

---

# Universidad de Chile

Departamento de Geofísica

## Sismología

GF 4001-2

Profesor: Sergio Ruíz

Cátedra: Tsunamis  
Hermann Schwarze  
2020



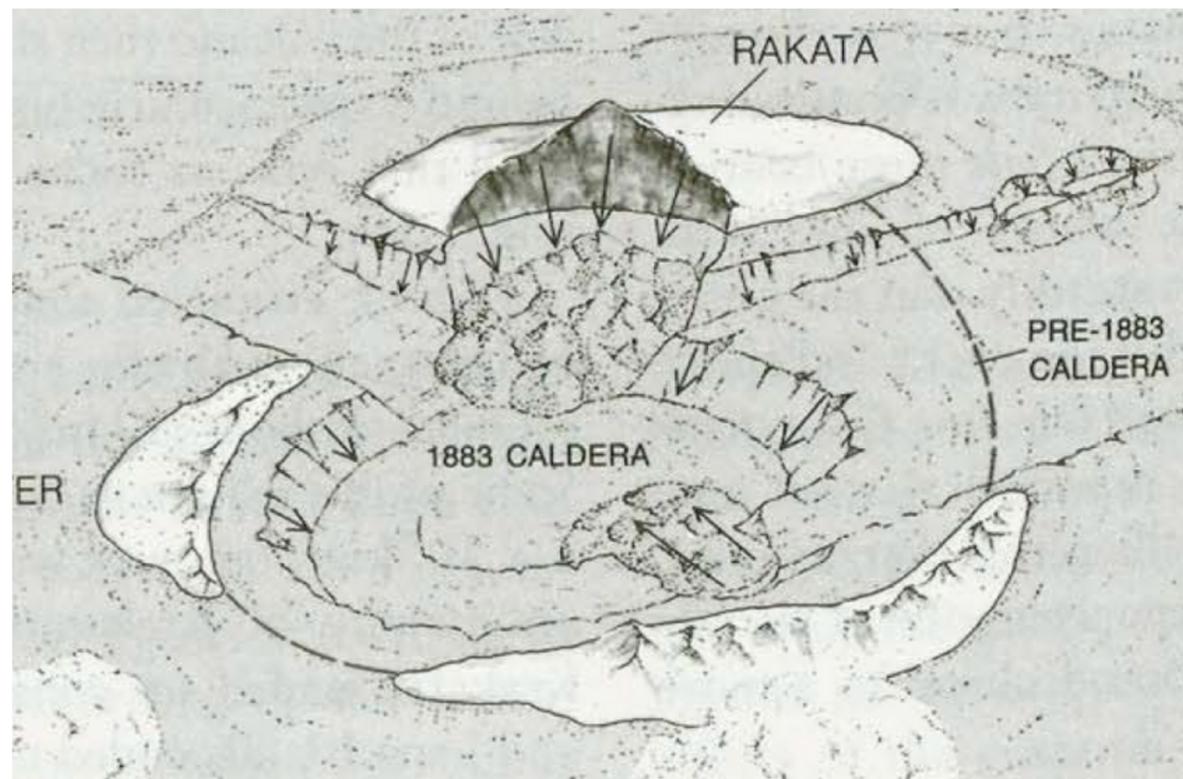
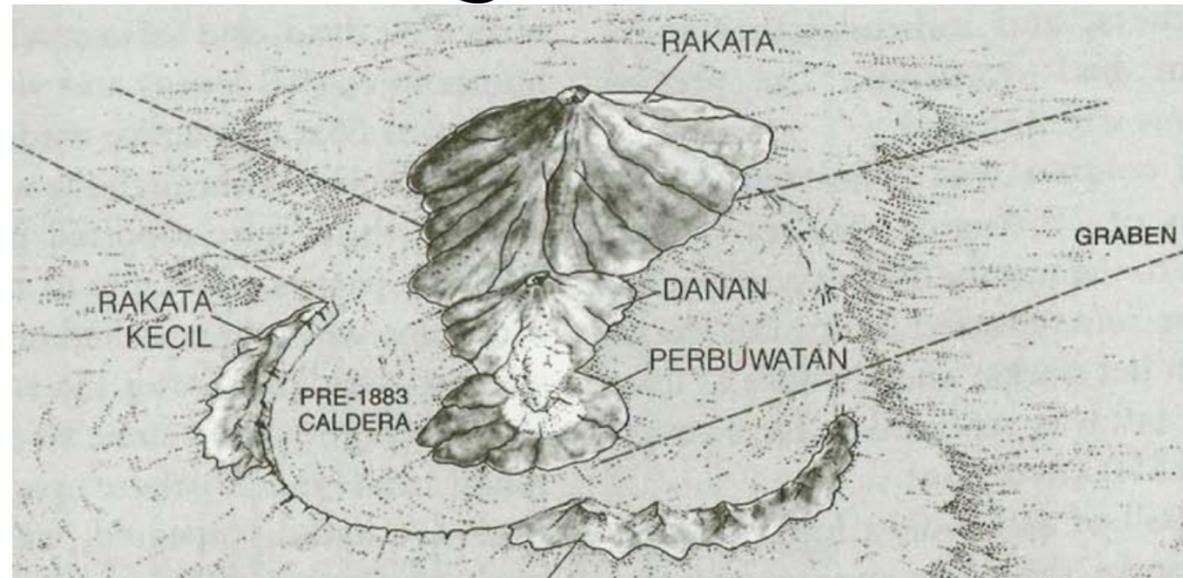
## TSUNAMI:

Los tsunamis son trenes de ondas de gravedad generadas por eventos geológicos extremos en los océanos, fiordos o incluso algunos lagos. Son el resultado del desplazamiento de enormes masas de agua en todas direcciones, en donde la única fuerza restauradora del equilibrio es la fuerza de gravedad.

津波

El término "tsunami" viene de la combinación de los símbolos japoneses "tsu-nami", que traducido significa "ola de puerto". Este es el concepto más acuñado en la literatura científica, aunque también popularmente se les conoce como maremotos en español.

# Existen distintos fenómenos naturales que pueden generar tsunamis, entre los que destacan los



- Generados por fuentes sísmicas
- Generados por grandes erupciones volcánicas.
- Generados por eventos de remoción en masa (landslides).
- Generados por liberación catastrófica de gas en el lecho marino.
- Variaciones extremas de presión atmosférica.
- Generados por caída de meteoritos sobre el mar.

# Características de los terremotos tsunamigénicos

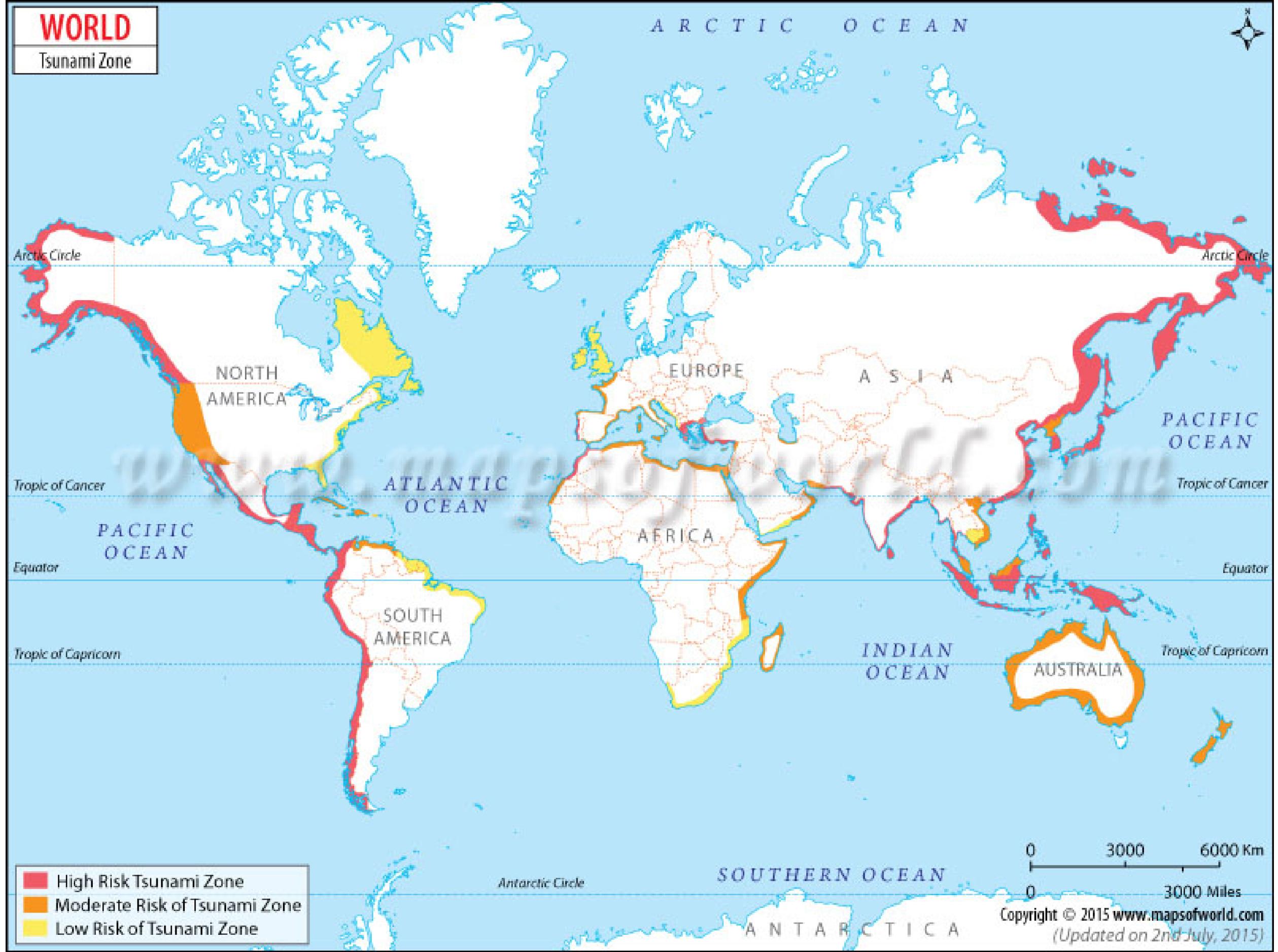
**Table 1.1** Twenty-first-century tsunamis

No	Date	Earthquake magnitude ( $M_W$ )	Maximum water height (m)	Number of victims	Location of event
1	23/06/2001	8.4	8.8	26	Peru
2	24/12/2004	9.1	50.9	227899	Indonesia, Sumatra
3	17/07/2006	7.7	20.9	802	Indonesia, South Of Java
4	15/11/2006	8.3	21.9	0	Russia,
5	13/01/2007	8.1			Central Kuril Islands
6	01/04/2007	8.1	12.1	52	Solomon Islands
7	21/04/2007	6.2	7.6	10	Chile
8	15/08/2007	8.0	10.05	3	Peru
9	29/09/2009	8.1	22.35	192	Samoa
10	27/02/2010	8.8	29	156	Chile
11	25/10/2010	7.8	16.9	431	Indonesia, Sumatra
12	11/03/2011	9.0	55.88	18482	Japan
13	28/10/2012	7.7	12.98	1	Canada, British Columbia
14	06/02/2013	7.9	11	10	Solomon Islands
15	01/04/2014	8.2	4.4	0	Chile

- La mayor parte de los tsunamis provienen de una fuente sísmica y suelen formarse sobre los márgenes de subducción.
- Todos los terremotos submarinos pueden generar tsunamis, pero para efectos prácticos, se considera que sólo los grandes ( $M_w > 7.5$  (ONEMI)) están asociados a riesgo de inundación.

