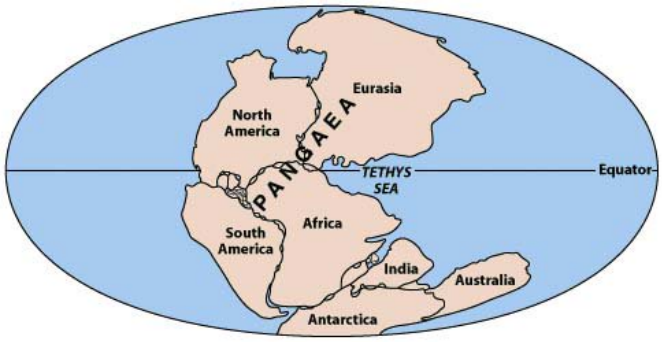
Tema 3: PROCESOS INTERNOS: TECTÓNICA DE PLACAS

CONTENIDOS DEL TEMA:

1. De la separación de los continentes a la tectónica de placas
2. Bordes divergentes
3. Bordes convergentes
4. Bordes transformantes
5. Pruebas de la tectónica de placas
6. Medición del movimiento de las placas
7. Agentes implicados en el movimiento
8. Evolución de las placas
9. Terremotos
10. Terremotos y tectónica
11. Interior de la Tierra

LA SEPARACIÓN DE LOS CONTINENTES: WEGENER

La imagen muestra una representación del supercontinente **Pangea**, que existió hace aproximadamente 335 millones de años, antes de comenzar a fragmentarse.



Qué nos quiere transmitir

- **Wegener** propuso en 1915 que todos los continentes estuvieron unidos en un bloque llamado **Pangea**.
- Pangea empezó a fragmentarse hace **200 millones de años**.
- Los continentes se desplazaron hasta su posición actual.
- Entre ellos hoy hay **corteza oceánica**, no solo mares.
- La fragmentación de Pangea dio lugar a la formación de nuevos océanos y mares, y alteró significativamente los climas globales.

De esta manera se empieza a profundizar en la idea fundamental: **los continentes se mueven**.

Evidencia 1: AJUSTE GEOMÉTRICO

Aquí vemos la famosa coincidencia entre la forma de Sudamérica y África.

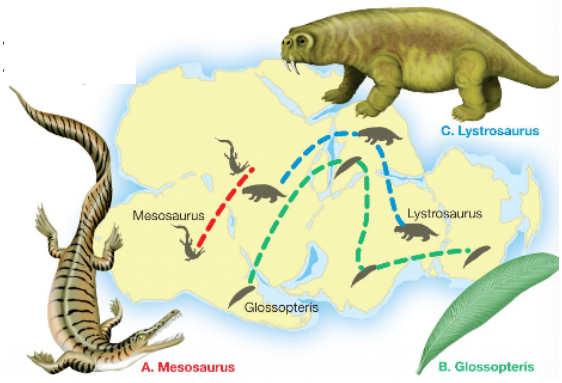


¿Esto qué probó?

- El encaje casi perfecto entre ambos continentes no es casual.
- Las pruebas de **Wegener** para la teoría de la deriva continental se agrupan en geográficas, paleontológicas, geológicas y paleoclimáticas. Estas evidencias incluyen el encaje de los continentes (especialmente África y Sudamérica), la coincidencia de fósiles y formaciones geológicas a través de océanos, y la presencia de evidencias de climas antiguos (como glaciares y depósitos de carbón) en lugares que hoy no corresponderían a esos climas. **Wegener** lo consideró una evidencia de su separación a partir de un bloque único.

Evidencia 2: <u>FÓSILES IGUALES EN LUGARES HOY SEPARADOS</u>

Especies fósiles idénticas aparecieron en continentes actualmente muy distantes. Ejemplos notables se encontraron en el reptil acuático *Mesosaurus*, cuyos fósiles se localizaron en Sudamérica y el sur de África, y el reptil terrestre *Lystrosaurus*, encontrado en África, India y la Antártida.

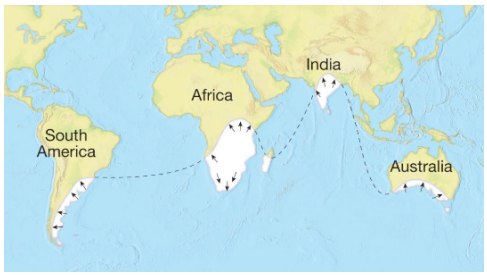


- Estos organismos no podían cruzar océanos actuales, por ello ⇒ **los continentes estaban unidos**.

Evidencia 3: <u>ROCAS Y MONTAÑAS COINCIDENTES</u>

En esta imagen se muestra similitud de rocas y estructuras geológicas de la misma edad en continentes actualmente separados y cadenas montañosas que continúan de un continente a otro (Apalaches–Caledónides).





Esto nos indica que:

- Rocas iguales y montañas alineadas aparecen en continentes separados.
- La única explicación coherente: antes estaban juntos en el mismo borde.



Evidencia 4: <u>PALEOCLIMAS</u>

Existen indicios de glaciaciones antiguas que coinciden en regiones hoy lejanas, y evidencias de climas similares en regiones actualmente muy separadas.

Ésto, ¿Qué nos indica?

- Las señales climáticas idénticas en zonas separadas, solo encaja si en el pasado estaban próximas y en otras latitudes.

<u>EL PROBLEMA DE WEGENER</u>

- Wegener tenía excelentes evidencias de su tesis, pero no pudo exponer el mecanismo científico convincente que explicara cómo los continentes se movían a través de la corteza oceánica.
- La comunidad científica rechazó su hipótesis hasta la segunda mitad del siglo XX.

<u>NACE LA TEORÍA MODERNA: TECTÓNICA DE PLACAS</u>

- Más ajustada a las evidencias científicas
- Relacionada con la capa rígida más externa de la Tierra:
  - Esa capa se denomina **Litosfera**
  - Dividida en diversas placas:
    - Las placas se mueven lentamente
    - La placa más grande es la placa pacífica
- La **Astenosfera**:
  - Es una capa de la Tierra situada bajo la litosfera

- Más caliente y deformable que la litosfera
- Permite el movimiento de la litosfera

• Los bordes de las placas:
- Las mayores interacciones entre las placas ocurren en los bordes de las placas
- Diferentes tipos de bordes:
  - Bordes convergentes o destructivos
  - Bordes divergentes o constructivos
  - Bordes de falla transformante

Resumiendo:

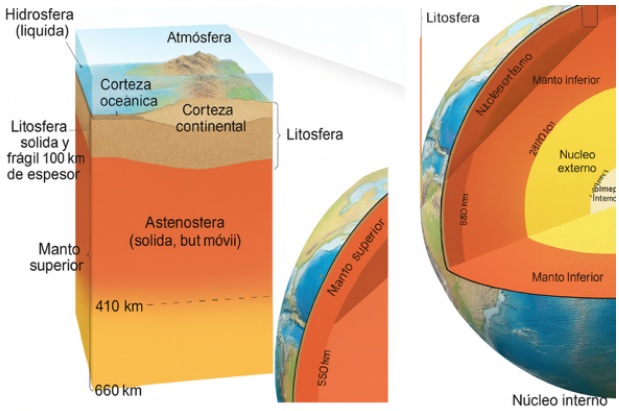
- La **litosfera** es rígida y está formada por placas.
- Estas **se mueven lentamente**.
- Bajo ellas está la **astenosfera**, más caliente y plástica, que permite el movimiento.
- Existen **tres tipos de bordes**: divergentes, convergentes y transformantes.

CORTE INTERNO DE LA TIERRA

En esta imagen se ven diferentes capas: corteza oceánica, corteza continental, litosfera, astenosfera, manto superior.

Qué quiere transmitir

- La tectónica de placas depende de la **estructura física** de la Tierra.
- El manto superior tiene partes rígidas (litosfera) y partes plásticas (astenosfera).
- La movilidad se origina por diferencias térmicas internas.

