

# Artículos

## Tectónica de Placas: Teoría integradora de las Ciencias de la Tierra

\* Fernando Hongn y \*\* Víctor García

\* IBIGEO-CONICET y Facultad de Ciencias Naturales-UNSa.

\*\* CONICET y Universidad de Río Negro.

Los terremotos que ocurrieron en los últimos años, particularmente los de Java-Sumatra (diciembre de 2004), Haití (enero de 2010), Chile (febrero de 2010) y Japón (marzo de 2011), con elevados números de víctimas y pérdidas económicas, han generado preocupación y despertado la curiosidad de la población acerca de las causas y los efectos de los terremotos, y sobre la posibilidad de predecirlos. En el caso de los habitantes del valle de Lerma, esta situación se ha visto amplificada por el sismo ocurrido el 27 de febrero de 2010, pocas horas después del sucedido en Maule (Chile). Con posterioridad a cada evento, el tema es tratado de forma vertiginosa por la prensa, en las escuelas, charlas de familia, amigos y vecinos, hasta que deja de ser noticia y así sucesivamente. En este aluvión informativo surgen visiones apocalípticas, catastrofistas, de presagios religiosos, de la venganza que se toma la Tierra por el maltrato que le brindamos, del calentamiento global, entre tantas otras, que empañan las opiniones racionales que explican qué es un terremoto y por qué se origina.

Temas de Biología y Geología del NOA nos brinda la oportunidad de ofrecer algunos conceptos básicos para comprender los procesos geológicos involucrados en el fenómeno **natural** de los terremotos. Al informarnos sobre un terremoto, indefectiblemente surgen referencias, por ejemplo, a una **placa tectónica** que se hunde por debajo de otra o que se desplaza junto a otra, o que se separa o aleja de otra. Por esta razón, la idea original de una contribución dirigida a explicar los terremotos, deriva en una serie de notas consecutivas en las que primero trataremos la Tectónica de Placas para destacar aquellos aspectos de mayor interés que ayuden a comprender el fenómeno de los sismos o terremotos; en los números siguientes se tratarán los terremotos en general, los terremotos en Argentina con énfasis en la región noroeste y las medidas de prevención.

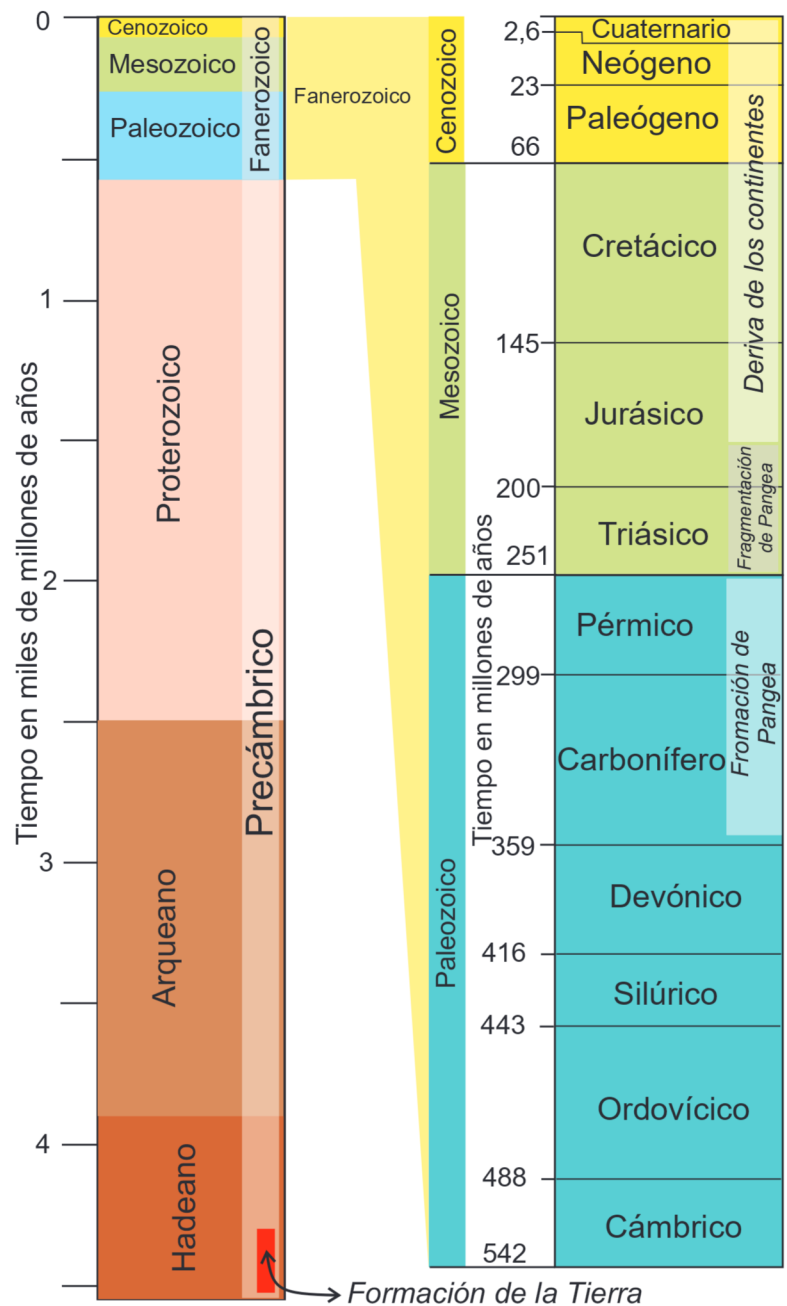


Figura 1. División del tiempo geológico con indicación de principales eventos relacionados a la Pangea.

## TECTÓNICA DE PLACAS

La teoría de la Tectónica de Placas es uno de los paradigmas de las Ciencias Naturales y de las Ciencias de la Tierra en particular porque integra observaciones geológicas, geofísicas y geográficas que permiten entender la evolución del planeta Tierra desde sus orígenes, hace aproximadamente 4000 millones de años, hasta la actualidad (Figura 1). La Geofísica se ocupa de la Tierra desde el punto de vista de la Física y su objeto de estudio comprende todos los fenómenos relacionados con la estructura, condiciones físicas e historia evolutiva de la Tierra.

En la presente contribución, analizaremos los aspectos de la teoría que ofrecen mayor interés para entender el origen de los terremotos con el riesgo de dejar de lado otros también fundamentales de la Tectónica de Placas. Comenzaremos con una síntesis de los hechos que se consideran pilares en la construcción de esta teoría y que permiten interpretar el fenómeno natural de los sismos o terremotos. Esta reseña es además apropiada para mostrar cómo evoluciona una teoría científica en las Ciencias Naturales. En el marco de la Tectónica de Placas también es posible entender la distribución y evolución de las fauna y flora fósiles (extinguidas) y actuales.

