

FIGURA 1.—VISION MODERNA DE LA TEORIA DE WEGENER. Fases A-E: (1) Dos grandes bloques soldados forman en un principio el supercontinente Pangaea I. (2) Una primera desmembración produce cuatro continentes; (3) dos de ellos se sueldan de nuevo y la soldadura continúa (4) hasta que se juntan todos de nuevo (5), dando lugar al supercontinente de partida (E), llamado ahora Pangaea II. La fase F se parece mucho a la A. Los bloques a y b se denominan respectivamente Gondwana y Laurasia. En la etapa G aparece ya el desmembramiento actual, con (c) Norteamérica, (d) Sudamérica, (e) Eurasia, (f) África, (g) Antártida, (h) India y (i) Australia. La imagen es sólo esquemática y ha sido tomada del trabajo de Valentine y Moores, *Nature* 228, 657-9 (1970).

LA DERIVA DE LOS CONTINENTES

Que ni los continentes ni los fondos oceánicos son algo inmutable, sino que cambian lenta y apreciablemente en el globo terráqueo, es un pensamiento que remonta al menos a 1620 con Francis Bacon (1561-1626). Después, el asunto no se volvió a mencionar seriamente hasta 1858 (Snider) y principios de nuestro siglo (F. B. Taylor, en 1910, y Baker, en 1911). Fue, sin embargo, Alfred Lothar Wegener (1880-1930) el gran visionario o profeta (1) de la teoría de la se-

(1) Hay quien considera a Wegener, y aparentemente con razón, como el Copérnico de la Geofísica, pudiendo hablarse de la «revolución wegeneriana». Ello se debe a que, gracias a los trabajos de la década de los 60, la idea de Wegener empezó a cobrar fundamento. Sin embargo, a diferencia de Copérnico, Wegener no fue capaz de proveer una base teórica o experimental aceptable de sus «visiones». Un caso semejante de visionario, con algo más de Copérnico que de Wegener, es nuestro contemporáneo A. I. Oparin (nacido en 1894). La «revolución opariniana», confirmada bastante recientemente (véase TRIUNFO, número 554, 21 de julio de 1973), divide la Biología entre un período en que la «creación natural» era dogma universal y otro período en que la «evolución prebiótica» es de aceptación universal. Sin embargo, la fundamentación técnica de las ideas de Oparin no se debe a él mismo, sino, entre otros, a S. Miller, M. Calvin, S. Fox y J. Oro, siendo F. Wöhler (1828) el precursor.

paración relativa de los continentes y de la expansión de los fondos oceánicos, teoría que en la última década (a partir de los años 60) está emergiendo como fundamento y causa, en particular, de la orogénesis.

En una obra notable, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* (1915) («El origen de los continentes y océanos»), cuya traducción inglesa apareció en 1924, Wegener expuso la idea de que los actuales continentes provienen de la desmembración de uno primitivo, denominado Pangaea (en la figura 1 se detalla gráficamente una visión moderna de la idea de Wegener). La primera especulación de Wegener en tal dirección data, de hecho, de 1912.

El argumento de partida de Wegener vino de la constatación de que las costas atlánticas de Sudamérica y África están geológicamente hechas una para otra (figura 2). Al mismo tiempo, había indicios de la similitud en los restos paleontológicos, mineralógicos, de fauna y flora, de ambos continentes. Hechos análogos pueden observarse entre el continente chino y la California americana. Por muy extraño que pueda parecer, todas