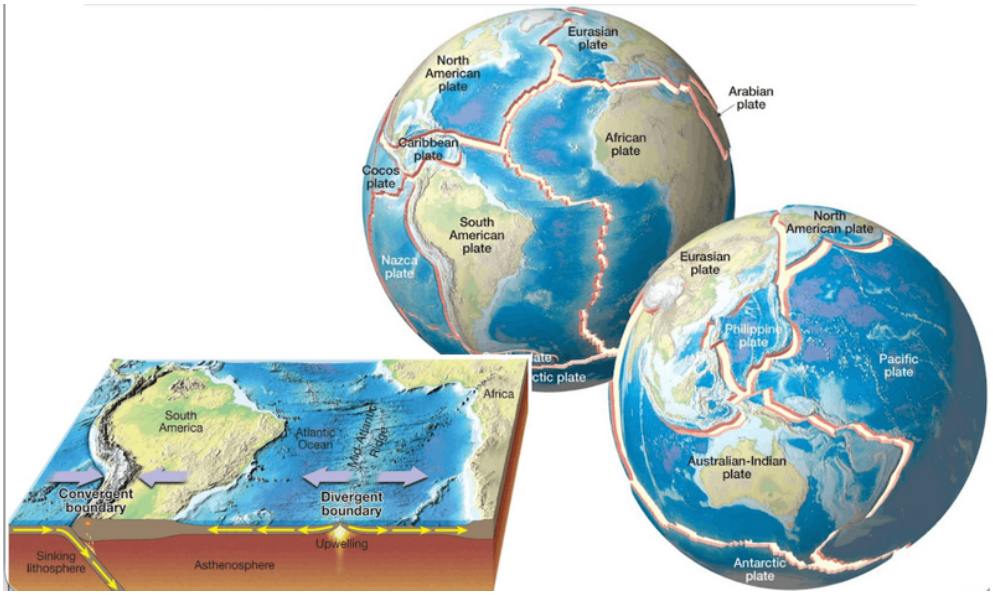


MAPA DE LAS PLACAS LITOSFÉRICAS

Aquí podemos observar placas como: Pacífica, Africana, Indo-Australiana, Sudamericana…

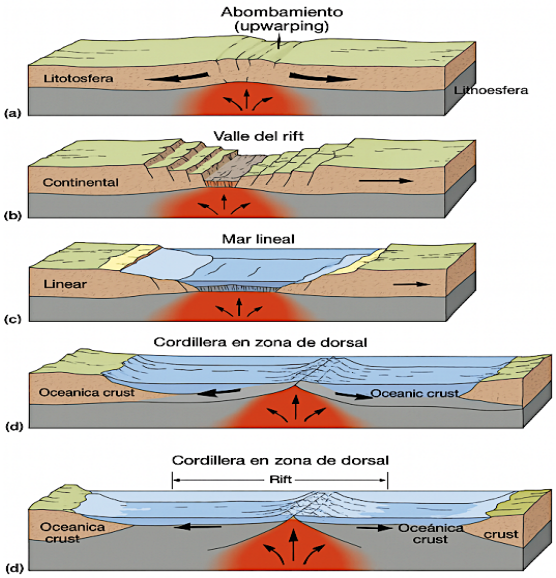
De esta manera vemos que:

- La Tierra está dividida en grandes placas.
- Se aprecia claramente dónde están los bordes y cómo encajan entre sí.
- La placa del Pacífico es la **más grande**.



BORDES DIVERGENTES CONTINENTALES: VALLES DEL RIFT

Los bordes divergentes son las **dorsales oceánicas**, donde dos placas tectónicas se separan creando nueva litosfera oceánica. Este proceso se debe al ascenso de magma desde el manto que, al solidificarse, forma corteza en forma de **expansión del fondo oceánico**. Las dorsales son "bordes constructivos" debido a esta formación de litosfera, y presentan actividad volcánica y sísmica.



Este es el proceso:

- Dos placas se separan.
- Asciende magma que forma **nueva corteza oceánica**.
- La dorsal se eleva por la disminución de presión.
- Zona volcánica, con alto flujo térmico.

Ejemplo: **Dorsal Mesoatlántica**.

- Se ve la evolución Rift → Mar Rojo → Océano Atlántico.

Separación continental:

• Se inicia por la existencia de material fundido procedente del manto que intenta alcanzar la superficie.

• La zona se deforma (hinchándose) y fracturándose, por donde se producen procesos volcánicos y el inicio de la fracturación del continente.

• Se forman valles alargados con intensa actividad volcánica (Fase Valle del Rift)

• Al extenderse, el valle puede quedar inundado formándose un mar alargado (Fase Mar Rojo)

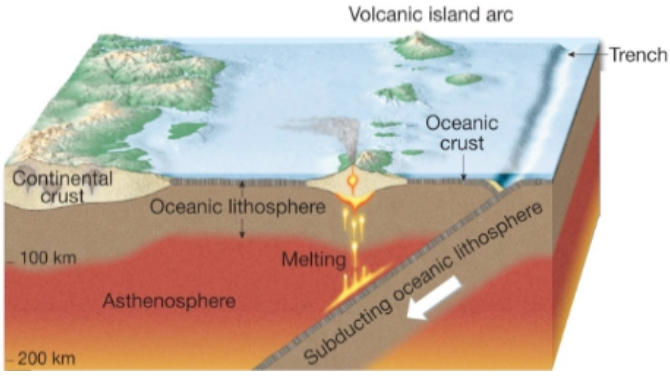
• Los bordes se separan formándose un océano entre ambas secciones (Fase Océano Atlántico)

Ejemplo clásico: **África oriental → Mar Rojo → Océano Índico**.

https://www.youtube.com/watch?v=9EyVzcq8GoI&t=724s

CONVERGENCIA OCÉANO-OCÉANO

- Este proceso geológico genera nueva corteza oceánica en las dorsales oceánicas a medida que las placas tectónicas se separan. El magma del manto asciende, se solidifica y se convierte en nueva corteza, que luego se desplaza lateralmente, arrastrando consigo a los continentes y expandiendo así las cuencas oceánicas.
- Aparecen **arcos de islas volcánicas**.

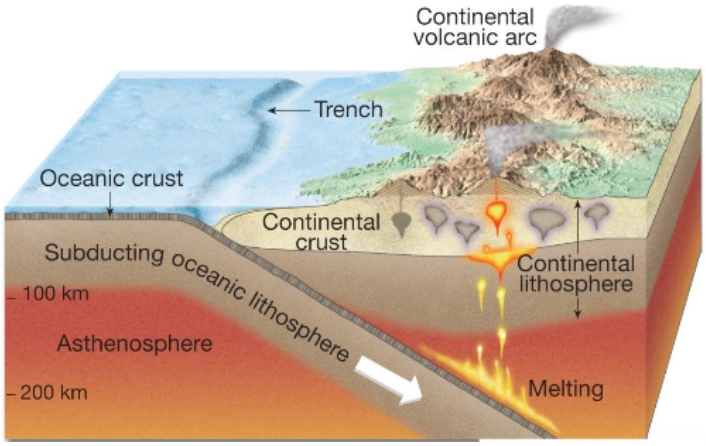


Ejemplos de islas: Marianas, de Tonga, Aleutianas.

CONVERGENCIA OCÉANO-CONTINENTE

La convergencia océano-continental ocurre cuando una placa oceánica choca con una placa continental. La placa oceánica, más densa, se hunde bajo la placa continental en un proceso llamado

subducción, formando una zona de subducción con una fosa oceánica profunda. Este proceso produce terremotos y crea una cadena de volcanes en la placa continental, conocida como arco continental.



- **Subducción:** La placa oceánica, más densa, se desliza bajo la placa continental menos densa.
- **Zona de subducción:** El área donde ocurre este hundimiento.
- **Fosa oceánica:** Se forma una fosa profunda en la zona de subducción.
- **Arco continental:** A medida que la placa oceánica se funde en el manto, el magma resultante asciende y erupciona, creando una cordillera volcánica paralela a la costa en la placa continental.
- **Terremotos:** La fricción entre las placas genera terremotos frecuentes.

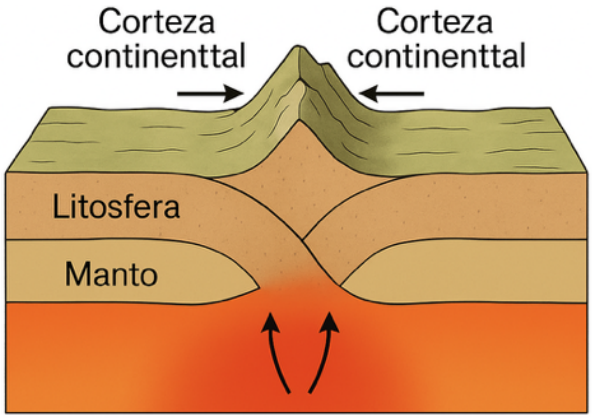
- **Ejemplo:** La Cordillera de los Andes, a lo largo de la costa occidental de Sudamérica, es un ejemplo de este tipo de límite convergente.

CONVERGENCIA CONTINENTE-CONTINENTE

Esto ocurre cuando dos placas tectónicas con corteza continental chocan. Dado que ambas son de baja densidad, ninguna se hunde (subduce) bajo la otra. En su lugar, el material es empujado hacia arriba, formando grandes cordilleras montañosas y generando plegamientos y deformaciones en las rocas. El Himalaya es un ejemplo prominente de este proceso, que resulta de la colisión entre las placas de la India y Eurasia.