# WORLD

## Tsunami Zone



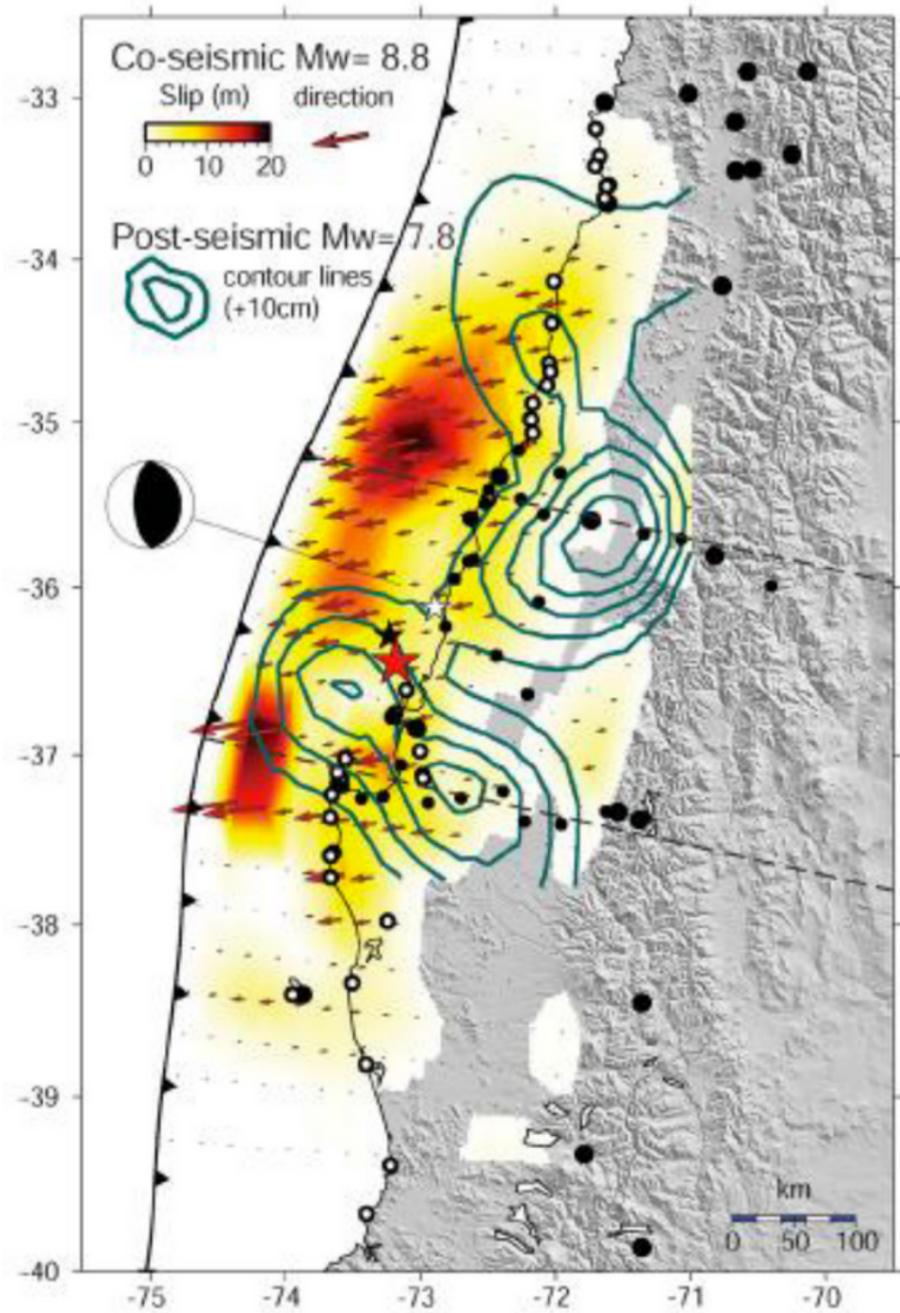
- High Risk Tsunami Zone
- Moderate Risk of Tsunami Zone
- Low Risk of Tsunami Zone

0 3000 6000 Km  
0 3000 Miles  
Copyright © 2015 www.mapsofworld.com  
(Updated on 2nd July, 2015)

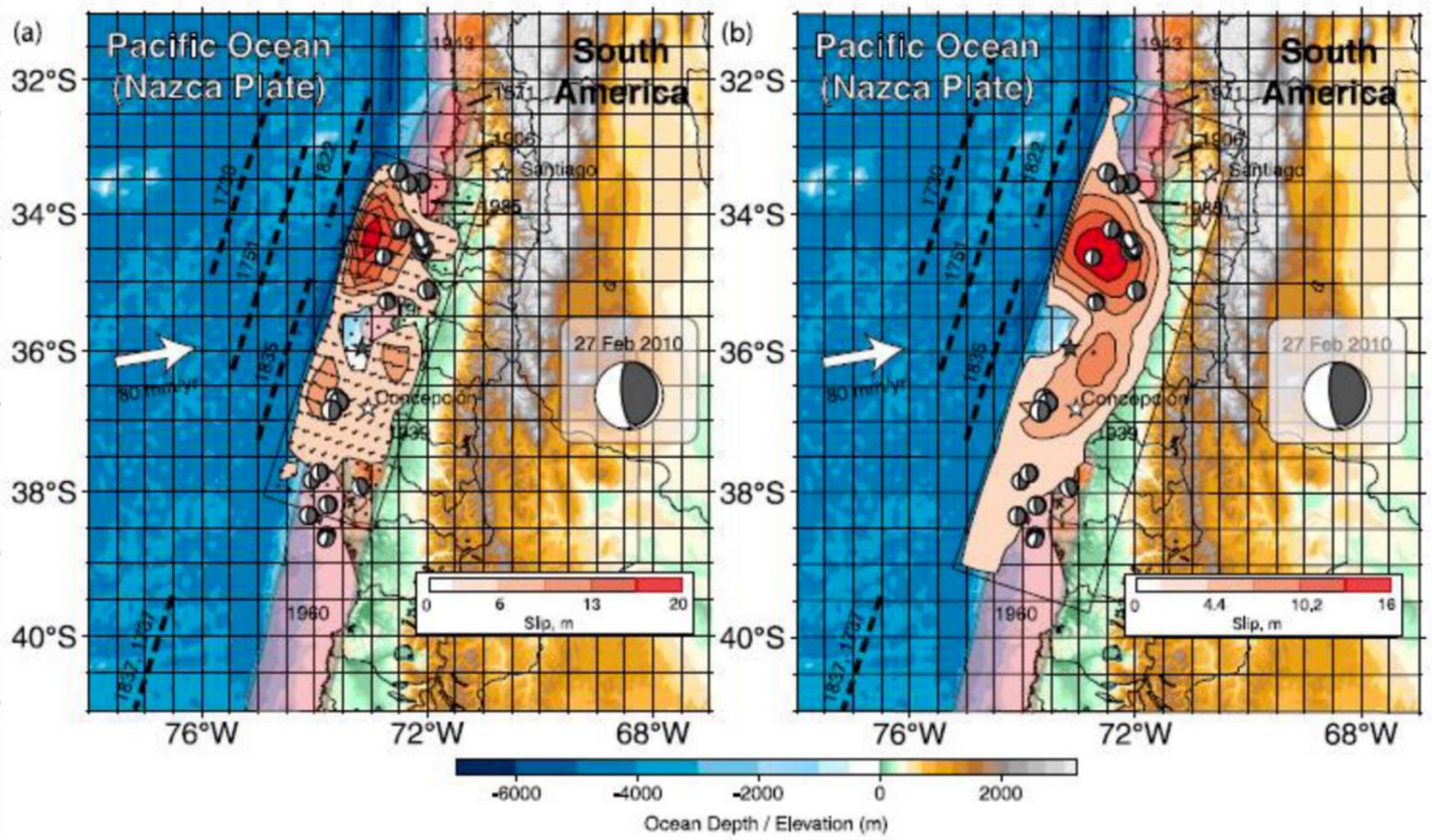
## Características de los terremotos tsunamigénicos

- Se le dice "tsunamigénico" a cualquier terremoto con potencial de generar un tsunami.
- El potencial tsunamigénico de un terremoto depende principalmente de la magnitud  $M_w$  del sismo, pero también importa la geometría de la falla, la profundidad del hipocentro, la ubicación del centroide del slip y la velocidad de la ruptura.
- Kajiura demostró que la eficiencia en la generación de tsunamis es cercana a 1, cuando la duración de la ruptura es corta comparada con el tiempo que requiere un tsunami para viajar a través del área de la fuente.
- Esto implica que para la mayoría de los terremotos tsunamigénicos, se puede asumir que la deformación ocurrida en el fondo del mar es replicada en la superficie de forma "instantánea".
- Parte de la energía que no se transfiere al mar como ondas de tsunami, se convierte en ondas acuáticas.

