

TECTÓNICA DE PLACAS Y EVOLUCIÓN BIOLÓGICA: CONSTRUCCIÓN DE UN PARADIGMA E IMPLICACIONES DIDÁCTICAS

Plate tectonics and Biological Evolution: a paradigm construction and teaching implications

Leandro Sequeiros (1), Enrique García de la Torre (2), Emilio Pedrinaci Martínez (3)

RESUMEN

La Tectónica de Placas y la Evolución Biológica son dos de los paradigmas más integradores de las Ciencias de la Tierra. Pero el tratamiento didáctico de la Tectónica de Placas no puede separarse de la Evolución Biológica. Se propone en este artículo una secuenciación de contenidos para cuarto curso de Secundaria fundamentada en la Historia de las Ciencias de la Tierra.

ABSTRACT

Two of the most emblematic paradigms in the Earth Sciences are Plate Tectonics and Biological Evolution. Nevertheless, the teaching approach to Plate Tectonics is shown inseparately from Biological Evolution. A contents sequentiation for 4th Secondary School course established on the History of Earth Sciences is proposed in this paper.

Palabras clave: Tectónica de Placas, Evolución Biológica, Historia de las Ciencias de la Tierra, Selección de contenidos, Educación Secundaria.

Key words: Plate Tectonics, Biological Evolution, Earth Sciences History, contents Selection, Secondary School.

INTRODUCCION

La Tectónica de Placas (Elsom, 1993; Tarling y Tarling, 1975; VVAA, 1974; VVAA, 1983; Wilson, 1974) y la Evolución Biológica (Cloud, 1983; Simpson, 1985; VVAA, 1990) son contenidos obligatorios para Cuarto Curso en la Educación Secundaria obligatoria de acuerdo con el Decreto de Mínimos del MEC.

Sin embargo, la experiencia diaria de los profesores en el aula muestra la dificultad que encuentran para la enseñanza y aprendizaje de los conceptos que se integran dentro de lo que se ha dado en llamar entre los científicos la Tectónica de Placas y la Evolución Biológica.

Más aún: la Tectónica de Placas (como paradigma unificador de las Ciencias de la Tierra que pretende el conocimiento de los procesos de construcción de continentes y océanos del planeta) y la Evolución Biológica (como paradigma unificador de las Ciencias de la Vida y de la Tierra que pretende el conocimiento de los procesos de construcción de los sistemas vivientes en nuestro planeta) no pueden separarse a no ser por motivos exclusivamente didácticos. Ambos procesos se han desarrollado juntos y continúan actuando y configurando la realidad del planeta. Esta complejidad aumenta más aún si cabe las dificultades didácticas en Educación Secundaria Obligatoria.

Muchos de los planteamientos está presentes en algunas obras didácticas (Agueda, Anguita, Araña y López Ruiz, 1983; Alonso y Sesé, 1988; Anguita, 1988; Erikson, 1992; Simpson, 1985; Vera Torres, 1994).

Aunque una de las disciplinas del Nuevo Bachillerato introduce en el primer curso de Ciencias de la Naturaleza y de la Salud la disciplina de **Biología y Geología** y sus contenidos profundizan en estos conceptos, es aconsejable que los alumnos, al final de Secundaria, tengan alguna idea sobre ellos.

Son escasos, sin embargo, los trabajos sobre los obstáculos mentales que los alumnos y alumnas de Secundaria y Bachillerato tienen para la comprensión de estos paradigmas tan complejos de las Ciencias de la Tierra.

La ausencia de trabajos fiables sobre representaciones (preconcepciones de los alumnos) sobre la construcción mental de los procesos relacionados con la Tectónica de Placas y la Evolución Biológica puede ser suplida parcialmente por la dura y muchas veces decepcionante experiencia diaria de profesores y profesoras en el aula.

Por otra parte, la historia de las Ciencias de la Tierra y de la Vida suministra informaciones de interés: la Tectónica de Placas y sus relaciones con la Evolución biológica no es solamente un paradigma emergente de difícil construcción, sino que la histo-

(1) ICE Universidad de Córdoba. Apdo 5003. 14080 Córdoba.

(2) IB Parque de Fidián. Córdoba.

(3) CEP de Castilleja de la Cuesta (Sevilla).
(miembros del "Equipo Terra").

ria compleja de su construcción muestra de alguna manera la dirección de una cierta secuencia de aprendizaje. Aunque la pretendida isomorfía entre historia de la ciencia y aprendizaje de las Ciencias debe ser tomada siempre con cautela, la historia puede suministrar pistas de interés didáctico.

Por ello, en este trabajo proponemos una secuenciación de contenidos fundamentada en la reflexión sobre la Historia de las Ciencias de la Tierra.

HISTORIA DE UNAS RELACIONES DIFÍCILES

Uno de los problemas más debatidos actualmente dentro del mundo de los geólogos es el de las relaciones entre la Tectónica de Placas y la Evolución Biológica. Estas se han convertido en un principio iluminador del quehacer científico en Ciencias de la Tierra. La interpretación evolutiva del Registro Fósil antes y después de la Tectónica de Placas ha estado sometida a una auténtica "revolución científica" kuhniana (Hallam, 1980).

Pero el paradigma explicativo de la Evolución desde la óptica de la Tectónica de Placas no se ha construido de una vez. Como ocurre en la mayor parte de las grandes teorías, la aventura del cambio científico es siempre sinuosa, ramificada y a veces con callejones sin salida.