⇒ **Características principales:**

- **Colisión de placas:** Dos placas con corteza continental se mueven una hacia la otra y chocan.
- **Falta de subducción:** Ninguna de las placas se hunde por completo debido a su baja densidad.
- **Formación de cordilleras:** La presión resultante del choque empuja la corteza hacia arriba, creando enormes cadenas montañosas.



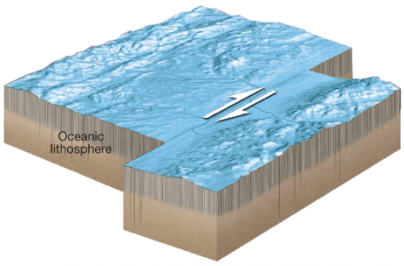
- **Plegamiento y deformación:** Las rocas se pliegan, se deforman y se metamorfosean debido a las enormes fuerzas de la colisión.
- **Ausencia de volcanes:** A diferencia de otros tipos de convergencia, no hay volcanes asociados a la colisión continental-continental, ya que la corteza es demasiado gruesa y no se produce magma que pueda atravesarla.
- **Sismos:** Se producen terremotos debido a las tensiones acumuladas en las placas durante la colisión.

Ejemplos:

- **Himalaya:** Resultado de la colisión entre la placa de la India y la placa Euroasiática.
- **Alpes:** Formados por la colisión entre las placas africana y euroasiática.
- **Pirineos y Urales:** Otros ejemplos de cordilleras formadas por este tipo de convergencia.

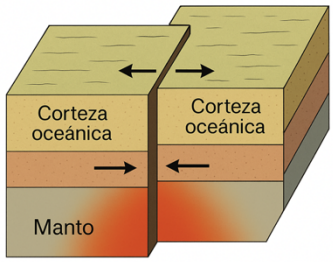
BORDES TRANSFORMANTES

Los bordes transformantes son uno de los tres tipos principales de límites de placas tectónicas.



⇒ **Características Principales:**

- **Definición:** Son límites donde dos placas tectónicas **se deslizan lateralmente** una respecto a la otra.
- **Movimiento:** El movimiento es de **desplazamiento horizontal** (falla de desgarre).
- **Litosfera:** A diferencia de los otros límites, en los bordes transformantes **ni se crea ni se destruye** litosfera (corteza). Por eso a veces se les llama **bordes pasivos**.
- **Actividad Sísmica:** Son zonas de alta actividad sísmica. El roce y la fricción entre las placas causan una gran acumulación de tensión que se libera en forma de **terremotos masivos**.



Ejemplo Famoso:

El ejemplo más conocido a nivel mundial de un borde transformante es la **Falla de San Andrés** en California, Estados Unidos.

- En esta falla, la **Placa del Pacífico** se desliza junto a la **Placa de Norteamérica**.

https://www.youtube.com/watch?v=A8pwd35-ahE

PRUEBAS: SONDEOS OCEÁNICOS

Las pruebas que sustentan la **Teoría de la Tectónica de Placas** se clasifican principalmente en evidencias basadas en la **Deriva Continental** (propuesta por **Alfred Wegener**) y evidencias posteriores que explican el **mecanismo** del movimiento en el fondo oceánico.

⇒ **Pruebas Oceánicas (Expansión del Fondo Marino)**

Estas evidencias surgieron después de la Segunda Guerra Mundial gracias al mapeo de los fondos marinos y explicaron el motor del movimiento de las placas.

- **Bandeado Magnético (Paleomagnetismo):** Las rocas volcánicas en el fondo oceánico registran la polaridad del campo magnético terrestre en el momento de su formación. Se observan **bandas simétricas** de magnetización normal e invertida a ambos lados de las **dorsales oceánicas**, lo que indica que se está creando nueva corteza de manera constante y simétrica en el centro de la dorsal.
- **Edad de la Corteza Oceánica:** La edad de las rocas del fondo marino aumenta progresivamente **a medida que nos alejamos de la dorsal oceánica**. Las rocas más jóvenes se encuentran justo en el eje de la dorsal, mientras que las más antiguas (de hasta unos 200 millones de años) están cerca de las zonas de subducción, y los sedimentos más antiguos del océano tienen <180 Ma.
- **Distribución de Sismos y Volcanes:** La gran mayoría de la actividad sísmica (terremotos) y volcánica en el mundo **no se distribuye al azar**, sino que se concentra a lo largo de estrechas franjas que delimitan las placas tectónicas (los bordes de placa).
- **Medición Directa del Movimiento:** Tecnologías modernas como el **GPS** y la interferometría de muy larga base (VLBI) permiten medir con precisión y en tiempo real el movimiento actual de las placas, confirmando que se desplazan a velocidades que varían entre 1 y 16 cm al año.

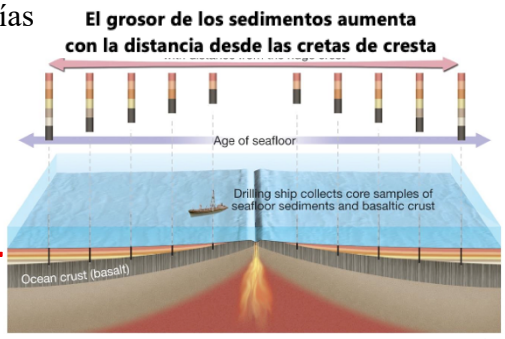
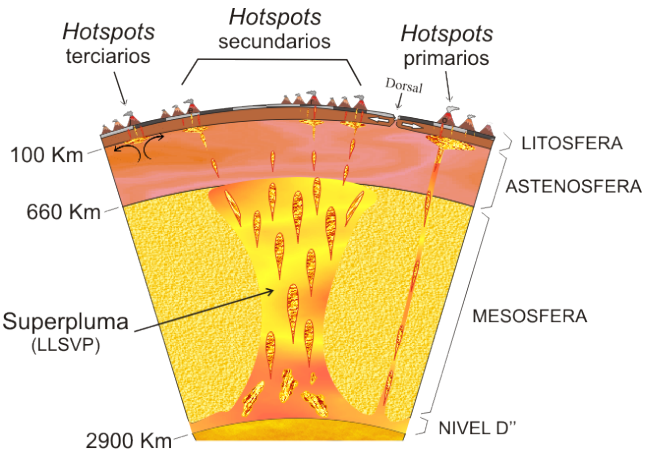


Imagen del espesor de los sedimentos respecto a la dorsal

PUNTOS CALIENTES Y PLUMAS DEL MANTO

Las **plumas del manto** y los **puntos calientes** son fenómenos de **vulcanismo intraplaca** que proporcionan una explicación para la actividad volcánica que ocurre lejos de los límites de las placas tectónicas.



⇒ **Plumas del Manto**

Una pluma del manto es una **columna ascendente de material caliente y menos denso** que se origina en las profundidades del manto terrestre, posiblemente cerca del límite entre el núcleo y el manto (capa D").

- **Composición y Movimiento:** Aunque el material es caliente, se considera que asciende en **estado sólido** y no líquido, comportándose como una corriente de convección vertical.
- **Morfología:** Se piensa que tienen una estructura de "hongo", con una **cabeza** más ancha (la parte superior que choca con la litosfera) y un **conducto** estrecho o **cola** que la conecta con su origen profundo.
- **Efecto:** Al alcanzar la base de la litosfera, la disminución de la presión (descompresión) sobre el material caliente de la cabeza de la pluma provoca su **fusión parcial**, generando grandes volúmenes de **magma** (generalmente basáltico).

⇒ **Puntos Calientes**

Un punto caliente es la **manifestación superficial** o el lugar donde el magma generado por una pluma del manto perfora la litosfera y produce vulcanismo.

- **Ubicación Fija:** Se cree que, en general, los puntos calientes o su fuente (la pluma) permanecen en una **posición relativamente fija** en el manto profundo durante millones de años.
- **Vulcanismo Intraplaca:** Son la causa del vulcanismo que no está asociado con la expansión de las dorsales (límites divergentes) o la subducción (límites convergentes).
- **Formación de Cadenas Volcánicas:** Debido a que la pluma del manto se mantiene fija mientras que la **placa litosférica suprayacente se mueve** sobre ella, el punto caliente crea una **cadena de volcanes alineados**. Los volcanes más activos son los que están directamente sobre la pluma, mientras que los más antiguos se van extinguiendo a medida que son arrastrados por el movimiento de la placa.