# Utilidad del centroide para determinar el riesgo de tsunamis



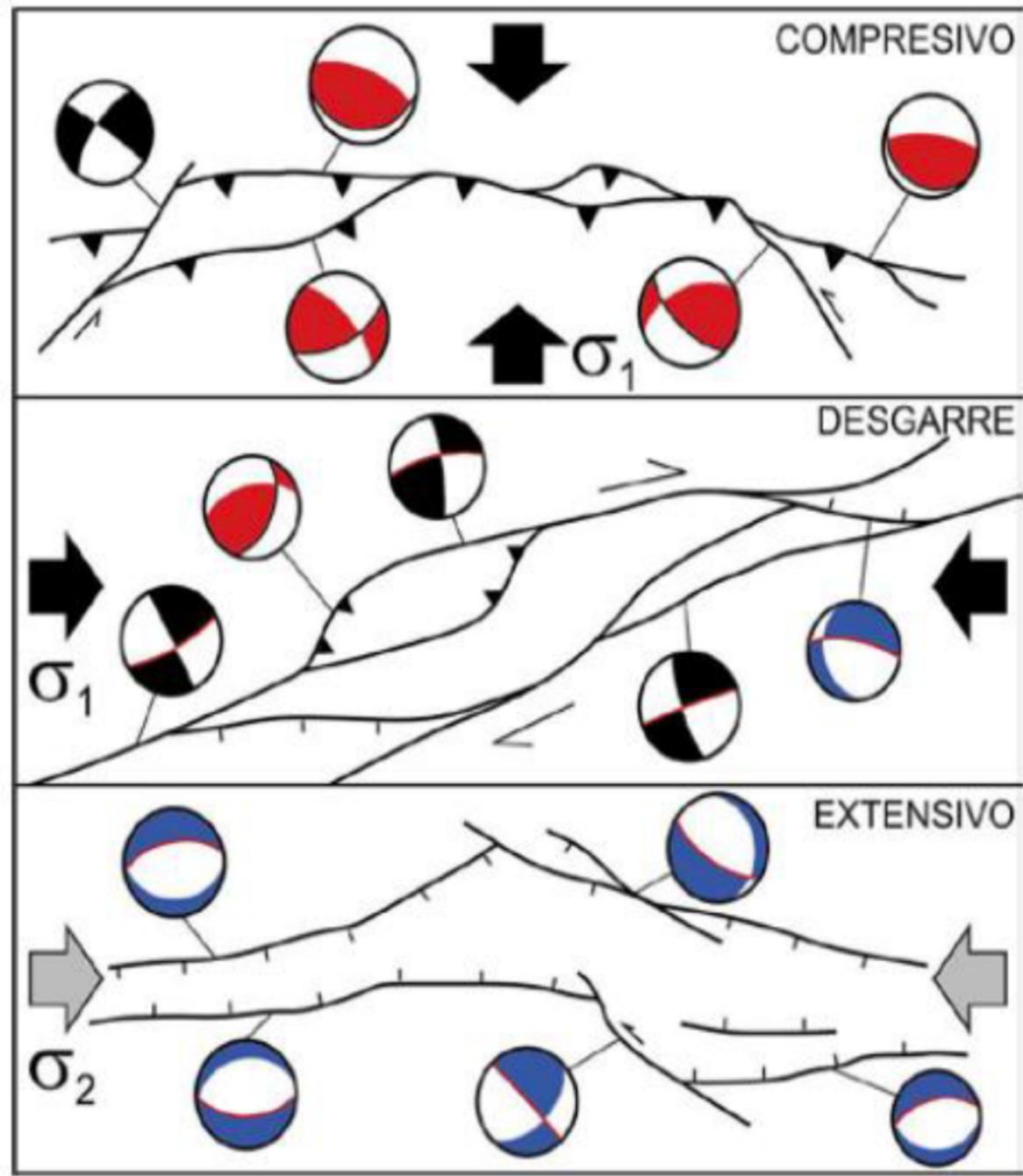
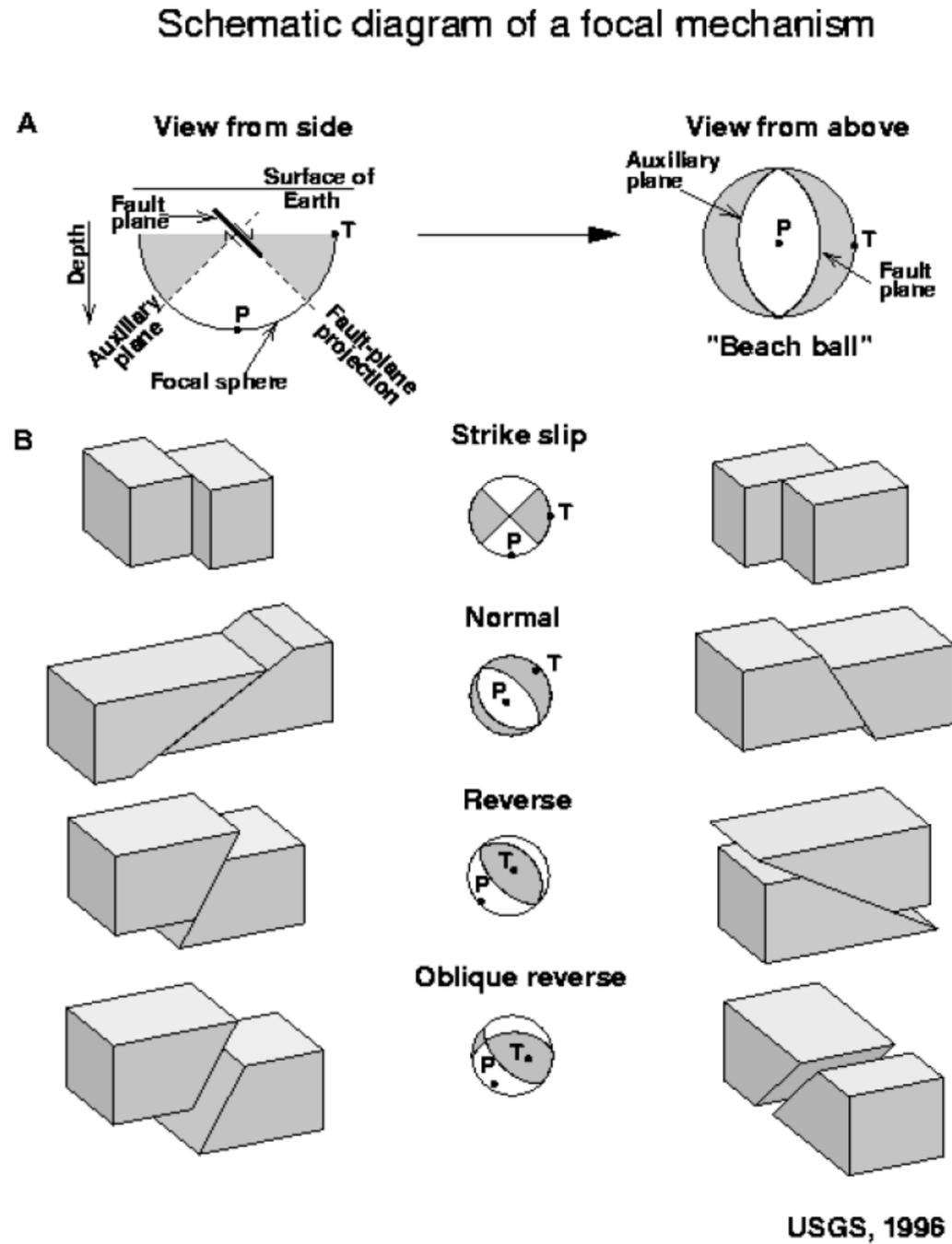
Vigny et al.



Lay et al.

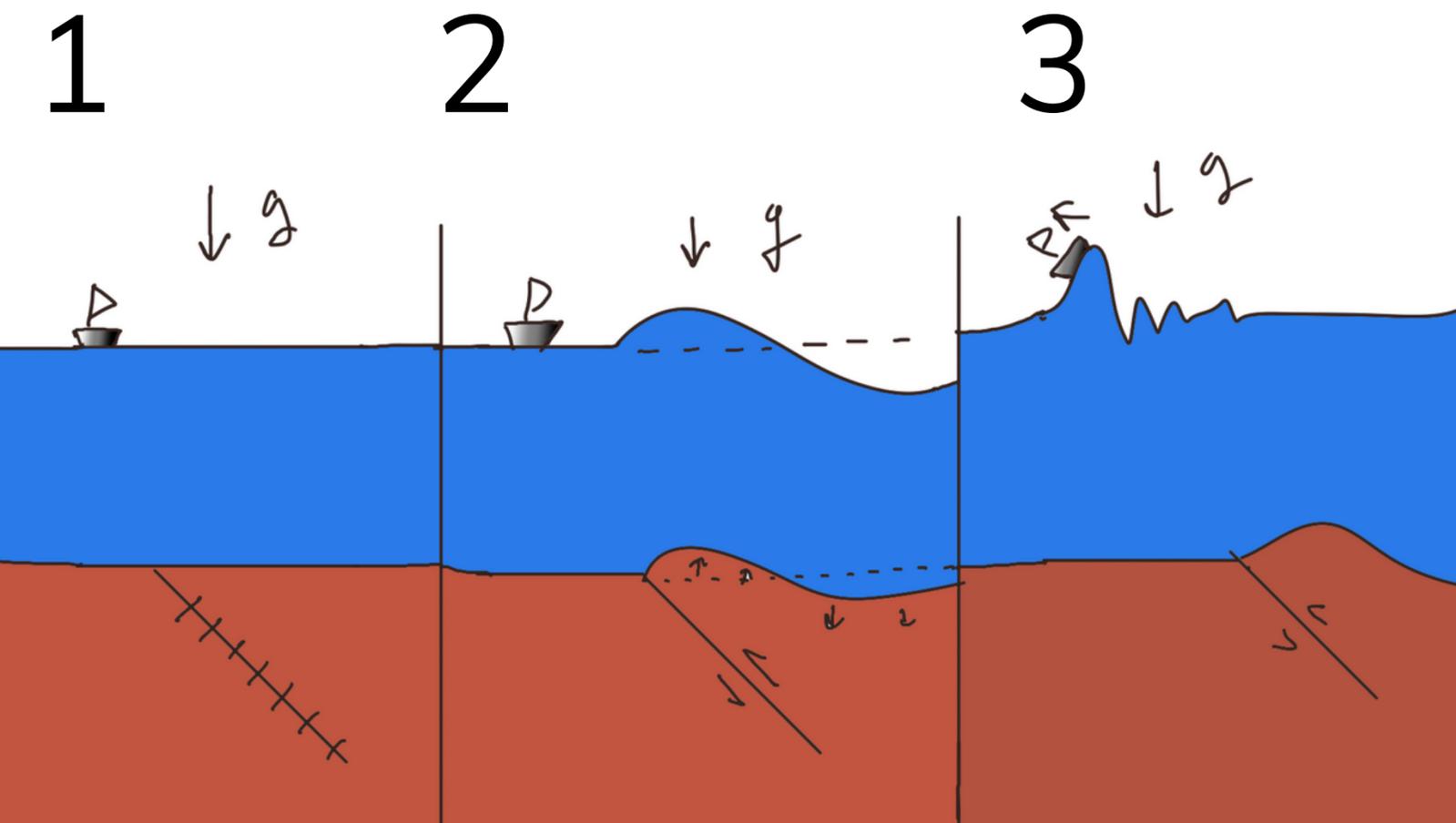
# Terremoto del Maule 2010

# ¿ Por qué es tan importante el mecanismo focal de un Terremoto?



# Características de los terremotos tsunamigénicos

Los terremotos tsunamigénicos generan deformación vertical en el fondo del lecho marino ubicado sobre la fuente. Ésta es una deformación elástica producida por la dislocación sísmica en el plano de falla.