## EVOLUCIÓN DE LA TEORÍA DE LA TECTÓNICA DE PLACAS O TECTÓNICA GLOBAL

### La deriva de los continentes

La aparición de los primeros mapas de las costas de América, África y Europa (Figura 2) permitió reconocer la existencia de una notable similitud geométrica de las líneas de costa. La primera mención de este encaje es atribuida a Abraham Ortelius, geógrafo y cartógrafo flamenco, a fines del Siglo XVI.



**Figura 2.** “*Theatrum Orbis Terrarum*” (Teatro del Mundo). Mapa elaborado por el cartógrafo y geógrafo flamenco Abraham Ortelius en 1570, quien es reconocido como el creador del primer atlas moderno. Fuente: <http://ancientworldmaps.blogspot.com>

A partir de entonces, el avance de la cartografía ofreció nuevos elementos que permitieron considerar a los continentes como piezas de un rompecabezas, especialmente al tener en cuenta el encaje entre las costas este de América y oeste de África. Este hecho fue destacado por diferentes naturalistas desde la observación inicial de Ortelius y la propuesta de Snider en el año 1858. Snider puede considerarse como uno de los precursores de la Tectónica de Placas porque mencionó la movilidad de los continentes y propuso la primera reconstrucción paleogeográfica (Figura 3), la cual muestra coincidencias a grandes rasgos con las interpretaciones actuales.

En 1910, el físico norteamericano Taylor, y en 1912, el meteorólogo alemán Alfred Wegener, describieron a la deriva continental o movilidad de los continentes como un proceso que habría comenzado hace aproximadamente 200 millones de años y que continuaría en la actualidad. Se considera a Wegener como el padre de la Tectónica de Placas porque, al formular la teoría de la **Deriva Continental** en su libro “**El origen de los continentes y océanos**” (publicado en Alemania en 1915) sintetizó los datos geológicos, paleontológicos y paleoclimáticos que, además del encaje entre los continentes, daban sustento a su teoría, entre ellos:

a) Fósiles de plantas y animales similares que se encuentran en diferentes continentes (Figura 4, arriba). Los detractores de la teoría de Wegener proponían puentes intercontinentales a través de los cuales habrían migrado las especies cuyos fósiles se descubrieron en diferentes continentes;

b) Cadenas montañosas que terminan abruptamente contra el borde de un continente y se continúan con iguales características en otro al juntarlos. Para argumentar esta continuidad, Wegener consideró los detallados estudios del geólogo sudafricano DuToit, quien fortaleció las pruebas que sugerían que los actuales continentes habrían estado agrupados;





**Figura 3.** Reconstrucción de los continentes presentada por Snider en el año 1858. Modificado de Tomecek (2009).

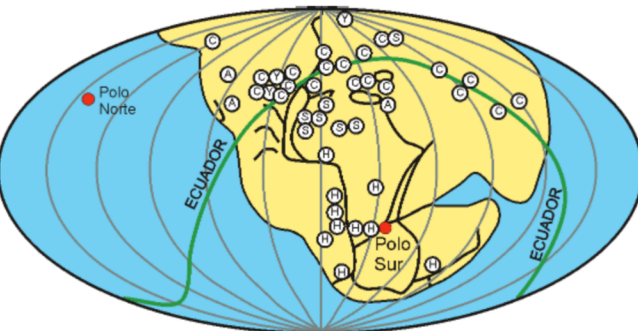
c) Movilidad de masas continentales. Por medio de estudios geodésicos se había determinado una variación en la posición de dos islas de Groenlandia en un período de 50 años. La Geodesia estudia la forma y dimensiones de la Tierra, así como sus cambios;

d) Rocas del Carbonífero y Pérmico asociadas a glaciares distribuidas en América del Sur, África, India, Australia y Antártida, aún cuando estas regiones se encontraran actualmente en zonas ecuatoriales. Esta observación de Wegener sugería una variación marcada de la posición de las mismas respecto al Polo y al Ecuador para aquel tiempo (Figura 4, abajo).

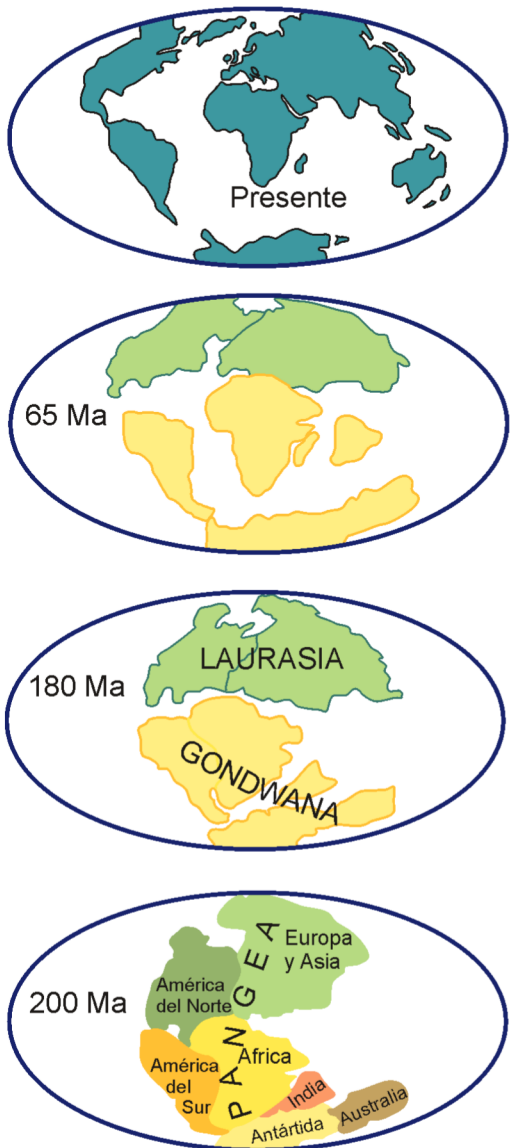
De acuerdo con estos argumentos, Wegener propuso que en el Carbonífero-Pérmico los continentes habrían formado una única masa continental a la que denominó Pangea (toda la Tierra), supercontinente que incluía a los actuales América (norte y sur), Eurasia (Europa y Asia), África, India, Australia y Antártida. Pangea primero se habría separado en dos grandes masas (Laurasia y Gondwana) que habrían continuado fragmentándose y derivando hasta alcanzar sus configuración y posiciones actuales (Figura 5). Propuso además, que la deriva habría comenzado a fines del Triásico (hace aproximadamente 200 millones de años).

Para explicar cómo los continentes eran capaces de moverse, Wegener tuvo en cuenta: a) Los estudios de Suess, quien a fines del Siglo XIX propuso que la Tierra estaba dividida en capas: a las más externas las denominó SIAL y SIMA. La primera estaba constituida básicamente por silicatos livianos de aluminio, sodio y potasio, y la segunda, por silicatos pesados de hierro y magnesio. Según esta propuesta la SIAL era la más superficial, menos densa, y estaba compuesta básicamente por rocas sedimentarias, graníticas y metamórficas mientras que la SIMA, más densa, se disponía por debajo de la SIAL y estaba compuesta por rocas tipo basálticas; y b) La teoría de la Isostasia que surgió a partir de mediciones en los Andes y

Algunas de las conclusiones de Du Toit se basaron en trabajos de cooperación con científicos de Argentina y otras surgieron de investigaciones llevadas a cabo por geólogos que desarrollaban sus trabajos en Argentina como Juan Keidel. Keidel fue un geólogo alemán contratado por el gobierno argentino en 1906 que brindó fuertes argumentos para sostener que las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires (Sierra de la Ventana) estaban relacionadas con montañas del sur de África y que habían formado un único cordón montañoso en el pasado geológico.