- **Ejemplos Famosos:**
  - **Islas Hawái (Oceánica):** La cadena Hawái-Emperador es el ejemplo clásico del movimiento de la Placa del Pacífico sobre un punto caliente fijo.
  - **Yellowstone (Continental):** Un punto caliente debajo de la Placa de Norteamérica, responsable de un sistema volcánico muy grande y complejo.

Este video ilustra muy bien cómo el movimiento de la placa sobre la pluma del manto da lugar a una cadena de islas volcánicas como Hawái:

https://www.youtube.com/watch?v=yEptxU08yf8

PALEOMAGNETISMO

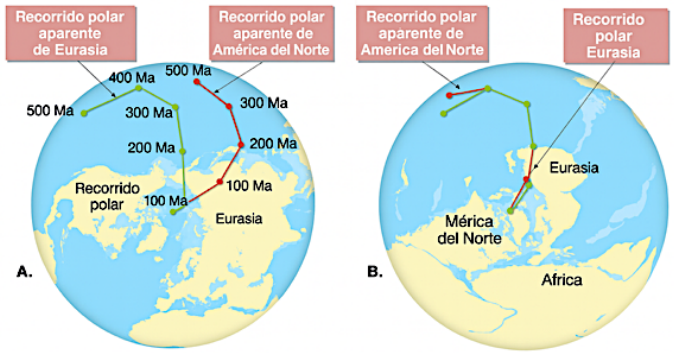
El **Paleomagnetismo** es la disciplina geofísica que estudia el **campo magnético terrestre registrado en las rocas** a lo largo de la historia geológica. Es una de las pruebas más sólidas y fundamentales de la Teoría de la Tectónica de Placas, especialmente para validar la hipótesis de la **expansión del fondo oceánico**.

⇒ Principios Clave del Paleomagnetismo

- **Magnetismo Remanente:** Ciertas rocas, especialmente las volcánicas (ígneas) ricas en minerales ferromagnéticos como la **magnetita**, conservan un registro del campo magnético de la Tierra en el momento de su formación.
- **Punto de Curie:** Cuando el magma se enfría y solidifica por debajo de una temperatura crítica (el **punto de Curie**), los minerales magnéticos se **alinean** con la dirección y la polaridad del campo geomagnético de ese instante. Esta orientación queda "congelada" en la roca, constituyendo su **magnetismo termorremanente**.
- **Polaridad Magnética:** A lo largo de la historia de la Tierra, el campo magnético ha experimentado **inversiones periódicas** de polaridad. Es decir, los polos Norte y Sur magnéticos han intercambiado sus posiciones de forma irregular, alternando entre polaridad **normal** (similar a la actual) y **reversa**.

⇒ Evidencia de la Expansión del Fondo Oceánico

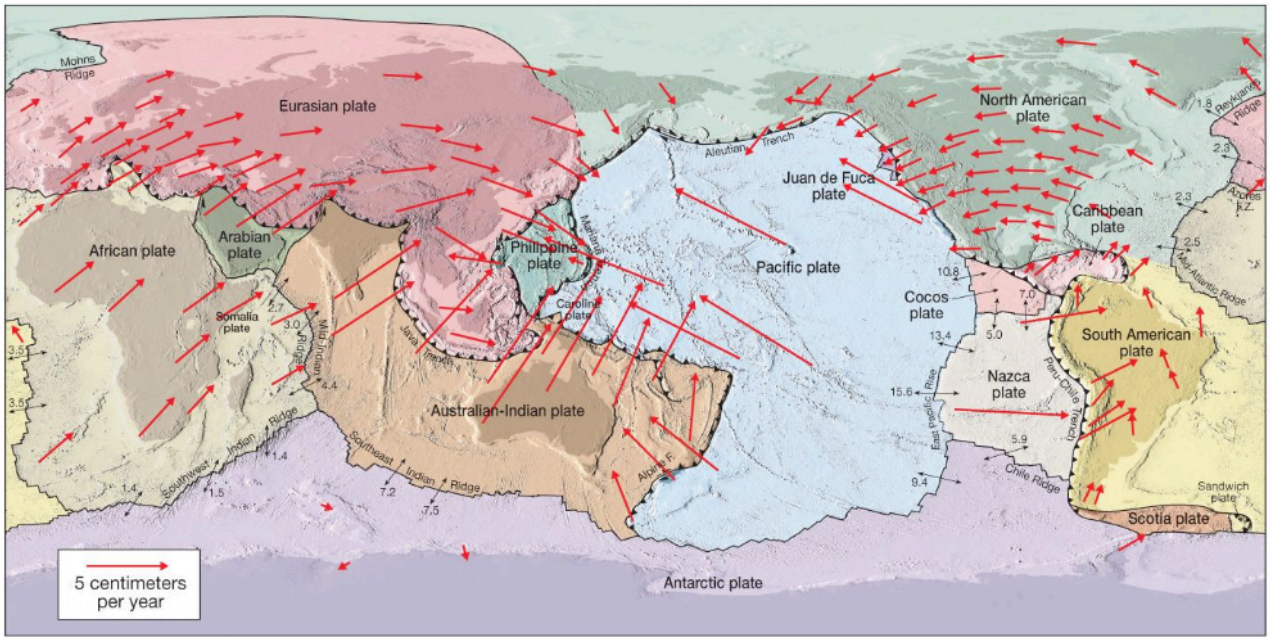
El mayor aporte del paleomagnetismo a la Tectónica de Placas es la evidencia de las **bandas magnéticas simétricas** en el fondo oceánico, que demuestran el proceso de creación de nueva corteza en las dorsales oceánicas.



1. **Formación en la Dorsal:** En el eje de una dorsal oceánica (límite divergente), el magma asciende, se enfría y se solidifica, registrando la polaridad magnética del momento.
2. **Desplazamiento:** A medida que las placas se separan, esta nueva corteza se mueve lateralmente, y nuevo magma asciende para formar más corteza en el centro.
3. **Patrón Simétrico:** Dado que las inversiones de polaridad son un fenómeno global, la corteza formada durante un período de polaridad **normal** deja una franja de magnetización normal, y la formada durante una polaridad **reversa** deja una franja de magnetización inversa. Este proceso se repite, creando un patrón de **bandas paralelas y simétricas** a ambos lados de la dorsal.
4. **Confirmación:** La coincidencia de las franjas magnéticas del fondo marino con la escala de tiempo de las inversiones magnéticas conocidas, combinada con la datación radiométrica de las rocas, probó que la corteza es más joven cerca de la dorsal y más antigua a medida que se aleja. Esto es la prueba directa y cuantitativa de que el **fondo oceánico se está expandiendo**.

- **Resumen:**
  - El campo magnético se invierte periódicamente.
  - Las bandas magnéticas alternadas a ambos lados de la dorsal son **idénticas**.
  - Es la prueba absoluta de que el suelo oceánico **se expande** desde la dorsal.

MEDICIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS PLACAS



⇒ **Qué quiere transmitir**

- Las flechas rojas muestran las direcciones de desplazamiento.
- Hoy se mide con **GPS e interferometría**.
- Las placas se mueven 5 centímetros al año por cada 1,5 centímetros representados en las flechas.

AGENTES IMPLICADOS EN EL MOVIMIENTO

⇒ **Mecanismos de la tectónica de placas**

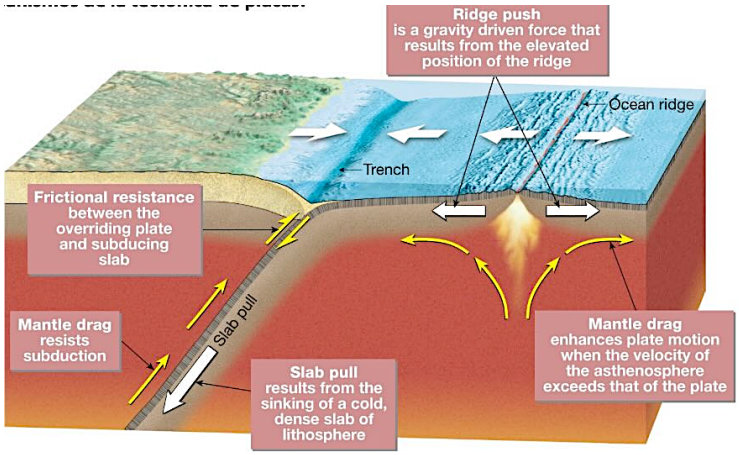
El movimiento de las placas tectónicas es impulsado por la **energía térmica** interna de la Tierra, lo que genera un sistema de circulación en el manto que, a su vez, mueve la litosfera.

Los mecanismos principales son una combinación de fuerzas gravitacionales que "empujan" y "tiran" de las placas, además del flujo del manto que las "arrastra".