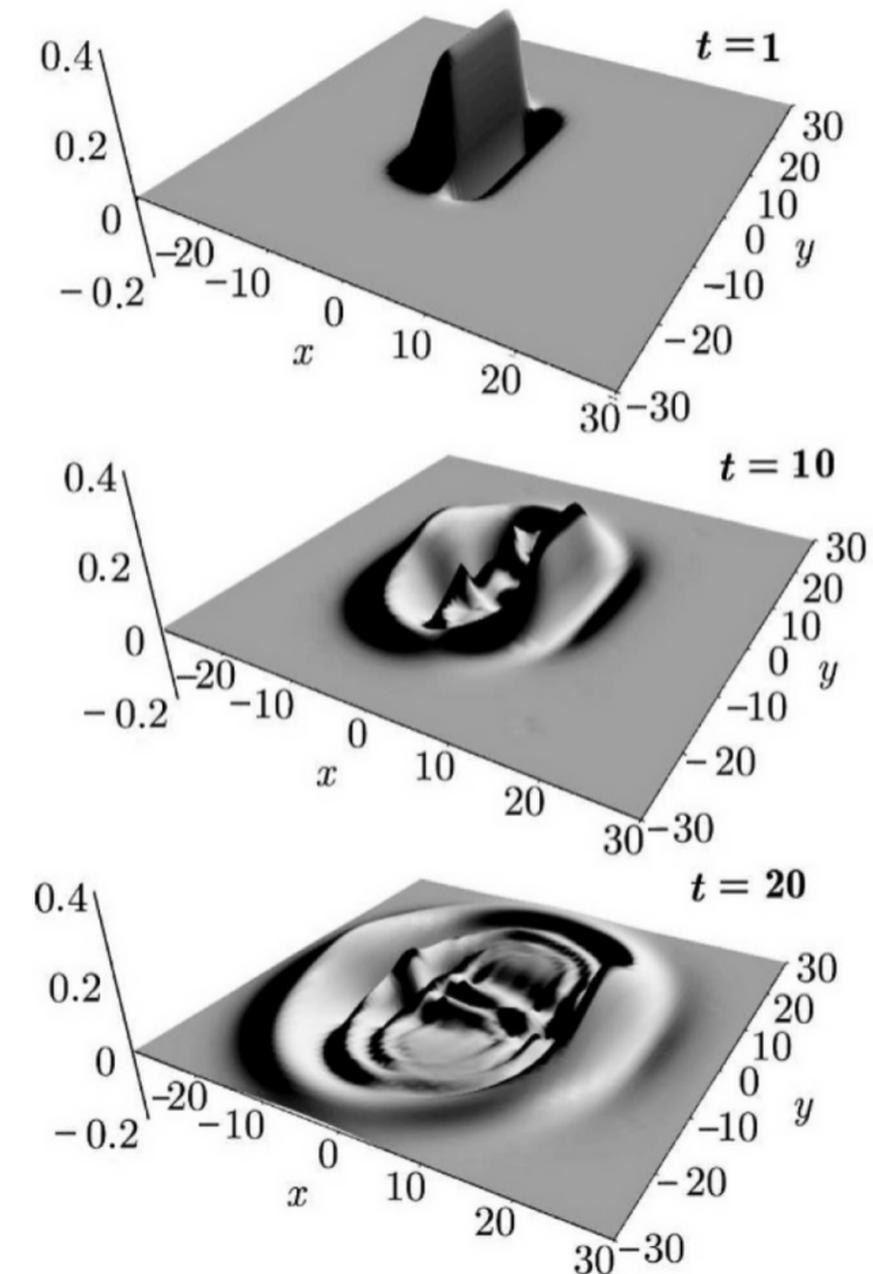
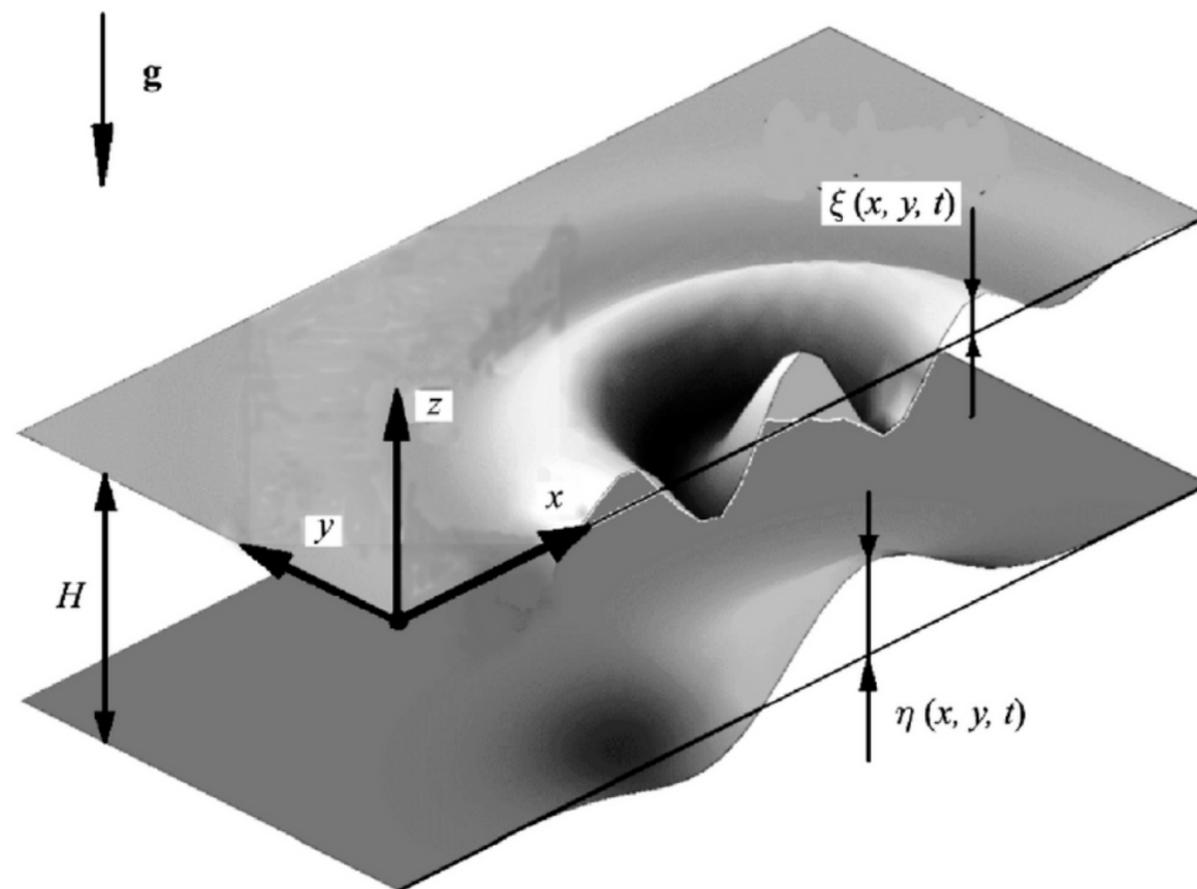
1) Estado de reposo, previo a la dislocación. En este momento la falla se encuentra trabada.

2) El principio de conservación de la masa provoca que el agua desplazada por la deformación vertical del fondo oceánico mueva toda la columna de agua hacia la superficie, perturbándola.

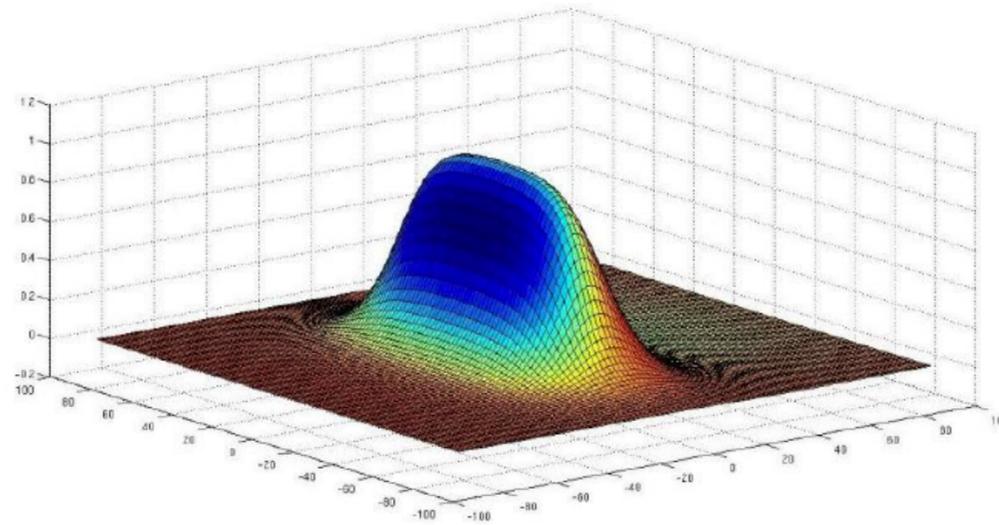
3) Esta perturbación sobre la superficie libre del océano sólo puede ser restaurada por la fuerza de gravedad, la que provocará que la energía transferida desde la deformación del terremoto al agua viaje en forma de ondas de gravedad.