Desde el siglo XIX, los paleontólogos han intentado responder a tres cuestiones que ligan los cambios geográficos y la evolución biológica:

1. *¿Cómo explicar la actual distribución geográfica de los animales y plantas en nuestro planeta?*
2. *¿Cómo influye el movimiento de las placas continentales en el hecho evolutivo?*
3. *¿Explica la Tectónica de placas todos los fenómenos relacionados con la Evolución? ¿Cómo explicar el hecho de la Extinción de las Especies desde la Tectónica de Placas?*

1. BIOGEOGRAFÍA Y EVOLUCIÓN BIOLÓGICA:

Históricamente, la primera cuestión suscitada y respondida ha sido ésta: *¿Cómo explicar la actual distribución geográfica de los animales y plantas en nuestro planeta?*

1.1. Darwin y la Biogeografía

Se suele presentar en los libros de Historia de la Ciencia al naturalista Charles Darwin (1809-1882) como el fundador de la Biogeografía moderna. En su *Viaje de un naturalista alrededor de Mundo* (escrito entre 1831 y 1835) Darwin plantea el hecho de la *anómala* distribución de los animales y plantas en el mundo.

Darwin observó que el clima no parece ser el único elemento -como creían los antiguos- que condiciona la presencia de determinados grupos

animales y vegetales en escenarios geográficos concretos. Anotó el hecho de que en regiones climáticas similares de Europa y Sudamérica había seres vivos muy diferentes. De aquí infirió la hipótesis de que los que hoy llamamos factores ecológicos no son los únicos determinantes de la distribución geográfica.



Es más: Darwin investigó los registros fósiles y los interpretó como restos de los antecesores de los organismos vivos. Así interpretó los huesos de los Megaterios de la desembocadura del Río de la Plata y su relación con animales vivos en América del Sur.

En *El Origen de las Especies por la Selección Natural* (1859) dedica dos capítulos a estas cuestiones: el hecho de la Biogeografía y el pasado fósil de los organismos actuales.

El recurso a los restos fósiles para reconstruir las historias evolutivas de los escenarios biológicos pretéritos constituye una de las grandes intuiciones metodológicas de Darwin, y desde este punto de vista es el renovador de la Biogeografía que pasa a ser ciencia histórica, lo que hoy se denomina Paleobiogeografía.

Para Darwin, son dos los elementos que condicionan la distribución actual de los seres vivos: el clima y las barreras geográficas. El clima limita la supervivencia (la capacidad para sobrevivir con los recursos existentes), mientras que las barreras principalmente geográficas limitan la colonización de los grupos biológicos de otras regiones.

Hay que hacer notar -y así lo expresa el mismo Darwin- que varios siglos atrás el jesuita José de Acosta (1540-1600) en su *Historia Natural y Moral de las Indias* (publicada en 1590) se había pre-

guntado ya por qué los animales y plantas de las Indias eran diferentes a los del Viejo Mundo. Responde que Dios situó allí las más apropiadas para vivir y reproducirse.

Casi dos siglos más tarde, tras su viaje científico a Laponia, Carlos Linneo (1707-1778) sigue apostando por el creacionismo científico: "las especies son las mismas que una a una fueron creadas por Dios Infinito al principio del mundo". El hecho de que las de Laponia sean diferentes se debe a que han sobrevivido allí las mejor dotadas para climas fríos. Las otras han emigrado a regiones más propicias.

1.2. Fósiles y Geografía hasta George Gaylord Simpson

Al final del siglo XIX algunos naturalistas se hacen las mismas preguntas que Acosta, Linneo y Darwin. Pero intentan responder desde otras categorías.

La referencia a los fósiles -ya intuita por Darwin- va a dar la clave para el avance histórico de la construcción de un paradigma explicativo. En 1896 se publica *A Geographical History of Mammals* de Richard Lydekker, una obra que marca un hito en la historia del pensamiento biogeográfico. Lydekker estudia la aparentemente irracional distribución de los mamíferos en el mundo y sobre todo la diferencia existente entre Norteamérica, Sudamérica y Europa. Este autor parte de esta hipótesis en su investigación: el estudio y conocimiento de los restos fósiles de mamíferos nos pueden dar la respuesta al problema de la distribución geográfica actual de los Mamíferos.



Dentro de la consideración darwinista de la vida, Lydekker apunta tres razones que pretenden justificar de la distribución geográfica de los mamíferos actuales en el mundo a partir del estudio de los fósiles:

- 1) La desigual distribución de los mamíferos por el mundo está regida por las modificaciones evolutivas de los distintos linajes de acuerdo con la Selección Natural (ya que el clima, los recursos alimenticios, la presión de los depredadores condicional la ausencia y/o la presencia de determinados grupos de mamíferos en espacios concretos).
- 2) La expansión ocasional de diversos grupos de mamíferos de una región a otra aprovechando momentos de retirada del mar o de los hielos. Esta expansión de los mamíferos pretende ocupar más territorio para aumentar la capacidad de recursos en momentos de crecimiento de los efectivos de la población.

El ejemplo típico es el de los caballos, que según los fósiles aparecen en América donde evolucionan y posteriormente pasan a Eurasia hace 5 millones de años (en el Plioceno).

- 3) Otra de las causas de la distribución irregular de los mamíferos por el mundo es la extinción local o universal de muchos grupos debido fundamentalmente a cambios climáticos (Lydekker alude aquí a la desaparición de los marsupiales de Europa en la Era Terciaria, ya que vivieron en ella tal como los atestiguan los fósiles).