1. Convección del Manto (La Fuerza Subyacente)

La **convección del manto** es la fuerza impulsora básica y fundamental.

- **Ciclo de Calor:** El calor generado en el núcleo y el manto inferior (principalmente por la desintegración radiactiva de elementos) provoca que el material del manto (roca sólida, pero plástica a largo plazo) se caliente, se vuelva menos denso y **ascienda**.
- **Corrientes:** Cerca de la litosfera, el material se enfría, se vuelve más denso y **desciende** nuevamente, creando un ciclo de corrientes de convección.



- **Movimiento de Placa:** Estas corrientes lentas y deslizantes actúan como una "cinta transportadora" que **arrastra** (o, más precisamente, facilita el movimiento de) la litosfera suprayacente, siendo el motor inicial del movimiento.

2. Tracción de Losa (Slab-Pull)

Esta es considerada por muchos investigadores como la **fuerza dominante** que impulsa el movimiento de las placas más rápidas.

- **Proceso:** Ocurre en los **límites convergentes** donde la litosfera oceánica (la "losa" o *slab*) se enfría con la edad y se vuelve más densa que la astenosfera subyacente.
- **Gravedad:** Debido a su mayor densidad, la losa se hunde bajo la otra placa en el proceso de **subducción**, y la fuerza de la gravedad la **tira hacia abajo** en el manto.

- **Efecto:** Este "tirón de la losa" arrastra consigo el resto de la placa conectada, actuando como un ancla pesada que jala la placa completa.

3. Empuje de la Dorsal (Ridge-Push)

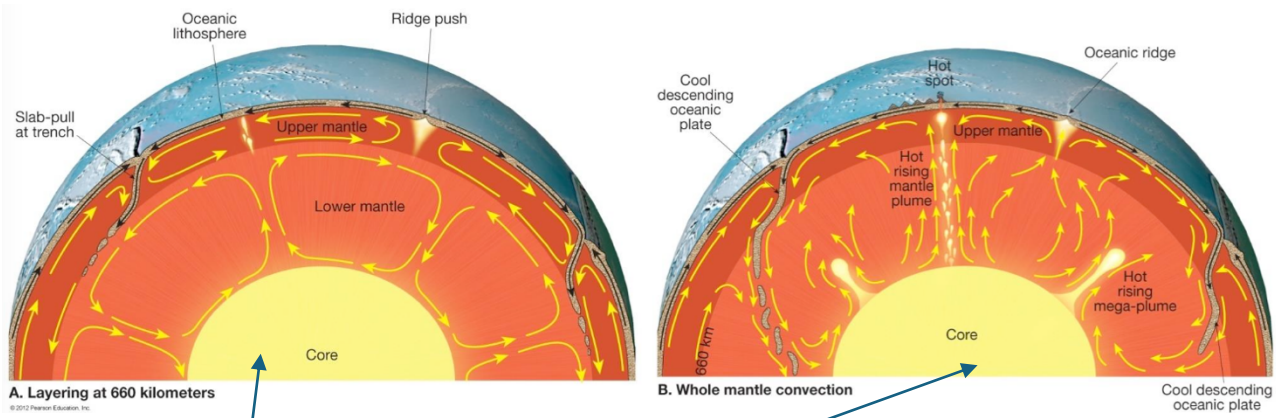
Esta fuerza complementa el movimiento, actuando como un mecanismo que "empuja" la placa desde su lugar de origen.

- **Proceso:** Se produce en los **límites divergentes** (dorsales oceánicas) donde el material caliente del manto asciende y crea nueva corteza.
- **Elevación:** La corteza recién formada es caliente, menos densa y, por lo tanto, se **eleva topográficamente** por encima del fondo oceánico circundante.
- **Gravedad:** La gravedad hace que esta porción elevada de la placa se deslice o **empuje lateralmente** hacia afuera desde la cresta de la dorsal, forzando a la placa entera a moverse.

https://www.youtube.com/watch?v=AUPBLNWsKUg

En resumen, el movimiento de las placas es un sistema complejo donde la **Tracción de Losa** (tirón hacia abajo en las zonas de subducción) y el **Empuje de la Dorsal** (empuje hacia afuera en las dorsales) son las fuerzas gravitacionales directas que actúan sobre la placa litosférica, mientras que la **Convección del Manto** es el motor térmico subyacente que genera el movimiento general.

CONVECCIÓN DEL MANTO



Esta imagen ilustra dos modelos de **convección del manto** terrestre, que es el proceso por el cual el calor interno de la Tierra asciende y se transfiere moviendo el manto impulsando la tectónica de placas.

- El modelo A muestra la "convección por capas a 660 kilómetros", donde las células de convección están confinadas al manto superior y al manto inferior por separado.
- El modelo B representa la "convección de todo el manto", donde las plumas calientes ascendentes desde cerca del núcleo y las placas oceánicas frías descendentes (subducción) circulan a través de todo el manto.
- Ambos modelos muestran mecanismos clave de la tectónica de placas, como el "*slab-pull*" (tirón de la losa en la trinchera) y el "*ridge push*" (empuje de la dorsal oceánica).

- La convección del manto es un proceso fundamental que ha influido en la evolución de la Tierra y la formación de su superficie

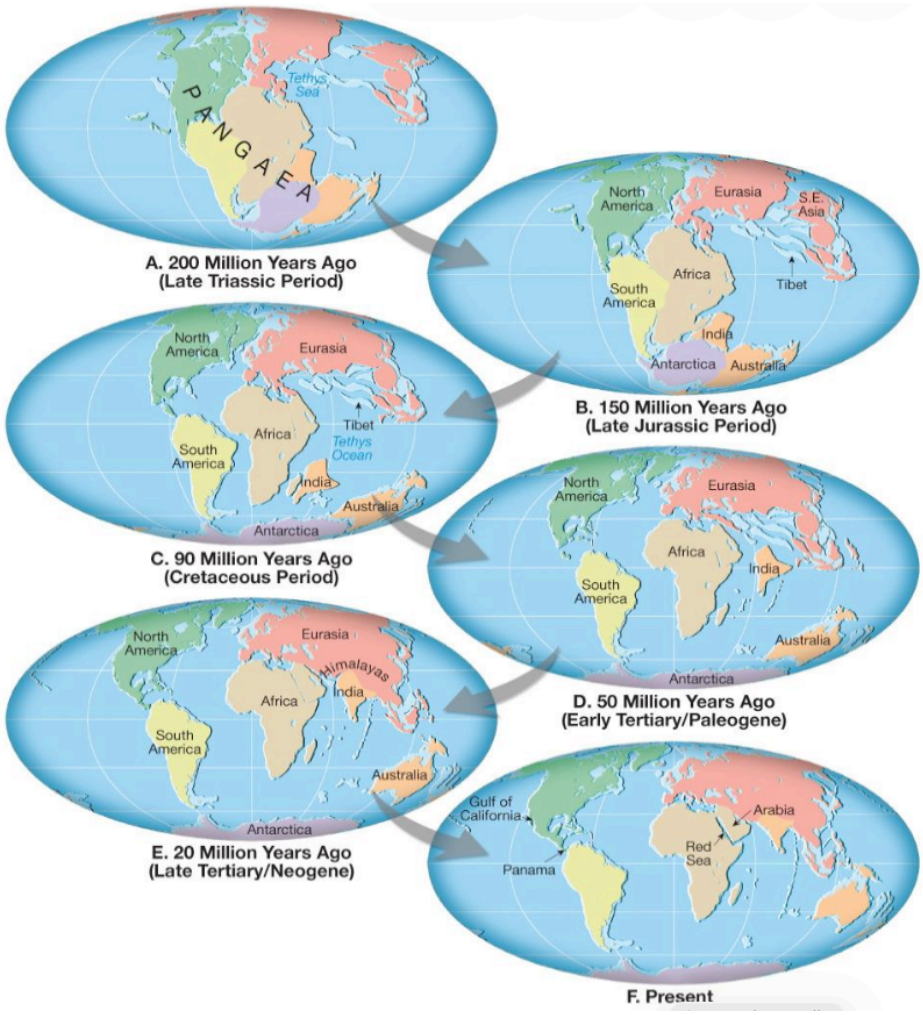
  ⇒ Esta teoría que muestra el profesor no toma partido: solo muestra la complejidad real.

EVOLUCIÓN DE LAS PLACAS

Aquí se presenta la secuencia desde hace 200 Ma hasta hoy.

- De esta manera podemos ver de forma más clara que la Tierra es dinámica:
  ⇒ Pangea → Jurásico → Cretácico → Terciario → Actualidad.