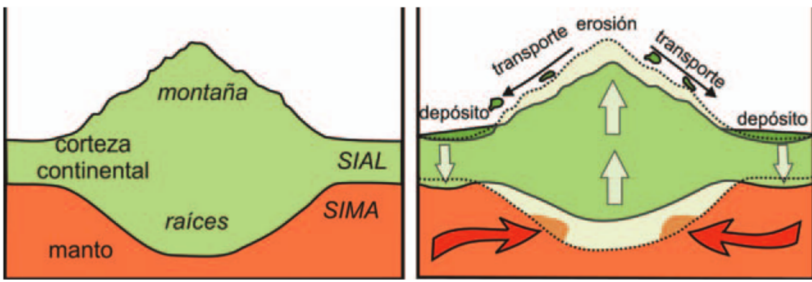


**Figura 4.** Algunos de los argumentos utilizados por Wegener para sustentar su hipótesis de la existencia, durante fines del Paleozoico y comienzos del Mesozoico, de un supercontinente denominado Pangea. Arriba: Distribución de floras y faunas fósiles del Paleozoico Tardío y Mesozoico Temprano (Modificada de Yount 2009). Wegener consideró que la ocurrencia de fósiles similares en diferentes continentes se debía a que éstos habrían estado unidos y sugirió reconstrucciones como aquellas de la figura (comparar con reconstrucción de la Figura 3 propuesta por Snider en 1858). Abajo: Mapa que muestra los argumentos paleoclimáticos para el Carbonífero (360-300 millones de años) (Modificado de Kearey 2009). Wegener encontró que rocas asociadas a glaciares (H, hielo, en la figura) o a zonas húmedas y cálidas en las que se originaba carbón (C en la figura) o a zonas áridas en las que se formaban campos de arenas (A en la figura) o niveles con sales (Y, yeso, y S, sal, en la figura) mostraban una distribución que no era compatible con la posición actual de los polos y del Ecuador. Así, formuló una reconstrucción para el tiempo carbonífero en la que sugirió la posición de los polos y del Ecuador.



**Figura 5.** Cuatro estados de la Deriva Continental de Wegener, desde el supercontinente inicial de Pangea (Triásico tardío, 200 millones de años); diferenciación de Laurasia y Gondwana en el Jurásico (180 millones de años); definición de algunos de los actuales continentes y océanos a principios del Cenozoico, (65 millones de años) y la configuración presente. Fuente: Yount (2009)

en el Himalaya, que mostraron que la atracción gravitatoria que ejercían estas grandes cordilleras eran menores a las supuestas. Así se planteó que el exceso de masa representado por el volumen extra que significaba una cordillera estaba compensado por rocas más livianas por debajo. Esta compensación se tradujo en la propuesta que la capa SIAL era más espesa en las zonas de grandes elevaciones topográficas (por ejemplo la región andina) que en las zonas llanas (por ejemplo la llanura chaqueña). Este comportamiento es comparable con aquél de un témpano, cuya porción sumergida es directamente proporcional a la parte emergida. A medida que una cordillera crece en altura y ancho de igual forma se incrementan sus raíces, de forma contraria cuando una cordillera deja de crecer y es desgastada por agentes de erosión, al disminuir su volumen también disminuyen sus raíces. Este concepto dio lugar a la propuesta que las rocas más densas de la capa SIMA deberían fluir para lograr el equilibrio o compensación entre las masas (Figura 6). La teoría de la Isostasia se comprobó con el levantamiento registrado en la península escandinava como consecuencia del derretimiento del casquete de hielo de varios kilómetros de espesor que la había cubierto durante la última era glacial ocurrida aproximadamente 15.000 años atrás; al desaparecer la capa de hielo se eliminó un peso o volumen a la península experimentándose un levantamiento de milímetros por año como resultado de esta compensación de masas.



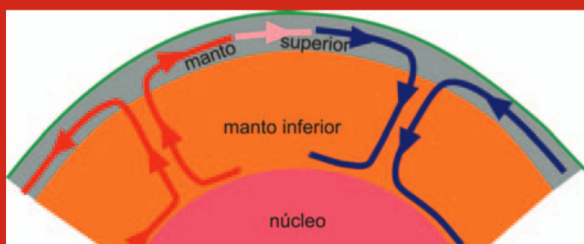
**Figura 6.** El concepto de Isostasia. Se esquematiza una zona montañosa, donde la corteza continental es más espesa respecto a las zonas llanas; por eso se dice que las cordilleras tienen raíces. En la Puna de los Andes del NOA, el espesor de la corteza continental es de 60 km mientras que en el Chaco es de aproximadamente 30 km (Izquierda). Cuando los agentes erosivos (principalmente ríos) desgastan las zonas montañosas, el material arrancado de ésta es transportado y finalmente depositado en zonas más bajas. De esa forma se produce una transferencia de material que resulta en cambios de espesor de la corteza continental. Estos cambios producen zonas de levantamiento y de hundimiento, los que se compensan en profundidad por flujo del manto (Derecha).

Wegener se basó en estos principios para sostener que las rocas más livianas (SIAL) flotaban sobre aquellas más densas (SIMA), por lo que podían desplazarse y derivar, proceso que habría conducido a la fragmentación del supercontinente de Pangea, la apertura del Océano Atlántico, la formación de cordilleras en los bordes de los continentes (por ejemplo los Andes) por la compresión que sufrían los bordes que constituían el frente de movimiento durante la deriva y otros rasgos que incluía su teoría. El gran mérito de Wegener fue proponer su teoría de una forma integrada, con distintos tipos de argumentos que la fundamentaban e hipótesis acerca del origen y mecanismos de la deriva, aunque él mismo reconocía que estos mecanismos constituían los puntos débiles de su propuesta.



La hipótesis de Wegener fue fuertemente rechazada a través de críticas a sus diferentes argumentos y principalmente a los mecanismos invocados para explicar la movilidad de los continentes y a las fuerzas necesarias para provocar el desplazamiento. Sin embargo, el impacto que había causado en la comunidad científica fue mayor al supuesto y un importante grupo de científicos enfocaron sus esfuerzos a buscar nuevos argumentos y mecanismos para explicar la movilidad de los continentes. Entre éstos, cabe destacar los aportes de Arthur Holmes.

La convección es una forma de transmitir calor. La transmisión de calor por convección ocurre por desplazamiento de la materia. En la tierra los materiales más calientes suben y generan celdas de convección. Las celdas de convección localizadas en el manto son aquellas que provocan el movimiento horizontal que constituye el motor de la tectónica de placas. Existen diferentes propuestas acerca del tamaño y distribución de estas celdas de convección.