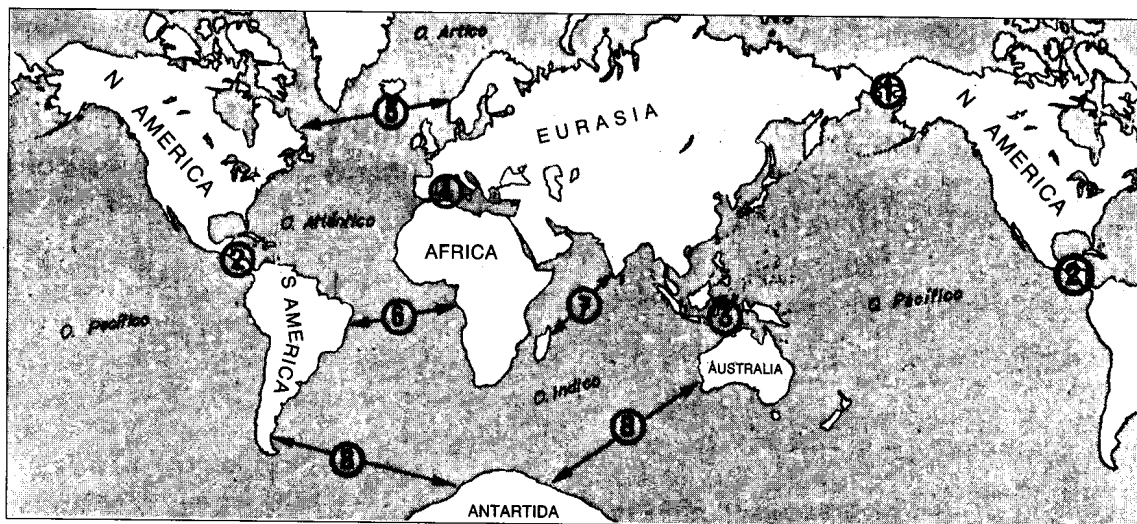
Los estudios de Lydekker y otros autores llegaron a postular la necesidad de recurrir a lo que se dio en llamar los **puentes intercontinentales** (lenguas de tierra hoy desaparecidas que unían continentes e islas a lo largo de los océanos y que a lo largo de los tiempos se han abierto y cerrado).

Esta era la explicación más lógica para la distribución de los tapires (que hoy viven en el SE de Asia y en América de Sur) para los que era necesario buscar un "paso" a través del océano si se les suponía un origen común.

También para los caballos era necesario un puente intercontinental entre América y Eurasia a través del Atlántico. La hipótesis del paso por el estrecho de Behring es posterior.

El primer trabajo más elaborado geológicamente y que pretendía justificar la hipótesis de los puentes intercontinentales se publica en 1907. Su autor es Theodor Arldt, el cual para explicar la distribución de mamíferos (dentro siempre de un modelo no movilista) debe acudir a muchos continentes hundidos y puentes intercontinentales.

En 1915 W.D. Matthew reduce a cuatro los puentes intercontinentales y además reduce mucho su tamaño, limitándose a pasarelas de corteza hoy hundida. Parte de la hipótesis (discutible paleontológicamente) de que los mamíferos aparecen y evolucionan siempre en los continentes septentrionales (en el norte, coincidiendo con zonas frías) y de ahí emigran hacia los continentes del sur (más cálidos).



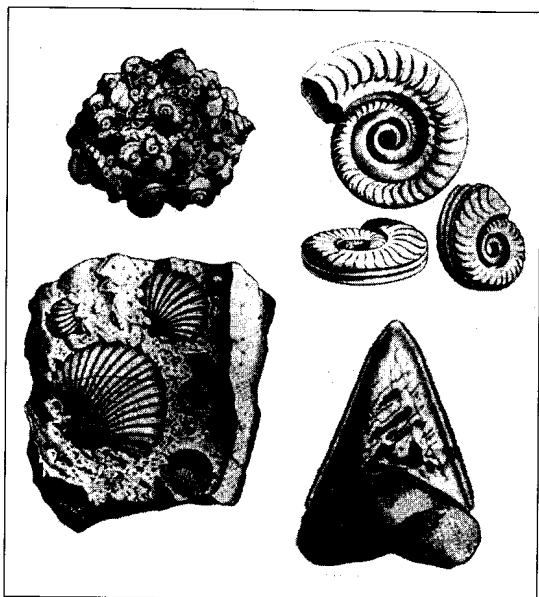
Posición de los principales "puentes intercontinentales": actuales (1-4), y más o menos hipotéticos (5-8) que han podido existir en épocas anteriores, cuando la distribución de continentes y océanos no era la misma que actualmente, según Meléndez (1977).

En algunos casos, son los cambios climáticos los que producen la extinción en las zonas más septentrionales, permaneciendo vivos en los continentes del sur. (Para una visión actual de estos problemas, con abundante bibliografía, ver Morales, 1989)

1.3. Wegener y los fósiles

Según testimonio del propio Wegener (Introducción a "El Origen de los Continentes y Océanos", 4ª edic. 1926, edición española de 1983), comenzó a tomar en serio la hipótesis de la Deriva después de enterarse de la evidencia fósil entre Brasil y África.

Wegener utiliza los fósiles como un argumento a favor de sus ideas, pero de sus ideas no obtiene conclusiones sobre la historia de la vida.



Láminas de la *Metellotheca* de Mercati. Michele Mercati (1541-1593).

Wegener no era paleontólogo sino meteorólogo y tuvo que acudir a fuentes secundarias para fundamentar sus ideas. Su tesis esencial es la siguiente: no hace falta acudir a la hipótesis de los Puentes Intercontinentales para explicar las semejanzas de faunas entre Brasil y África, y entre Australia, África y la India.

Tres investigaciones paleontológicas de principio de siglo reclaman su atención: por un lado, la presencia en los continentes del sur (África, Sudamérica, Australia y la India) de fósiles de la planta carbonífera *Glossopterys*, y que le permiten definir un gran supercontinente meridional, *Gondwana*.

Por otra parte, los estudios sobre los fósiles de un reptil paleozoico, *Mesosaurus*, que vivió en las zonas continentales pantanosas del Pérmico de Brasil y Sudáfrica. Es difícil que pudiese recorrer por un puente entre continentes los miles de kilómetros que los separan.

También la presencia de grupos de marsupiales en Sudamérica y Australia y que tienen los mismos parásitos a ambos lados del mar.