- Puede visualizarse cómo los continentes se han ido separando y chocando.



TERREMOTOS: CONCEPTO, ONDAS Y SISMOGRAMAS

- Un terremoto es una vibración de la Tierra que se produce por una liberación rápida de energía.
- La energía liberada se distribuye de forma radial en todas las direcciones desde el foco.
- El epicentro es el punto de la superficie del planeta situado directamente sobre el foco del terremoto.
- La energía se traslada en forma de ondas.
- Esta energía puede ser registrada por instrumentos científicos situados alrededor de todo el mundo.
- Los terremotos suelen estar asociados a grandes facturas (fallas) en la corteza del Planeta.
- Gran parte de los movimientos de las fallas pueden ser explicados por la Tectónica de placas.



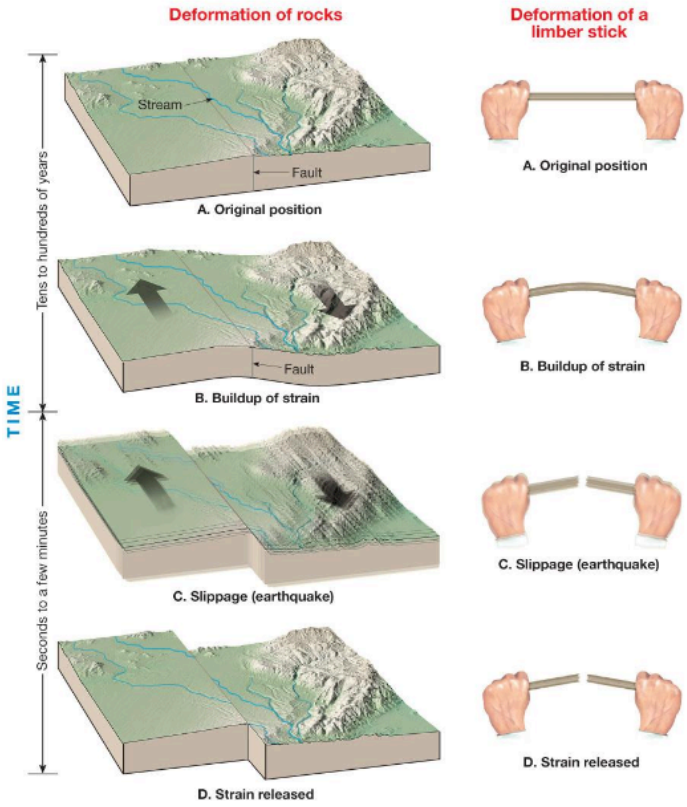
Terremoto de San Francisco

⇒ **Mecanismos**:

• El rebote elástico:

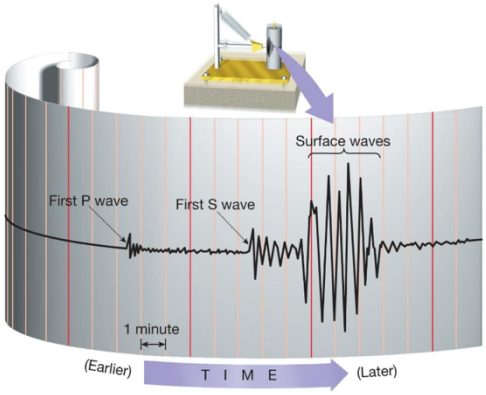
- Las rocas a ambos lados de una falla se deforman almacenando energía elástica.
- Esta energía se libera cuando es mayor que la resistencia y la fricción entre las rocas de la falla.

- Precursores y réplicas:
  - En ocasiones se producen liberaciones parciales de la energía (precursores)
  - Tras el terremoto principal, pueden producirse reajustes y liberaciones secundarias de energía que provocan terremotos denominados réplicas.



⇒ **La sismología**

- El estudio de los terremotos comenzó hace unos 2000 años en China.



- Los sismógrafos son instrumentos científicos que registran las ondas generadas por el terremoto.
- Registran el movimiento de una masa fija sobre un tambor que va girando.
- Existen distintos tipos de sismógrafos, capaces de medir las ondas en 1, 2 o 3 componentes espaciales (X, Y, Z).

⇒ Los registros se denominan sismogramas.

⇒ **Ondas Sísmicas**

Las **ondas sísmicas** son oscilaciones o vibraciones que se propagan desde una fuente (como un terremoto o una explosión) a través de un medio elástico (la Tierra), transportando **energía mecánica**.

Se clasifican en dos grandes grupos: **Ondas de Cuerpo** (que viajan por el interior) y **Ondas Superficiales** (que viajan por la superficie).

1. Ondas de Cuerpo (Internas)

Se originan en el **hipocentro** o foco del sismo y viajan a través de las capas internas de la Tierra. Son cruciales para estudiar la estructura interna del planeta.

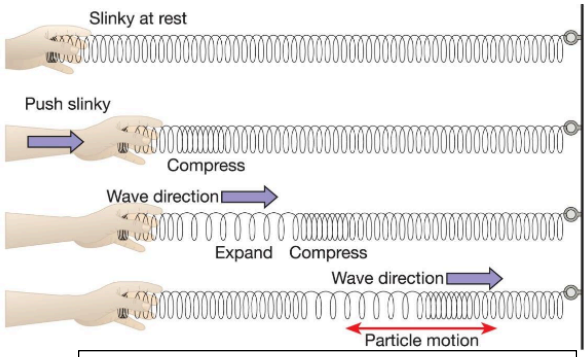
A. Ondas P (Primarias)

- **Velocidad:** Son las **más rápidas** (de ahí su nombre, Primarias), siendo las primeras en ser registradas por un sismómetro.
- **Movimiento:** Son ondas **longitudinales** (o de compresión). Las partículas de roca se comprimen y dilatan en la **misma dirección** en la que viaja la onda, de forma similar al sonido.
- **Medios:** Pueden viajar a través de **sólidos, líquidos y gases**. Su velocidad cambia según el medio que atraviesan (refracción).

B. Ondas S (Secundarias)

- **Velocidad:** Son **más lentas** que las Ondas P, llegando en segundo lugar al sismómetro.

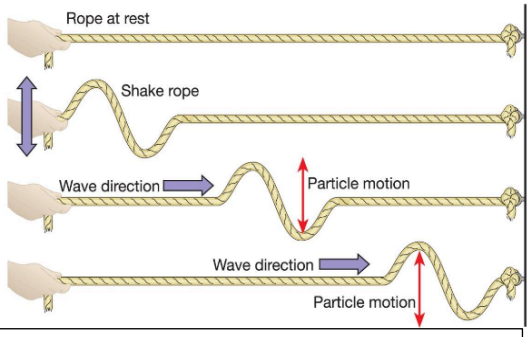
- **Movimiento:** Son ondas **transversales** (o de cizalla). Las partículas se mueven **perpendicularmente** a la dirección de propagación de la onda, creando un movimiento de cizallamiento.
- **Medios:** Solo pueden viajar a través de **sólidos**. Su incapacidad para atravesar medios líquidos (como el núcleo externo terrestre) fue una prueba fundamental para determinar la composición interna de la Tierra.



Ondas P generadas usando un slinky

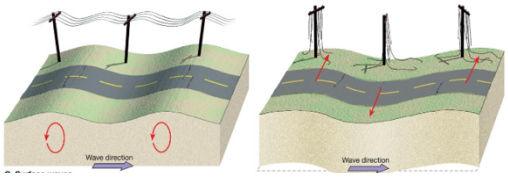
2. Ondas Superficiales

Se generan cuando las Ondas P y S alcanzan la superficie de la Tierra (el **epicentro**) y se propagan a lo largo de ella. Son las **más lentas**, pero generalmente las que causan el **mayor daño** estructural.



Ondas S generadas usando una cuerda

A. Ondas de Love (L)



- **Movimiento:** Hacen que el suelo se mueva **horizontalmente** (de lado a lado) de forma perpendicular a la dirección de propagación.
- **Efecto:** Causan desplazamientos laterales del terreno.

B. Ondas de Rayleigh (R)

- **Movimiento:** Generan un movimiento **elíptico y retrógrado** en el suelo, similar a las olas del mar.
- **Efecto:** Producen un movimiento ondulante vertical y horizontal que disminuye con la profundidad.