# Características de la fuente tsunamigénica

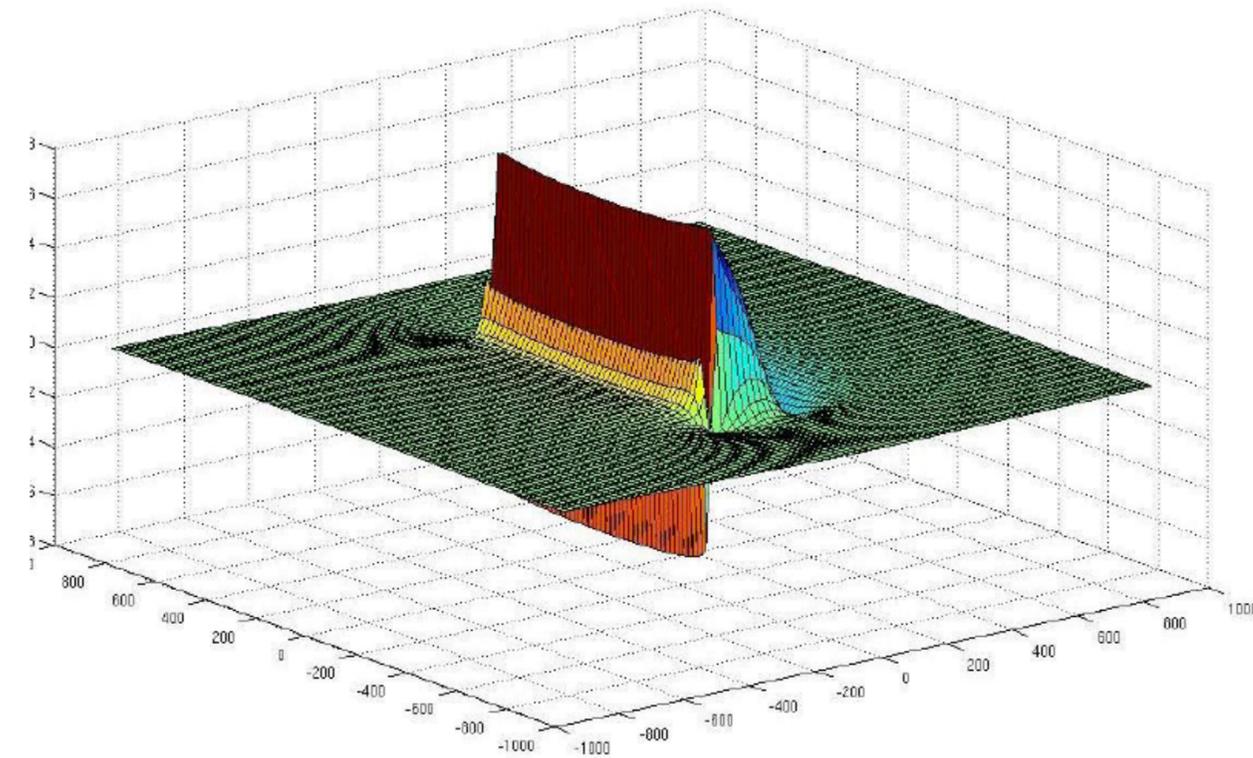
En la mayoría de los casos la velocidad a la que ocurre la deformación del fondo del mar es lo suficientemente rápida como para que, desde la percepción del océano, ésta ocurra de forma instantánea, se puede asumir que en el instante inicial la perturbación en la superficie libre del mar es una copia de la deformación del lecho marino.



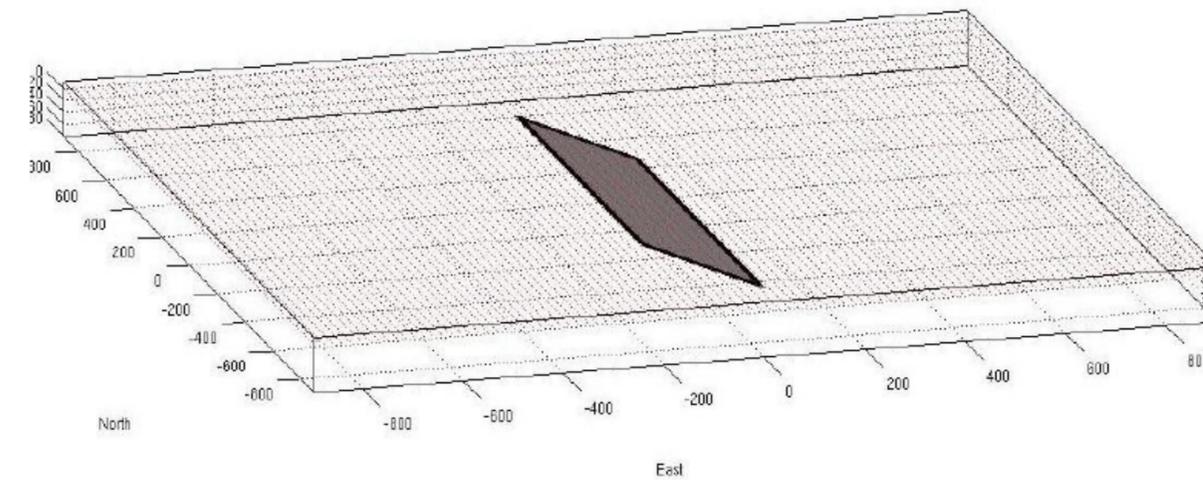
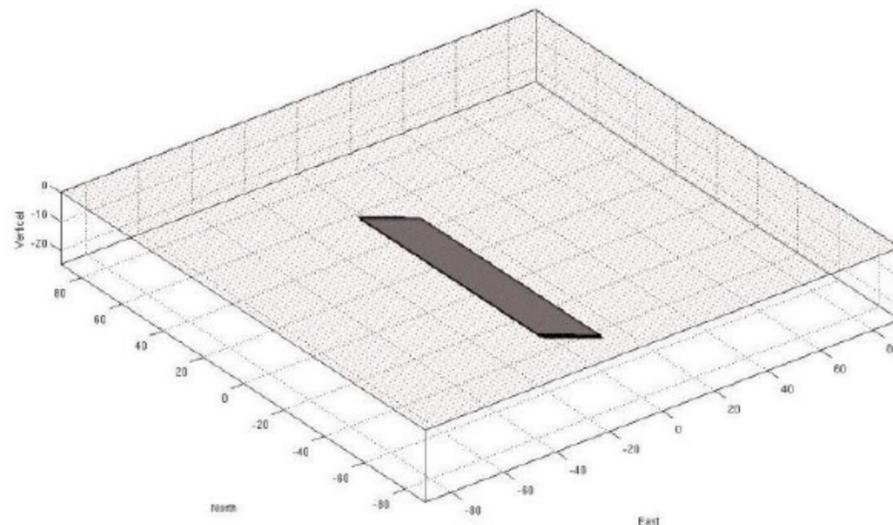
# Deformación del lecho marino: Uso del modelo de Okada



