

## HOMENAJE A TUZO WILSON

Montserrat Domingo Morató (1)

### NOTA DEL EDITOR

El reciente fallecimiento de este pionero del moviñismo moderno nos ha movido a pedir a Montserrat Domingo el esfuerzo de glosa y traducción de dos de sus obras significativas: la «Revolución en las Ciencias de la Tierra», con la que en 1968 anunciaba orgullosamente el nacimiento de una Nueva Geología, y «La deriva continental y una teoría de la convección» uno de sus últimos trabajos publicados. Surge así una oportunidad incomparable no sólo de leer una obra tan citada como poco conocida en nuestro país, sino también de calibrar la fertilidad creativa, a través de casi un cuarto de siglo, de uno de los científicos que ya figuran en la historia de las Ciencias de la Tierra que el mismo tanto contribuyó a renovar.

La divulgación en España de la antigua obra pionera de Wilson de 1968 se justifica por sí misma como un hito en la historia de la ciencia moderna, así como por la perspectiva que aportó en un momento crucial de la investigación en Ciencias de la Tierra, y por cumplirse el vigésimoquinto aniversario de su publicación. Pero además, la reciente desaparición del autor ha constituido un doloroso imperativo para rendirle el homenaje póstumo de contribuir a divulgar también su obra última e inacabada, que sin duda hará avanzar mucho más en el futuro a las ciencias que plantean sus preguntas al relieve y estudian las consecuencias de los cambios de éste en todos los subsistemas del planeta.

Hace 25 años que el geólogo canadiense J. Tuzo Wilson envió a la revista *Vie et Milieu* para su publicación dos artículos revolucionarios fundidos en uno bajo el título «Revolución en las Ciencias de la Tierra» (Wilson, 1968).

El valor didáctico de considerar la evolución de las ideas en la enseñanza de las ciencias hace ya mucho que ha sido reconocido. Tener una noción precisa de los saltos cualitativos en esta evolución facilita al docente percatarse con nitidez del contenido y cronología de los cambios conceptuales que han llevado al punto donde hoy nos encontramos. Sólo por eso ya se justifica la divulgación entre los docentes de artículos y propuestas clave publicados en el pasado.

Pero la aportación de Wilson es mucho más que un salto cualitativo en la evolución de las ideas. Es exactamente lo que podríamos llamar dar en el clavo y hacerlo en el momento oportuno; es una reflexión sobre cómo se toma conciencia de que la realidad no encaja con las concepciones que se tienen para interpretarla, es percatarse de la imperiosa necesidad de subvertir las ideas cuando estas encorsetan el trabajo y ofuscan la inteligencia y es a la vez una propuesta de revolución mental concretada en un modelo.

La publicación inicial en francés en una revista parisina especializada en biología terrestre y marina

y oceanografía de unos artículos escritos originalmente en inglés por un geólogo canadiense induce a preguntarse por las causas que llevaron al autor a tal decisión, por qué unas ideas eminentemente geológicas, que con el paso del tiempo se han revelado tan acertadas, tuvieron que partir hacia el debate público de las páginas de un boletín destinado a divulgar los logros de unas especialidades digamos mas bien poco geológicas en el sentido que la Geología podía tener en 1968. Al oceanógrafo francés Xavier Le Pichon, quien prologa los artículos de Wilson (prólogo que aquí no se reproduce), le cabe el mérito de haber sido el primero en percatarse de la trascendencia del contenido de las reflexiones y propuestas de su amigo. La perspicacia de Wilson ha sido recompensada. Sus ideas y su modelo han hecho camino hasta nuestros días y siguen iluminando el trabajo de muchos, tanto investigadores como docentes. Están llenos de sugerencias estimulantes y de pequeñas joyas en forma de sentencias preclaras y desafiantes. Ahora que la teoría de las placas está incorporada a casi todos los niveles de investigación y docencia en Ciencias de la Tierra, sigue siendo un desafío la frase del autor: «El problema, y es una perspectiva inmensa y apasionante, es estudiar el detalle de la nueva teoría.»

Ni la reflexión teórica sobre la naturaleza de la revolución científica apoyada en las ideas de Kuhn (1967), ni el ciclo de vida de las cuencas oceánicas tienen desperdicio para los docentes. Nos obligan a vivir y transmitir a los alumnos cada momento de la ciencia sin dogmatismo y con conciencia de provisionalidad y nos estimulan al ejercicio dialéctico de confrontar abstracción con concreción, modelos con realidad, la escala planetaria con la local y regional.

A algunos profesores nos ha parecido sumamente útil aplicar su propuesta de ciclo para interpretar territorios locales o regionales, peninsulares o de otras partes del mundo, e incluso nos hemos servido de ella para trabajar con los alumnos, habitualmente para hacerles comprender nuestro entorno más inmediato (Domingo, 1992 a) y excepcionalmente, en

(1) Facultad de Ciencias de la Educación, Departamento de Geología y Departamento de Geografía de la Universidad Autónoma de Barcelona.

momentos socialmente críticos, como el de la guerra contra Irak de 1991 (Domingo, 1992 b), cuando el medio lejano se vuelve próximo y cotidiano a causa de los medios de comunicación, al preguntarnos qué sabíamos sobre el territorio en conflicto y descubrir que Wilson ya nos había explicado en 1968 por qué el mar Caspio, aquel lago estudiado en nuestra infancia como algo excepcionalmente extraño, era salado en lugar de dulce como los demás.

Su propuesta sigue viva y va siendo ampliada y reformulada. Ahora se habla del ciclo del supercontinente (Nance y cols., 1988), y con esta consideración multidisciplinar se vislumbran las inmensas consecuencias para la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera de una realidad cuya interpretación fue una propuesta inicialmente centrada sólo en la litosfera.

Sólo por eso, además de por sus muchos descubrimientos y aportaciones más concretos, como las fallas transformantes y otros, la obra originaria de Wilson merece ser más divulgada, y su autor, más conocido y respetado por cuantos nos hemos beneficiado de su atrevimiento y capacidad de percibir y describir lo que nos hacía falta para avanzar. Sirva

este 25 aniversario como pretexto apropiado para rendir públicamente nuestro homenaje, una muestra del cual pretende ser esta presentación y traducción.

## BIBLIOGRAFÍA

Wilson, J.T. (1968). Revolution dans les Sciences de la Terre. *Vie et Milieu*, XIX,2-B, 395-424.

Kuhn, T.S. (1967). The structure of scientific revolutions. Phoenix Books, Univ. Chicago Press, 1967.

Domingo i Morató, M. (1992 a). Aplicació del model de Wilson a Catalunya. *Actes III Simposi sobre l'Ensenyament de les Ciències Naturals*, Girona, Eumo.

Domingo i Morató, M. (1992 b). Didàctica de la Geologia i Guerra contra l'Irak. *Actes III Simposi sobre ensenyament de les Ciències Naturals*, Girona, Eumo.

Nance, D.R., Worsley, T.R y Moody, J.B. (1988). El ciclo del supercontinente. *Investigación y Ciencia*, 144, 36-43 (Septiembre).

## A. REVOLUCIÓN EN LAS CIENCIAS DE LA TIERRA

*J. Tuzo Wilson (1)*

### INTRODUCCIÓN

La publicación reciente de diversos trabajos importantes ha conducido a la aceptación rápida y general de la revolución más importante en las Ciencias de la Tierra desde hace un siglo. Parece que por fin sabemos cómo se comporta la Tierra sólida. La corteza es móvil, la deriva de los continentes existe y se podrán determinar los movimientos pasados de los continentes a medida que los datos magnéticos oceánicos progresen. Seguro que quedan algunos escépticos, pero la mayoría no están al corriente de los últimos descubrimientos.

Para comprender cómo se han hecho los descubrimientos y por qué han tenido tanta aceptación conviene considerar la historia de la Ciencia de la Tierra. Como en el caso de cualquier otra ciencia, el progreso se consigue en cuatro etapas: la obtención de datos, la deducción de leyes o principios, la previsión de conclusiones y la verificación de esas previsiones.

Por desgracia para el desarrollo de la Ciencia de la Tierra, lo que sabemos del planeta es tan complejo que el descubrimiento de los principios ha sido mu-

cho más lento que para los cuerpos más simples tales como átomos o estrellas. Los geólogos y los geofísicos se encuentran todavía en la etapa de recabar datos, sin capacidad para interpretarlos cabalmente. Salvo algunos aspectos menores, las teorías geológicas hasta ahora han sido vagas e inciertas y las teorías geofísicas, burdamente simplificadas. No se sabía cómo se comportaba la Tierra.

La profundidad de nuestra ignorancia y la debilidad de nuestras teorías quedan bien manifiestas en nuestra incapacidad de llegar a un acuerdo, tras un siglo de controversia, sobre la deriva de los continentes. ¿Cómo puede afirmarse nada con precisión sobre la formación de montañas, o de estructuras que contienen petróleo, o sobre el origen de las rocas ígneas o el crecimiento de los yacimientos minerales, si no se ha resuelto esta cuestión fundamental?

El cambio nuevo y súbito de opinión procede de la sugerencia simultánea de Vine y Matthews, geólogos del Departamento de Geofísica de la Universidad de Cambridge, y Morley y Larabelle, geofísicos del Servicio Geológico del Canadá, según la cual los océanos crecen marcados por líneas de creci-

(1) Erindale College, Universidad de Toronto, Ontario, Canadá.  
(Traducido del original en francés por Montserrat Domingo Morató).

miento debidas a las inversiones del campo magnético terrestre.

Hoy se acepta esta hipótesis porque se ha demostrado recientemente la identidad en toda la superficie del globo de tres series proporcionales entre sí. Se acepta tanto más fácilmente porque geólogos y geofísicos buscaban un nuevo enfoque para el estudio de la Tierra. Estas series proporcionales son la escala de tiempo de las inversiones del campo magnético terrestre, la escala de distancias de la anchura de las anomalías magnéticas en el fondo de los océanos y la escala de profundidades de las inversiones en el magnetismo remanente de los testigos de sedimentos marinos.

Hoy se ve que el fondo de los océanos se renueva constantemente y que la historia del movimiento de los continentes está impresa magnéticamente en la nueva corteza así formada. De modo que aquélla se puede descifrar con magnetómetros tan fácilmente como se interpretan los anillos de crecimiento en los tocones de los árboles.

Lo que era impensable hace sólo tres años, hoy se acepta sin oposición seria. El Profesor R. Flint de Yale me ha anunciado que va a empezar inmediatamente a redactar de nuevo sus manuales de Geología. Parece que hay que volver a examinar en su conjunto el programa de las Ciencias de la Tierra y que asistimos a un cambio semejante al que se produjo cuando la Física moderna reemplazó a la Física clásica en la enseñanza universitaria. Debemos estudiar la Tierra como un todo, como un sistema único. El estudio de algunos métodos menos eficaces deberá dejar lugar a los métodos más eficaces de investigación de la Tierra.