Apuntemos aquí, que hoy el planteamiento de las relaciones entre registro fósil y deriva continental es diferente: la tectónica de placas es el escenario (el sistema activo de interacciones) del proceso evolutivo, como veremos después.

Wegener no sólo postula un modelo más sencillo para explicar la distribución actual de los seres vivos en el planeta: la Deriva Continental no necesita acudir a hipotéticos puentes, puesto que son las masas continentales las que estaban primitivamente unidas. Wegener, por otro lado, es mordaz en sus críticas contra los defensores de los llamados Puentes Intercontinentales. Desde su punto de vista, los hipotéticos Puentes sin descartados con argumentos geofísicos. Da dos argumentos en contra de los Puentes:

- a) Si los fondos oceánicos estuviesen pavimentados con puentes hundidos del material de la corteza, las medidas gravimétricas deberían detectarlo, cosa que no se realiza.

- b) También la hipótesis de los puentes intercontinentales contradice el equilibrio isostático: si los puentes eran islas de corteza, no pueden hundirse en un manto más denso. Volverían a "flotar", lo cual no sucede.

1.4. La Biogeografía según la Teoría Sintética

La Teoría Sintética de la Evolución (nacida tras el Congreso de Princeton en 1940) recoge como uno de sus postulados básicos las ideas de Darwin sobre las barreras entre continentes y las de Lydekker sobre migraciones de mamíferos. Todo ello se expresa en un escenario no movilista (los continentes no se han movido de donde están).

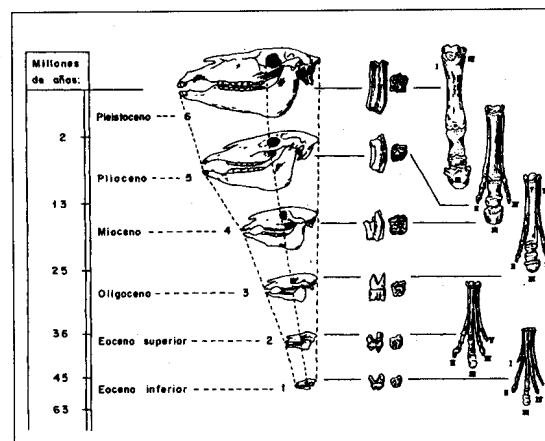
Parten de la hipótesis que cada especie se origina en el núcleo de una población periférica (poco numerosa) por la aparición fortuita de una mutación que en generaciones sucesivas va siendo seleccionada si favorece nuevas adaptaciones. Cuando aparece esa nueva "variedad" tiende a extenderse geográficamente y puede ser capaz de "saltar" las barreras (no sólo geográficas sino también ecológicas, etológicas, reproductoras...) que antes eran insalvables.

Esa variedad tiende a separarse (no sólo geográficamente) del núcleo parental y puede colonizar nuevos hábitats (un proceso de dispersión). Pero para ello debe hacer un itinerario (geográfico, ecológico, etológico...) a través de una zona no ocupada.

Los partidarios de la Teoría Sintética o Nueva Síntesis acuñan el término de "**ruta de dispersión**" para explicar las migraciones de los grandes grupos de organismos a lo largo de los tiempos. Ha sido el paleontólogo George Gaylord Simpson quien más ha profundizado en esta cuestión proponiendo modelos explicativos de gran solidez.

Simpson distingue tres tipos de rutas de dispersión:

- 1) Los llamados por él *corredores* o *pasillos*: son conexiones de tierra que permiten el paso en ambas direcciones de la mayor cantidad posible de organismos. El istmo de Panamá, por ejemplo, ha funcionado como tal en el Terciario.
- 2) Los *puentes filtro*: son pasillos que tienen un carácter selectivo en una de las direcciones: combinan la conexión terrestre con otro factor adicional (como el clima) de forma que elimina a algunos posibles migradores (así, la temperatura baja impidió que determinados animales cruzasen a Eurasia a través del Estrecho de Behring).
- 3) Las llamadas *rutas "lotería"*, o por azar. Son aquellas que la cruzan algunos por casualidad (por azar o fortuitamente). Así, la llegada de animales y plantas a una nueva isla volcánica es un proceso de colonización por azar: llegan los que son arrastrados por las corrientes, o adheridos a otros, o sobre un tronco flotante...). Suelen dar lugar (como en las Galápagos) a poblaciones de baja diversidad y ecológicamente desequilibradas).



Evolución de los Équidos en Norteamérica durante la "Era Terciaria", según Osborn, en Meléndez (1977).

1.5. La Biogeografía en la Tectónica de Placas

La Tectónica de Placas (o Tectónica Global) es un paradigma omnicomprensivo de las ciencias de la Tierra y de la Vida que tiene un planteamiento pluridisciplinar. Considera nuestro planeta como un subsistema dentro del Sistema Solar, y éste dentro de la Galaxia.

La Tectónica de Placas es un paradigma vertebrador de múltiples saberes sobre la dinámica del planeta en sus interacciones con los ecosistemas vivientes.

Este paradigma explica de un modo mucho más simple y deja menos problemas pendientes que el viejo paradigma de Simpson basado en hipotéticos corredores y rutas de dispersión. La Tectónica de Placas ha dejado de ser una bonita hipótesis para convertirse en un paradigma explicativo coherente y aceptado por la comunidad científica porque está dotado de un mayor poder explicativo.

Un ejemplo concreto muestra la potencialidad explicativa de la Tectónica de Placas para explicar algunos aspectos de la Evolución Biológica como es la distribución actual y pasada de los marsupiales.

La pregunta que puede hacerse es ésta: ¿Cómo explicar la presencia actual de marsupiales en América del Sur y en Australia?