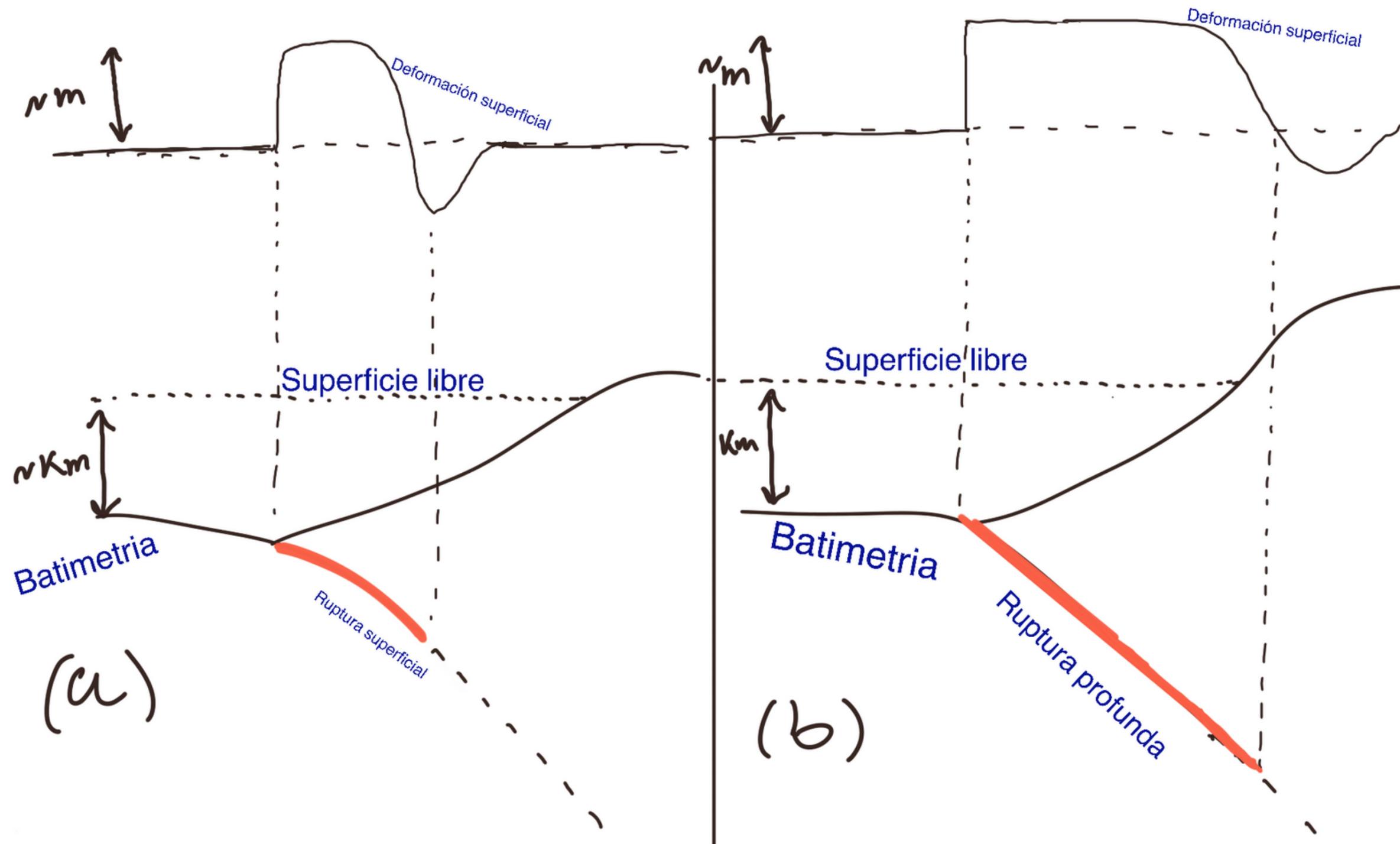
**Mw- 7.5**



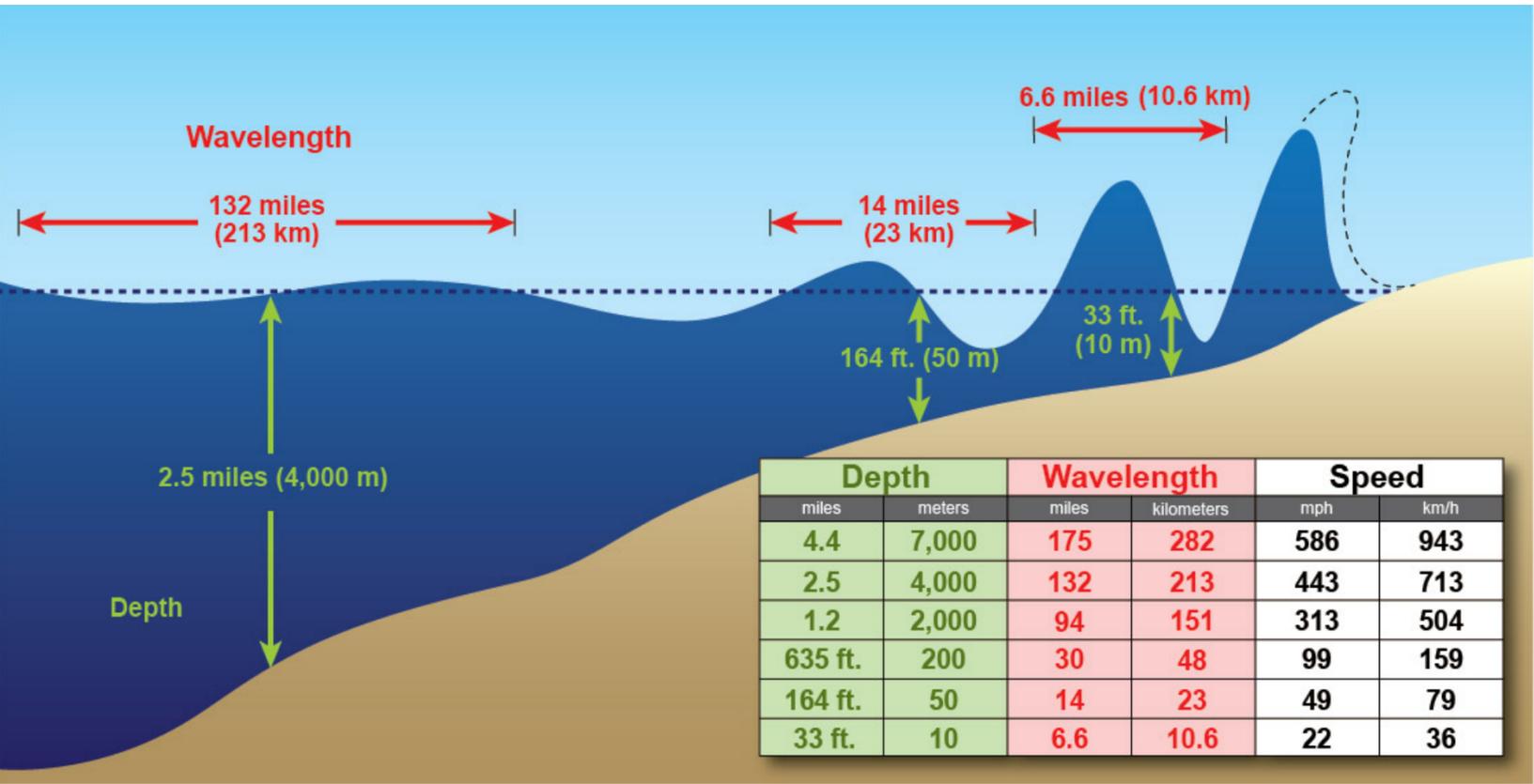
**Mw- 9.5**



# ¿Por qué se retira el mar antes de un tsunami?

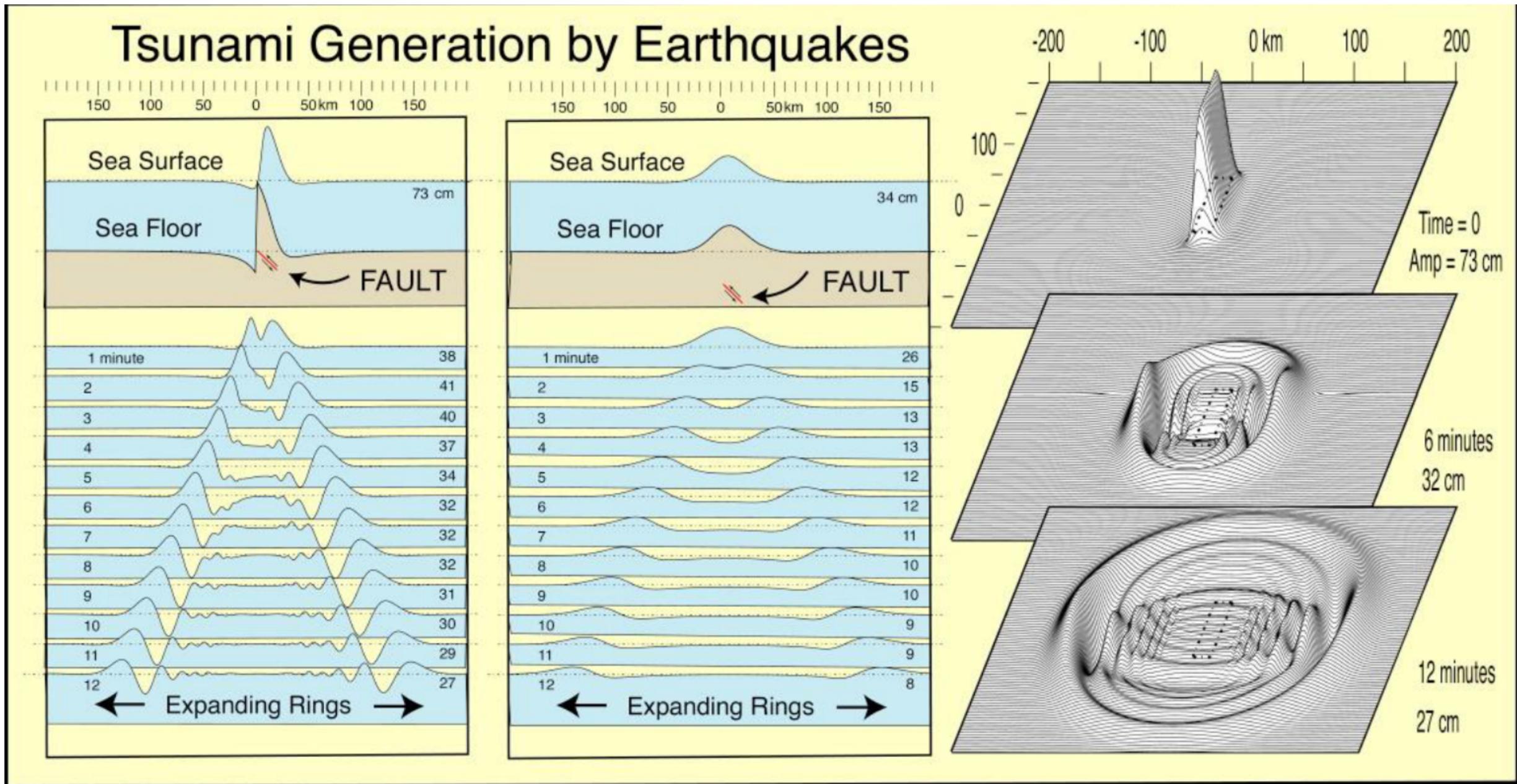


# Características de las ondas de tsunami

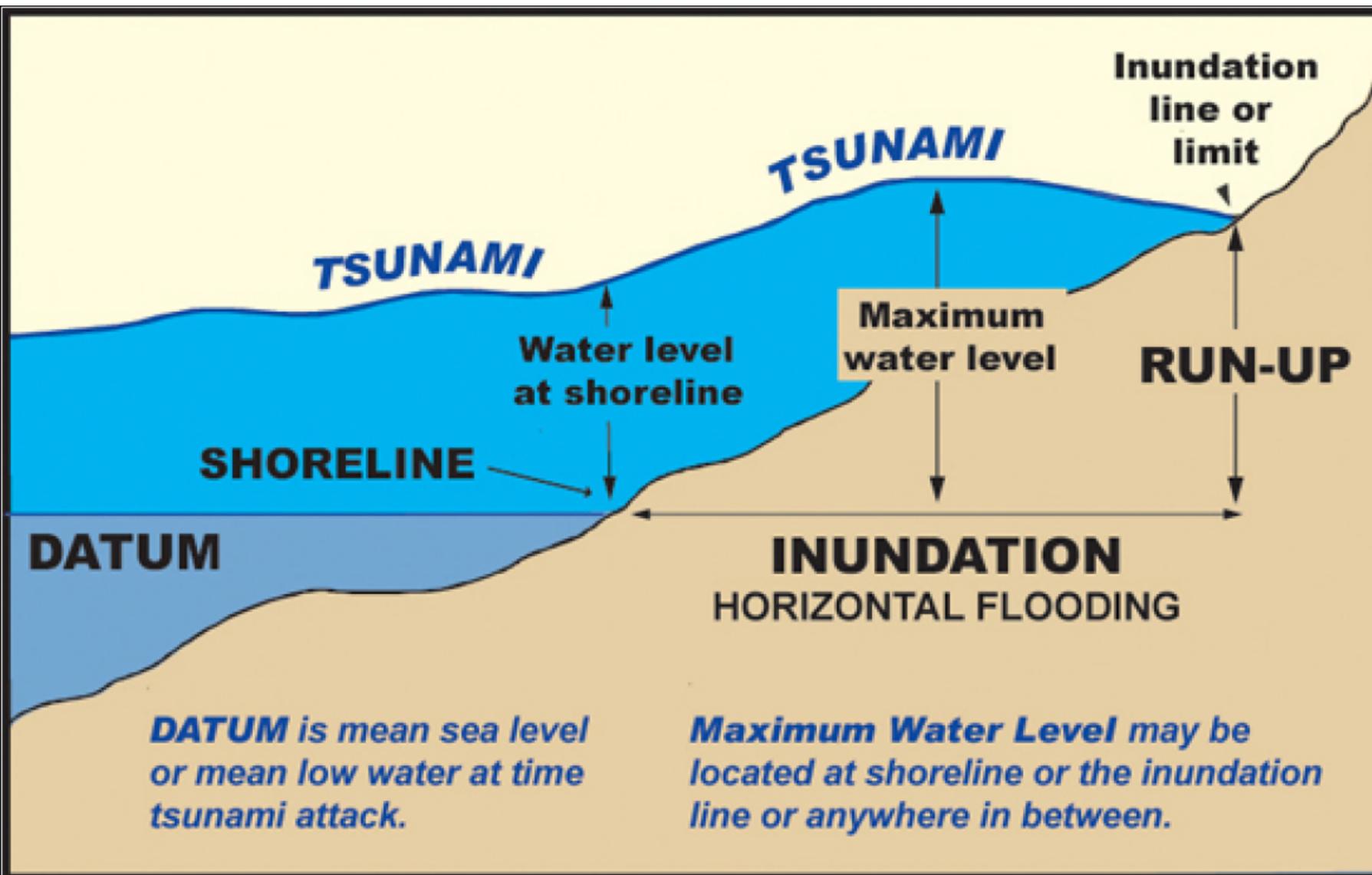


- Tienen una longitud de onda del orden de cientos de kilómetros, por lo que se dice que tienen un comportamiento de ondas de aguas someras.
- La velocidad de fase de los tsunamis depende de la profundidad del fondo del océano y de la aceleración de gravedad:  $c = \sqrt{gh}$ . Como la profundidad media del océano es de alrededor de 4 km, entonces la velocidad media de los tsunamis en mar abierto es del orden de los 700 km/s.
- Los tsunamis respetan el principio de conservación de energía, por lo que al ir acercándose a tierra firme, sufren una desaceleración con la profundidad, disminuyen su longitud de onda, lo que es compensado con una mayor amplitud de las olas al momento de tocar tierra.

# ¿Cómo afecta la profundidad de la fuente en el tsunami?

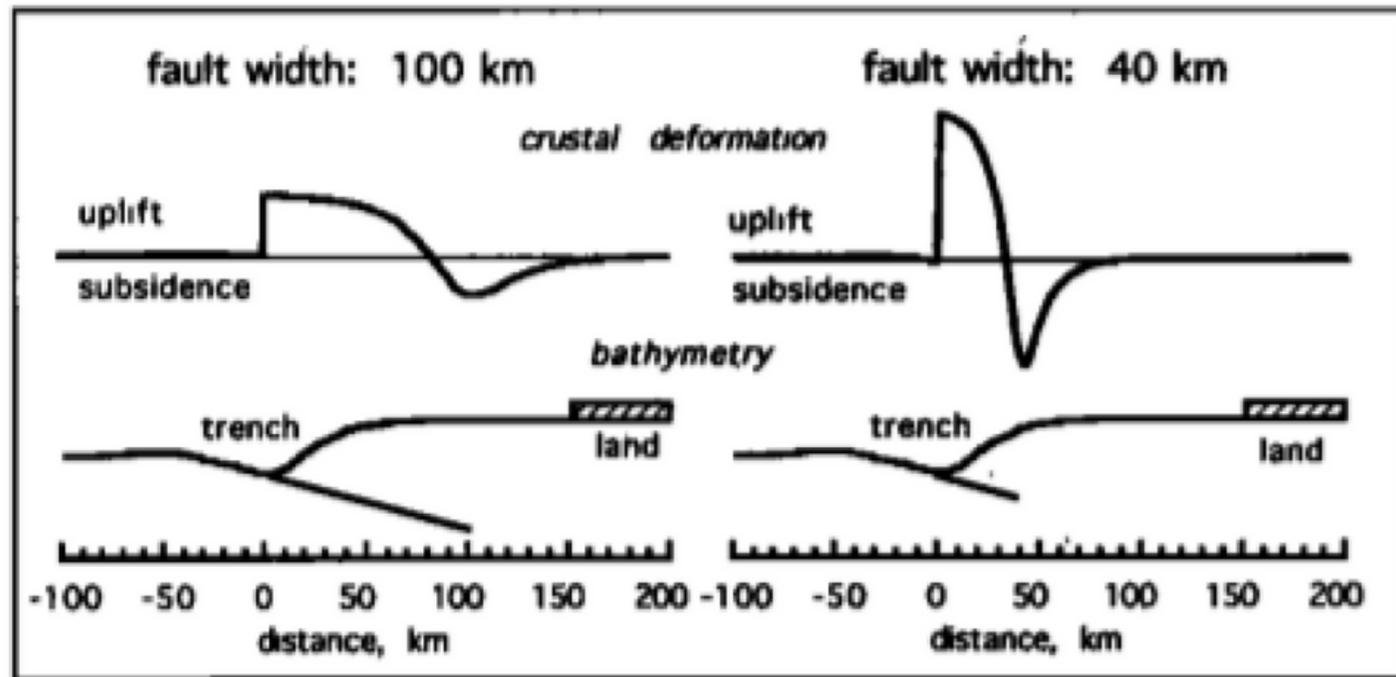


# Arribo de los tsunamis a la costa



- La forma de los tsunamis al llegar a la costa depende completamente de la forma de la batimetría. Mientras mayor sea la pendiente del lecho del mar cerca de la costa, menor será la amplitud del tsunami, por el contrario, en una zona en donde el fondo del mar tiene muy poca pendiente, las amplitudes del tsunami serán mayores.