La tendencia principal en las investigaciones geológicas ya está cambiando, pero cabe esperar que esos descubrimientos acelerarán dicho cambio, orientándolo hacia métodos e ideas más eficaces.

Las consecuencias relativas a la prospección petrolera serán sin duda máximas en el margen continental. Si los océanos y los márgenes continentales se han formado recientemente, sus estructuras, evidentemente, no serán las mismas que si han cambiado poco en el transcurso de los tiempos geológicos.

Es fácil vislumbrar algunas de las consecuencias relativas a la prospección minera; por ejemplo, en la interpretación de cuerpos ultrabásicos y de depósitos minerales asociados en islas oceánicas. Sea como fuere, hay una consecuencia mucho más importante: probablemente pronto lograremos una mejor comprensión del comportamiento y de la estructura de los continentes y del fenómeno de acumulación de rocas y minerales.

## I. NATURALEZA DE LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA

Durante más de cincuenta años, los investigadores especializados en Ciencias de la Tierra se han pre-

guntado si los continentes derivaban y a la vez han discutido la cuestión de la permanencia de las cuencas oceánicas. Esta controversia (1-4), que fue larga y acalorada, plantea diversas preguntas. ¿Por qué se requiere tanto tiempo para resolver este problema? ¿Acaso no hay ninguna experiencia definitiva que pueda resolver el problema? ¿Por qué este tema suscita pasiones tan fuertes?

Este artículo estudia estos problemas y llega a la siguiente conclusión: Wegener abrió un tema de discusión más importante de lo que imaginó. Parece que para llegar a una conclusión necesitamos una verdadera revolución científica en nuestra forma de pensar. Esta debe tomar la forma de un cambio en nuestras doctrinas y una conversión en nuestras creencias en el aspecto más fundamental del comportamiento de la Tierra. Empezaremos examinando el estado presente de las Ciencias de la Tierra. Es demasiado evidente: los geólogos no están satisfechos. Discutiremos algunas de las causas de su insatisfacción.

## ¿POR QUÉ LA GEOLOGÍA HA PERDIDO TERRENO?

Algunos se preguntan por qué se han tenido que inventar términos o expresiones tan poco satisfactorias como «la Ciencia de la Tierra» (Geociencia) o «los investigadores especialistas en Ciencias de la Tierra» (earth scientists) si hace un siglo las palabras «Geología» y «geólogo» bastaban. Ello se debe en parte a que el campo de la Geología se ha reducido. Cuando Lyell (6) hablaba de cambios relativos de nivel entre tierra y mar, de terremotos, del calor terrestre, se le consideraba una autoridad en esas materias. Hoy los expertos en esos asuntos son los geodestas y los geofísicos y pocos de ellos han recibido una formación sólida en Geología. Ello se debe en parte a que se han descubierto nuevos métodos de estudio de la Tierra que no constituyen parte de los estudios geológicos clásicos. La confección de mapas gravimétricos y magnéticos detallados de la Tierra, la determinación isotópica de la edad de las rocas, los métodos geofísicos de prospección y el estudio del paleomagnetismo son temas que algunos geólogos conocen, pero que generalmente son más estudiados por físicos que a menudo los investigan en secciones separadas de las de los geólogos.

## ¿POR QUÉ EL ESTUDIO DE LA TIERRA ESTÁ TAN FRAGMENTADO?

Hace ya mucho tiempo que el estudio de la Tierra está dividido en una serie de ciencias separadas, cada una valiosa, pero con escasos vínculos entre sí. Se suele decir que el primer estudio científico de una región cualquiera de la Tierra empezó en el siglo XVI con las contribuciones de Agricola a la Mineralogía. Los manuales siguen ordinariamente

la historia de la Geología describiendo la controversia que se produjo en el siglo XVIII entre los «neptunistas» y los «plutonistas» y que condujo al rechazo de las creencias en los cataclismos y el «catastrofismo» y al establecimiento de las ideas modernas con Hutton, Smith y Lyell.

Los textos de Geología no mencionan ni la demostración, en 1600, de la naturaleza dipolar del campo magnético terrestre por William Gilbert, ni la publicación de los mapas geomagnéticos de Halley ni tampoco el descubrimiento por Newton de la teoría de la gravedad, todo ello durante el siglo XVI (6, 7). Fueron, por consiguiente, contribuciones sólidas a la Ciencia de la Tierra que han precedido a la Geología moderna. Desde siempre el plato fuerte de la Geología ha sido la observación y no la teoría; por el contrario, los geofísicos, durante más de tres siglos, han dispuesto de teorías precisas sobre el geomagnetismo y la gravedad, pero hasta hace sólo tres o cuatro decenios, los instrumentos eran demasiado inadecuados y no permitían hacer observaciones rápidas y fáciles. Hasta que no se los mejoró era imposible vincular la Geofísica con la Geología.

Estas ciencias se han mantenido separadas, han sido estudiadas por personas diferentes y enseñadas a estudiantes diferentes. La historia de este desarrollo independiente ha traído como consecuencia que se estudiaran y enseñaran en departamentos diferentes materias tan estrechamente emparentadas como la Sismología y la Geotectónica, o también la Estratigrafía, las determinaciones de la edad isotópica y el paleomagnetismo, mientras que siempre tradicionalmente se han enseñado conjuntamente asignaturas con tan poca vinculación mutua como la Mineralogía y la Paleontología.

La Geología se encuentra dividida también por otra razón. Se trabaja muy poco la Geología a escala mundial. En general se trata la asignatura como una serie de estudios regionales separados. Volveremos sobre el tema, pero lo indicado basta para poner de manifiesto que la ciencia de la Tierra siempre ha estado fragmentada. Hecho que nos conduce a plantear una pregunta sacrílega.

#### ¿EXISTE UNA CIENCIA DE LA TIERRA?

¿O acaso hay sólo una ciencia de los minerales, de las rocas, de los fósiles, de los terremotos, del geomagnetismo y de otros aspectos particulares de la Tierra que no están en absoluto bien integrados entre sí? Me parece que la única respuesta honesta es que no existe una verdadera Ciencia de la Tierra considerada como un todo, dado que el conjunto de estas ciencias subsidiarias no constituye una sola ciencia. Lo propio de una ciencia es que permite hacer previsiones. La ausencia de una ciencia efectiva de la Tierra ha quedado demostrada con el descubrimiento reciente e inesperado del sistema de dorsales medio-oceánicas. Hasta hace doce años nadie había previsto la existencia de la estructura activa más importante de la superficie terrestre. Hace diez

años, cuando se estableció su continuidad a lo largo de más de 60.000 km, la doctrina clásica de los continentes fijos no era capaz de explicar su naturaleza (8-9).

Sugiero la analogía siguiente: si los médicos, después de muchos centenares de años de práctica, no hubieran conseguido descubrir la circulación sanguínea, diríamos con razón que la Fisiología apenas había avanzado. Poco importaría que se hubieran desarrollado ciencias tan valiosas como la odontología, la dermatología y la antropología física; su avance no cambiaría la afirmación fundamental de que la medicina en conjunto no está bien comprendida. Por más que muchas ciencias subsidiarias como la mineralogía, la química de los silicatos o el geomagnetismo gocen de buena salud y sigan desarrollándose, me parece que la Ciencia de la Tierra en conjunto no está bien desarrollada. El hecho de no haber podido encontrar un principio unificador para la Tierra debería constituir el objeto de la principal preocupación de todos los investigadores especialistas de la Tierra.

#### ¿POR QUÉ LA GEOLOGÍA HA VISTO MENGUAR SU PRESTIGIO?

Es muy cierto que la Geología ha incrementado regularmente su potencial de conocimientos y de valor absolutos, pero también lo es que ha disminuido su importancia y su prestigio. En Canadá, hace cien años, los dos investigadores más importantes eran ambos geólogos. Sir William Logan era un alto funcionario y Sir William Dawson fue durante treinta años decano de la Universidad McGill, entonces la más importante del país. Estos dos sabios y otros geólogos exploraron activamente el país, fundaron la Sociedad Real del Canadá e impulsaron otros proyectos importantes. En Estados Unidos reinaba la misma situación y en Europa los geólogos eran tenidos en alta estima; lo demuestran nombres como los de Lyell, Sedgwick, Murchison, Geikie, Hein, Argand y Suess. Nadie puede decir que en nuestra época los geólogos o los investigadores de la Tierra ocupen una posición tan eminente como aquélla.

Este declive relativo se debe en parte a la competición de ciencias nuevas de brillante prestigio, pero si ésa fuera la única explicación ¿por qué otras ciencias antiguas, como la Astronomía, por ejemplo, han podido mantener su vida y su prestigio?

Hay quien atribuye ese declive relativo a una publicidad de mala calidad y piensa que el público no ha sabido apreciar las contribuciones de la Geología. Sin embargo, parece que esto es un síntoma, más que una causa. ¿No será la triste verdad el hecho de que durante el siglo transcurrido desde la publicación por Darwin de «El origen de las especies» geólogos y geofísicos se han conformado con almacenar datos? Datos ciertamente valiosos, pero pocas cosas que puedan excitar un interés general o conducir a una comprensión profunda de la Tierra. La excepción son las propuestas de Wegener sobre

la deriva de los continentes (10). Esta deriva siempre ha interesado al público pero, hasta hace poco, no a los expertos.

### ¿ACASO EL DECLIVE DE LA GEOLOGÍA SE DEBE A HABER DESCUIDADO LAS MATEMÁTICAS, LA FÍSICA O LA QUÍMICA?

Hoy un grupo importante mantiene que en esta negligencia radica el origen de los problemas de la Geología. Hacen esfuerzos vigorosos y admirables para introducir las técnicas de la Química moderna, los instrumentos de Física y los ordenadores en las diferentes secciones de la Geología. Yo no me habría pasado estos últimos veinte años como geólogo dentro de un departamento de Física si no hubiera tenido fe en el valor final de una formación de este tipo. Pero no creo que la carencia de esta formación pueda proporcionar una explicación completa del declive de la ciencia de la Tierra. Para estudiar la Tierra nunca han faltado matemáticos, físicos ni químicos de calidad. Copérnico, William Gilbert, Newton, Halley, Gauss, Kelvin, Goldschmidt, Gutenberg y Bowen, por mencionar sólo algunos nombres del pasado, han prestado mucha atención a la Tierra, pero ninguno ha proporcionado una teoría unificadora sobre su comportamiento.

Las dificultades para aplicar métodos precisos al estudio de la Tierra se presentan bajo dos formas, ambas procedentes de una sola causa. Las limitaciones de la inteligencia y el ingenio humano son tales que los resultados precisos sólo se han conseguido para sistemas simples. La Tierra, en sí misma, dista mucho de ser simple. Un trabajo preciso sólo puede lograrse o bien sobre zonas aisladas de la Tierra (lo que hace la mayoría de geólogos) o bien sobre modelos muy simplificados de la Tierra entera (lo que tratan de hacer la mayoría de geofísicos).