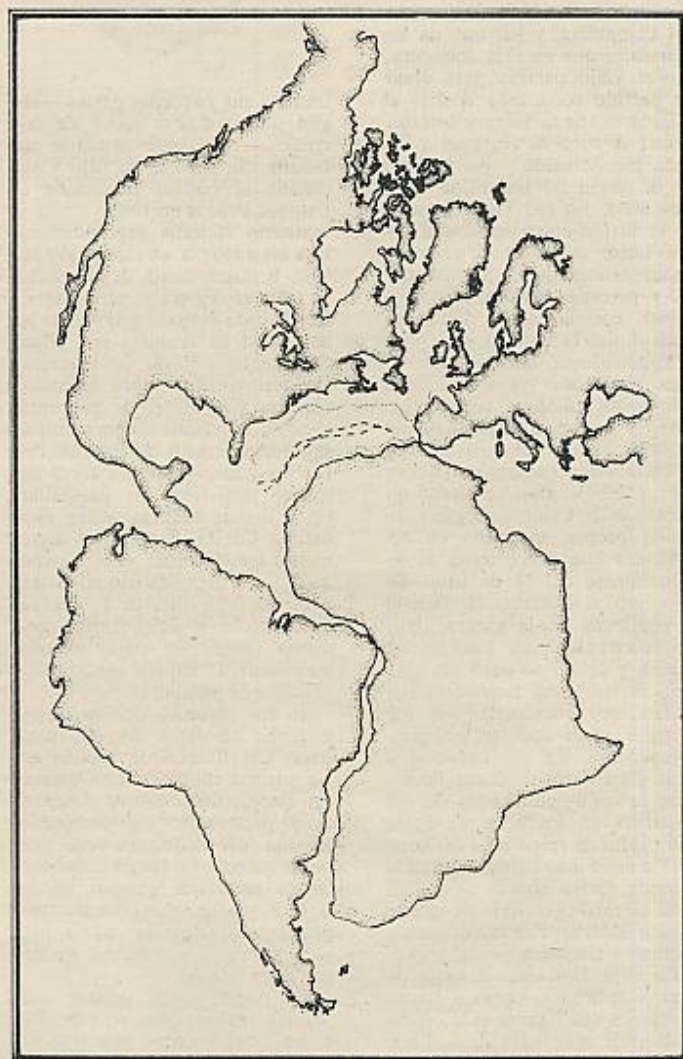


FIGURA 2.—UNA IMAGEN EN APOYO DE LA VISION DE WEGENER. Lo que importa no es realmente lo que se ve en superficie, sino el acople «perfecto» entre las placas continentales por debajo de la superficie del océano. La zona Atlántica (de Norte a Sur) define una cresta, mientras que Centroamérica (de Oeste a Este) y el Mediterráneo serían parte de trincheras.

estas evidencias fueron en la época de Wegener atribuidas al azar. Sencillamente, las ideas de Wegener iban contra el dogma geofísico imperante en la época: el Inmovilismo de continentes y suelos oceánicos. Ha sido necesario esperar hasta nuevos descubrimientos geofísicos y geológicos de los años 60 para que alcanzasen un margen de audiencia aceptable en la comunidad científica internacional.

Hay que reconocer que Wegener no fue capaz de apoyar sus «visiones» en fundamentos físicos sólidos. En particular, atribuyó a fuerzas gravitatorias la separación de continentes, y ya en 1929 se puso de manifiesto que tales causas producen efectos tectónicos despreciables, y, por tanto, son irrelevantes en el problema de Wegener. En apoyo de la idea de Wegener se puede argüir que un resultado del movimiento relativo de los con-

