

TEMA DEL DÍA

LA PERSPECTIVA DE LA UNIFICACIÓN DE LAS CIENCIAS DE LA TIERRA.

Perspective of Earth Sciences unification

J. L. San Miguel de Pablos (*)

RESUMEN:

Resumen.- A lo largo de la Historia de la Geología se han enfrentado dos “tradiciones paradigmáticas”, designadas en el artículo como *degradacionista* y *sistemista*. A la última pertenecerían tanto la tectónica de placas como la hipótesis Gaia. Pese al muy distinto peso concedido a una y otra concepción por la comunidad científica, pueden existir significativos vínculos entre ellas que acaso merecería la pena explorar. Por otra parte, si toda ciencia natural madura se enfoca sobre un nivel de estructuración de la materia-energía (diríamos que sobre un *nivel sistémico*), la eventual definición de un nuevo nivel (el de los “objetos planetarios”) podría tener el inesperado efecto de hacer madurar una geología unificada.

ABSTRACT:

Seemingly two paradigmatic traditions -named *degradationist* and *systemist* in the article- have been opposing one another along the History of Geology. Both the tectonics of plates and the hypothesis of Gaia belong to the latter. In despite of their unequal reception by the scientific community, significant links exist between them, and exploring such links could be suitable... Moreover, if one can agree that every mature science applies to a specific *systemic level*, the definition of a new level could have an unexpected effect: it could bring to us a mature unified Geology.

Palabras clave: *Historia de la geología, paradigmas, degradación térmica de la Tierra, auto-organización, sistemas (Teoría de), tectónica de placas, hipótesis Gaia, planetología, ciencias maduras.*

Keywords: *History of Geology, paradigms, thermic degradation of Earth, self-organisation, systems (theory of), tectonics of plates, Gaia hypothesis, planetology, mature Sciences.*

DOS TRADICIONES GEOLÓGICAS

Son bastantes los autores que defienden, hoy en día, que no ha existido ningún “primer paradigma” de la geología con anterioridad a la tectónica de placas¹. Esta teoría -cuyas nociones fundamentales se establecieron en los años sesenta del presente siglo- sería pues, históricamente, la primera concepción paradigmática (por utilizar la conocida noción kuhniiana) con que han contado las ciencias de la Tierra, mientras que otras propuestas globales tales como el neptunismo, el plutonismo, el catastrofismo y el actualismo no habrían pasado de apuestas parciales interpretativas -las dos primeras- o metodológicas -las dos últimas- que tuvieron su importancia, puesto que impulsaron fructíferos programas de investigación (Lakatos), pero que ni lograron dotar de plena coherencia a nuestra percepción de las dinámicas terrestres, ni tampoco alcanzaron el suficiente grado de consenso en la comunidad de los estudiosos de la geología.

Este punto de vista parece perfectamente defendible, sin que sea capaz de invalidarlo el hecho manifiesto de que, en el curso de los últimos dos siglos, se hayan desplegado diversas líneas teóricas orientadas a dar con “la causa fundamental” que gobierna los procesos geológicos. Una de tales líneas fue la *teoría contraccionista*, según la cual la formación de los geosinclinales y la actividad orogénica eran consecuencia de un supuesto fenómeno general de contracción del globo terráqueo, que sería debido a su paulatino enfriamiento, el cual se daba por seguro desde el momento que no se conocía otra energía interna terrestre que la térmica residual. La contratación del predicamento de que gozó este pre-paradigma geológico conduce a observar que parece haber existido, desde los inicios de la investigación geológica, una línea divisoria nítida entre los distintos modos de aproximarse a la dinámica global del planeta..., una línea divisoria tan marcada