El malogrado M.A. Peacock me describió muy bien el primer punto de vista. Me dijo que había dejado de estudiar la geomorfología de las grandes regiones (11) porque no podía obtener resultados precisos; entonces se decantó por la identificación de los minerales por rayos X, identificación muy precisa. Bien se percataba de que había abandonado el estudio de la Tierra por el estudio de determinados cristales, pero prefería un estudio exacto, aunque fuera limitado. Por desgracia, muchos otros investigadores que actúan de modo parecido se imaginan todavía que estudian la Geología entendida en el sentido amplio del término. Lo que no es así, si la Geología es el estudio de la Tierra. Un vistazo a una serie cualquiera de resúmenes de artículos geológicos revelará que los estudios detallados se han convertido en el refugio de los geólogos. Cada estudio es quizás admirable en sí mismo, pero algunos de los temas, trabajados incluso durante siglos, en poco contribuirán a nuestra comprensión de la Tierra. Este es, sin embargo, el objeto fundamental de la Geología.

El segundo punto de vista es el error común de los físicos. Alguno de ellos puede haber descubierto

las propiedades de cuatro o cinco compuestos silícicos, otro sabe cómo resolver problemas de armónicos esféricos o de ecuaciones lineales diferenciales o cómo se propaga el calor por conducción o convección de los sistemas simples.

Estas personas sienten la tentación de afirmar que la Tierra se comporta más o menos como sus diferentes modelos y sacar conclusiones de ello. Los resultados parecen tan precisos que uno tiende a aceptarles sus conclusiones con demasiada ingenuidad: las técnicas son tan impresionantes que muchos geólogos han sentido complejo de inferioridad ante ellas.

La introducción de esas técnicas nuevas fue algo espléndido, pero no hay que olvidar que los modelos teóricos o de laboratorio son burdas simplificaciones de la Tierra real, y que en general se sustentan en hipótesis dudosas; también hay que tener presente que alguna de esas técnicas puede aportar más que otras al estudio de la Tierra. Habría que dedicar por lo menos la misma reflexión a los métodos de estudio que la que se consagra a mejorar ciegamente técnicas tradicionales.

Creo que hay una gran confusión en relación con la expresión «ciencia fundamental», ya que no se hace la distinción entre estos dos significados. Por una parte se la utiliza para las Matemáticas, la Física o la Química; de otro lado se usa para un enfoque fundamental que va al fondo de los problemas; y ambos significados no son en absoluto sinónimos. En el primer sentido, la Física es considerada como una ciencia más fundamental que la Geología, porque la Física se ocupa de la energía, de la materia, de los átomos y de los fermiones, que constituyen todo el universo físico, incluida la Tierra, mientras la Geología no se ocupa más que de la superficie de un planeta. A menudo la Física puede ser útil en el estudio de la Geología. En la segunda acepción, una ciencia es fundamental si llega a la raíz de un problema y permite una comprensión más profunda del mismo. En este sentido, no estoy en absoluto de acuerdo en que la aplicación de una técnica, simplemente porque es Física de la buena, sea necesariamente fundamental.

Usar un microscopio electrónico para estudiar una roca es una aplicación de una ciencia fundamental según la primera acepción, porque uno se sirve de la Física y tal vez de la sólida Petrología, pero si el estudio particular no aporta ninguna luz sobre el comportamiento de la Tierra, entonces eso no es Geología fundamental según la segunda acepción.

Digo todo eso no para desanimar a nadie respecto al uso de nuevas técnicas ni para menospreciar las investigaciones detalladas, lo digo para esclarecer el pensamiento y poner el acento en el hecho de que lo que le falta a la Ciencia de la Tierra no son tanto las técnicas elegantes sino ideas unificadoras, aunque ambas cosas sean necesarias.

Por fortuna, muchos artículos recientes, en particular sobre las cuencas oceánicas, ponen de manifiesto que eso hoy ya se reconoce.

## ¿ESTÁ LA CIENCIA DE LA TIERRA SUFICIENTEMENTE MADURA PARA UNA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA?

Mientras reflexionaba sobre estos problemas he tenido la suerte de leer el libro de T.S. Kuhn «La estructura de las revoluciones científicas» (12). La tesis de Kuhn es que el marco en el cual alguien se plantea un problema en ciencia quizás es tan importante como las técnicas que usa. Por ejemplo, los astrónomos de la época de Ptolomeo lograron grandes avances. Sus telescopios les permitieron seguir los planetas con precisión. Pudieron predecir los eclipses y los movimientos de los planetas. El hecho de predecir los eclipses implicaba el uso de los movimientos epicíclicos, que son más difíciles de comprender y de usar en los cálculos que los movimientos elípticos de la astronomía de Copérnico. Su progreso lo frenó una creencia religiosa: el ser humano y la Tierra se hallan en el centro del Universo.

La contribución de Copérnico fue sugerir un cambio de doctrina e indicar una mejor manera de considerar el Sistema Solar. No inventó instrumentos nuevos, no mejoró la teoría matemática ni tampoco cambió las observaciones astronómicas que se habían ido acumulando durante siglos. Todas esas cosas habían sido lo suficientemente buenas como para dar a Aristarco la idea de un sistema solar heliocéntrico 200 años antes. Lo que hizo Copérnico fue substituir lo que había cerrado el paso al progreso por una doctrina nueva que podía explicar una mayor variedad de observaciones y en la que sin embargo cabían también las antiguas. Ello supuso un gran avance para la ciencia.

Kuhn da otros ejemplos. Insiste en todo lo que se consiguió gracias a doctrinas hoy consideradas como inadecuadas, en la química flogística, la termodinámica calórica, la física clásica, pero pone de manifiesto que en todos los casos se ve que la doctrina, el marco de referencia, al que llama «paradigma», ha constituido el principal obstáculo para el progreso. Para avanzar era preciso cambiar la doctrina precedente por un nuevo paradigma gracias a una revolución científica. Los investigadores debían liberarse de una falsa hipótesis por la que estaban obstruidos dogmática e innecesariamente. ¿Es aquí donde radica el problema de la Ciencia de la Tierra? ¿Nos frena un paradigma falso y pasado de moda? ¿Está la Ciencia de la Tierra lo bastante madura como para una revolución? Me parece que sí.

## ¿CUÁL HA SIDO LA DOCTRINA O PARADIGMA CLÁSICO?

Sin duda alguna, la última revolución científica importante en las Ciencias de la Tierra la marcó la publicación, en 1830, de los «Principios de Geología» de Lyell.

Anteriormente a esta revolución, los geólogos creían que todas las rocas (lo mismo las ígneas que

las sedimentarias) habían precipitado tras un diluvio único y que las irregularidades eran consecuencia de cataclismos. Estas ideas tenían también una base religiosa. Lyell resumió las aportaciones de muchos investigadores cuando afirmó que la Tierra había evolucionado lentamente mediante la actuación de fenómenos que vemos funcionar hoy, y no por la sucesión de algunas catástrofes breves. Como ocurre tras cada revolución científica, en 1830 la Geología se hallaba en un estado de efervescencia con la perspectiva de un futuro prometedor. Se empleaban muchas técnicas ya bien establecidas para la aplicación y la mejora del estudio de las rocas, los minerales, los estratos y las formas del terreno. Se contaba con una doctrina nueva y bien definida que enseguida todo el mundo aceptó. Se habían determinado los métodos para confeccionar los mapas geológicos de todo tipo de regiones. Lo único que parecía necesario para comprender la historia de la Tierra era la aplicación amplia de aquellos métodos e ideas.

Los servicios geológicos y los laboratorios universitarios se unieron enseguida en esa tarea a los aficionados entusiastas y han continuado esa labor hasta hoy en día. Mucho hemos aprendido sobre minerales, rocas, fósiles, la naturaleza del terreno, y también sobre geomagnetismo, sismología y geoquímica. También contamos con mapas geológicos de todos los países. Pero ¿dónde están la historia y la Ciencia de la Tierra que esperábamos? Hacia 1890, Suess intentó escribir un tratado completo. También se han hecho otros esfuerzos más limitados y más especializados (13-16). Cuando yo era estudiante se me dijo, aún lo recuerdo, que la Geología era una materia tan inmensa y tan difícil que nadie más que Suess había logrado dominar suficientemente todos los detalles para escribir una obra como la suya. Ante esta afirmación todavía ahora me siento perplejo, porque da a entender que la Geología es una materia más compleja que la historia humana, la Economía, la Geografía o la Lingüística, que no son más que algunas de las materias tratadas con éxito a escala mundial. También es bien extraño que, a pesar de que ya contamos con libros sobre la Geología de la mayor parte de los continentes, nadie parece capaz de sintetizarlos en una sola obra.

Yo no creo que la Geología sea más compleja, pienso que ha tenido menos fortuna. La razón, me parece, estriba en que siempre le ha faltado un marco satisfactorio en el que poder construir. En temas limitados y en regiones pequeñas la Geología ha logrado grandes progresos. Los geofísicos y los geoquímicos también los han conseguido. Pero siempre ha habido dificultades cuando se comparan múltiples temas o diferentes regiones.

Después de leer a Kuhn se hace evidente que lo falso probablemente es la doctrina, el paradigma. Lyell y todos los manuales clásicos posteriores han enseñado que la Tierra es casi estática, de continentes y océanos fijos. Algunos investigadores han levantado objeciones, como Wegener, que propuso una deriva reciente de los continentes iniciada durante

la era mesozoica (10) y también Barrell (17) y Schuchert (18), con las tierras limítrofes desaparecidas, y Willis (19), que propuso uniones por istmos, pero esos puntos de vista nunca han sido ampliamente aceptados.

Es importante recordar que cuando Lyell estableció su doctrina clásica se liberó de las ideas religiosas de diluvio y de cataclismos, adoptando la opinión de que la Tierra era casi estática. Era un punto de vista muy lógico a causa de la creencia natural del ser humano en la «terra firma». En 1830 nadie había planteado todavía en serio el problema de la deriva de los continentes sobre una Tierra móvil.

Incluso podríamos llegar a sugerir que Copérnico sólo realizó la mitad del trabajo necesario para librar al ser humano de creencias primitivas muy antiguas. Como dice Dampler, «la concepción antigua tenía a su favor la opinión común de que la Tierra era una base sólida e inmutable hacia la cual todo caía. Existía también la autoridad de Aristóteles. El hombre imaginaba una Tierra en reposo bajo sus pies.» (20). Copérnico liberó el espíritu de los seres humanos al hacerles percatarse de que la Tierra no era fija, sino que podía moverse en el espacio. ¿No deberíamos nosotros seguir a Wegener y avanzar un paso más constatando que nuestra doctrina de los continentes fijos es una herencia del pasado, carente de pruebas e inútil? ¿No sería más lógico hacernos a la idea de que el interior de la Tierra ya no tiene por qué ser inmóvil?