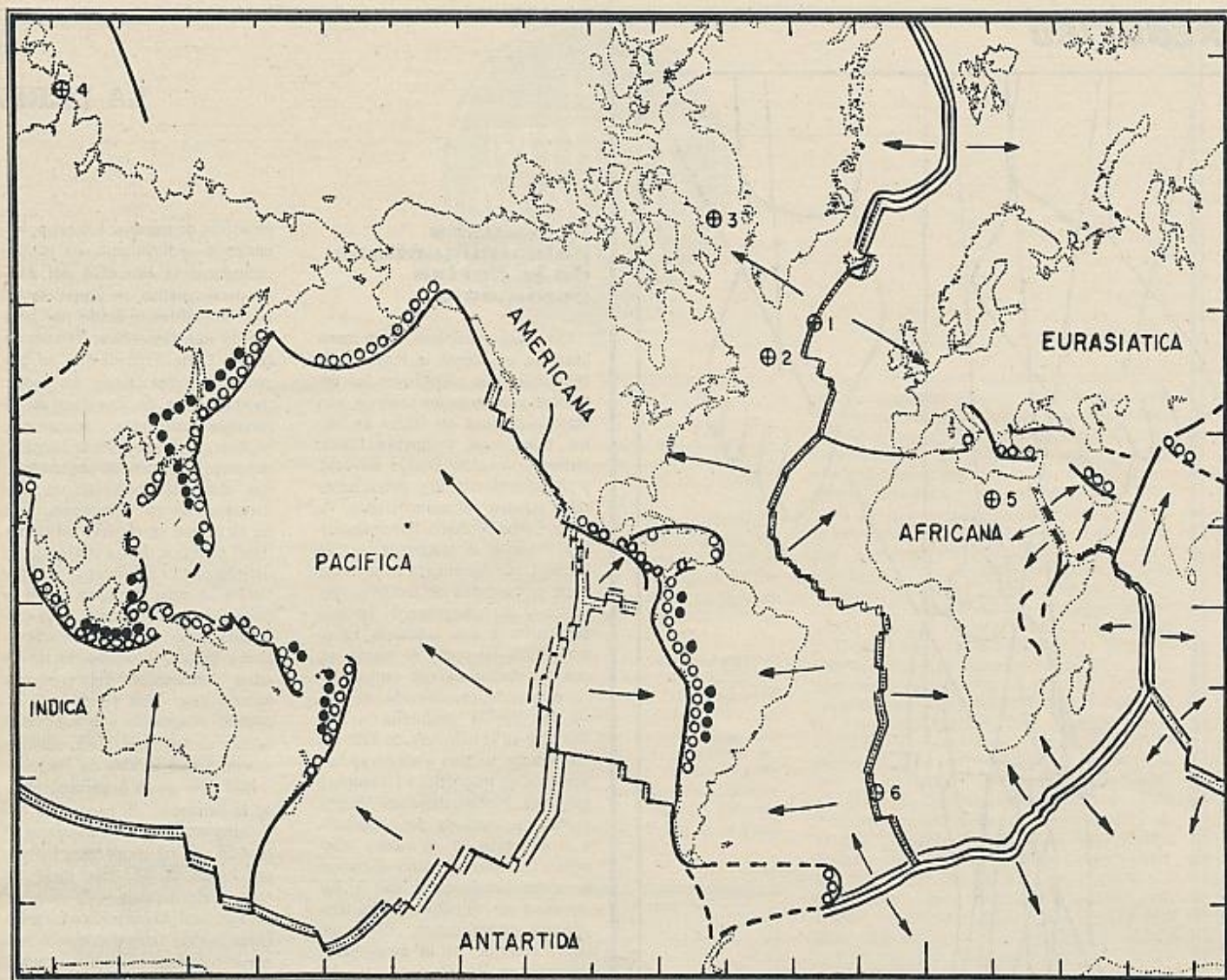


FIGURA 3.—DISTRIBUCIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS CRESTAS (—) y TRINCHERAS (---, línea continua) y DE LAS SEIS PLACAS MAYORES ASEISMICAS DE CORTEZA TERRESTRE, según algunos autores (Le Pichon, 1968). Los círculos con cruz (⊕) indican sus posibles centros de rotación. Las flechas indican el movimiento de deriva continental: hacia fuera en las crestas y hacia dentro en las trincheras. Los círculos indican zonas de actividad sísmica (● : profunda; ○ : intermedia). Las rayas continuas indican en general líneas de actividad sísmica (tal actividad, si suave, puede darse en las crestas).

MANUEL G. VELARDE y JESUS SALAN

tinentes es la formación de cadenas montañosas. La orogénesis de la época justificaba, sin embargo, esos fenómenos sobre argumentos de expansión o contracción puramente térmica.