Los elementos radioactivos son aquellos que son inestables y buscan una configuración estable mediante la emisión de partículas (radiación). La liberación de estas partículas genera energía. Un elemento radioactivo original se llama elemento padre y el producto final se llama hijo. El uranio 238 ( $^{238}\text{U}$ ) es el elemento padre del plomo 204 ( $^{204}\text{Pb}$ ) y el potasio 40 ( $^{40}\text{K}$ ) es el elemento padre del Argón 40 ( $^{40}\text{Ar}$ ). Como las investigaciones físicas han permitido conocer la vida media de un elemento padre, es decir cuanto tiempo demanda la transformación del elemento padre al elemento hijo por radioactividad, este principio se utiliza para conocer la edad de las rocas. Se buscan minerales que contengan  $^{238}\text{U}$  y a través de sofisticados aparatos se mide cuál es la proporción de ese elemento padre que se ha transformado en el elemento hijo. Como se conoce la vida media del elemento, es posible calcular cuánto años o millones de años han transcurrido desde que se formó el mineral que contiene ese elemento. Así se conoce la edad absoluta de las rocas y con estos métodos se han ajustado las escalas de tiempo geológico hasta llegar a la esquematizada en la Figura 1.

De acuerdo con Holmes, el calor generado por la descomposición de los elementos radioactivos contenidos en las rocas produciría corrientes de convección en la SIMA. Debido a que las áreas continentales por su composición tenían mayor contenido de elementos radioactivos, Holmes pensó que las corrientes de convección estaban acentuadas en estas áreas y tenían la suficiente fuerza como para desmembrar y separar los grandes continentes, entre las que se generaban nuevos océanos. La hipótesis de Holmes constituyó la primera propuesta sólida acerca del mecanismo del movimiento horizontal de los continentes. Si bien los mecanismos postulados actualmente para explicar el desplazamiento de los continentes y la creación de océanos guardan poca relación con la propuesta de Holmes, ésta puede considerarse como la bisagra entre la Deriva Continental y la Tectónica de Placas o Tectónica Global.

## La Tectónica de Placas o Tectónica Global

Las discusiones y debates entre los impulsores y detractores de la deriva continental se mantuvieron sin grandes avances o retrocesos durante la década de 1940, período dominado por los estados de guerra y posguerra que involucraron a los países más poderosos del mundo y consecuentemente a sus economías y sistemas educativos y científicos dedicados principalmente al desarrollo de nuevas tecnologías para aplicarse en el conflicto. Es en este marco que Harry Hess, geólogo y oficial naval de Estados Unidos, queda a cargo del sistema de detección de submarinos y de patrullaje en varias islas del Océano Pacífico, tarea para la que utilizan el sistema SONAR.

El sistema SONAR se basa en la emisión de ondas acústicas o sonoras, las que rebotan o se desvían en objetos, permitiendo la detección de éstos. Durante la Segunda Guerra Mundial se utilizaba este mecanismo para detectar submarinos. Este principio, o similar, se aplica actualmente para la detección de cardúmenes de peces tanto en la pesca comercial como en la deportiva. Hess encontró que este sistema funcionaba para grandes profundidades y lo utilizó para medir la profundidad a la que se encontraba el fondo oceánico.

Hess no olvidó sus curiosidades científicas y durante sus funciones como marino colectó miles de datos sobre la profundidad del fondo oceánico y descubrió que no era plano como se interpretaba sino que mostraba irregularidades como ocurre en los continentes. Finalizada la guerra, Hess y otros científicos (Marie Tharp y Bruce Heezen entre otros) continuaron con sus investigaciones y obtuvieron el primer mapa del fondo oceánico que mostraba los principales accidentes topográficos. Se destaca la precisión con la que el método permitió definir las dorsales centro oceánicas (Figura 7) que habían sido detectadas con menor detalle por investigaciones previas, además de poner en evidencia otras cadenas montañosas submarinas como aquella que se extiende a partir del archipiélago de Hawai, las zonas de plataforma y las fosas oceánicas ubicadas principalmente en las costas del Pacífico. Hess propuso que las dor-

sales centro oceánicas correspondían a cadenas de volcanes submarinos formadas como consecuencia de celdas de convección ascendentes. De acuerdo con esta propuesta, en las dorsales se generaba nuevo fondo oceánico e implicaba que la edad del mismo se incrementaba con la distancia a las dorsales. Además, postuló que la formación de nuevo fondo oceánico implicaba necesariamente su destrucción en otras partes para mantener el volumen de la Tierra y que el fondo oceánico más antiguo se hundía por debajo de los continentes, o de otro suelo oceánico en las fosas.



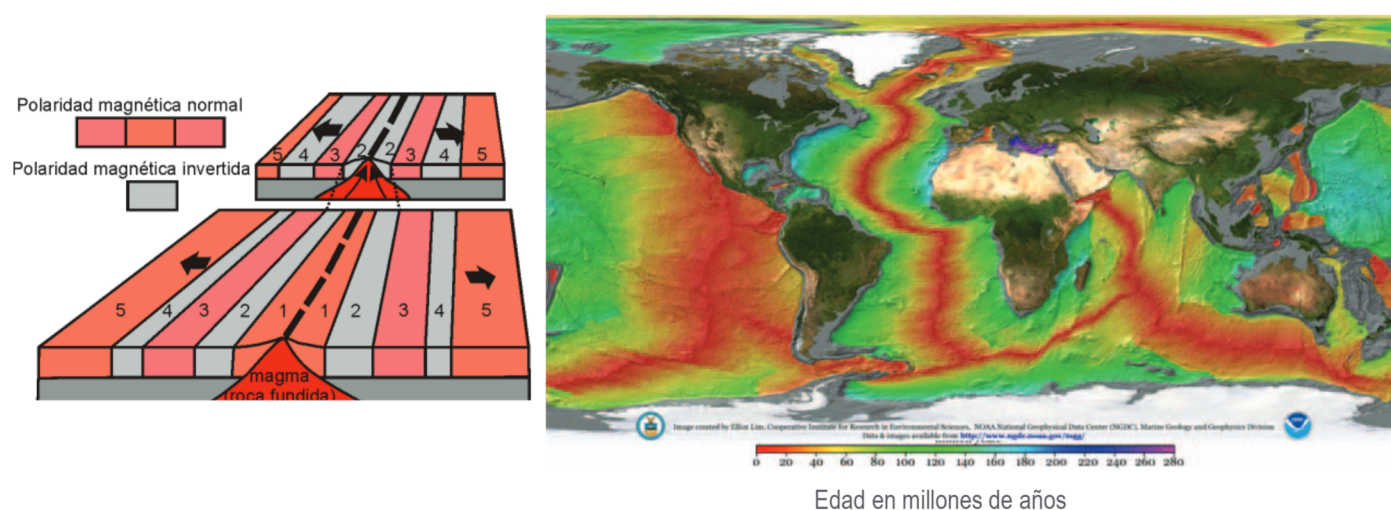
**Figura 7.** Rasgos topográficos del fondo oceánico. La figura destaca la dorsal centro atlántica (Heezen y Tharp, 1977).