¿Es posible un nuevo paradigma? ¿Y si la Tierra fuera realmente móvil, y si las cuencas oceánicas se hubieran abierto y cerrado en diversas ocasiones, y si los continentes se estuvieran desplazando lentamente? Entonces nuestra doctrina sería falsa. ¿Se trata de una falsa creencia que ha obstaculizado el progreso? ¿Es ésta la razón por la cual la Ciencia de la Tierra se halla fragmentada? ¿Será por eso por lo que la Geología no ha respondido a lo que de ella se esperaba? ¿Es por esa razón por lo que se dejan de lado los estudios a gran escala en beneficio de estudios de detalle? Si hemos creído en un paradigma erróneo y concebido la Tierra como no debíamos, nos hemos impuesto un bloqueo mental de nuestra propia cosecha y no podremos progresar mientras no lo abandonemos y lo reemplacemos por un paradigma nuevo.

En la doctrina clásica la Tierra es esencialmente estática. El cambio evidente es considerar una versión móvil de Tierra.

Y en relación a ello, he aquí una buena analogía. Si los que estudian los remolinos de agua hubiesen tenido desde hace mucho tiempo una doctrina bien asentada que les impidiera creer que el agua se movía en estos remolinos, no habrían podido comprender la naturaleza real de esos remolinos. De poco serviría que pusieran mucho cuidado en dibujar la forma de los remolinos, analizar la pureza del agua, realizar estudios precisos sobre su viscosidad, su constante dieléctrica u otras propiedades físicas; estas mediciones jamás resolverían el problema de

los remolinos mientras no se cambiara la doctrina. Sin embargo, la toma de conciencia por parte de los investigadores del movimiento del agua les permitiría inmediatamente percatarse de la naturaleza y del comportamiento de los remolinos.

Osaría sugerir que el principal obstáculo para el progreso en la Ciencia de la Tierra fue la doctrina de una Tierra esencialmente estática. Constatar que la Tierra es móvil, he aquí el nuevo paradigma necesario.

Los escépticos dirán que no hay nada nuevo, que la idea de una deriva de los continentes lleva un siglo en discusión. Resaltan que la idea de Wegener, según la cual la deriva principió en la era mesozoica, nunca ha sido demostrada, y aún menos la propuesta de que esta deriva se ha repetido a lo largo de toda la duración del tiempo geológico (21-23). Ignoran las pruebas procedentes del paleomagnetismo y exigen otras pruebas antes de creer en la deriva. En general se exige una medida precisa de la velocidad a la que dos continentes se separan. Es verosímil que pronto se obtengan estas mediciones, pero la demostración del movimiento no demostrará la deriva de los continentes. Si se nos hace observar que Europa y Norteamérica se alejan una de otra pongamos por caso unos 30 cm en 10 años, ello no demostrará que se han distanciado 3.000 km en 100.000.000 años. Esta es una extrapolación excesiva. Bien podría suceder que los continentes sólo oscilasen en torno a posiciones fijas medias. Si se demostrara que parejas de continentes no se encuentran en proceso de desplazamiento relativo, eso no favorecería la teoría de la deriva, pero en todo caso tampoco la contradiría absolutamente. No podemos revivir el pasado. No existe experiencia definitiva ninguna capaz de demostrar que las cuencas oceánicas se han mantenido esencialmente inmóviles en un pasado lejano o que se han abierto y cerrado.

Lo más que puede hacerse es examinar el conjunto de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos admitiendo el principio de una Tierra estática primero y después el de una Tierra móvil y luego decidir qué enfoque proporciona la mejor interpretación de todos los datos.

Kuhn declara categóricamente que en eso existe un grado de arbitrariedad inexistente en el proceso científico normal y cotidiano y que en verdad parece poco científico. Escribe que cuanto más los historiadores de la Ciencia examinan con cuidado, por ejemplo, la dinámica aristotélica, la química flogística o la termodinámica calórica, tanto más cierto les parece que estas concepciones sobre la naturaleza comúnmente admitidas no eran en general menos científicas que las admitidas actualmente, y no dependían de la idiosincrasia del ser humano. Siempre hay un elemento arbitrario, debido a incidencias personales e históricas, en las creencias adoptadas por una comunidad científica dada en un momento dado. Además, en tanto que estas creencias incluyen un elemento de arbitrariedad, la propia naturaleza de la investigación normal es una garantía de que las innovaciones no tardarán en hacer su aparición. A veces, un problema normal, uno de los que habría

que resolver siguiendo reglas y procedimientos conocidos, se resiste al asalto reiterado de los más dotados. Y de una u otra forma, la creencia normal empieza entonces a tambalearse. Cuando eso ocurre, uno inicia investigaciones extraordinarias que finalmente conducen a la profesión hacia una nueva serie de creencias, a una nueva base para la práctica de la Ciencia. Los episodios extraordinarios son lo que llamamos revoluciones científicas.

Parece como si los geólogos, mientras limitaban sus estudios a la superficie de los continentes, se hallasen en la posición de unos marinos que examinaran con gran detalle el puente de sus barcos. En ambos casos ni geólogos ni marinos pueden esperar descubrir gran cosa de los continentes o de los buques. Ha sido el advenimiento de la geología marina, el primer vistazo verdadero lanzado por encima de la borda, lo que ha producido una riqueza de datos nuevos incompatibles con la vieja creencia en una Tierra casi inmóvil. Los fondos oceánicos parecen estar en movimiento y, sin embargo, si adoptamos las nuevas ideas de Vine y de Matthews (26, 27), de Heirtzler (28) y de Le Pichon (29), la suma de los cambios en la mayor parte de las antiguas ideas no es en modo alguno enorme. La superficie de la Tierra no es plástica. En gran parte y durante la mayor parte del tiempo consiste en grandes placas rígidas. La movilidad se halla confinada en los estrechos cinturones montañosos y en las dorsales medio-oceánicas. Son esa rigidez de las grandes placas y la ausencia de movimientos en el interior de la mayor parte de los continentes lo que parecía tan opuesto al concepto de una Tierra móvil y lo que durante tanto tiempo ha obstaculizado la aceptación de las ideas sobre la deriva de los continentes. Hoy, las teorías de la renovación de los fondos oceánicos (*ocean floor spreading*) están tan bien definidas que las velocidades de crecimiento a lo largo de las dorsales medio-oceánicas se pueden usar para calcular las tasas y direcciones de compresión en las cordilleras (29). Los hechos que atestiguan a favor de esta movilidad y las consecuencias que de ellos se desprenden se examinan en otros trabajos (5, 30, 31). En contraste con estas explicaciones precisas que permite la movilidad, la noción de una Tierra estática deja sin explicación alguna muchas observaciones modernas.

Kuhn concluye proponiendo que cualquier paradigma nuevo o doctrina nueva «debe parecer que resuelve un problema no resuelto pero reconocido por todos, problema que no se podía abordar de ningún otro modo. En segundo lugar, el nuevo paradigma ha de preservar una parte relativamente importante de las posibilidades concretas de resolución de los problemas, posibilidades que la ciencia ha visto aumentar con el paradigma precedente». El hecho de aceptar la deriva parece cubrir este requisito, dado que eso no significa el abandono de muchas cosas, sino la liberación de ideas y una apertura total hacia la vasta materia consistente en cómo escribir de nuevo la Geología histórica.

Existe una gran similitud entre la revolución de Copérnico y lo que podemos llamar la de Wegener.

Ambos tuvieron precursores que ya habían planteado enfoques parecidos, pero los dos ganaron merecidamente su prestigio, porque expusieron sus ideas tan claramente y de una manera tan oportuna que fueron los primeros en conseguir una amplia audiencia. Ni al uno ni al otro se les hizo caso en vida. Se consideró que cada uno de ellos había apuntado ideas curiosas, pero que estas llamaban la atención sólo por ser novedosas, y no se las consideró como doctrinas a seguir. Con todo, ambos fueron bastante afortunados, ya que al cabo de cincuenta o sesenta años sus ideas se vieron fuertemente impulsadas por nuevos descubrimientos. Uno fue la invención del telescopio y el uso que de él hizo Galileo para observar los satélites de Júpiter, las fases de Venus y otros detalles del Sistema Solar, que condujeron al rechazo de la astronomía de Ptolomeo y a la aceptación de la de Copérnico. Análogamente, en el caso de Wegener, ha sido el descubrimiento de la renovación del fondo oceánico y la determinación de su velocidad y de la historia reciente mediante el estudio de las anomalías magnéticas lo que ha convencido a muchos de que Wegener tenía razón (8, 26, 32).

Las dos revoluciones tienen otro punto en común. Son las dos mitades del esfuerzo humano por liberarse de la idea primitiva de que la Tierra es el centro fijo del Universo. Para los primeros observadores, la posición central y la importancia de la Tierra parecían evidentes y naturales. Para percatarse de que la Tierra estable no era más que un planeta que se desplaza por el espacio se requirió un gran esfuerzo de ciencia y de imaginación.

También hoy hay que violentar el espíritu para admitir que este planeta no es rígido, sino que tiene movimientos internos.

Echando una ojeada al pasado, lo que parece notable es la tenacidad con la que casi todos nos hemos resistido durante tanto tiempo a las ideas de Wegener. Todos sabíamos que las leyes de las dimensiones determinan que los cuerpos grandes sean relativamente poco resistentes. Todos sabíamos que el interior de la Tierra se encuentra a una temperatura muy alta. ¿Por qué habíamos de suponer durante tanto tiempo que un cuerpo de este tipo fuera obligadamente rígido? Eso no era más que el triunfo de una técnica superficial de observación y el de una doctrina arcaica sobre el razonamiento científico elemental y el sentido común.

Ahora se manifiesta con claridad que era la naturaleza de esa movilidad lo que ha servido para ocultarla tan celosamente. La superficie actúa como un mosaico de placas, como lo han venido afirmando desde hace mucho los geólogos en África (24, 33-36). Cada continente es muy estable. Los cinturones montañosos no. Pero la interpretación correcta ha estado eludiéndonos hasta que no se han descubierto y explicado las dorsales medio-oceánicas.