Los descubrimientos de los años sesenta, que apoyan la idea visionaria de Wegener, están básicamente en cuatro direcciones: 1) Evidencias paleomagnéticas (2); 2) evidencias del movimiento de los suelos oceánicos; 3) estudios de edad del material de dichos suelos, y 4) evidencias sísmológicas

(en la figura 3 se indican las zonas de mayor actividad sísmica y volcánica, así como un esquema de las placas terrestres cuyo movimiento relativo parece ser hoy universalmente aceptado). Por razones de limitación de espacio, por su espectacularidad y por considerarlas como más asequibles del gran público, nos limitamos en esta nota a describir las evidencias paleomagnéticas.

Geomagnetismo

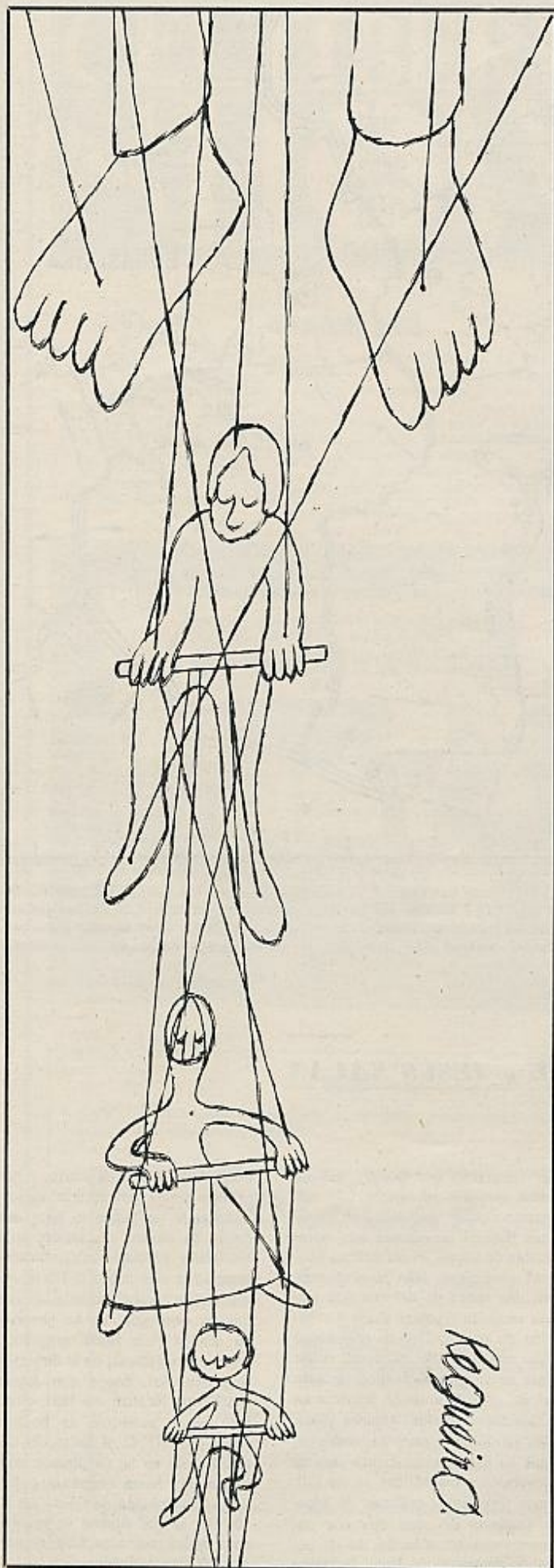
Se admite hoy que la dirección Polo Norte-Polo Sur del campo magnético terrestre ha cambiado en

el transcurso del tiempo, habiéndose invertido su sentido (del momento dipolar magnético, en términos físicos) un número muy apreciable de veces en las últimas épocas geológicas. Más concretamente, una época de determinado signo magnético parece durar un millón de años, mientras que desde que una inversión comienza hasta que se alcanza el sentido opuesto al del período anterior, transcurren unos diez mil años. Algunos cálculos permiten inferir, sin embargo, que ha habido unas ciento setenta inversiones magnéticas en los últimos trescientos millones de años.