(*) Plaza de Matute, 4; 4^oD. E-28012 Madrid

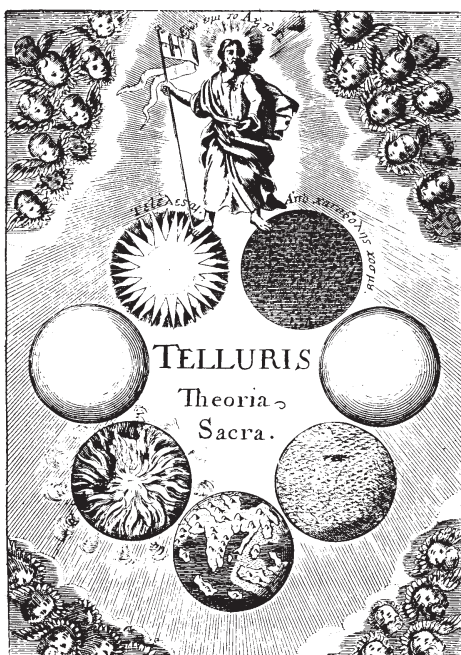
(1) Por ejemplo Anthony Hallam i Alberto Elena.

que podría bastar para delimitar dos *tradiciones paradigmáticas*² con claras connotaciones filosóficas, que -en mi opinión- se encuentran presentes constantemente en la historia de la geología. Para designarlas, propongo los términos de “corriente degradacionista” y “corriente sistemista”. Voy a tratar de resumir sus características:

a. Tradición degradacionista.

Referencias: Werner, Suess, Kelvin y, en general, los contraccionistas y los estabilistas.

Claves conceptuales: degradación térmica de la Tierra, binomio enfriamiento-contracción (siendo esta última la causa de los geosinclinales y de las orogenias). El enfriamiento terrestre impone límites temporales más o menos estrechos, así como condicionamientos estrictos a la evolución biológica (Kelvin). Se tiende a apoyar el fijismo continental. Se contempla la perspectiva de la muerte térmica del planeta. **La Tierra es concebida como un dominio más de aplicación lineal del 2º principio de la termodinámica**, y no en absoluto como “un sistema autoorganizado”, “una entidad viva” ni nada por el estilo. Para esta tradición la Tierra es más bien **un escenario** en el que se producen “fenómenos geológicos” de diferentes entronques (fenómenos físicos, químicos, etc.) y en el que, entre otras cosas, ha surgido la vida y ha evolucionado. La Tierra se ve pues como un objeto inorgánico sometido a degradación entrópica.



Frontispicio del Telluris Theoria Sacra de Thomas Burnet.

(2) Tradiciones paradigmáticas.- Al seguir la historia de las ciencias que observamos que con frecuencia ideas, hipótesis y hasta paradigmas se “engarzan” constituyendo auténticas tradiciones culturales (noción, por cierto, cara a Feyerabend) con un hilo conductor destacable..., tradiciones con mayor o menor vigencia según las épocas, pero cuya continuidad se mantiene (aunque también hay veces que parece interrumpirse para luego reanudarse, y quizás estemos entonces ante etapas de relativa marginalización). Así, en geología tenemos una tradición movilita (Fisher-Wegener-tectónica de placas) y en biología una evolucionista (Lamarck-Darwin).

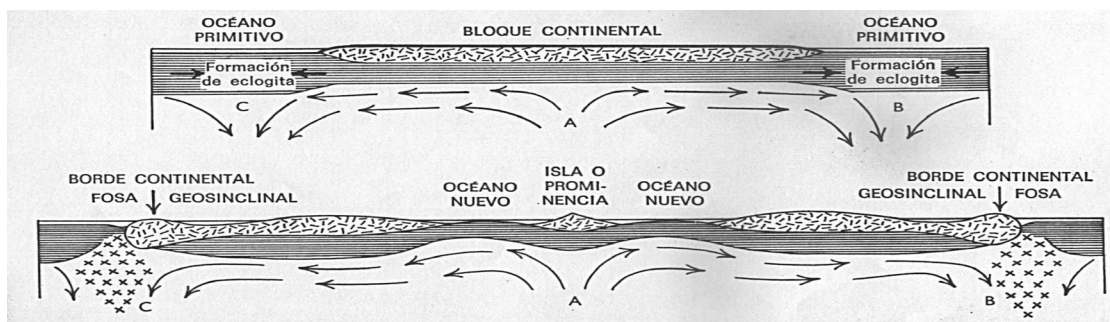
b. Tradición sistemista.