Hoy hay que aceptar una determinada forma de deriva de los continentes. Tanto el concepto de una Tierra rígida como la idea de una Tierra que puede

moverse son, ambas, hipótesis, pero la segunda teoría puede dar cuenta de casi todo lo que la primera ha podido explicar y, además, de mucho más. Quien siga creyendo que la Tierra es siempre rígida, acepta una explicación defectuosa, a pesar de que ya dispone de una alternativa mucho mejor. El problema, y es una perspectiva inmensa y apasionante, es estudiar el detalle de la nueva teoría. Adaptar los datos ya acumulados e incorporar los nuevos exige revisar toda la Geología histórica y redactar de nuevo todos los manuales clásicos. He aquí un campo de acción y un trabajo que se abren a las nuevas técnicas. La Geología, la Geofísica y la Geoquímica han sido todas fragmentos de una ciencia basada en la falsa suposición de que la Tierra es esencialmente estática y que la Geoquímica versa sobre sistemas cerrados. La nueva Ciencia, que lo es porque se basa en el paradigma tan diferente de una Tierra móvil, puede unificar antiguos estudios e impulsar nuevas investigaciones. Creo que se evitarían confusiones atribuyéndole un nombre diferente. Este nombre debería ser «Geonomía».

Las ideas de este artículo se han desarrollado lentamente y en el transcurso de conversaciones demasiado numerosas para ser recordadas en detalle o para que sea posible expresar un reconocimiento adecuado. Los nombres de todos aquéllos de quienes he cosechado las ideas se dan en las referencias de éste y otros artículos citados (5, 30, 31). He aprendido mucho en mis prolongadas visitas a Cambridge y a las Universidades Nacionales Australianas, así como en mis breves viajes por todos los continentes. El libro de T.S.Kuhn me ha proporcionado la idea principal, y S.J.Colman y J. Purdy me han comentado mi manuscrito. Agradezco igualmente, por la ayuda aportada para mis viajes y estancias en las Universidades, al Consejo Nacional de Investigación del Canadá (National Research Council of Canada), al Servicio Geológico del Canadá (Geological Survey of Canada), al «United States Vela Project», a la Río Algom Mines-Ltd y a la UNESCO.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Van Waterschoot van de Gracht, W.A.J.M. (1928): (ed.) *Theory of continental drift: a symposium Amer. Ass. Petrol. Geol.*, Tulsa, Oklahoma.
- (2) Munyan, A.C. (1963): (ed.) *Polar wandering and continental drift. Soc. Econ. Paleont. Mineral., Spec. publ. no. 10*, Tulsa, Oklahoma.
- (3) Runcorn, S.K. (1962): (ed.) *Continental drift*. Academic Press, New York.
- (4) Blackett, P.M.S., E.C. Bullard and S.K. Runcorn (1965): (eds.) *A symposium on continental drift, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 258, A, no. 1088.
- (5) Wilson, J.T. (1968): *Can. Min. Metall. Bull.*, 61, no. 670.
- (6) Lyell, C. (1847): *Principles of Geology* (7th ed.). J. Murray, London.
- (7) Holmes, A. (1965): *Principles of physical Geology* (2nd ed.). Nelson, London.
- (8) Ewing, M. y Heezen, B.C. (1956): *Amer. Geophys. Union. Geophys. Monog. no. 1*, 75.
- (9) Hill, M.J. (1965): *The Sea*, vol. 3. *Interscience Pubs.*, New York and London.
- (10) Wegener, A. (1966): *The origin of continents and oceans*, Dover Pubs. New York (traducción al castellano, *El origen de los continentes y océanos*. Ed. Pirámide, 1983).
- (11) Peacock, M.A. (1935): *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 46, 633.
- (12) Kuhn, T.S. (1967): *The structure of scientific revolutions*. Univ. Chicago Press.
- (13) Suess, E. (1904): *The face of the earth*. Clarendon Press, Oxford.
- (14) Bucker, W.H. (1933): *Deformation of the earth's crust*. Princeton Univ. Press.
- (15) Umbgrove, J.H.F. (1947): *The pulse of the earth* (2nd ed.). Martinus Nijhoff, The Hague.
- (16) Kummel, B. (1961): *History of the Earth*. W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- (17) Barrell, J. (1913): *Amer. J. Sci.*, 36, 87 and 225.
- (18) Schuchert, C. (1923): *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 34, 151.
- (19) Willis, B. (1932): *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 43, 917.
- (20) Dampier, W. (1952): *A history of science* (4th ed.), 109. Cambridge Univ. Press.
- (21) Runcorn, S.K. (1962): *Nature*, 195, 1248.
- (22) Sutton, J. (1966): *Nature*, 196, 731.
- (23) Wilson, J.T. (1966): *Nature*, 211, 676.
- (24) Vail, J.R. *Tectonophysics* (en prensa).
- (25) Jones, D.L. y McElhinny, M.W. (1967): *J. Geophys. Res.*, 72, 4171.
- (26) Vine, F.J. y Matthews, D.M. (1963): *Nature*, 199, 947.
- (27) Vine, F.J. (1966): *Science*, 154, 1405.
- (28) Pitman, W.C. III y Heirtzler, J.R. (1966): *Science*, 154, 1164.
- (29) Le Pichon, X.J. (1968): *Geophys. Res.*, 73, 3661.
- (30) Wilson, J.T.: *Science* (en prensa).
- (31) Wilson, J.T.: *Can. J. Earth Sci.* (en prensa).
- (32) Hess, H.H. (1962): *History of ocean basins*, in Engel, A.E.J. (ed.) *Petrologic Studies*, Buckingham Volume. *Geol. Soc. Amer.*
- (33) Holmes, A. (1951): *Intern. Geol. Cong.* 18th, pt. 14, 254.
- (34) Macgregor, A.M. (1951): *Geol. Soc. S. Afr. Trans.*, 54, 27.
- (35) Brock, B.B. (1956): *Geol. Soc. S. Afr. Trans.*, 60, 177.
- (36) Clifford, T.N. (1967): *Geol. Soc. Am. Spec. Papers*, 92.

## II. EL CICLO VITAL DE LAS CUENCAS OCEÁNICAS

Se han descubierto sorprendentes conjuntos de accidentes topográficos, anomalías magnéticas, fallas y líneas sísmicas en el fondo de los océanos. Si determinadas cuencas oceánicas crecen a lo largo de las dorsales medio-oceánicas y otras se reducen a lo largo de las fosas, entonces se pueden explicar tales conjuntos de manera precisa. Si, por el contrario, las cuencas oceánicas son permanentes, no pueden comprenderse ni estos conjuntos, ni los resultados paleomagnéticos, ni otros hechos avanzados en favor de la deriva de los continentes. Se considera, pues, que los continentes se desplazan como grandes placas semipermanentes, empujadas por el crecimiento o el cierre de las cuencas oceánicas. Sin duda este mecanismo ha funcionado durante la mayor parte de los tiempos geológicos.

Un cambio doctrinal tan importante tiene consecuencias que van muy lejos. Se puede denominar revolución científica wegeneriana, en referencia a su artífice principal. Uno de sus resultados es que se puede describir el ciclo ideal de crecimiento y declive de una cuenca oceánica en seis estadios, a los que corresponden aproximadamente.

- 1.º) Los rifts de Africa Oriental.
- 2.º) El Mar Rojo.
- 3.º) El Océano Atlántico.
- 4.º) El Océano Pacífico.
- 5.º) El Mar Mediterráneo.
- 6.º) La cordillera del Himalaya.

A cada uno de estos estadios corresponde un tipo característico de montañas, rocas ígneas, sedimentos, condiciones climáticas, y la presencia o ausencia de evaporitas, abanicos aluviales, klippes y otros rasgos distintivos.

Los descubrimientos recientes en las cuencas oceánicas han convencido a la mayoría de los geólogos y geofísicos marinos, de que las cuencas oceánicas crecen y se cierran y de que a consecuencia de ello los continentes se hallan en movimiento. Estos puntos de vista concuerdan con los argumentos más antiguos a favor de la deriva de los continentes, de los puentes continentales desaparecidos y con las implicaciones de las observaciones paleomagnéticas.

Estas son incompatibles con la creencia en continentes y cuencas oceánicas inmóviles, creencia que ha sido la doctrina clásica desde la época de Lyell. Hay que elegir. O bien los continentes son inmóviles, y entonces no existe explicación disponible para una gran parte de las observaciones precisas realizadas en el fondo de los océanos, o bien las cuencas oceánicas crecen y se cierran, con consecuencias para la geología de los continentes que sin duda son mucho más importantes de lo que jamás habríamos imaginado hasta ahora.

Esta nueva doctrina o paradigma se acepta porque es capaz de explicar una gran parte de lo que las hipótesis precedentes explicaban y a la vez da cuenta de otros hechos que aquéllas no podían explicar.

Este cambio es enorme. Es la diferencia que hay entre una isla y un barco. En ciencia, el paso a una nueva doctrina es una revolución científica (1). Se la puede llamar la revolución wegeneriana en referencia a su defensor principal. Ello no nos obliga necesariamente a aceptar todas sus ideas. En particular concebimos la deriva como un fenómeno antiguo que aparece en el Precámbrico, más que durante la era mesozoica.

Ya hemos comentado la naturaleza de esta revolución wegeneriana. En este artículo examinamos una de sus consecuencias importantes, la evolución aparente de las cuencas oceánicas, ilustrando en qué forma las cuencas pueden sucederse unas a otras en ciclos lentos pero potentes. Además publicamos una reinterpretación de la geología de Norteamérica en el marco de esta deriva de los continentes (2).

Hace sólo diez años muy pocos creían en la deriva de los continentes. Si los continentes son como grandes barcos, un estudio detallado de los puentes de mando (que es lo que de hecho ocupaba a la mayoría de los geólogos) no es un buen método para descubrir si los barcos se mueven. Recientemente se ha podido medir las posiciones cambiantes de los diversos continentes gracias a las observaciones paleomagnéticas y hemos podido mirar, por así decir, por la borda hacia el fondo oceánico. Estas investigaciones, iniciadas y efectuadas en gran parte por investigadores de las universidades de California, Cambridge, Columbia y Londres y por expediciones soviéticas, han puesto de manifiesto que la estructura de los fondos oceánicos es muy diferente de la de los continentes. No parece necesario retomar estos resultados, que son recientes, fácilmente accesibles, bien conocidos y ya bien resumidos (3). Los descubrimientos incluyen las dorsales medio-oceánicas (4), otras cadenas submarinas (5, 6), las zonas de fractura (7), los mosaicos regulares de anomalías magnéticas en las cuencas oceánicas (8), las fallas transformantes (9), el sentido de los movimientos a lo largo de las fallas (10), el grosor de los sedimentos y su edad (11). Estos descubrimientos, asociados a las ideas sobre la isostasia (12), el encaje de unos continentes con otros (13), la paleoclimatología (14), el paleomagnetismo (15), la capa de baja velocidad (16), la geoquímica del interior de la Tierra (17) y los argumentos biológicos (18) han convencido a prácticamente todos los geólogos y geofísicos marinos de que debe existir algún tipo de deriva de los continentes.

Las velocidades supuestas de renovación de los fondos alcanzan los 12 cm por año, valor parecido al observado en fallas activas como la de San Andrés (19).