Las observaciones de Hess dieron lugar a la teoría de la expansión del fondo oceánico propuesta en 1962, proceso también sugerido, aunque documentado en forma menos detallada, por Dietz en 1961. Hess demostró que los fundamentos de Wegener eran válidos y mejoró sensiblemente la propuesta del mecanismo de movilidad de los continentes, no de forma similar a témpanos o icebergs como había propuesto Wegener sino a través de mecanismos más complejos como los propuestos por Holmes, que incluían flujo y movimiento del material del manto. Hess mejoró, y a la vez valorizó, la propuesta de Holmes, identificando las dorsales como zonas de ascenso y creación de nueva corteza y las fosas como zonas en las que se consumía la corteza oceánica. Además explicaba la relativa juventud del fondo oceánico (no más antiguo que 200 millones de años) con respecto a los continentes donde se encuentran rocas de más de 3000 millones de años. La conjunción de las teorías de deriva continental y de expansión del fondo oceánico formaron las bases de la Tectónica de Placas, por ello Hess es considerado como uno de sus grandes impulsores.

De forma aproximadamente paralela a las investigaciones cartográficas del fondo marino, se desarrollaba otra disciplina que brindó nuevos argumentos y reforzó los existentes acerca de la expansión del fondo oceánico y la movilidad de los continentes: el magnetismo terrestre.



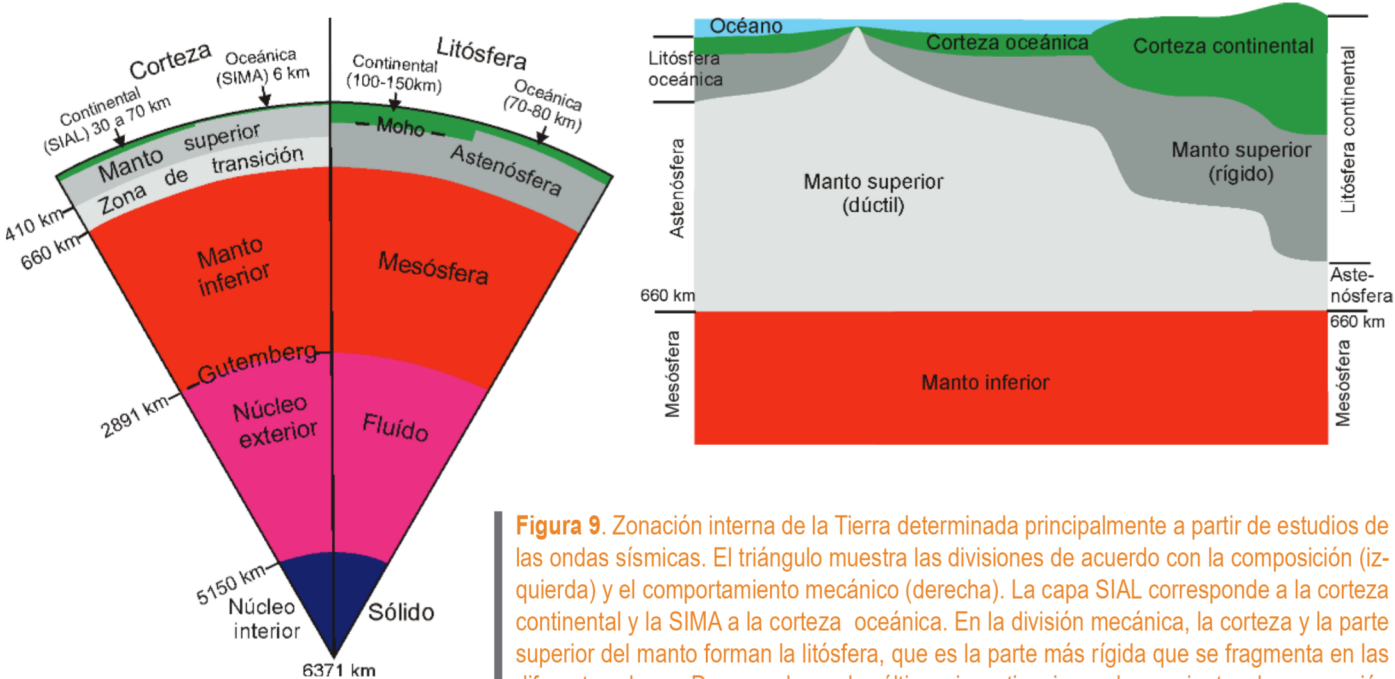
La Tierra se comporta como un imán con dos polos que producen un campo magnético; la brújula se orienta según este campo, principio utilizado por las primeras civilizaciones para orientarse. El origen de este campo magnético se atribuye al flujo de metales en el núcleo externo como consecuencia de la rotación de la Tierra. Muchos minerales son magnéticos; el ejemplo más conocido es la magnetita. Ciertos tipos de rocas contienen minerales magnéticos que se ordenan al momento de su formación siguiendo el campo magnético terrestre, es decir que es posible conocer la orientación del campo magnético a través del magnetismo de las rocas. Este principio permite conocer la orientación del campo magnético en rocas de varios millones de años de edad. La disciplina científica que estudia el campo magnético terrestre en el pasado a partir del magnetismo de rocas antiguas se conoce con el nombre de Paleomagnetismo. El magnetismo de las rocas se mide utilizando aparatos muy sensibles que se han perfeccionado con el curso de las investigaciones. Runcorn, durante la década de 1950, observó que sus mediciones paleomagnéticas indicaban que, para diferentes tiempos, los polos tenían diferentes posiciones, hecho que implicaba que los polos habían cambiado de posición con el tiempo. Estas primeras conclusiones lo indujeron a intensificar sus estudios: obtuvo así posiciones del polo para rocas de la misma edad en diferentes áreas. Dado que esta situación particular era insostenible (para un determinado tiempo el polo debió estar fijo en una posición), Runcorn atribuyó estas diferencias a rotaciones y movimientos que habrían experimentado las rocas luego de su formación. Para comprobar su idea, representó sus datos paleomagnéticos para rocas de la misma edad sobre una reconstrucción de los continentes similar a aquella de Wegener y encontró que existía coincidencia en la orientación del campo magnético.