Referencias: Hutton, Lyell (en cierta medida), Wegener y otros movilitas, tectónica de placas, hipótesis Gaia.

Claves conceptuales: la Tierra es un sistema (un sistema orgánico para Hutton, un sistema homeostático controlado por el fenómeno de la vida, en la hipótesis Gaia). Hoy en día estamos en condiciones de formular con bastante más rigor que hace tan sólo unas pocas décadas, la diferencia fundamental que separa a esta tradición paradigmática de la anterior: se trata de una diferencia de carácter energético-termodinámico. De acuerdo a la concepción actual (Prigogine *et al.*) de sistema autoorganizativo, si la Tierra es uno de ellos, sus múltiples componentes elementales -cuya interacción se situaría entonces “lejos del equilibrio termodinámico”- tendrán que estar inmersos en uno o varios flujos sobreabundantes de energía. Ahora bien, así es efectivamente, dado que podemos reconocer inmediatamente dos de tales flujos: en primer lugar el de la energía geotérmica, y en segundo lugar, el de la energía solar que es un flujo de energía sobreabundante y no decreciente, puesto que hoy sabemos que el Sol experimenta un calentamiento paulatino, en vez de un enfriamiento como se creía en tiempos de Kelvin. Así pues, inmersa como lo está en estos dos flujos de energía, la Tierra ha debido generar estructuras disipativas capaces de impedir que su entropía global haya ido en aumento a lo largo de los tiempos geo-cosmogónicos.

LAS CIENCIAS DE LA NATURALEZA COMO DOMINIOS IMPLICITOS DE UN CONOCIMIENTO “SISTÉMICO”

Una reflexión atenta acerca de la caracterización de sus respectivos objetos de estudio, conduce a constatar que todas y cada una de las ciencias generales “maduras” se enfocan sobre un nivel sistémico concreto de integración de la realidad. Es así, desde luego, para la física (en sus dos dominios, que son la dinámica cuántica y la dinámica clásica), para la química (la ciencia del nivel atómico/molecular), para la biología (centrada en el nivel de complejidad propio de la vida orgánica), para la astrofísica/cosmología, e incluso para la antropología y la sociología. ¿Sucede así también en el caso de la geología? Examinémoslo... Focalizada durante siglos sobre un objeto único (el planeta Tierra), la geología ha sido - y sigue siendo- estrechamente subsidiaria de la física, la química, la biología y la cosmología, sin que aparentemente su campo de estudio se identifique con un nivel sistémico específico. Teniendo esto en cuenta y valorándolo como pienso que se merece, llega uno a la conclusión de que existía una verdade-



Entre las primeras ilustraciones de autores movilstas que propugnan la convección se cuenta ésta de 1928 de Arthur Holmes, uno de los pocos geólogos que en su tiempo cultivaron y desarrollaron las entonces denostadas ideas de Wegener (Reproducido de Holmes y Holmes, 1980, *Geología Física*, ed. Omega, p. 714).

ra dificultad de fondo para que la geología se constituyese como ciencia general madura, encontrándose obligada a quedarse en rama científica especializada (que es lo que me parece que siempre ha sido, hasta ahora). Esto podría tener bastante que ver con el “papel hegemónico” concedido a otras ciencias de la naturaleza (en primer lugar, a la física) por los epistemólogos y filósofos de la cultura, en sistemático detrimento de la geología. Ahora bien, una rama científica inicia un proceso de maduración -tal como, en un momento dado, pasó con la electricidad o con la óptica dentro del marco de la física- desde el momento en que se dota de un primer modelo paradigmático, el cual tiene la virtud de darle la coherencia y la unidad mínima imprescindibles, así como de crear el suficiente consenso en la comunidad de los científicos sobre las causas generales de los fenómenos que estudia. Dado que el primer auténtico paradigma de la geología es la tectónica de placas, parece que su triunfo debería haber supuesto la transformación de las dispersas “ciencias geológicas” en una geología integrada en tanto que rama científico-natural. Sin embargo no ha sido así, a todas luces, y cabe preguntarse por qué...