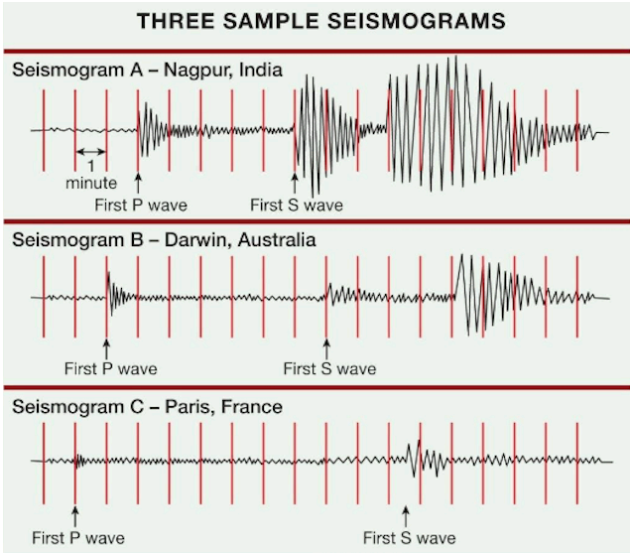
Característica	Onda P (Primaria)	Onda S (Secundaria)	Ondas Superficiales
Velocidad	Más rápida	Intermedia (aprox. la mitad de P)	Más lenta
Tipo de Onda	Longitudinal (Compresión)	Transversal (Cizalla)	Compleja (Love y Rayleigh)
Medio de Propagación	Sólido, Líquido, Gas	Solo Sólido	Superficie
Poder Destructivo	Bajo	Moderado	**Alto**

Concretando:

- Los terremotos son liberaciones bruscas de energía acumulada por deformación.
- Las ondas P y S viajan por el interior; las superficiales causan los daños.
- Los sismógrafos permiten estudiar el interior del planeta.

⇒ **LOCALIZACIÓN DEL EPICENTRO**

Esta imagen nos muestra el **método completo para localizar el epicentro de un terremoto** usando **sismogramas**, **curvas tiempo–distancia**, y finalmente **triangulación** sobre el globo.



1. Los sismogramas (izquierda) proporcionan esta información:

Vemos **tres sismogramas reales** procedentes de tres estaciones situadas en lugares muy distantes:

- **Nagpur, India**
- **Darwin, Australia**
- **París, Francia**

Cada sismograma tiene dos marcas fundamentales:

A. Llegada de las ondas P (Primarias)

- Son las primeras que alcanzan la estación.
- Viajan más rápido.
- En el gráfico se ven como son las primeras oscilaciones más pequeñas (picos menos intensos).

B. Llegada de las ondas S (Secundarias)

- Llegan después.
- Son más lentas y producen oscilaciones más amplias.
- En los sismogramas se ve claramente un aumento de la amplitud cuando llegan las S.

→ **El dato clave que se extrae aquí:**

El tiempo que pasa entre la llegada de las P y la llegada de las S. Ese intervalo se señala claramente en los tres registros, y **nos dice a qué distancia está la estación del foco del terremoto**, pero **NO** la dirección.

Observaciones importantes:

- En Nagpur, la separación entre P y S es grande.
- En Darwin, algo menor.
- En París, todavía más pequeña.

Esto significa:

👉 Nagpur está **más lejos** del epicentro.

👉 Darwin está a **distancia intermedia**.

👉 París está **más cerca**.

2. Curva tiempo–distancia (arriba a la derecha): muestra cómo se convierte el tiempo en kilómetros:

La gráfica representa:

- **Eje vertical:** tiempo en minutos (de llegada desde el terremoto).
- **Eje horizontal:** distancia en kilómetros (o millas).
- Dos curvas: una de ondas **P** (azul) y otra de ondas **S** (roja).

→ **Con esta gráfica** se busca en el eje vertical la **diferencia de tiempo P–S** observada en cada estación.

Ejemplo (visual):

- Si la diferencia es de 5 minutos → buscamos 5 en el eje vertical.
- Allí vemos cuántos kilómetros corresponden según las curvas (se ve una línea punteada indicando un ejemplo).

Este proceso es esencial para convertir el tiempo del sismograma en **distancia exacta al epicentro**.

3. La triangulación (abajo a la derecha): localizar el epicentro:

Una vez sabemos las distancias:

- Desde Nagpur, India
- Desde Darwin, Australia
- Desde París, Francia

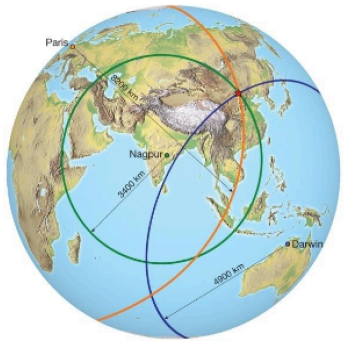
→ Cada distancia se representa en el mapa como **un círculo** alrededor de cada estación.

Regla geológica fundamental: El epicentro estará **en algún punto del círculo**, pero no sabemos en cuál.

Al dibujar tres círculos:

- Uno desde Nagpur
- Uno desde Darwin
- Uno desde París

👉 **El único punto donde los tres círculos se cruzan es el epicentro del terremoto.**



Esto se ve claramente en el globo:

- Los tres círculos (de colores distintos) se cruzan en un punto concreto.
- Ese punto es la localización precisa del terremoto.

Es el método oficial usado por todos los institutos sismológicos.

→ **Resumen riguroso del proceso completo:**

1. **Cada estación registra las ondas sísmicas.**
   Se identifica la llegada de P y después de S.
2. **Se calcula la diferencia temporal P–S.**
   Ese intervalo crece con la distancia.
3. **Se usa la gráfica tiempo–distancia** para convertir ese intervalo en kilómetros.
4. **Se trazan círculos** alrededor de cada estación con su radio correspondiente.
5. **El punto donde coinciden los tres círculos es el epicentro.**

Este método se llama **triangulación sísmica** y es la técnica estándar en sismología moderna.

⇒ **EL TAMAÑOS DE LOS TERREMOTOS: MAGNITUD E INTENSIDAD**

Existen dos formas de medir el tamaño de los terremotos:

- **Magnitud:** estima la cantidad de energía liberada en el foco del terremoto.
- **Intensidad**: mide el tamaño del terremoto en un punto determinado en función de los efectos y destrozos en superficie causados por el terremoto.

Para ello:

- Escala Richter
- Escala de Mercalli
- Magnitud del momento (Mw) es la escala moderna más fiable.

- Energía liberada
- Frecuencia de terremotos

→ **EL TAMAÑO DE LOS TERREMOTOS**:

- **Escalas de magnitud:**
  - La **Escala de Richter (ML)** está basada en la mayor amplitud de las ondas sísmicas:

$$M = \log_{10} A + 3\log_{10}(8\Delta t) - 2.92 = \log_{10}\left(\frac{A \cdot \Delta t^3}{1.62}\right)$$

  - Tiene en cuenta la disminución de la amplitud en función de la distancia al epicentro.
  - La mayor magnitud registrada ha sido de 8.9.
  - Las intensidades menores de 2 no son sentidas por el ser humano.
  - Cada unidad de la escala implica un incremento de diez veces la amplitud de la onda y 32 veces en la energía liberada.
  - La **magnitud de momento (Mw)** se determina a partir del momento sísmico, que es una cantidad proporcional al área de ruptura (i.e., al tamaño de la falla geológica que rompió) y al deslizamiento que ocurra en la falla.

Intensidad	Magnitud
I	1 a 2
II	2 a 3
III	3 a 4
IV	4
V	4 a 5
VI	5 a 6
VII	6
VIII	6 a 7
IX	7
X	7 a 8
XI	8
XII	Mayor a 8

Relación intensidad-magnitud de los sismos

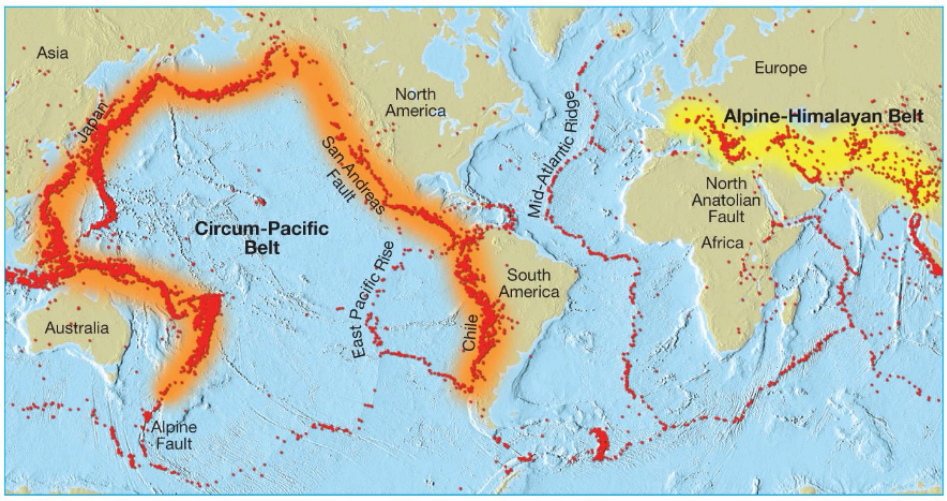
- **Escalas de intensidad:**
  - **Escala Modificada de Mercalli** desarrollada a partir del grado de destrucción de los edificios por los terremotos de California (Estados Unidos).
  - La intensidad resultante puede no mostrar el grado real del terremoto.