Si son permanentes, estos tipos de movimientos implican desplazamientos relativos entre continentes de algunos millares de kilómetros en 100 millones de años. Velocidades de este orden habrían posibilitado que los océanos actuales se formasen a partir del Jurásico o Cretácico, como lo supuso Wegener (20). Pero ¿por qué no habría de haber deriva

antes de esa fecha? Muchas buenas razones inducen a pensar que los movimientos relativos empezaron bastante antes. ¿Cuáles son los rasgos de la geología del Mesozoico medio que indican un cambio radical en la evolución del planeta? Suponer un cambio de esta naturaleza es contrario al principio de la uniformidad. Si no ha existido deriva más antigua, las montañas precretácicas tendrían que haberse formado de otra manera. Los geólogos no han encontrado diferencias entre ellas. Introducir dos explicaciones allí donde una basta es violar el principio «no hay que introducir la pluralidad sin necesidad de ello».

Si la deriva puede explicar los resultados paleomagnéticos en rocas recientes ¿por qué invocar una causa diferente a la deriva para explicar resultados semejantes obtenidos con las rocas más antiguas? La deriva durante la era paleozoica, a mi entender, puede explicar observaciones geológicas intrigantes que de otro modo quedan sin respuesta (21), incluidas las ideas de Barrell y Schuchert sobre los puentes continentales desaparecidos (22). Ello nos induce a admitir que probablemente en la superficie terrestre se han abierto sucesivamente cuencas oceánicas que luego se han cerrado lentamente.

Como los remolinos aguas abajo de una cascada en un río o las corrientes en la superficie de un caldero hirviente, estos vastos movimientos ascendentes nacen y desaparecen, uno se extingue mientras otro comienza en otro lugar. La consideración de la naturaleza de los océanos actuales y de la historia geológica de lo que parece que fueron cuencas oceánicas en las regiones caledoniana-apalachiana y de las Montañas Rocosas (2) induce a pensar que el ciclo vital de las cuencas oceánicas puede dividirse en seis estadios.

Para cada uno, este artículo da características, ejemplos, y tipos de montañas formadas durante este estadio.

### **Estadio n.º 1: Las cuencas oceánicas en formación (Rifts de Africa Oriental)**

Son levantamientos con rifts axiales que se alinean a través de un continente (23, 24). El movimiento de separación a lo largo de los rifts es débil y lento (25). Son característicos el vulcanismo basáltico y alcalino, los climas continentales, los abanicos aluviales menores y los pequeños depósitos de evaporitas. La fuerza dominante parece ser un levantamiento acompañado de tensión, de disminución de presión y de cizallamiento horizontal local. Dado que los rifts de Africa Oriental tienen por lo menos diez millones de años, el levantamiento debe haber precedido largamente al desplazamiento horizontal. J.R. Vail (26) destaca que «los rifts siguen los cinturones orogénicos con una persistencia notable», lo que sugiere que son los precursores de los océanos de los que ahora se sabe que a menudo han cortado en dos las cordilleras antiguas.

El único tipo de formación de montañas característico de este estadio es el debido a bloques fallados levantados verticalmente a lo largo de los rifts y a los volcanes que lo acompañan.

### **Estadio n.º 2: Las cuencas oceánicas jóvenes (Mar Rojo, Golfo de Adén, Mar de Noruega, Bahía de Baffin)**

Son los océanos estrechos con rift, con márgenes de bloques y altiplanos continentales fallados.

Montañas elevadas bordean las costas de los continentes adyacentes. Suele registrarse vulcanismo basáltico y fallas transformantes. Las influencias climáticas varían de continentales a marítimas. Parecen frecuentes las cuencas de evaporitas, como la depresión de Danakil actual, una gran parte de la cuenca del mar Rojo durante el Mioceno y del golfo de México durante el Jurásico (27).

El mar Rojo y el golfo de Adén, que tienen más de 10 millones de años, constituyen dos buenos ejemplos. El mar de Noruega es todavía más antiguo, dado que probablemente se formó durante el Cretácico. Es más ancho y tiene dos crestas laterales que unen Islandia con Groenlandia y con Noruega. El origen de la bahía de Baffin data probablemente del Cretácico. Se abrió lentamente y luego quedó inactiva. Ello podría explicar el grosor de los sedimentos, el limitado desarrollo de la dorsal axial, la débil sismicidad y la configuración poco característica de las anomalías magnéticas. No obstante, el carácter lineal de las anomalías magnéticas induce a suponer que se trata de una corteza oceánica, opinión que comparten los científicos soviéticos (28). Al sugerir que el fondo representa un bloque continental hundido (29), se hace de la bahía de Baffin una excepción para la cual no existe ninguna otra razón, que es la causa de muchas dificultades y que ignora el desgarre en el estrecho de Nares.

Este desgarre se hizo patente cuando los manuscritos de los mapas geológicos del Canadá y Groenlandia, preparados independientemente por Stockwell y Berthesen para un mapa mundial, se compararon en Nueva Delhi en 1964. No hay ninguna razón para que el estrecho de Nares sea rectilíneo si no es la de que sigue un desgarre horizontal. De todos modos, las plataformas continentales de la bahía de Baffin son más anchas de lo que a menudo se ha admitido (13), hecho que reduce el desgarre necesario.

Los tipos de orogenia característicos de este estadio son las dorsales medio-oceánicas, las crestas laterales y las montañas marginales levantadas (como en Eritrea, Noruega, Groenlandia, el Labrador y la isla de Baffin). Esta última isla puede representar un estadio más antiguo de montañas de rift, como las elevaciones de Africa Oriental.

### **Estadio n.º 3: Las cuencas oceánicas maduras (océano Atlántico)**

El fondo basáltico del océano, a partir de la dorsal medio-oceánica, se hunde hacia la costa y está progresivamente cubierto de sedimentos, que se engrosan hacia las cuencas marginales y las plataformas continentales. No hay movimiento relativo a lo largo de los márgenes de los continentes adyacentes. Han desaparecido los levantamientos costeros. Se han desarrollado volcanes en la dorsal medio-oceánica

y por doquier en las cuencas, aisladamente o en cadenas lineales. Los climas son marítimos. No se forman abanicos aluviales ni depósitos de evaporitas. Los depósitos profundos y de plataforma (miogeosinclinal) predominan. Recientemente los fondos del Océano Atlántico han sido cartografiados detalladamente, especialmente por las Universidades de Columbia y Cambridge y los Institutos de Woods Hole, de la Unión Soviética y de Bedford (3-5, 7, 11, 30).

Una gran parte del Océano Atlántico se formó en el interior de un continente antiguo y las costas opuestas pueden encajarse una con otra. De todos modos, dos secciones parecen haberse formado en el límite entre un continente antiguo y una cuenca oceánica más antigua. Esta es por lo menos la interpretación que se ha dado para la cresta de Lomonosov (5) y la del Sur de Florida-Bahamas. Por eso se les llama crestas-frontera.

Las orogenias características de este estadio son todas submarinas. Son las dorsales medio-oceánicas, las crestas frontera entre dos cuencas oceánicas, las crestas laterales como las que se localizan a ambos lados de Islandia y las cadenas lineales de islas basálticas como las islas Sociedad. La diferencia entre estos dos últimos tipos parece proceder de que sus fuentes se hallen situadas respectivamente sobre las dorsales medio-oceánicas o en su exterior.

**Estadio n.º 4: Las cuencas oceánicas que se reducen (parte occidental del actual Océano Pacífico, y durante el Paleozoico Inferior, los océanos antiguos: Caledoniano-Apalachiano y de la Cordillera de las Montañas Rocosas)**

Si algunas cuencas oceánicas crecen, y si no ha habido expansión rápida de la Tierra, otros océanos deben haberse reducido casi a la misma velocidad, formando fosas y arrugas eugeosinclinales allí donde sus fondos han sido reabsorbidos. El Océano Pacífico constituye un ejemplo actual de ello, aunque complicado por la corriente ascendente que corresponde a la dorsal del Pacífico Oriental. Breves instantes de reflexión bastan para convencernos de que su crecimiento en la cresta no impide en absoluto que la cuenca se reduzca en conjunto. Se considera que la idea de una expansión súbita y rápida de la Tierra después del Mesozoico es inútil, de una validez dudosa, llena de complicaciones (31) e incapaz de explicar las orogenias pasadas.

Menard (3), Hess (32) y otros autores (33) han descrito los accidentes de las cuencas pacíficas. La única parte de corteza antigua que queda se halla en el Pacífico Occidental. Allí se han desarrollado guirnaldas de islas bordeadas por fosas oceánicas (3, 33). También hay fosas a lo largo de América del Sur y Central.

En el Pacífico Occidental, tras las guirnaldas han seguido desarrollándose plataformas continentales. Los climas son marítimos. No hay abanicos ni evaporitas. Los depósitos de plataforma continental (miogeosinclinales) y de guirnaldas insulares (eugeo-

sinclinales) son característicos. Los sistemas montañosos formados en este estadio son guirnaldas de islas y montañas batolíticas.

**Estadio n.º 5: Las cuencas que se cierran (Mar Mediterráneo, Mar Negro y Mar Caspio)**

Si una cuenca oceánica sigue encogiéndose, las costas opuestas acaban chocando. Eso es lo que se cree que le sucedió, durante el Ordovícico Medio, al Océano Apalachiano-Caledoniano en Nueva Inglaterra (2, 21) y durante la era terciaria al Océano Tethys (34). Se mezclan las floras y también las faunas poco profundas y terrestres. Allí donde las guirnaldas resbalan sobre bloques continentales se alzan montañas y se forman abanicos aluviales. Pueden patinar «klippes» hacia el interior, como durante el Paleozoico por los estados de Nueva York, Terranova y Nevada (35). Partes de océanos pueden quedar aisladas y convertirse en cuencas evaporíticas o mares extremadamente salados. El mar Caspio, las cuencas de evaporitas de Nueva Escocia y las cuencas pérmicas de Texas constituyen buenos ejemplos de ello. Este estadio a menudo se acompaña de ajustes horizontales, como en Turquía, California, Chile y Nueva Zelanda en nuestros días. Es en el transcurso de este estadio cuando tiene lugar la formación de grandes cordilleras compresivas, como la del Himalaya y la Caledoniana-Apalachiana, por la superposición de dos bloques continentales. En la parte adyacente de los continentes este efecto de superposición puede levantar altiplanos, como el del Tíbet y el del Colorado (36) y las presiones que se propagan hacia el interior pueden generar levantamientos en bloques (por ejemplo, los «Black Hills»).

**Estadio n.º 6: Las cuencas oceánicas cerradas (las montañas del Himalaya y el Tethys)**

Una vez ultimado el cierre de un océano, puede quedar una cordillera inactiva atravesando un continente compuesto (34,37). Los Urales y el Himalaya parecen ser los ejemplos más evidentes de ello.