La tectónica global ha definido un modelo dinámico del planeta Tierra, un modelo que suministra explicaciones verosímiles de la mayoría de los fenómenos geológicos y que además está dotado de una

notable capacidad predictiva. Está claro, por otra parte, que tal modelo -pese a su carácter paradigmático- no basta por sí solo para poner de manifiesto un nuevo nivel estructural auto-organizativo del mundo físico. Y ello a pesar de quedar flotando una pregunta: ¿no sugiere la tectónica de placas un “sistema Tierra”? En otros términos, ¿acaso el modelo tectónico global no pone ya de relieve que nuestro planeta exhibe unos ciertos rasgos autoorganizativos? Examinemos con mayor detenimiento esta cuestión.

LA TECTÓNICA GLOBAL DE PLACAS LITOSFÉRICAS COMO PRIMERA DINÁMICA AUTO-ORGANIZATIVA DE LA TIERRA

La Tierra cuenta, desde el punto de vista endógeno, con una importante fuente de energía conocida como “calor interno”, cuyo origen sería doble: energía residual de la acreción primitiva y energía radiactiva.³ Desconozco cuál es el peso relativo exacto de ambos factores, pero parece estar claro que, en todo caso, la radiactividad natural terrestre es muy importante. Por consiguiente, los cálculos de lord Kelvin -considerados en su tiempo como irrefutables- según los cuales, dada su temperatura y actividad volcánica actual, la Tierra no podía tener más de 100 millones de años, no estaban mal hechos..., lo que pasa es que él nunca contó con la radiactividad.

En los años cuarenta se sugirió que al generarse esta energía en exceso, no se puede entender cómo es que la Tierra no experimenta un sobrecalentamiento, con su corolario de un notorio incremento de vulcanismo. Habiéndose planteado, sin embargo, esta observación antes de que Prigogine descubriese que las “estructuras disipativas” son la base elemental de los sistemas autoorganizativos, hoy está claro que en ellas reside la respuesta al enigma planteado, dado que las placas tectónicas (desconocidas también hace cincuenta años) configuran unas gigantescas células de Bénard termo-reguladoras que permiten una disipación eficaz del calor interno radiactivo, y que tienen paralelamente la virtud de estructurar globalmente el planeta.

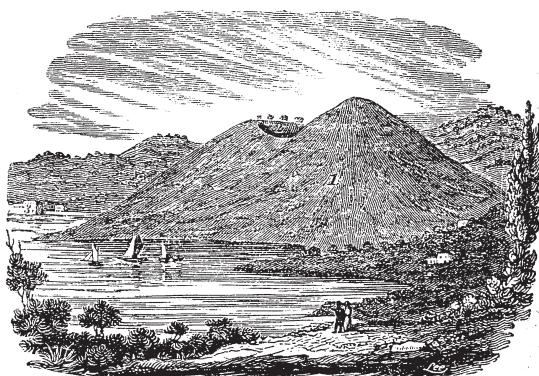


Ilustración de la primera edición de los Principes of Geology de Charles Lyell.

(3) Incluso ha sido propuesta una tercera fuente de energía geotérmica: la de cristalización del núcleo interno sólido.