Digamos de paso que nos encontramos actualmente en un período de transición hacia inversión

magnética. Si ello es cierto, y hay razones serias para creerlo, vamos, lentamente, por supuesto, hacia una época de intensa glaciación; esta glaciación afectará extraordinariamente a la vida sobre la Tierra, reduciéndola probablemente a una mínima expresión. Se ha observado que el Polo Norte magnético se está desplazando en la dirección Noroeste. Así, desde que James Clark Ross localizó, en 1831, dicho Polo en la península de Boothia (70° 5' N-96° 47' O, al Norte del Canadá), éste se ha desplazado continuamente hasta encontrarse hoy en la isla Príncipe de Gales 73° N-101° O, lo que supone un recorrido o deriva muy apreciable en menos de siglo y medio.

(2) Por paleomagnetismo se entiende el estudio de la imanación natural de rocas y sedimentos terrestres, cuestión que tratamos en la sección tercera de esta nota.



Evidencias paleomagnéticas de la deriva continental

Las rocas volcánicas, tales como basaltos, así como la mayoría de las arcillas que constituyen los depósitos sedimentarios marinos, son materiales ricos en óxidos de hierro, tales como magnetita (óxido férrico), hematita (óxido ferroso) y titanomagnetita (3). Estos minerales pueden ser considerados, «a grosso modo», como ferromagnéticos (aunque la magnetita es, de hecho, ferrimagnética, y la hematita tiene propiedades de antiferromagnético y ferromagnético). Lo que singulariza a una sustancia ferromagnética, tal como el hierro, es que por debajo de una temperatura característica, llamada de Curie, T_c (en la magnetita es de 565°C , y en la hematita, de 675°C), sus átomos tienden a alinearse con sus campos magnéticos (atómicos) paralelos. Poseen, asimismo, la propiedad de imanarse paralelamente a la dirección de un campo magnético externo, tal como el campo terrestre (en lo que sigue lo llamaremos geomagnético). Otra temperatura característica, por debajo de la anterior, es la denominada temperatura de atrapamiento del campo magnético externo, T_b (esta temperatura es también superior a la temperatura ambiente, y para una muestra dada depende del **granulado** de la misma). Ocurre que enfriado el material desde una temperatura superior a la T_c hasta una temperatura inferior a la T_b , en presencia de un campo magnético externo, entonces, a partir de T_b hacia abajo, el material **guarda** la imanación adquirida paralela al campo externo, y ello de manera estable y permanente; incluso si una vez alcanzada T_b el campo externo desaparece o se altera. A esa imanación se la denomina magnetismo **termorremanente** (en adelante lo denotaremos MTR). Un ánfora, una cerámica o un ladrillo adquieren MTR en el proceso de fabricación. Puede ocurrir que una muestra sometida a sucesivos recalentamientos y enfriamientos adquiera varias direcciones de MTR, pero no entraremos en detalles sobre ese asunto marginal.

Lo interesante es que si se cogen

(3) Esto es cierto para cualquier roca ígnea o metamórfica (tal como la cuarzita, el gneiss, el esquisto o las calizas cristalinas). Una roca ígnea (tal como los granitos, basaltos o peridotitas) se forma por cristalización de un líquido silíceo caliente, como un magma volcánico.

muestras de material terrestre, volcánico o sedimentario, es posible determinar la dirección del campo geomagnético en presencia del cual se enfriaron desde por encima de sus respectivas temperaturas de Curie. Entonces, si se proyectan las direcciones del campo geomagnético de muestras de diferentes continentes y épocas geológicas, y ocurriese que la dirección geomagnética hubiese permanecido fija, todas las proyecciones convergerían en un solo punto. Esto no es lo que se observa en la realidad, sino que dichas proyecciones definen puntos diferentes, que describen un arco de curva sobre el globo terráqueo. Más aún, cada continente tiene su curva característica y propia, diferente de las de otros continentes. Tal comportamiento magnético puede ser explicado aceptando que los continentes se han desplazado relativamente, según la idea de Wegener.