## CONCLUSIÓN

Cabe destacar cuatro puntos generales. Primero, cuando dos placas continentales se separan, tienden a hacerlo a lo largo de fracturas; así pues, las dorsales medio-oceánicas son generalmente accidentes topográficos debidos a una tensión pura y a una disminución de presión. Esta regularización simple caracteriza igualmente el Atlántico (7), pero no aparece en los rifts africanos (23). Tal vez los océanos no se aproximan al caso ideal más que cuando crecen. Es sorprendente que las dorsales medio-oceánicas se abran sin cizallamiento en la dirección de una simple disminución de la presión. De todos modos, las costas que se aproximan no son ni regulares en sus formas ni paralelas entre sí. Por consiguiente, su unión combina normalmente el cizallamiento horizontal con la compresión. De ello se desprende que la mayoría de las montañas en general se caracterizan por cizallamientos horizontales importantes, co-

mo lo vemos hoy en California, Chile y Turquía. Igualmente se considera que ahí radica el origen de las grandes fallas de desgarre presentes en Columbia Británica (24, 38) y a lo largo de todo el sistema caledoniano-apalachiano (2). Es interesante resaltar que durante los tres primeros estadios de formación de las cuencas oceánicas, todas las formas de montañas son debidas a un levantamiento combinado con una tensión; en cambio, una vez desarrolladas las cuencas oceánicas, todos los tipos de montañas se deben a una compresión combinada con un levantamiento.

En segundo lugar, dos artículos recientes (39) han tratado sobre el movimiento relativo de las principales placas de la corteza. No importaba distinguir entre las partes oceánicas y las continentales de esas placas, dado el breve período por el que se interesaban dichos artículos.

Para períodos más largos es importante señalar que, mientras los fondos oceánicos parecen ser absorbidos en las fosas oceánicas sin grandes levantamientos, el choque y la superposición de un bloque continental encima de otro provocan un gran levantamiento que, en consecuencia, se opone a su acción. Existe pues un contraste importante entre los fondos oceánicos que crecen simplemente y con relativa rapidez y que son reabsorbidos fácilmente, y los continentes, que se desarrollan lentamente, de un modo complejo, y que se resisten mucho a cualquier hundimiento. De ello se desprende que la configuración de los continentes ejerce un mecanismo de retroalimentación (*feedback*) que determina en parte sus movimientos.

Los continentes tienden a ser preservados intactos, mientras que las cuencas oceánicas crecen y mueren. Ahí yace el gran obstáculo para el reconocimiento y la aceptación de la deriva de los continentes. Una vez establecido un continente, los efectos de la deriva sobre sus regiones centrales distan mucho de ser manifiestos.

En tercer lugar, se ha propuesto en este artículo que la evolución de las cuencas oceánicas es el fenómeno primordial que actúa en la superficie terrestre. En tal caso, su crecimiento y declive son los acontecimientos geológicos más majestuosos. Es la propia inmensidad de esta actividad la que ha impedido que se le preste atención. En comparación, la formación de montañas y otros movimientos terrestres son efímeros y menores.

Podría decirse que orogenia y epirogenia no son más que una consecuencia de la thalassogenia. Sin

embargo estos términos se prestan a confusión y no añaden precisión a la simple sugerencia de que las cuencas oceánicas, al crecer y cerrarse, conducen a la formación de montañas y cambios de nivel.

Finalmente, estas ideas de grandes movimientos sostenidos durante largos períodos en la superficie terrestre no pueden aceptarse en la doctrina geológica convencional. La Geología, la Geofísica y la Geoquímica se han basado todas en el concepto de una Tierra esencialmente estática. Ciertamente, se ha hablado de movimiento, pero considerado como una excepción reciente, una noción a rechazar, y hoy por hoy ningún manual clásico ha incorporado todavía los efectos de un movimiento activo durante largos períodos. Ello conlleva un cambio de doctrina, una nueva manera de considerar la Tierra. Esta conversión, como lo ha mostrado elegantemente Kuhn, constituye una revolución científica. A mi entender, los descubrimientos recientes sobre los fondos oceánicos han ocasionado la revolución de la Ciencia de la Tierra vivida por el modelo estático de ésta.

Sugiero que se evitarían confusiones atribuyendo un nombre nuevo a la nueva doctrina o paradigma de una Tierra completamente móvil. Con una doctrina apropiada la Ciencia de la Tierra ya no tiene por qué seguir fragmentada. Se la debería estudiar en su conjunto como una ciencia única, para la cual un nombre apropiado, sugerido a menudo en el pasado, sería la Geonomía.

Las ideas incorporadas en este artículo han nacido lentamente en el transcurso de prolongadas visitas a Cambridge y a las universidades nacionales australianas, durante muchas otras visitas más breves y conversaciones, en particular con F.W. Beales, E.C. Bullard, P. Hillary, J. Harrington, H.H. Hess, P.B. King, M.S. Krishnan, R. Melville, E.R.W. Neale, C.S. Smith, F.J. Vine, J.B. Waterhouse y J.O. Wheeler. Mi esposa y E.A. Robinson han releído el manuscrito. Expreso mi agradecimiento a todos ellos.

He tratado de mencionar mis diversas fuentes, pero no es posible hacerlo a la perfección. Uno olvida y no llega a citar la ayuda de tantas personas. Quiero mencionar el apoyo aportado a mi investigación y a mis viajes por diversas universidades, el National Research Council de Canadá, el Geological Survey de Canadá, el programa Vela Uniform de Estados Unidos, la Unesco y Río Algom Mines Ltd.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Kuhn, T.S. (1967): *The structure of scientific revolutions*. Phoenix Books, Univ. Chicago Press.
- (2) Wilson, J.T.: *Can. Min. Metal. Bull.* (en prensa).  
Wilson, J.T.: *Nature* (en prensa).
- Wilson, J.T.: *Can. J. Earth Sci.* (en prensa).
- (3) Heezen, B.C., Tharp, M. y Ewing, M. (1959): *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, 65.
- Runcorn, S.K. (1962): (ed.) *Continental Drift*. Academic Press, London.

- Menard, H.W. (1964): *Marine Geology of the Pacific*. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Talwani, M. (1964): *Marine Geol.*, 2, 29.
- Udintsev, G.B. (1964): *Chart of the Pacific Ocean*. Soviet Inst. Oceanol. Moscow.
- Hill, M.N. (1965): (ed.). *The Sea*, Interscience Pubs. New York.
- Blackett, P.M.S., Bullard, E.C. y Runcorn, S.K. (1965): (eds.). *Phil. Trans. Royal Soc.* London, A 258.
- Gaskell, T.F. (1967): (ed.). *The Earth's Mantle*. Academic Press, London.
- (4) Heezen, B.C. y Ewing, M. (1960): *Science*, 131, 1977.
- (5) King, E.R., Zietz, I. y Alldredge, L.B. (1964): *Science*, 144, 1551.
- Atlasov, I.P. (1964): *Dok. Akad. Nauk. S.S.S.R.*, 156, 1341, transl. E.R. Hope, Def. Res. Bd. Can., T412R.
- (6) Wilson, J.T. (1965): *Nature*, 207, 907.
- (7) Menard, H.W. y Dietz, R.S. (1952): *J. Geol.*, 60, 766.
- Heezen, B.C., Bunce, E.T., Hersey, J.B. y Tharp, M. (1964): *Deep-Sea Res.*, 11, 11.
- (8) Raff, A.D. y Mason, R.G. (1961): *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 72, 1259.
- Vacquier, V. (1965): *Phil. Trans.* A 258.
- Vine, F.J. y Matthews, D.H. (1963): *Nature*, 199, 947.
- Bullard, E.C. y Mason, R.G. (1963): *In The Sea*, 3. M.N. Hill, (ed.), Interscience Pubs., New York.
- Heirtzler, J.R. y Le Pichon, X. (1965): *J. Geophys. Res.*, 70, 4013.
- Pitman, W.C., III y Heirtzler, J.R. (1966): *Science*, 154, 1164.
- Vine, F. (1966): *J. Science*, 154, 1405.
- Le Pichon, X. (1968): *J. Geophys. Res.*, 73, 3661.
- (9) Wilson, J.T. (1965): *Nature*, 207, 343.
- (10) Sykes, L.R. (1967): *J. Geophys. Res.*, 72, 2131.
- (11) Funnell, B.M. (1964): *Geol. Mag.*, 101, 421.
- (12) Riedel, W.R. y Funnell, B.M. (1964): *Q. J. Geol. Soc. Lond.*, 120, 305.
- Saito, T., Ewing, M. y Burckle, L.H. (1966): *Science*, 151, 1075.
- Opdyke, N., Glass, B., Hays, J.D. y Foster, J. (1966): *Science*, 154, 349.
- Ewing, M. y Ewing, J. (1967): *Science*, 156, 1590.
- (12) McConnell, R.K., Jr. (1965): *J. Geophys. Res.*, 70, 5171.
- (13) Bullard, E.C., Everett, J.E. y Smith, A.G. (1965): *Phil. Trans.*, A 258, 41.
- (14) Nairn, A.E.M., (1964): (ed.) *Problems in Palaeoclimatology*. Interscience Pubs., London.
- (15) Irving, E. (1964): *Paleomagnetism*. Wiley, J. and Sons, New York.
- (16) Anderson, D.L. (1966): *Science*, 151, 321.
- Lehmann, I. (1967): En T.F. Gaskell, (ed.) *The Earth's Mantle*. Academic Press, London.
- (17) Ringwood, A.E. y cols. (1966): *Petrology of the Upper Mantle*. Australian Nat. Univ. Publ., 444.
- Bell, P.M. (1967): *Trans. Amer. Geophys. Union*, 48, 666.
- (18) Darlington, P.J., Jr. (1965): *Biogeography of the southern end of the world*. Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass.
- Brundin, L. (1966): *Kungl. Svenska Vetenskap. Hendl.*, Fjorde Ser., 11, nr. 1.
- (19) Hamilton, W. y Myers, W.B.: (1966): *Geol. Surv. Canada Paper*, 66-14, 291.
- (20) Wegener, A. (1966): *The origin of continents and oceans*, 4th ed., Dover Pubns. Inc., New York.
- (21) Runcorn, S.K. (1962): *Nature*, 195, 1248.
- Sutton, J. (1963): *Nature*, 198, 731.
- Gough, D.I., Opdyke, M.D. y McElhinny, M.I.J. (1964): *J. Geophys. Res.*, 69, 2509.
- Creer, K.M. (1964): *Nature*, 204, 369.
- Dearnley, R. (1966): *Phys. Chem. of the Earth*, 7, 1.
- Wilson, J.T. (1967): *Rev. Soc. Can. Spec. Pubs.*, 10, 94.
- Briden, J.C. (1967): *Nature*, 215, 1334.
- (22) Barrell, J. (1913): *Amer. J. Sci.*, 4th Ser., 36, 87 y 225.
- Schuchert, C. (1923): *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 34, 951.
- (23) Hunter, A.N. Rept. (1965): *UNESCO Seminar on East Africa Rift System*. Univ. Coll. Nairobi.
- (24) T.N. Irvine (1966): (ed.) *Geol. Surv. Canada Paper*, 66-14.
- (25) Mohr, P.A. (1967): *Bull. Geophys. Obs. Haile Selassie Univ.*, Ethiopia, 11, 1.
- (26) Vail, J.R. (1967): *Res. Inst. African Geol. Univ. Leeds Ann. Rept.*, 11, 33.
- (27) Durham, C.O. y Murray, G.E. (1967): *Geol. Soc. Amer. Program 1967 Ann. Meet.*, 52.
- (28) Godby, E.A., Baker, R.C., Bower, M.F. y Hood, P.J. (1966): *J. Geophys. Res.*, 71, 511.
- Vine, F.J. y Morgan, W.J. (1967): *Geol. Soc. Amer. Program 1967 Ann. Meet.*, 228.
- Puminov, A.P. (1967): *Dok. Akad. Nauk SSSR*, 175, 901, 1967, Trans. Canada Def. Sci. Inf. Serv., T487R.
- (29) Kerr, J.W. (1967): *Earth Planet. Sci. Let.*, 2, 283.