SEGUNDA DINÁMICA AUTOORGANIZATIVA TERRESTRE: LA “GAIA” DE LOVELOCK Y LYNN MARGULIS

Sin embargo, la cosa se complica cuando consideramos que simultáneamente la Tierra se baña en un segundo flujo de energía, aun más importante que el que acaba de ser descrito. Se trata de la radiación solar. Hoy sabemos que ésta se ha incrementado lenta pero significativamente -al parecer en torno a un 30%- a lo largo de los tiempos geológicos. ¡Todo lo contrario de lo que se creía en el siglo XIX! La divergencia entre el “inevitable” sobrecalentamiento teórico de origen solar, y el real mantenimiento aproximado de la temperatura media del planeta ha sido estudiada por Lovelock, y la solución que el investigador británico propone a esta paradoja es uno de los pilares (quizá el principal) de su tan célebre como polémica *teoría de Gaia*, que paso a continuación a resumir:

Lovelock llama la atención sobre una serie de homeostasis (fenómenos de autorregulación) que únicamente se dan en la Tierra y no en ningún otro planeta del sistema solar. Tales homeostasis van todas ellas en el sentido de mantener las condiciones físicas que hacen posible la existencia y el mantenimiento del fenómeno de la vida orgánica. Tenemos en primer lugar una **homeostasis térmica** que es en cierto modo análoga al mantenimiento de la temperatura corporal en las aves y los mamíferos: a pesar del incremento de la radiación solar en el transcurso de los últimos 4 Ga., diversos fenómenos terrestres han cooperado para hacer que la temperatura media del globo se mantuviese casi estable, con escasos picos fuera de los límites normales. Y aparentemente tales picos han sido rápidamente amortiguados por la reacción estabilizadora de “Gaia”.

Se observa asimismo el **mantenimiento de la proporción de oxígeno molecular** en la composición de la atmósfera, aunque sólo a partir de la llamada “revolución del oxígeno”, cambio radical que consistió en el aumento espectacular de dicho gas hace alrededor de 2,5 Ga., que estuvo motivado por la evolución de los proto-vegetales. En este punto,

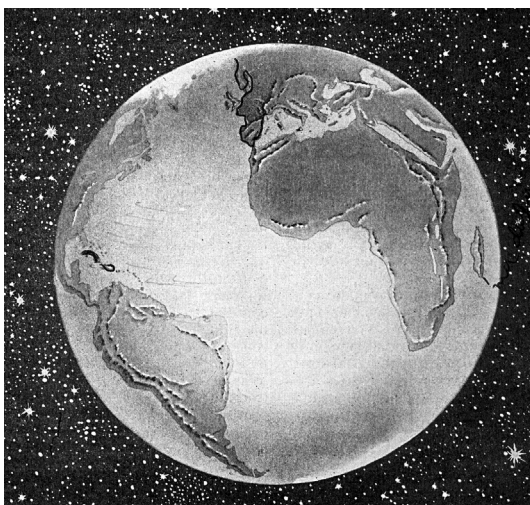


Imagen artística de nuestro planeta en la obra *La Tierra* de W. M. Jackson, editores (1928).

hay que notar que la mezcla gaseosa que expresa la composición de la atmósfera terrestre moderna es inestable químicamente. Están en presencia gases que reaccionan entre sí, y de hecho lo hacen continuamente, de modo que nuestra atmósfera es un caso de equilibrio dinámico en el que diversos gases - el oxígeno entre ellos- se destruyen y regeneran sin cesar. Ahora bien, este tipo de equilibrio es una de las características fundamentales de todo lo viviente.

Tenemos también una misteriosa **regulación de la salinidad oceánica** -factor este de gran importancia para que la vida marina, tal como la conocemos, pueda sobrevivir- de la que Lovelock da una explicación “gaiana”. Por otra parte, la **retención global del agua** -esencial para la existencia de cualquier clase de vida- está ligada a la homeostasis térmica, pues de no ser por ésta (que está condicionada en gran parte por la vida como fenómeno terrestre global), la temperatura media de la Tierra subiría por encima de los 300°C -frente a los 13°C actuales- lo que no sólo haría imposible cualquier actividad biológica sino que además el agua, obligada a permanecer en estado gaseoso, perdería pronto sus átomos de hidrógeno, los cuales se “evaporarían” al espacio exterior, como al parecer ha sucedido de forma masiva en Venus y en menor medida en Marte.