Se conocen fósiles de marsupiales en Sudamérica desde el Cretácico (hace unos 100 millones de años). Los más antiguos en Australia son del Terciario. La hipótesis de las migraciones, barreras y puentes deja cabos no resueltos: ¿cómo pasaron de América del sur a Australia? Matthew opina que migraron desde Sudamérica hasta África y de ahí a Asia y de Asia a Australia.

Dentro del paradigma movilista se explica de forma más simple: en el Eoceno Sudamérica y Australia estaban cerca entre sí y de la Antártida. Por allí debieron pasar, dado que la Antártida tenía entonces un clima cálido.

Para esta hipótesis existe una contrastación actual: en 1982 se descubrió una mandíbula de marsu-

pial del Eoceno (40 m.a.) en la isla Seymour en la Antártida. Justo en el lugar intermedio entre Sudamérica y Australia. Por ello, la fiabilidad de esta explicación parece mayor.

2. Tectónica de Placas y Evolución Biológica:

La pregunta que ahora es oportuno hacerse es la siguiente: ¿Qué poder explicativo tiene la Tectónica de Placas en el escenario evolutivo?. ¿Cómo influye el movimiento de las placas continentales en el hecho evolutivo?.

En diversos trabajos, el profesor Bjorn Kurtén (1974) y sobre todo el profesor Anthony Hallam (1972, 1974, 1980) han presentado modelos explicativos de fenómenos evolutivos que se explican más fácilmente dentro del paradigma de la Tectónica de Placas.

La hipótesis de Hallam (1972, ampliamente seguida hoy por los paleontólogos) es ésta: cuando una masa de tierra se rompe y separa el resultado es el aislamiento genético (y por ello divergencia morfológica), y que haya climas diferentes en ambos lugares (que da lugar a presión selectiva diferente).

Al contrario: las fusiones de continentes da lugar a homogeneización de áreas, migraciones en ambos sentidos y aumento de la competencia por el espacio y los recursos.

La fundamentación la encuentra Hallam en los trabajos del geólogo W. Valentine sobre la diversidad biológica en función de la posición de los continentes. El cambio de posición de los continentes puede dar lugar a procesos evolutivos muy diferentes.

Hallam reduce a cuatro estos procesos: Divergencia, Convergencia, complementariedad y vicarianza.

Divergencia: Hay veces que en el registro fósil se observa que la composición y diversidad de los ecosistemas va siendo diferente en el tiempo. En un primer momento las faunas y floras son comunes pero van divergiendo. Estos casos coinciden con una separación geográfica de áreas continentales.

Hallam presenta tres ejemplos: dos del Cenozoico y otro del Mesozoico.

El primero se refiere al tardío alzamiento del istmo de Panamá hace dos millones de años. Se separan dos regiones marinas que hasta entonces tenía los mismos moluscos. Durante el Pleistoceno se han desarrollado especies gemelas descendientes de géneros idénticos (pero aislados).

El segundo ejemplo se refiere a los invertebrados del Tethys en el Terciario inferior. En esa época eran los mismos desde el Caribe hasta el Mediterráneo. Durante el Mioceno, hace unos 25 m.a. la homogeneidad se ve fragmentada. Los del Atlántico son diferentes a los del Mediterráneo.

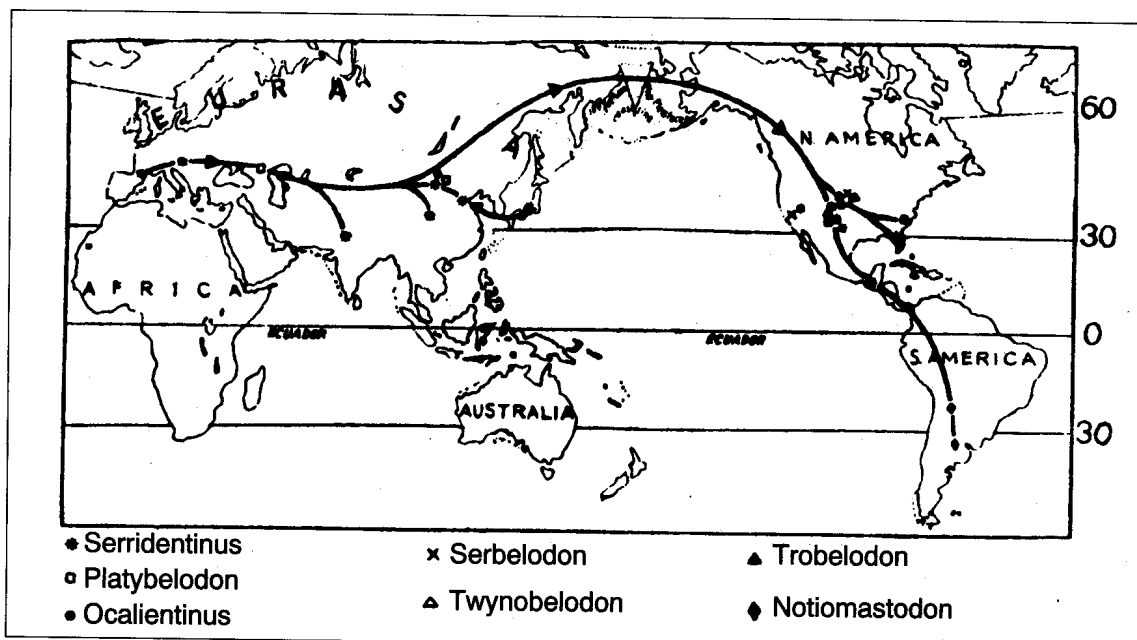
Tercer ejemplo: los animales terrestres del Terciario.

Durante el Mesozoico era los mismos en Australia, Africa y Sudamérica, sobre todo en los reptiles.

Su diversificación en el Terciario es consecuencia de la fragmentación de la Pangea en el Mesozoico superior.