**Figura 8.** Anomalías magnéticas y edades del fondos oceánico. Izquierda: Esquema mostrando la creación de corteza oceánica en bandas simétricas que registran alternativamente polaridades normal e inversa. Los números representan edades que se tornan más antiguas alejándose de la dorsal centro oceánica (línea negra) Fuente: <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/developing.html>. Derecha: Mapa de edades del fondo oceánico. Se observa claramente que las edades más modernas están en las dorsales en las que se genera nueva corteza oceánica. Con la excepción del Mar Mediterráneo, las edades más antiguas del fondo oceánico son del orden de 180 a 200 millones de años, confirmando las hipótesis iniciales sobre la generación de los océanos actuales a partir del Triásico. Fuente: <http://www.ngdc.noaa.gov/>

Los primeras investigaciones paleomagnéticas habían demostrado que ocurría una variación regular en la polaridad del campo magnético con el tiempo geológico y esto significaba que existieron períodos en los que los polos magnéticos se habrían invertido y se denominan períodos de polaridad normal y de polaridad inversa (Fig. 8). También durante la década de 1950, Raff y Mason quienes trabajaban para un instituto de investigaciones oceanográficas de California, descubrieron que las rocas del fondo marino representaban fajas con polaridad normal y polaridad inversa y que eran paralelas a las dorsales centro oceánicas. Los resultados de Raff y Mason publicados en 1961 se integraron con aquéllos que al mismo tiempo habían obtenido Vine y Matthews, de la Universidad de Cambridge, estudiando el fondo del Océano Índico y que permitieron vincular estas anomalías de la polaridad magnética con la propuesta de expansión del fondo oceánico de Hess. De esta forma, en las dorsales se producía nueva corteza oceánica que registraba la polaridad magnética al momento de su formación. Estas bandas eran paralelas a las dorsales y se disponían de forma simétrica respecto a ellas, como imágenes especulares, y su edad debería aumentar junto con la distancia a la dorsal (Figura 8). Mediante las dataciones radiométricas fue posible obtener la edad de estas bandas con polaridades magnéticas normales e inversas, datos que confirmaron las hipótesis que proponían la movilidad de los continentes (Figura 8).

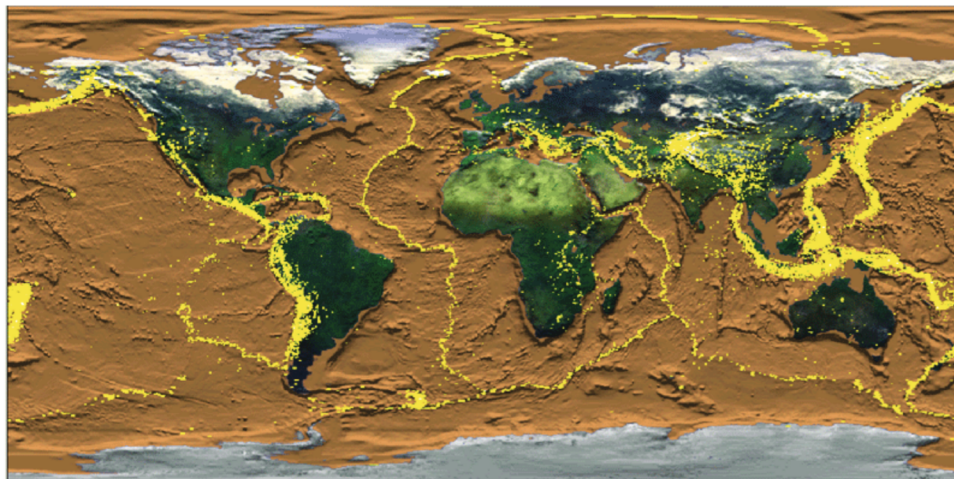
Otras evidencias sobre la dinámica global fueron aportadas por las investigaciones sismológicas. Un sismo es una liberación rápida de energía elástica acumulada en las rocas; esta energía se distribuye a través de las ondas sísmicas. Las observaciones iniciales mostraron que la actividad sísmica se concentra en áreas de costas y de montañas. La necesidad humana de entender este fenómeno que ocasionaba muertes y daños materiales llevó al desarrollo de la sismología, disciplina que estudia las ondas sísmicas, su origen y propagación. A fines del Siglo XIX se fabricaron los primeros sismógrafos y en las primeras décadas del Siglo XX se conformó una red a nivel mundial que permitió registrar, analizar e interpretar las ondas sísmicas. Una de las primeras observaciones consistió en que, de acuerdo con la velocidad de las ondas sísmicas, el interior de la tierra no es uniforme sino que está formado por capas con diferentes propiedades mecánicas a través de las cuales las ondas se propagan a diferentes velocidades. Así, la sismología brindó herramientas de valor para comprender la estructura interna de la Tierra, formada por capas concéntricas, e indicar las profundidades a las que se encontraban los límites de estas capas. De esta forma se detectaron variaciones en velocidad de las ondas sísmicas delatando la discontinuidad de Mohorovicic o Moho, en la transición de la corteza al manto, la discontinuidad de Gutenberg, en la interfase entre manto y núcleo, y la zona de baja velocidad sísmica en la parte superior del manto que se establece como el límite entre litósfera y astenósfera. En este marco, se formularon diferentes propuestas sobre la zonación interna de la Tierra, algunas con fundamentos de su composición, otras con fundamentos acerca de su comportamiento mecánico (Figura 9).



**Figura 9.** Zonación interna de la Tierra determinada principalmente a partir de estudios de las ondas sísmicas. El triángulo muestra las divisiones de acuerdo con la composición (izquierda) y el comportamiento mecánico (derecha). La capa SIAL corresponde a la corteza continental y la SIMA a la corteza oceánica. En la división mecánica, la corteza y la parte superior del manto forman la litósfera, que es la parte más rígida que se fragmenta en las diferentes placas. De acuerdo con las últimas investigaciones, las corrientes de convección que generan el desplazamiento de las placas ocurrirían en el manto (mesósfera y astenósfera) aunque para algunos científicos las celdas de convección ocurren principalmente en la astenósfera.

Tal vez el resultado más importante obtenido a partir de estos estudios fue la determinación de la capacidad del manto de fluir, hecho que sustenta la existencia de celdas de convección como el motor de la Tectónica de Placas. Con el incremento del número de sismógrafos en distintas partes del mundo se perfeccionó la detección de los sismos dado que comenzaron a investigarse aquellos de menor intensidad y a obtenerse de forma precisa su ubicación. Los mapas de distribución de sismos mostraron claramente que zonas de mayor sismicidad coincidían con aquellas de mayor actividad volcánica, tanto en los continentes como en los océanos (Figura 10). Además, fue posible identificar la distribución de los sismos en profundidad, resultando significativa la localización de los hipocentros sobre superficies inclinadas hacia los continentes en las costas pacíficas, únicas regiones en las que se detectaban sismos de profundidades intermedias y altas (70 a más de 500 km de profundidad). Hipocentro y epicentro son términos que identifican respectivamente el punto en el que se produce el sismo en profundidad y la proyección de este punto hacia la superficie.