- (30) Poole, W.H., (1966): (ed.) *Geol. Surv. Canada Paper*, 66-15.
- (31) Birch, F. (1964): *J. Geophys. Res.*, 69, 4377.  
Le Pichon, X. (1968): *J. Geophys. Res.*, 73, 3661.
- (32) Hess, H.H. (1946): *Amer. J. Sci.*, 224, 772.  
Hess, H.H. (1962): En A.E.J. Engel, (ed.) *Petrologic Studies*, 599. Geol. Soc. Amer.  
Hess, H.H. (1965): En W.F. Whittard and R. Bradshaw, (eds.) *Submarine Geology and Geophysics*, 317. Butterworths, London.
- (33) Pushcharovsky, Ya. M. (1967): *Tectonophysics*, 4, 571.
- (35) King, P.B. (1959): *The evolution of North America*. Princeton Univ. Press.  
Clark, T.H. y Stearn, C.W. (1960): *The geological evolution of North America*. Ronald Press, New York.
- Gilluly, J. y Gates, O. (1965): *U.S. Geol. Surv. Paper*, 465.
- (36) Gilluly, J.Q. (1963): *J. Geol. Soc. Lond.*, 119, 133.
- (37) Kropotkin, P.A. *Eurasia as a composite continent* in I.U.G.S. U.N.E.S.C.O. Symposium on Continental Drift, Montevideo (en prensa).
- (38) Wheeler, J.O. (1967): *Tectonics*, in C. H. Smith, (ed.) *Geol. Surv. Canada Paper*, 67-41, 3.
- (39) McKenzie, D.P. y Parker, R.L. (1967): *Nature*, 216, 1276.  
Le Pichon, X. (1968): *J. Geophys. Res.*, 73, 3661.

## B. LA ÚLTIMA PROPUESTA DE WILSON

Montserrat Domingo

Por lo que se desprende de una reciente comunicación personal y del hecho de incluir a modo de ilustración de lo que dice un artículo suyo sobre deriva continental y convección (Wilson, J. Tuzo, 1990, *Continental drift and a theory of convection, Terra Nova*, vol. 2, n.º 6, pp. 519-538), parece ser que aquí podría encontrarse la clave de sus ideas más recientes y avanzadas, las que, decía él, todavía no son lo bastante conocidas ni compartidas por la mayoría. El artículo, que es parte de una publicación especial sobre la estructura alpina-mediterránea, lo presentó Wilson en el contexto de un homenaje a Alfred Wegener, a quien calificaba de «científico distinguido y el principal arquitecto de un plan moderno de la Tierra».

A la espera de una divulgación póstuma de sus elaboraciones últimas, en las que aún estaba trabajando cuando le sobrevino la muerte, a continuación se ofrece un resumen de los prolegómenos de su nueva propuesta y se transcriben, traducidas y en cursiva, algunas de las argumentaciones que parecen más significativas de la misma; las figuras del artículo y sus pies explicativos, que aquí no se reproducen, contienen elementos de información tanto o más valiosos que el propio texto; por ello y para paliar el subjetivismo del siguiente extracto, es recomendable acudir a la publicación original.

Ésta arranca con un breve repaso histórico, desde 1800, de la evolución de los puntos de vista en las Ciencias de la Tierra, en especial los relativos a las hipótesis sobre la existencia de alguna capa móvil interior y sobre convección, con referencias especiales al rechazo general de los científicos de la época a la propuesta de Wegener de 1912, a la visión pionera

sobre la convección de Holmes (1928-31 y 1933, cuya escasa divulgación atribuye Wilson a la modestia de su autor), y a la contribución de los matemáticos a la comprensión del flujo interno, los efectos de la movilidad en rotación y la relación entre convección y formación de montañas.

A continuación pasa revista a las aportaciones iniciadas a partir de los años 50, que desembocarían en los 70 en la teoría de la tectónica de placas, incluida la hipótesis sobre las plumas del manto.

Prosigue con argumentos y datos propios y de numerosos autores que permiten entender en qué medida la formación y migración de las unidades del relieve dependen de uno de dos tipos de circuitos de materia móvil dentro del manto: el circuito somero de la astenosfera y el mucho más profundo, que arranca del límite manto-núcleo, de las plumas del manto.

...la litosfera rígida se rompe de acuerdo con la ley de Navier de fractura frágil... mientras que el manto dúctil experimenta convección según las leyes de flujo de fluidos en patrones en parte controlados por fracturas litosféricas. Estas influencias duales e interactuantes explican el comportamiento tectónico... En cada momento dado el ascenso por debajo de los continentes afecta sólo a unas áreas limitadas; hoy algunas se encuentran en el sudoeste de Estados Unidos, Asia Central, Botswana, Antártida y rifts de Africa Oriental, Europa y Siberia. La identificación de corrientes ascendentes puede revolucionar la Geología, porque sus efectos acumulativos han sido grandes y no se han tenido suficientemente en cuenta...

...La mayor parte de la masa de la Tierra, su manto, fluye como un fluido muy viscoso e interactúa con

una cáscara, la litosfera, que es rígida y frágil y se rompe por cizallamiento...La esencia de este concepto (la tectónica de placas) es que la litosfera y el manto tienen diferentes propiedades, pero interactúan, y, a mayor detalle, otros dos accidentes menores están también implicados en el comportamiento tectónico. Estos accidentes son las plumas, que ascienden atravesando todo el manto desde el límite núcleo-manto, y pequeñas escamas despegadas en la superficie, que incluyen tanto los mantos de corrimiento como las cubiertas de las plumas del manto...

...Las propias plumas no se han cartografiado, pero se presupone la existencia de unas cuarenta de ellas para explicar las propiedades y la alimentación de una clase peculiar de volcanes que señalan su presencia. Se los llamó volcanes de punto caliente cuando poco se conocía sobre ellos, a no ser su energía, su longevidad y la observación de que constituyen un marco casi estacionario de referencia para los movimientos de las placas...

...Esta propuesta de convección puede también resolver una vieja controversia sobre el posible levantamiento vertical de cadenas...

...Corrientes del manto han elevado la meseta del Colorado... (diversos autores) han postulado grandes levantamientos y migración horizontal de la región volcánica de Yellowstone y de las Rocosas de Colorado... y algunos levantamientos han migrado a través del escudo canadiense y a través de otros continentes...

...Corrientes del manto pueden levantar la litosfera verticalmente y fracturarla, generando fallas, bordes de placa y cadenas. Cuando una fractura se ha iniciado, el juego entre placas puede extenderla...

...En este artículo se reservará el término montañas para las construidas por compresión y se usará el de ranges (¿cadenas y altiplanos levantados?) para designar las formadas por levantamiento vertical y cizallamiento horizontal...

...Hoy se considera que la principal causa de movimientos en superficie es la convección en el manto... (en este apartado. Wilson indica las características de los grandes patrones de convección, los circuitos en la astenosfera y las cuarenta plumas activas).

...Aceptar la tectónica de placas supone aceptar que los accidentes superficiales migran y pueden colisionar...

...Diferentes accidentes en la superficie esférica de la Tierra giran a diferentes velocidades en torno a diferentes polos...

...Rifts y dorsales mesoceánicas se forman encima de plumas y por consiguiente cuando comienzan a

formarse son estacionarios en el marco planetario, pero si dos de estas dorsales son paralelas y no están separadas por una zona de subducción, su actividad determinará que se desplacen sus plumas generadoras, o al menos una de ellas...

...Si una dorsal tuvo una o más plumas del manto cuando colisionó ¿qué pudo ocurrirles a las plumas cuando la dorsal fue sellada o subducida?

...La propuesta de la colisión de una dorsal activa o de plumas de punto caliente con una costa y su migración tierra adentro merece ser explorada como causa del transporte de mantos de corrimiento. Una razón para confiar en ello es que todos los grandes mantos de corrimiento parece que se han iniciado en la costa y se han trasladado hacia el interior desde el mar...

...En Sierra Nevada (Rocosas) el reciente levantamiento debe haberse producido por el adelgazamiento reciente de la litosfera a causa de un progresivo calentamiento del manto subyacente, a medida que se trasladó al norte la unión triple de Mendocino; ello convirtió la litosfera sub-Sierra en astenosfera...

...Durante el magmatismo jurásico, la cobertera y el zócalo de la parte oriental de la Cordillera Canadiense se despegaron, el zócalo se movió verticalmente y las rocas de la cobertera fluyeron por gravedad, bajando por la pendiente de un domo ascendente de roca metamórfica en la zona central...

...Si un continente choca en una zona de subducción con una dorsal mesoceánica paralela a él, el resultado puede ser que el cubrimiento genere una faja caliente que migre tierra adentro. Estos levantamientos migratorios pueden haber elevado escamas y mantos y pilas de estratos...y haber proporcionado las pendientes para el deslizamiento gravitatorio y el traslado de mantos de corrimiento y escamas tierra adentro.

...En última instancia todas estas fajas calientes se enfrían y subsiden, con lo que se perderá la evidencia de su actividad y el movimiento de las escamas se convierte en un misterio. Eso puede aplicarse a muchas cadenas y altiplanos...

...Este artículo ha tratado de mostrar que el flujo y el ascenso vertical en el manto han desempeñado un papel importante en la estructura de los continentes... La relación entre topografía y ascenso del manto ha quedado bien clara por tomografía sísmica...La confección de mapas hipsométricos (con la topografía promedio) de todos los continentes ha facilitado el estudio de estas conexiones.