Convergencia: es el incremento, a medida que transcurre el tiempo, en el grado de similitud entre faunas de distintas regiones.

Un ejemplo, explicado mejor por la deriva continental, lo suministra la historia biológica de Sudamérica respecto a los mamíferos terciarios. Los Mamíferos fósiles anteriores al Plioceno son muy diferentes al norte y al sur de América.



Variaciones en la distribución geográfica y migraciones de los Mastodontes durante el Neógeno, según Osborn, en Meléndez (1977).

De los actuales mamíferos de sudamérica, el 44% son de origen norteamericano y el 56% son propios del sur.

Hacia el final del Plioceno (hace unos dos millones de años aproximadamente) ocurrió un brusco cambio: se estableció una conexión de tierra firme entre las dos américas: el istmo del Panamá. Muchos animales de Norteamérica cruzaron hacia el sur. Entre ellos estaba el Mastodonte, el tapir, camellos primitivos, y algunos carnívoros. Simultáneamente, muchos de los endemismos Sudamericanos se extinguieron: estos perdedores fueron los primitivos marsupiales (excepto dos géneros). Pero este tráfico no fué unidireccional: los armadillos migran al norte.

Simpson evalúa que antes de la unión de las dos Américas quizá 29 familias de mamíferos vivían al sur, y 27 familias muy diferentes vivían al norte.

Después de la unión los dos continentes tenían 22 familias en común (casi todas invasoras del norte y que extinguieron las faunas de Sudamérica).

Otro ejemplo de convergencia (Hallam, 1972) lo muestran los mamíferos africanos. Hace 25 millones de años la fauna de mamíferos de África tenía un fuerte endemismo. En el Mioceno inferior una serie de mamíferos euroasiáticos penetró en África por una o varias conexiones de tierra firme (migración hacia el norte de la placa afro-arábica y fusión de placas tras orogenia Alpina). La migración produjo la reducción e incluso extinción de parte de la fauna africana. Al mismo tiempo, los elefantes ancestrales cruzaron hacia Eurasia y pronto se esparcen por todo el mundo.

Un tercer ejemplo clásico (Hallam, 1972) de convergencia nos lleva al Cámbrico y Ordovícico inferior. Durante el Cámbrico los Trilobites estaban separados en dos faunas distintas (dos provincias): la americana y la europea. A lo largo del Ordovícico y Silúrico se pierden las diferencias. Hacia el Silúrico ya solo hay una provincia.

Como los trilobites viven en zonas costeras, se piensa que había un protoatlántico que se va cerrando en el paleozoico y deja pasar faunas de un sitio a otro.

Complementariedad: Se denomina así este tipo de distribución de los fósiles porque las faunas de costas y plataformas oceánicas adyacentes reaccionan a modificaciones del medio ambiente de forma complementaria. El ejemplo clásico es la situación antes y después del Plioceno del área de tierra del istmo de Panamá y los moluscos marinos del Atlántico y del Pacífico a ambos lados del mismo.

Antes del Plioceno, el mar une ambos mares, y por ello los moluscos de la plataforma son comunes a ambos lados. No así los mamíferos que son diferentes (por divergencia) a ambos lados del continente.

Tras la emersión del istmo, éste hace de corredor-filtro para los mamíferos (convergencia) y de barrera para los moluscos (que por divergencia van siendo progresivamente diferentes como en la actualidad).

Endemismo disjunto (Vicarianza): Describe esta situación: un grupo de organismos fósiles tiene una distribución geográfica limitada, pero en cambio aparece en varias partes del mundo que están en la actualidad, separadas por barreras geográficas importantes (como son los océanos).

Es clásico el caso del Mesosaurus (reptil pequeño del paleozoico con dentadura en forma de sierra) que sólo está en Brasil y África del sur. Era acuático y pantanoso. Ello indica que las zonas estuvieron en contacto en el pasado.



Los dinosaurios ofrecen un ejemplo interesante de endemismo disjunto: en Jurásico superior hay dos géneros (Brachiosaurus y Barosaurus) localizados en Norteamérica y África oriental. Los Brachiosaurus están también en Portugal y Argelia. Por este tiempo la Pangea se había fraccionado.

Otro caso de dinosaurios: en Cretácico superior en la India hay Laplatosaurus, Tithanosaurus y Antarctosaurus. Estos géneros aparecen también en Sudamérica y África oriental/Madagascar. Su origen está en un supercontinente luego roto y en la migración del continente Indio hace unos 100 mill. de años.

3. IMPLICACIONES DIDÁCTICAS

La construcción histórica de las relaciones entre Evolución y Tectónica de Placas sigue una secuencia interna lógica que hasta cierto punto sigue la secuencia de construcción de conocimientos.

Para sintetizar la propuesta, describimos en términos de "escenarios" los conjuntos de conocimientos que han ido configurando históricamente

las relaciones entre los problemas biogeográficos, la Evolución Biológica y la tectónica de Placas.

1. **Escenario creacionista:** El primer "escenario" que describe de alguna manera la interpretación inicial de lo que se entiende por biogeografía, se mueve dentro del paradigma más intuitivo y a la vez más persistente, como es el escenario creacionista. Para el P. José de Acosta y para Linneo no hay duda del hecho de la creación por parte de Dios de todas las especies que existen en el mundo.

La pregunta creacionista es si Dios llenó el mundo de las mismas especies, y luego éstas se han ido extinguiendo o se han ido de allí, o bien Dios ya creó en cada sitio las especies que venían bien según el clima y que él las distribuyó cada una en su lugar debido a su infinita sabiduría.

Es la interpretación que suelen dar los alumnos en los primeros cursos de Educación Secundaria (Sequeiros y Martínez Urbano, 1991). Desde nuestro punto de vista, la representación mental organizada dentro del escenario creacionista es difícil de sustituir por la representación evolutiva del mundo.