Más aún, se ha observado incluso la existencia de bandas de materiales imanados en una misma dirección, de tal modo que junto a una banda de dirección dada hay otra banda paralela a la anterior, pero de sentido magnético opuesto. Estas bandas tienen al menos tres características muy interesantes. Una es que se encuentran situadas en paralelismo con unas rugosidades o crestas (4) que existen en los fondos oceánicos. La **segunda** característica es que a ambos lados de una cresta, bandas similares, de un mismo sentido magnético, se hallan simétricamente distribuidas, formadas al parecer en un mismo período de tiempo. Una **tercera** característica es que estudios de la antigüedad de dichas bandas muestran que no sobrepasan unos pocos millones de años. Se trata, pues, de materiales relativamente jóvenes. Así se llega a la conclusión importante de que no sólo los continentes se están moviendo lateralmente, como imaginaba Wegener, sino que, además, es opinión actual de la mayoría de geofísicos que la corteza terrestre se

(4) Las **crestas oceánicas** tienen una configuración geomorfológica claramente distinta de las demás figuras tectónicas de los fondos marinos. Consisten en una especie de cadena montañosa, que sólo en muy contados casos llega a la superficie libre del mar. Esta cadena, paralelamente y a ambos lados de la cresta, tiene una serie de rugosidades. Las crestas recorren todos los océanos, aunque no siempre por su parte central. Por el centro van a lo largo de los océanos Atlántico e Índico. Asimismo, es de señalar que en estas regiones no hay apenas actividad volcánica ni sísmica (véase la figura 3).

DE LOS CONTINENTES

está generando continuamente, de tal modo que las zonas o fuentes de generación del material terrestre son las crestas oceánicas. Existiendo fuentes de material, cabe pensar en los eventuales sumideros del mismo. Tales son las llamadas trincheras (5) oceánicas. Diversos estudios sísmicos, amén de análisis paleomagnéticos, han puesto de relieve que estas grandes fosas, que llegan hasta los doce kilómetros de profundidad, son efectivamente las zonas donde la corteza terrestre se hunde en el interior del globo.

Como anécdota, señalemos, de paso, que la Península Ibérica se ha movido en el transcurso del tiempo. Concretamente, ha girado en el bloque eurásico, con centro de giro en algún punto de los Pirineos o de Francia, dando lugar, quizá por ello, a la formación del golfo de Vizcaya, al tiempo que el desplazamiento hacia el Mediterráneo originó la cordillera Penibética (¿de origen volcánico?) y los Pirineos. Tales movimientos podrían justificar la sismicidad de Andalucía y Levante y el eventual volcanismo de la región de Almería. Dicho sea de paso, el Himalaya y los Andes pueden considerarse también como provenientes de movimientos similares del manto superior.

Teorías científicas que apoyan la «profecía» de Wegener

¿Por qué, pues, se mueven los continentes? ¿Cómo se podrá justificar tanto la renovación como el hundimiento, antes mencionados, del material terrestre?

La explicación ha de buscarse en el interior de la Tierra. ¿Estuvo la Tierra inicialmente fría y luego se ha ido progresivamente calentando debido a fuentes internas, tales como fuentes radioactivas? O bien ¿estuvo la Tierra inicialmente caliente y ha sido su Historia el transcurso de su enfriamiento progresivo? Hoy día, los científicos vacilan entre una y otra hipótesis. Es, pues,

(5) Las trincheras son aquellas zonas donde se encuentran las más importantes depresiones oceánicas. Estas grandes fosas, generalmente estrechas, se encuentran en la zona convexa de las cadenas de islas o bien en proximidad de costas continentales básicamente formadas de grandes cadenas montañosas y que son zonas de extraordinaria sismicidad y volcanismo (véase la figura 3).