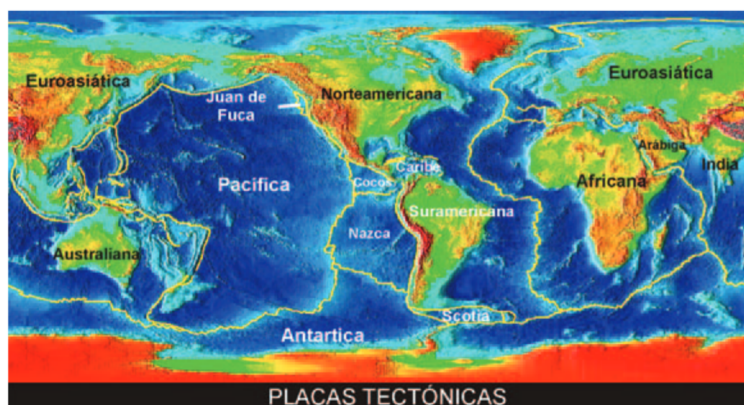




**Figura 10.** Distribución de sismos en el mundo. Compárese con la Figura 11 que muestra límites de placas tectónicas y con la figura de distribución de volcanes del artículo de Guzmán y Montero López en este número de TBGNOA Fuentes: NASA Goddard Space Flight Center y [www.uwsp.edu/geo/faculty/lemke/geog101/lectures/18\\_plate\\_tectonics.html](http://www.uwsp.edu/geo/faculty/lemke/geog101/lectures/18_plate_tectonics.html)

## La integración de observaciones en una única teoría

Pasaron más de 100 años desde la propuesta de Snider en 1858 hasta la década de 1960. Ese período refleja claramente el avance de los conocimientos, especialmente con posterioridad a Wegener. Las primeras observaciones de encaje de costas se mantenían aunque a finales de los 60 se complementaban con el conocimiento de la superficie terrestre tanto en los continentes como en los océanos, con la noción de la estructura interna de la Tierra en la que algunos materiales tenían capacidad para fluir, en la documentación de las edades del fondo oceánico y en la distribución de sismos y volcanes. Si bien se atribuye a un trabajo de McKenzie y Parker publicado en 1967 la primera mención de la Tectónica de Placas, fueron varios los científicos que entre 1965 y 1970 expresaron sus ideas sobre esta nueva teoría integradora, entre los que puede mencionarse a Wilson, Morgan, Isacks, Sykes y Oliver. Estos tres últimos geofísicos presentaron un trabajo en 1968 en el que integraron sus datos sismológicos con aquellos provenientes de otras disciplinas e introdujeron el término de Tectónica Global. Dejando de lado las cuestiones históricas, la Tectónica de Placas o Tectónica Global propone que la superficie de la Tierra está constituida por siete grandes fragmentos y otros más pequeños que se denominan placas tectónicas (Figura 11).

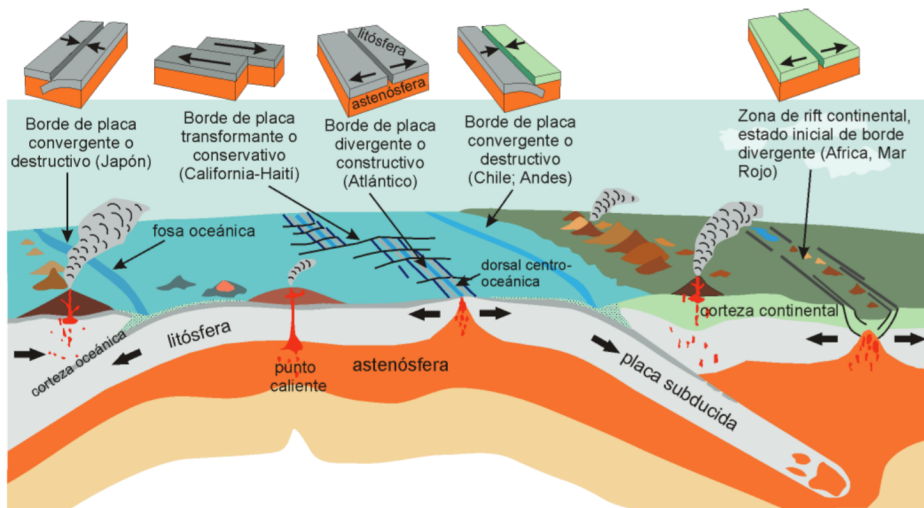


**Figura 11.** Fuente: [www.ngdc.noaa.gov/](http://www.ngdc.noaa.gov/)

El espesor de las placas varía entre 70 y 150 km, y constituyen la litósfera que es la capa más externa del planeta. La litósfera está constituida por la corteza continental (SIAL) y por la corteza oceánica y parte superior del manto (SIMA). La astenósfera es la parte del manto que se dispone por debajo de la litósfera y donde se producen las corrientes de convección térmicas (Figura 9). Estas corrientes o celdas de convección son las que provocan el movimiento de las placas litosféricas que se desplazan a velocidades de hasta 8-9 cm por año (la mayoría se mueve a velocidades de entre 2 y 5 cm por año). Si Cristóbal Colón hubiera hecho su viaje 500 años después, hubiese tenido que cruzar un océano 15 m más ancho, distancia aproximada que se ensanchó el Atlántico desde 1492 como resultado del movimiento de las placas

Los bordes o límites de placas son de tres tipos (Figura 12): a) Divergentes o constructivos: son aquellos donde las placas se separan y el espacio que se genera da lugar a la formación de nueva corteza a partir del ascenso de magma desde el manto. Están representados por las dorsales centro oceánicas, con ejemplos más típicos en los Océanos Atlántico, Pacífico e Índico; b) Convergentes o destructivos: son aquellos en los que dos placas se encuentran por movimientos opuestos y una placa se hunde

por debajo de la otra, proceso llamado subducción. Las zonas de subducción están marcadas por las fosas oceánicas como aquella que bordea el margen pacífico de América Central y del Sur o bordeando arcos de islas como en Japón-Kuriles. Se denominan destructivos porque en esos bordes se consume la litósfera que se hunde en la astenósfera mediante la subducción. Donde convergen una placa oceánica y una continental, la primera se hunde por debajo de la otra porque es más densa y genera en su avance, sobre el borde continental, una zona de acortamiento que forma montañas y cordilleras como es el caso de los Andes. Donde convergen dos placas oceánicas, aquella más antigua se hunde por debajo de la placa más nueva porque está más fría y por ello es más densa; ésto sucede por ejemplo en las islas Marianas (Mar de Filipinas) o Japón-Kuriles. Cuando la convergencia entre dos placas pone en contacto dos bloques de corteza continental se produce una colisión de placas como ocurrió entre la India y Asia, colisión que dio lugar a una zona de intenso acortamiento y levantamiento representado por los Himalayas; c) El tercer tipo de borde de placa se denomina transformante, conservativo o neutral. Allí no se produce ni se consume corteza porque las placas se desplazan lateralmente con movimiento paralelo al límite de placa. Los bordes transformantes más notables son aquellos contra los que terminan segmentos de las dorsales oceánicas, por ejemplo el que separa las placas Pacífica y Norteamericana en la zona de California, o el que marca el borde sur de la placa Norteamericana en contacto con las placas Sudamericana y del Caribe.