Tal vez sea el trabajo sobre la Diversidad y la Distribución Geográfica de animales y plantas una de las palancas del cambio conceptual previo a todo lo demás. Desde el punto de vista didáctico, la secuencia de aprendizaje habría de comenzar desde aquí.

Posiblemente algunos de los esquemas de distribución geográfica de mamíferos presentados por Hallam (1992) podrían ser un buen material para el planteamiento de problemas: ¿Por qué en América del Sur hay muchos mamíferos que no existen en América del Norte?. ¿Qué nos indican los fósiles encontrados?.

2. **Escenario darwinista:** para Darwin -siguiendo a Lyell- los continentes y los mares están ahora en el mismo sitio en que han permanecido durante muchos millones de años. En este sentido, Darwin nunca se planteó la posibilidad de un movimiento de continentes. En todo caso, el mar puede subir y bajar de nivel e inundar algunas regiones costeras.

Esas oscilaciones lentas y graduales del nivel del mar se deben a los cambios climáticos que se han sucedido a lo largo de los tiempos geológicos y de los que tenemos evidencia por los depósitos geológicos (fósiles marinos sobre montañas, restos de cuencas fluviales o depósitos glaciares) y por los fósiles (hay restos fósiles que evidencian otros climas diferentes a los actuales).

Las ideas darwinistas se fraguan dentro del llamado paradigma uniformista, cuyo máximo exponente es Charles Lyell. Las ideas más esenciales están en el libro que Darwin llevó en su viaje: "*Principles of geology*" (1831-1835).

Las observaciones fueron organizándose en la mente poderosa de Darwin que nos ha dejado su itinerario de aprendizaje y reestructuración cognitiva en su *Viaje de un naturalista alrededor del mundo*.

Darwin -y en esto difiere de Lyell- postula que los animales y plantas a lo largo de millones de

años se han ido seleccionando, adaptándose al clima que en cada momento hay en una región o extinguiéndose cuando las condiciones son adversas.

Llegar a construir en la mente de los alumnos el escenario darwiniano (al menos en sus conceptos más elementales) es una tarea ardua no exenta de espinosas desviaciones hacia escenarios **lamarkistas**.

Una unidad didáctica basada en actividades para construir los conceptos de selección natural darwinista y desterrar las concepciones adaptacionistas lamarckianas serán aquí un paso previo para la construcción de escenarios movilistas.

3. **Escenario wegeneriano** (o movilista): este escenario de representación del mundo supone ya un paso más: en él los continentes se desplazan ("flotan" sobre un manto fluido y van como barcos a la deriva empujados por la fuerza centrífuga del giro terrestre y por el campo magnético).

En la mente de Wegener (1880-1930) los continentes flotan y se desplazan sobre un manto fluido. Los mares son pasivos, pero pueden invadir continentes. Los organismos son solo pasajeros pasivos a bordo de los continentes. Los continentes al cambiar de sitio, cambian de posición y de clima.

Sin embargo las ideas de Wegener han aparecido en diversas ocasiones en la historia de las ciencias, de manera más o menos estructuradas. Hallam (1980) señala entre los precursores de Wegener a los siguientes: **Francis Bacon** (1561-1626; 1620 *Novum Organon*), F. Placet (1666: *La corruption du grand et petit monde*), Buffon (1707-1788), Alejandro von Humboldt (1769-1859). También tienen algunas ideas lejanamente wegenerianas: Snider-Pellegrini (1858: *La Création et ses mystères dévoilés*). G.H. Darwin (1845-1912), Osmond Fisher y F.B. Taylor (Hallam, 1980).

4. **El escenario de la Tectónica de Placas.** Algunos libros de Historia de las Ciencias de la Tierra presentan a la historia de la construcción de la Tectónica de Placas como uno de los ejemplos más clásicos de las "revoluciones científicas" de T.S. Kuhn (1975).

Lo que sí es claro es que la Tectónica de Placas supone un cambio radical en el modo de conocer la realidad de la dinámica del planeta Tierra. Pero la construcción de ese escenario supuso muchos años de controversia. De algún modo, es un indicador de la dificultad de la mente humana para construir adecuadamente ese paradigma integrador de las ciencias de la Tierra. Desde el punto de vista didáctico, los alumnos memorizarán una información sobre el tema destinada a los exámenes, pero con dificultad habrán reestructurado todas sus representaciones sobre el planeta.

Las ideas de Wegener cayeron en el olvido tras su misteriosa desaparición en Groenlandia en 1930. Algunos geólogos tuvieron tímidos intentos de defensa: entre ellos se citan A. Holmes (1929) y A. du Toit (1937).

Con la posguerra se reinician unos estudios en los fondos oceánicos y sobre el magnetismo terres-

tre. La expedición del Challenger (1953) aportó un gran número de datos para el conocimiento del interior de la Tierra completados durante el Año Geofísico Internacional (1962).

Las primeras hipótesis sobre expansión del suelo oceánico se formulan entre 1960 y 1968: son los trabajos de H.H.Hess (1960), Vine y Matthews (1963) y Tuzo Wilson (1965). En 1968 Heirzler, Pitman y Le Pichon elaboran un esbozo mucho más cercano a lo que hoy concebimos por Tectónica de Placas.

La aceptación de la Tectónica de Placas no se realiza en el mundo de la ciencia hasta final de los años 60. Desde 1967, se publican nuevos datos que confirman las hipótesis. A ello colaboraron de modo importante:

1968: Journal of Geophysical Research.

1969: Deep Sea Drilling Project.

1971: Proyecto Famous: descubrimiento de rocas volcánicas en dorsales.

En la actualidad, el escenario de la Tectónica de Placas inunda el paradigma de las Ciencias de la Tierra y de la vida. Entender lo que significa el planeta y los seres vivos implica haber asimilado las ideas más básicas del modelo.