Escala Sísmica Modificada de Mercalli	
I. Imperceptible	Microsismo, detectado por instrumentos
II. Muy Leve	Sentido por algunas personas (generalmente en reposo)
III. Leve	Sentido por algunas personas dentro de edificios
IV. Moderado	Sentido por algunas personas fuera de edificios
V. Poco Fuerte	Sentido por casi todos
VI. Fuerte	Sentido por todos
VII. Muy Fuerte	Las construcciones sufren daño moderado
VIII. Destructivo	Daños considerables en estructuras
IX. Muy Destructivo	Daños graves y pánico general.
X. Desastroso	Destrucción en edificios bien construidos
XI. Muy Desastroso	Casi nada queda en pie
XII. Catastrófico	Destrucción total

⇒ **PREDICCIÓN Y CINTURÓN DE TERREMOTOS**

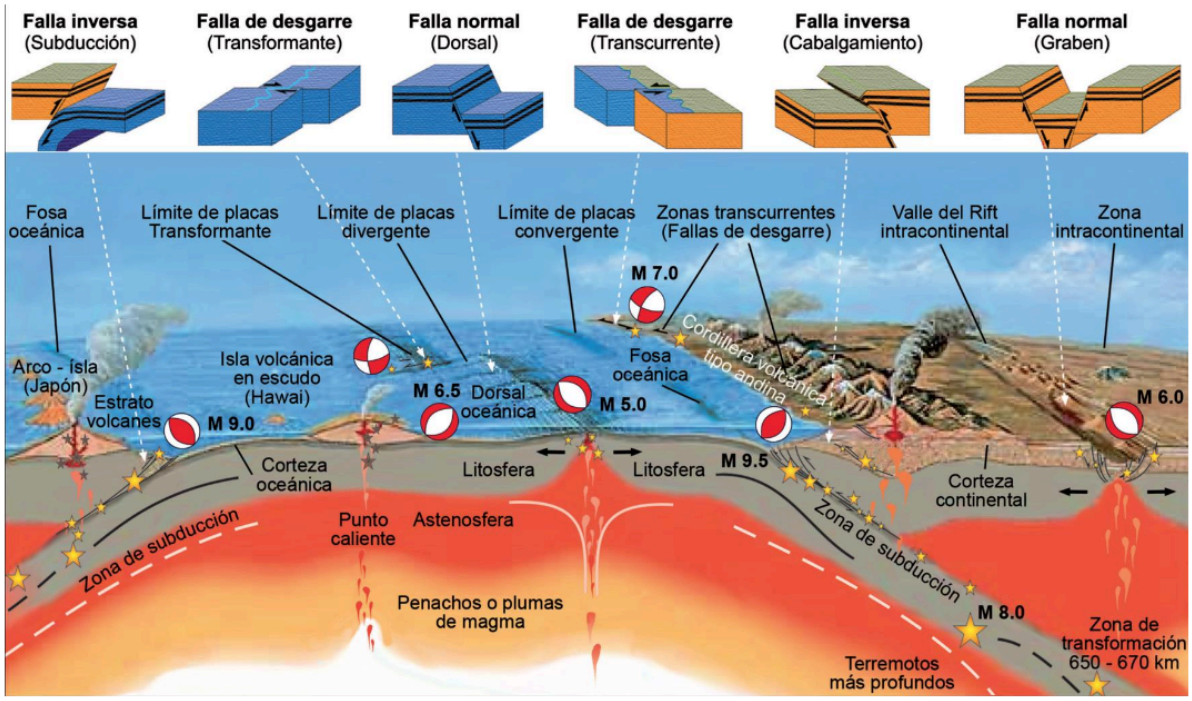
Aquí vemos el cinturón de los terremotos:

- Los terremotos grandes son difíciles de predecir.
- El 95% de la energía sísmica es liberada en:
  - El cinturón Circumpacífico, conocido como "Anillo de Fuego".
  - La región del Mediterráneo hasta el complejo de la cordillera de los Himalaya.
  - Las dorsales oceánicas.



⇒ **PROFUNDIDAD DE LOS TERREMOTOS**

- Los terremotos ocurren a profundidades de entre 5 y 700 km.
- El foco de los terremotos se clasifica en someros o superficiales (menos de 70 km de profundidad), intermedios (entre 70 y 300 km de profundidad), y profundos (más de 300 km de profundidad).
- Existen patrones en la distribución de los terremotos según su profundidad:
  - Los terremotos someros ocurren asociados a las dorsales oceánicas.
  - Prácticamente todos los terremotos profundos ocurren en el cinturón Circumpacífico y en particular a lo largo de las grandes fosas oceánicas.
- Por tanto, la distribución de los terremotos está fuertemente relacionada con los límites de las placas litosféricas y el tipo de borde.
- Esta es una de las evidencias que apoyan la teoría de la Tectónica de Placas.



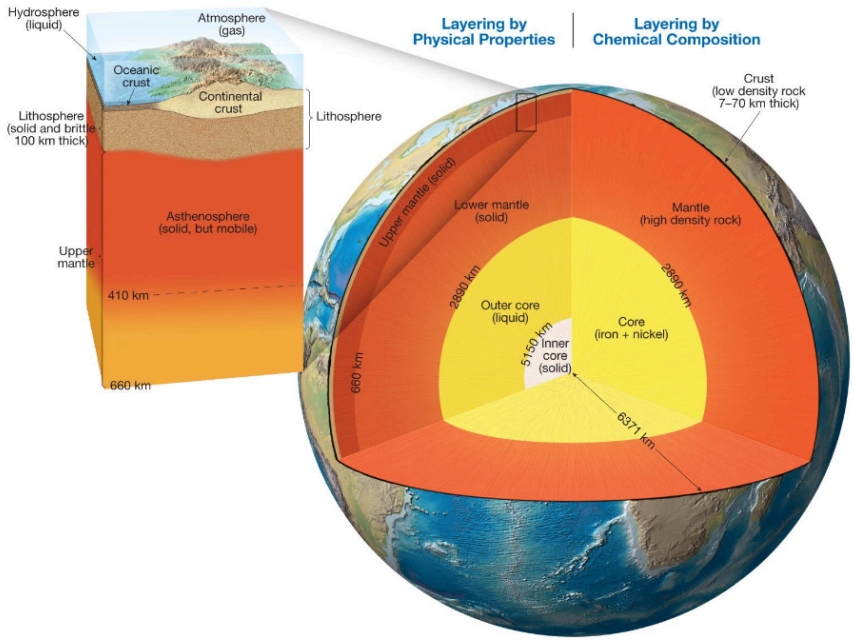
→ **Qué quiere transmitir**
- Terremotos someros → dorsales.
- Intermedios y profundos → zonas de subducción.
- La profundidad sísmica es prueba clara de la tectónica de placas.

⇒ **INTERIOR DE LA TIERRA**

Estructura interna según la <u>composición</u> de sus capas:

- Corteza (continental y oceánica) ⟶ Hasta los 70 km de profundidad
  - → Continental:
    - Ligera
    - Granítica
    - 7 km
  - → Oceánica:
    - Densa
    - Basáltica
    - 70 km
- Manto ⟶ hasta los 2900 km de profundidad.
  - → Semisólida a sólida
  - → Composición: peridotita

- Núcleo ⟶ hasta los 6370 km de profundidad.
  → El externo es líquido
  → El interno es sólido
  → Composición: Hierro y Níquel



Estructura según las <u>propiedades físicas</u> de sus capas:

- Litosfera: hasta 250 km de profundidad
  → Sólido y rígido
  → Corteza y manto superior
- Astenosfera: hasta los 600 km de profundidad
  → Semifundido y plástico
  → Manto superior
- Manto inferior: hasta los 2900 km de profundidad
  → Sólido muy caliente
  → Cierta capacidad de flujo
- Núcleo exterior: hasta los 5100 km de profundidad
  → Líquido y metálico a alta temperatura
  → En convección
- Núcleo interior:
  → Sólido y metálico, a alta temperatura
  → Comportamiento rígido

¿Cuál es el resumen?:

- El planeta es químicamente estratificado.
- Su comportamiento mecánico explica el movimiento de las placas.
- Las ondas sísmicas permiten saberlo.