De hecho, habría que contar también con el “latido” periódico de los continentes y los océanos, es decir, con la teoría -ya ampliamente fundamentada- según la cual las masas continentales se reúnen y se separan según un megaciclo de 500 millones de años que habría influido notablemente en la evolución de la biosfera. El megaciclo continental puede, pues, constituir un primer puente entre “Gaia” y la tectónica de placas.

La presencia conjunta en nuestro planeta -y aparentemente tan sólo en él, en el sistema solar- de todas estas auto-regulaciones globales, ha conducido a Lovelock a defender que, a partir de cierto grado de extensión del fenómeno de la vida, la Tierra ha pasado a estar controlada, de un modo fundamental y global, por ella, llegando incluso a “fusionarse” con ella y a convertirse de tal suerte en un *sistema global orientado por la biosfera* ¿En un superorganismo...? Más bien en una realidad autoorganizada del género de las contempladas por la teoría general de sistemas, es decir, en una realidad -o entidad- auto-regenerativa que, como tal, es más que la suma de sus componentes: la parte inorgánica, los organismos y los ecosistemas.

ENMARQUE PLANETOLÓGICO DE LA GEOLOGÍA GLOBALISTA

El hecho de empezar a contar, por fin, con datos morfológicos detallados, e incluso con fundamentadas hipótesis geológicas, referentes a los demás planetas de tipo terrestre del sistema solar, amplía enormemente las posibilidades de elaborar modelos globales de la Tierra, desde el momento que permite al fin desarrollar **una actividad comparativa entre entidades del mismo rango**, la cual es fundamental en todo proceso científico o sencillamente cognitivo.

En el marco actual, caracterizado por un conocimiento rápidamente creciente (es cierto que partiendo del “casi cero” inicial) de los restantes cuerpos planetarios del sistema solar, la elaboración de algo tan sencillo como una lista de analogías y diferencias, tanto a escala global como detallada, aparece como un objetivo científico razonable, que seguramente se hará enteramente posible -abarcando a *la totalidad* de los cuerpos planetarios solares- dentro de unos pocos años. Es obviamente también del mayor interés lograr dilucidar temas tales como el de la singularidad terrestre del fenómeno de la vida orgánica (o por el contrario, su eventual presencia, en la actualidad o en el pasado, en otros cuerpos planetarios) o el de la existencia de algún tipo de tectónica global -ligada verosímilmente a algún mecanismo autoorganizativo *prigoginiano*- en otros objetos planetarios, sin olvidar las eventuales dinámicas autoorganizativas atmosféricas (sugeridas al menos en el caso de Júpiter).

PERSPECTIVAS

A mi juicio, los grandes debates paradigmáticos del siglo XX en las ciencias de la Tierra, se han enladrado sobre la línea divisoria entre “tradiciones geológicas” que he puesto de relieve al comienzo del artículo. El triunfo de la tectónica de placas ha inclinado la balanza del lado de la *tradición sistemista*. Y hoy -pese a los esfuerzos, bastante evidentes, por marginalizarla- la teoría de Gaia constituye un nuevo “pulso” entre las dos corrientes en pugna.

De cara a contribuir a clarificar esta importante controversia de fondo que arrastran las ciencias de la Tierra, una línea o programa de investigación coherente debería tratar de evaluar el grado de interconexión entre los dos grandes procesos autoorganizativos del planeta: la geodinámica global (base de la tectónica de placas) y “biosfera/Gaia”. Datos tales como el reciclaje endógeno del carbono a través de la subducción y el vulcanismo, o el *feedback* que implica el hecho de que, por un lado, los océanos terrestres hayan existido persistentemente gracias al desarrollo y mantenimiento de la biosfera, y que, por otro, las aguas oceánicas -así como los sedimentos orgánicos y carbonatados- jueguen un papel importante de cara a la dinámica y a la existencia misma de las placas, parecen apuntar a que tal interconexión efectivamente existe. En caso de que ésta llegue a ser constatada (o mejor dicho, en caso de que los datos observados hagan verosímil una interpretación de las dinámicas terrestres esenciales basada en la interacción de las dos dinámicas autoorganizativas del planeta), entonces no solamente la tradición geológica sistemista se confirmaría como vencedora, sino que se pondrían los cimientos de una geología con categoría de ciencia básica, de una geología que, a partir de ahí, se enfocaría claramente (igual que la física, la química o la biología) sobre un nivel sistémico -es decir, sobre uno de los niveles autoorganizativos de la materia-energía- y que además contaría con un paradigma unificador que la dotaría de coherencia.