Desde la perspectiva didáctica, es imposible que los alumnos de Secundaria puedan entender los elementos más básicos de la tectónica de Placas en relación con los procesos evolutivos. Recientes cursillos para la formación de profesorado de Ciencias en Secundaria nos han confirmado esta dificultad. Pero consensuar unos mínimos dentro del Plan Docente de Centro es importante para la formación científica de los alumnos y alumnas.

4. CONCLUSIONES:

1. La historia de las Ciencias de la Tierra nos muestran -de modo esquemático- cuatro escenarios en los que se ha desarrollado la construcción de la tectónica de Placas en su relación con la Evolución Biológica.

2. Estos cuatro escenarios se han sucedido históricamente en el tiempo y marcan de alguna manera el crecimiento de la mente humana sobre estas cuestiones. De algún modo señalan la secuencia de aprendizaje a utilizar con los alumnos de Secundaria para la tectónica de Placas y Evolución.

3. Es necesario resaltar que será necesario pasar por los cuatro escenarios y haberlos ido interiorizando. En el diseño de las Unidades didácticas correspondientes habrá que irlos recorriendo.

4. Los alumnos, al principio de su proceso de aprendizaje, sostienen concepciones del mundo muy similares al escenario creacionista. Pasar al escenario darwinista supone un considerable esfuerzo de reestructuración cognitiva.

5. La asimilación del escenario movilista, primero wegeneriano y luego "tectonicista" no es tan sencillo como parece. El modelo tectonicista une varios conceptos complejos: el tiempo geológico

escenario en cuyo marco tiene lugar el drama evolutivo, los cambios climáticos de la Tierra, por desplazamiento de los polos, cambio de posición de las placas y oscilaciones del universo y el hecho del cambio biológico (evolución).

6. El profesorado deberá confeccionar sus propias unidades didácticas tendentes a movilizar las representaciones no científicas y construir de modo significativo los nuevos conceptos emergentes al nivel de formulación asequible para el alumnado según edad y nivel. Pero estas unidades -dentro de lo posible- tendrán en consideración la secuenciación de construcción de escenarios propuesta en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA DE TECTÓNICA DE PLACAS Y EVOLUCIÓN

- Acosta, José de (1590) *Historia Natural y Moral de las Indias*. Hay distintas ediciones. La más actual de Historia 16, de 1992.
- Agüeda, J., Anguita, F., Araña, V., López Ruiz, J., Sánchez de la Torre, L. (1983, 2ª edic.). *Geología*. Editorial Rueda, Madrid, 528 pp.
- Alonso, M.A. y Sesé, C. (1988) *Historia de la Tierra y de la Vida*. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid, 118 pp.
- Anguita, F. (1988). *Origen e Historia de la Tierra*. Editorial Rueda, Madrid, 524 pp.
- Cloud, P. (1983) La Biosfera. *Investig. y Ciencia*, 86, 116-127.
- Darwin, Ch.R. (1859) *El Origen de las Especies por la Selección Natural*. Hay diversas traducciones al español.
- Elsom, D. (1993) *La Tierra: creación, formación y mecanismos de un planeta*. Ediciones del Prado, 209 pp.
- Erickson, J. (1992) *La vida en la Tierra. Origen y evolución*. McGraw Hill, 303 pp.
- Hallam, A. (1972) La deriva continental y el registro fósil. *Investig. y Ciencia*, En: *Ecología, Evolución y Biología de las poblaciones*. Omega, 1978, 81-90.
- Hallam, A. (1974) *Atlas of Palaeobiogeography*. Elsevier, Amsterdam.
- Hallam, A. (1980) *De la deriva continental a la tectónica de Placas*. Editorial Labor, Barcelona, 136 pp.
- Kuhn, T.S. (1965, 1975) *Estructura de las Revoluciones Científicas*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Kurtén, B. (1974) Deriva continental y evolución. En: VVAA. *Deriva continental y Tectónica de placas*. Selección de Scientific American, Barcelona, 128-139 pp.
- Meléndez, B. (1977) *Paleontología*. T. 1. Parte general e invertebrados. Ed. Paraninfo. Madrid. 715 pp.
- Morales, J. (1989) Dispersiones de organismos terrestres y crisis geodinámicas. En: Aguirre, E. edit. *Paleontología. Nuevas Tendencias*, CSIC, Madrid, pp.259-270.
- Sequeiros, L. y Martínez Urbano, M. (1991) Evolución de las representaciones mentales sobre la Evolución Biológica: la creación y el origen del hombre. *Investigación en la Escuela*, Sevilla, nº 17.
- Simpson, G.G. (1985) *Fósiles e Historia de la vida*. Biblioteca Científica American, Barcelona, 240 pp.
- Tarling, D.H. y Tarling, M.P. (1975) *Derivas continentales*. Edit. Alhambra, col. Exedra, 106, 124 pp.
- Vera Torres, J.A. (1994) *Estratigrafía. Principios y Métodos*. Edit. Rueda, Madrid, 806 pp. (sobre todo, pp.673-746).
- VVAA. (1974) *Deriva continental y Tectónica de placas*. Selección de Scientific American, Barcelona, 231 pp.
- VVAA. (1983) *Dinamismo Terrestre. Investig. y Ciencia* (monográf.). nº86 (Noviembre), pp.14-136.
- VVAA (1990) *Planeta Tierra*. Serie TV de IBM con materiales didácticos.
- Wegener, A. (1983, de la edic. de 1926) *El Origen de los Continentes y Océanos*. Con un epílogo de F. Anguita. Edit. Pirámide, 230 pp.
- Wilson, J.T. (1974) Deriva continental. En: VVAA. *Deriva continental y Tectónica de placas*. Selección de Scientific American, Barcelona, 45-62. ■