- Run-Up: Corresponde a la cota de altura máxima de inundación del tsunami, Es el parámetro fundamental a calcular para conocer el riesgo de inundación de tsunamis en una zona.

# Tsunami Earthquake



Sección transversal de la subducción que muestra el grado de deformación superficial considerando diferentes valores de  $W$ .  
(Satake, 1994)

- Un “tsunami earthquake” es un terremoto que provoca un tsunami mucho más grande que lo que se espera a partir de los registros sísmicos
- La intensidad de estos terremotos es muy baja comparada con el tsunami que generan.
- Para este tipo de terremotos la eficiencia del paso de energía de la tierra al océano es más alta, por lo que generan tsunamis más grandes que lo normal.
- Esta eficiencia está relacionada con una baja velocidad de ruptura, la cual puede deberse a la presencia de muchos sedimentos subductados (+Presión de poros), al largo de la ruptura y/o a que el terremoto sea demasiado superficial:  
"Terremotos mas superficiales son más lentos y eso seria un tsunami earthquake. Lay."

# Algunos tsunamis históricos importantes

## Tsunami de bahía Lituya (1958)

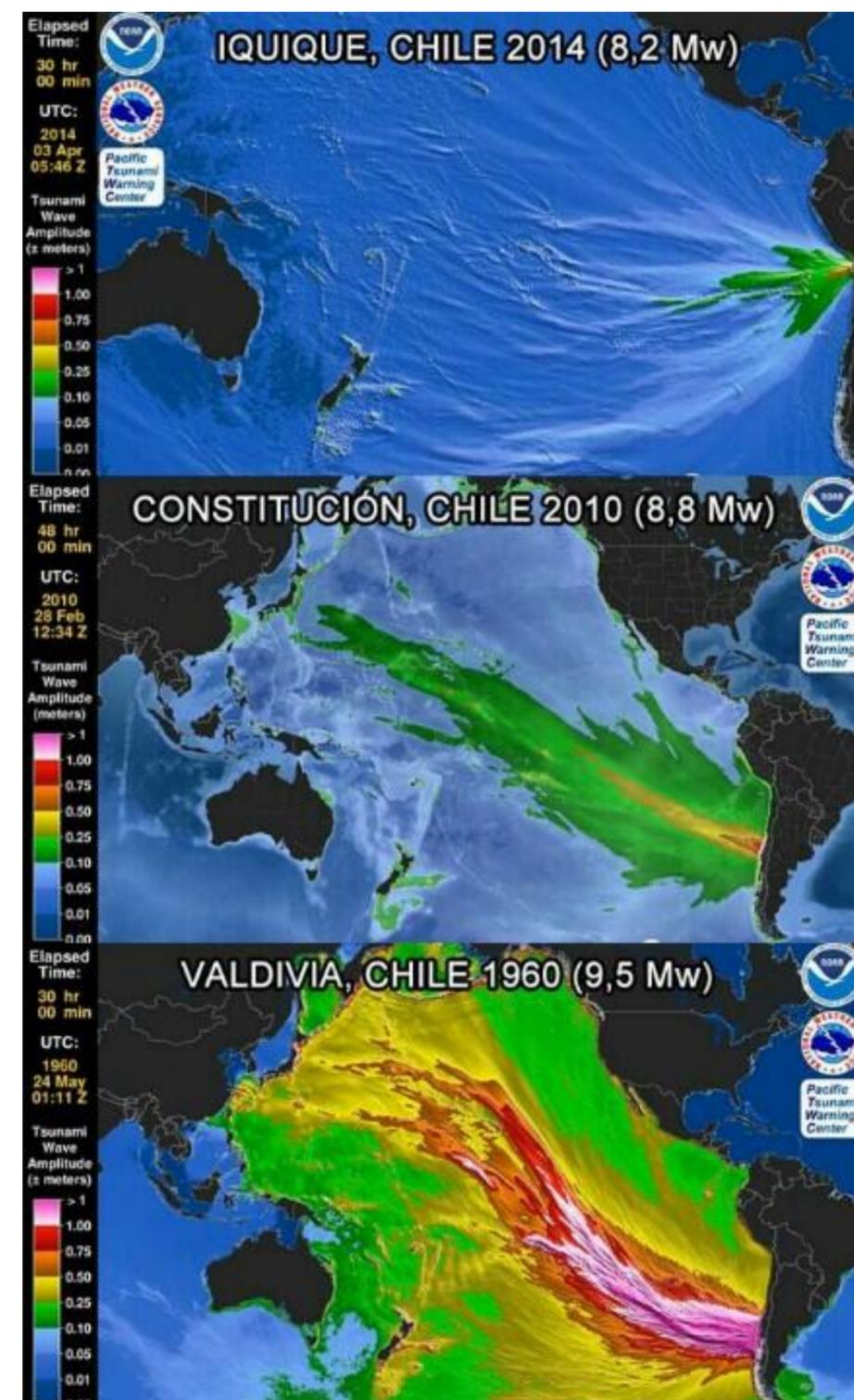


- Un terremoto Mw 7.8 en el sur de Alaska generó una remoción en masa en una de las laderas de la bahía de Lituya, generando una pared de agua de 524 m de alto, siendo la más alta registrada en la historia.
- La remoción en masa desplazó cerca de 30 millones de metros cúbicos de tierra y rocas.
- La ola del tsunami generó daños en los árboles costeros, cubriéndolos de sal y matándolos. Esto permitió después observar el run-up del tsunami alrededor de la bahía.