La idea es que la eventual interacción, mutuamente integradora, entre los modelos autoorganizativos “gaiano” y “tectónico global”, puede acabar conduciendo a la definición de un nivel sistémico macroecológico distinto de todos los conocidos. La eventual identificación de un nuevo *nivel de integración de la materia-energía* -el de un “sistema-planeta”- volvería aun más acuciante la vieja cuestión no resuelta de cuál es el significado exacto y el alcance real en la naturaleza, del concepto de *vida*. Tendría además como resultado el vincular estrechamente la geología global y la ecobiología evolutiva.

Da la impresión que la revolución científica que representa la tectónica de placas tiene una trascendencia parecida a la que tuvo el descubrimiento del oxígeno para la química⁴... Quiero decir que quizá se trate más bien de una *pre-revolución*, puesto que no basta, por sí sola, para definir el nivel sistémico que sería el campo específico de la *geología* -reconectada con su etimología de “discurso sobre Gaia”- entendida como ciencia integrada. De todos modos, la sacudida que la tectónica global ha provocado en el parcializado edificio de las ciencias de la Tierra, ha puesto en marcha un proceso que verosímilmente puede conducir a cambios aun más fundamentales que los ya enormes que ella misma supone.

BIBLIOGRAFIA.

- A. Elena (1985). “¿Revolución en geología?: de Lyell a la tectónica de placas” en revista *Arbor*, CSIC, Madrid.
- A. Hallam (1973). trad.: *De la deriva de los continentes a la tectónica de placas*, Labor, Barcelona.
- A. Hallam (1985): *Grandes controversias geológicas*, Labor.
- A. Holmes (1929). *Radioactivity and earth movements*, Geol. Soc., Glasgow.
- J. Hutton (1795). *Theory of Earth*, Edimburgo. (reed.: Hafner Publ. Co., Nueva York, 1959).
- L.E. Joseph (1990). *Gaia: the growth of an idea*, St.Martin's Press, Nueva York.
- T.S. Kuhn (1962). trad.: *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, México.
- J.E. Lovelock (1979). trad.: *Gaia: una nueva visión de la vida sobre la Tierra*, Hermann Blume, Madrid.
- J.E. Lovelock (1988). trad.: *Las edades de Gaia*, Tusquets, Barcelona.
- Ch. Lyell (1830-33). *Principles of Geology*, Londres. (reed.: Johnson Repr. Corp., Nueva York, 1969).
- I. Prigogine (1967). *Thermodynamics of Irreversible Processes*, Wiley, Nueva York.
- I. Prigogine (1972-82). trad.: *¿Tan sólo una ilusión?*, Tusquets.
- I. Prigogine (1988). trad.: *El nacimiento del tiempo*, Tusquets.
- E. Schrödinger (1944). trad.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets.
- E. Suess (1904-09). *The face of the Earth*, Clarendon Press, Oxford.
- A. Wegener (1929). *The origin of continents and oceans*. (reed.: Methuen, Londres, 1966).
- Tuzo Wilson *et al.* (1971). trad.: *Deriva continental y tectónica de placas*; Hermann Blume.
- L. von Bertalanffy (1975). trad.: *Perspectivas en la teoría general de sistemas*, Alianza Editorial, Madrid.
- Varios autores. *El nuevo sistema solar*; Libros de Investigación y Ciencia, Barcelona, 1984. ■

(4) Los hitos fundamentales de la verdadera gran revolución científica de la Química han sido: a. la explicación electrónica de las valencias; b. la nueva teoría atómica, que se encuentra en el origen de la física cuántica.