{P_{ae}} \quad (34)$$

Donde $\Delta P_{ae} = P_{ae} - P_a$.

ΔP_{ae} es el incremento en la presión lateral de tierras debido a sismo, adicional a la presión lateral de tierras activa en condición estática.

Varios códigos de Diseño Sísmico de Puentes recomiendan que la resultante del empuje pseudo estático actúa a una distancia $0.6H$ desde la base, como también que las aceleraciones verticales (a_v) pueden ser ignoradas cuando se utilice el método de M-O.