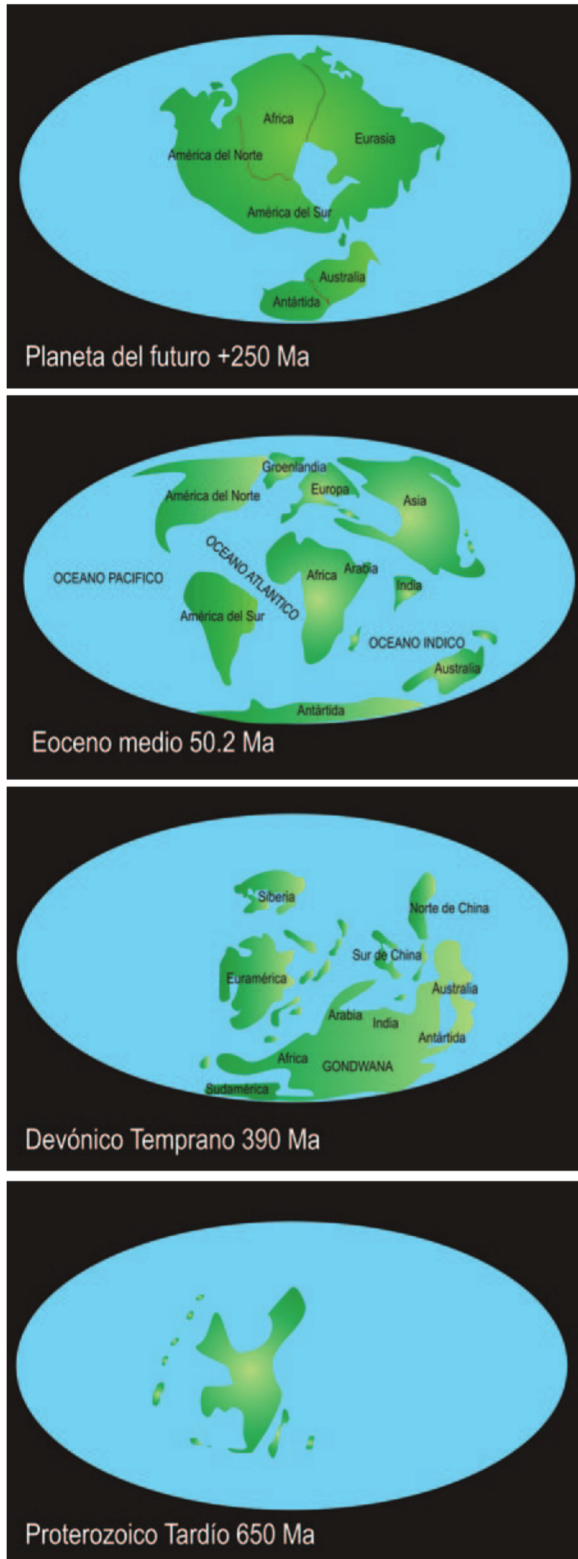


**Figura 12.** Esquema con diferentes bordes de placas (convergente, transformante, divergente). Se denomina rift a las estructuras y depresiones que ocurren donde se genera extensión de la litósfera, son habituales en los bordes de placas divergentes. Generalmente un rift se inicia en los continentes y progresa hasta convertirse en un océano. El rift de África y el Mar Rojo constituyen dos ejemplos de estados iniciales de rift, aunque el mar Rojo está más avanzado que el de África. El Océano Atlántico comenzó como el rift de África en el Triásico-Jurásico, después pasó por el estado en que se encuentra el Mar Rojo en la actualidad, y continuó abriéndose hasta el presente. Fuente: <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/Vigil.html>

Los bordes de placa constituyen las zonas de mayor actividad sísmica y volcánica mientras que en el interior de las placas se encuentran las zonas más estables (Figuras 10 y 11). Esta explicación que parece simple es la consecuencia de más de 150 años de discusiones y debates científicos, con miles de observaciones geológicas y geofísicas que documentaron o desecharon cada hipótesis a partir de cuya integración se fue construyendo la teoría de la Tectónica de Placas o Tectónica Global.

El siguiente desafío de la Tectónica de Placas fue determinar si esta teoría que se había demostrado para los últimos millones de años de la historia geológica, a partir del Mesozoico, había sido efectiva con anterioridad. El acelerado avance de las Ciencias de la Tierra en los últimos 40 años ha aportado numerosas evidencias acerca de cómo estaban distribuidos los continentes antes de la formación de Pangea (Figura 13). Aún hoy persisten debates y discusiones sobre cómo evolucionó la Tierra, aunque ya nadie discute la movilidad de los continentes a través de la historia del planeta.





**Figura 13.** Síntesis de reconstrucciones de continentes para el Proterozoico (650 millones de años), el Devónico (390 Ma), el Cenozoico temprano (50Ma) y una reconstrucción futurista para dentro de 250 millones de años, tiempo en el que se calcula se producirá una nueva amalgamación de continentes.

Redibujado de <http://www.scotese.com/earth.htm>

## Tectónica de Placas y Sismos

Esta revisión de la Tectónica de Placas ha sido realizada para explicar cómo se generan sismos. Un sismo es una liberación súbita de energía elástica acumulada en las rocas, energía que se propaga a través de las ondas sísmicas. ¿Cuándo se produce esta liberación súbita de energía? Cuando las rocas se rompen. ¿Por qué las rocas se rompen? Porque están sometidas a esfuerzos y tienen una capacidad limitada de acumular energía elástica. Cuando se alcanza un punto crítico, la roca se rompe según un plano de fractura. Si los bloques delimitados por este plano se mueven en forma paralela a la superficie, se trata de una falla geológica. ¿Cuáles son las regiones del mundo en las que se dan las mayores deformaciones de las rocas? En los bordes de placas. ¿Todos los bordes de placas se rompen de la misma forma? No. Las mayores deformaciones se encuentran en los bordes de placas convergentes y transformantes, especialmente donde ocurren situaciones que bloquean el desplazamiento de las placas y se acumula deformación elástica hasta que ésta se libera provocando grandes sismos como los de Haití en 2010, Chile en 2010 y Japón en 2011. ¿Son los sismos fenómenos naturales o inducidos por la actividad del hombre? Son fenómenos naturales asociados a la evolución y dinámica de la Tierra. Los sismos han ocurrido desde hace millones de años, mucho antes de las primeras manifestaciones de vida primitiva sobre la Tierra y seguirán ocurriendo durante muchos millones de años más. Son eventos que no guardan relación con la actividad del hombre ni con la religión, por ello es necesario remarcar su condición de proceso natural vinculado con la evolución geológica del planeta y que pueden ser explicados en el marco de la teoría de la Tectónica de Placas.

## Literatura citada y recomendada

Folguera A, Spagnuolo MG. 2011. De la Tierra y otros Planetas Rocosos. Una introducción a la Tectónica. <http://www.inet.edu.ar>

Heezen BC, Tharp M. 1977. World ocean floor panorama (map). Mercator projection. Marie Tharp Maps at [www.marietharp.com](http://www.marietharp.com)

Kearey P. 2009. Global tectonics. – 3rd ed. / Philip Kearey, Keith A. Klepeis, Frederick J. Vine, 481 p. WileyBlackwell

Tomecek S. 2009. Plate tectonics. Chelsea House Publishers. 101 p.

Yount L. 2009. Alfred Wegener: creator of the continental drift theory. Chelsea House Publishers. 160 p.