# Algunos tsunamis históricos importantes

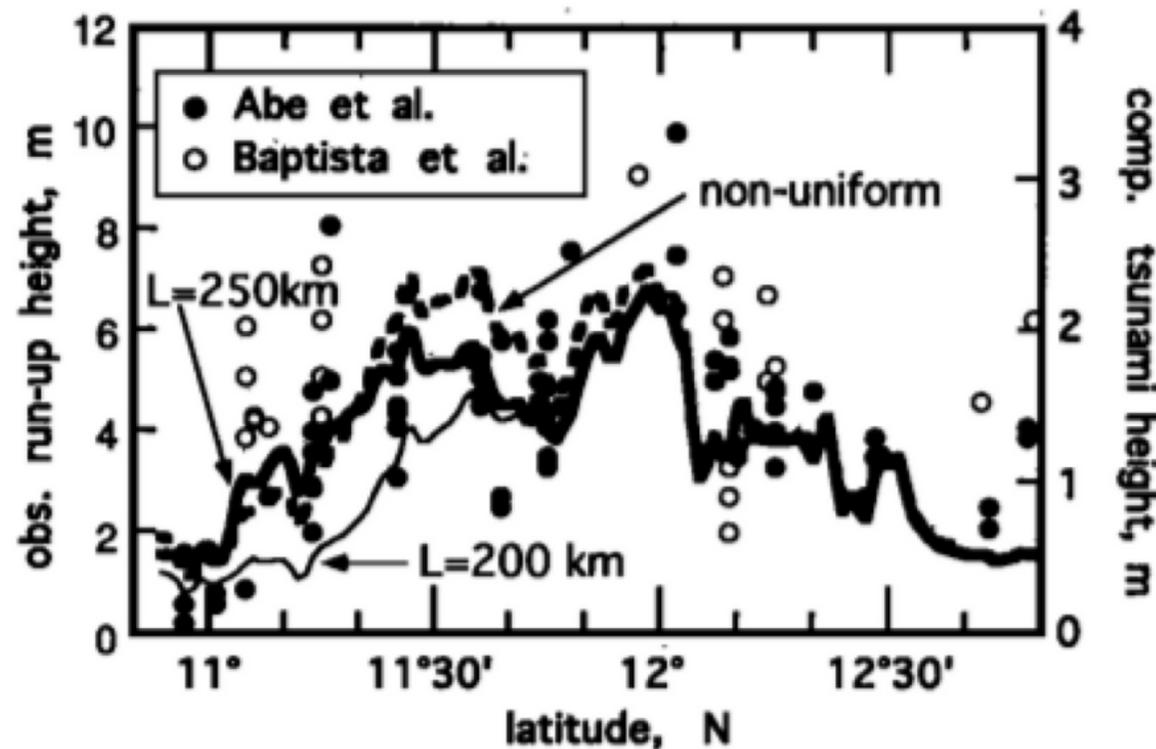
## Valdivia 1960

- El tsunami generado por el terremoto de Valdivia Mw 9.5 generó devastación en toda la costa del Pacífico.
- Cerca de Valdivia se registraron trenes de olas de entre 8-10 m de altura, las cuales mataron a cientos de personas y movieron barcos hasta 1.5 km tierra adentro.
- En Rapa Nui el tsunami arribó con olas de 10 m .
- 15 hs después, los frentes de ondas llegaron a Hawái con alturas de 10 m y matando a 61 personas en Hilo.
- Finalmente el tsunami llegó a Japón con olas de hasta 6 m de alto matando a 139 personas.
- También se registraron muertes en Filipinas y California.
- La ocurrencia de este tsunami motivó la creación del centro de alerta de tsunamis del Pacífico (PTWC), por sus siglas en inglés, con sede en Hawaii



# Algunos tsunamis históricos importantes

## Nicaragua 1992

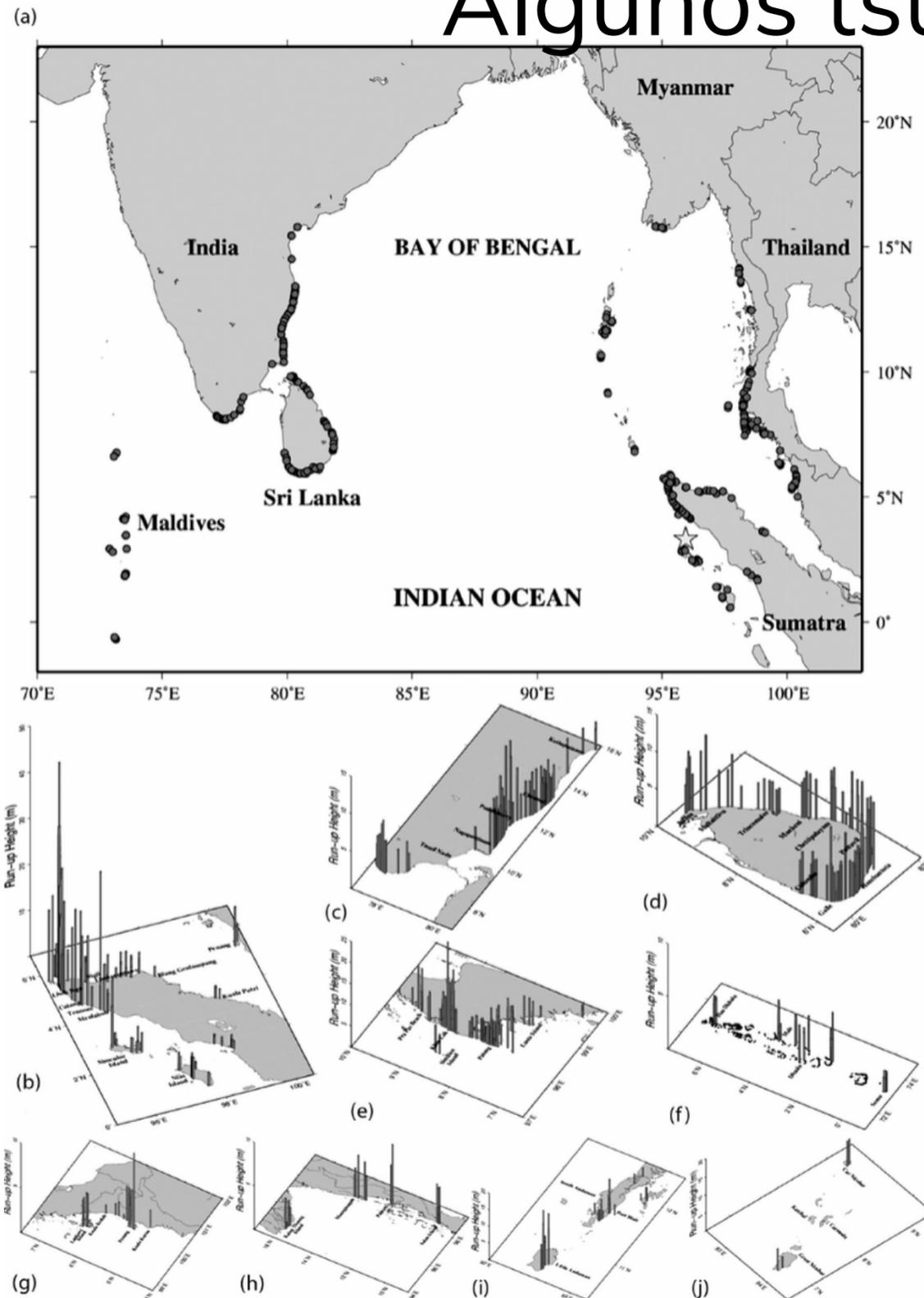


Satake (1994) Comparación del Run-Up v/s latitud observado y modelado usando distintos métodos

- Ocurrió el 1 de Septiembre de 1992 después de un terremoto de baja intensidad de Mercalli (III).
- El tsunami que se generó fue mucho mayor al esperado por la magnitud de ondas superficiales del sismo  $M_s=7.2$ , matando a más de 1700 personas, la mayoría niños.
- El periodo de atenuación del sismo fue mucho más largo del esperado por su magnitud ( $T= 100$  s)
- Satake (1994) propuso que el tipo de sismo ocurrido aquí fue un *tsunami earthquake*, los cuales se caracterizan por tener velocidades de ruptura mucho menores a las esperadas, lo que puede amplificar mucho la altura de las olas.

# Algunos tsunamis históricos importantes

## Sumatra-Andamar 2004



- Este tsunami fue generado por un terremoto Mw 9.3, con una ruptura de más de 1300 km de largo, y siendo el segundo terremoto más grande registrado.
- El tsunami generado golpeó todo el océano Indico, siendo especialmente destructivo en la bahía de Bengala, en donde se registraron run-ups de hasta 45 m de altura al norte de Sumatra.
- Hasta ahora ha sido el tsunami más mortífero del que se tenga registro, provocando la muerte de más de 280.000 personas.

# Algunos tsunamis históricos importantes

## Tohoku 2011

- Ocurrió el 11 de marzo del 2011 luego de un sismo Mw 9.1.
- El tsunami registró alturas máximas de hasta 40.5 m.
- En total se contabilizan más de 18.400 muertos y cientos de desaparecidos.
- La destrucción dejada por el tsunami fue observable también en Hawaii, California y Oregon.
- El tsunami destruyó parte de la planta nuclear de Fukuchima, provocando la explosión de uno de los reactores nucleares, por lo que se tuvo que evacuar a más de 45.000 personas en el área afectada.



# Algunos tsunamis históricos importantes

## Tohoku 2011