de desear una mayor investigación de la distribución térmica del interior terrestre. Parece estar bien establecido que el núcleo terrestre se encuentra a temperaturas del orden de los mil grados, comportándose como un líquido al paso de ondas sísmicas. Concretamente, nunca se ha observado que el núcleo pueda transmitir ondas transversales, lo que es una propiedad casi exclusiva de los líquidos. Sin embargo, muy poco se conoce del comportamiento del material terrestre a tales temperaturas, para las enormes presiones que se supone existen también. Nótese que aunque temperaturas como los seis mil grados pueden ser obtenidas en el laboratorio, no ocurre así con las correspondientes presiones en el núcleo. Ocurre, por ejemplo, que en esa zona la densidad del material terrestre parece ser superior a la densidad media del globo. Concretamente, se piensa que la densidad en la zona central del núcleo es de cuatro a siete veces superior a la densidad, por ejemplo, a 33 kilómetros de profundidad desde la superficie. A esta profundidad hay una presión diez mil veces superior a la atmosférica (sobre la superficie terrestre), siendo diez veces mayor aún a los 300 kilómetros de profundidad.

En cifras absolutas, hay autores que estiman que entre la superficie y las zonas a 400 y 700 kilómetros de profundidad hay una diferencia vertical de temperatura de más de dos mil grados en el primer caso y de unos dos mil ochocientos en el segundo. Hay, sin embargo, otros autores que establecen valores algo inferiores a los dados. Las divergencias entre autores provienen de que las temperaturas se obtienen indirectamente, a partir de medidas de la conductividad eléctrica del material terrestre, sobre la base de leyes semiempíricas, aún no universalmente aceptadas.

A escala local percibimos el material terrestre como un sólido casi cristalino y fracturable. En cambio, a escala global, como un todo, digamos al menos en extensiones horizontales de más de 1.000 kilómetros por 400 de profundidad, su comportamiento de medio continuo se parece más al de un fluido. Como tal ha de ser considerado extraordinariamente viscoso. Para fijar las ideas, digamos que el aceite es más viscoso que el agua (fluye menos fácilmente). Si tomamos como unidad la viscosidad (cinemática) del aceite, entonces el manto terrestre es, al menos, diez mil trillones (un uno y veintidós ce-

ros) de veces más viscoso, pero fluye. Constituye lo que se llama un fluido viscoplastico o viscoelástico. A esa clase de materiales pertenece, asimismo, la pasta dentífrica.

Así, a escala global es razonable imaginar que, debido a las grandes diferencias verticales de temperatura, este fluido viscoplastico se halla en movimiento convectivo, de manera cualitativamente análoga al movimiento celular que, para un aceite de silicona, uno de nosotros describió en el número 537 de TRIUNFO (13 de enero de 1973, página 22, figura 3 C). Ese movimiento convectivo celular lleva los nombres de Bénard y lord Rayleigh. En el manto terrestre, las dimensiones horizontales de esas células convectivas (en forma de anillos) vienen dadas por la distancia entre crestas (donde el material asciende a la superficie) y trincheras (donde el material terrestre desciende).

Por otro lado, se sabe que para una capa de unos milímetros de espesor y, por ejemplo, una veintena de centímetros de dimensión horizontal, la velocidad del movimiento convectivo del agua o del aceite de silicona, sometidos a diferencias verticales de temperatura del orden de unos pocos grados, es de unas centésimas de centímetro por segundo, o sea, de una treintena de centímetros por hora. En el caso del material terrestre, dicha velocidad habrá de ser extraordinariamente inferior, y así se estipula entre uno y diez centímetros por año! En algunos fondos oceánicos parece ser de unos seis centímetros por año (océano Pacífico) ¡como máximo! Esta es la velocidad que los geofísicos atribuyen a la deriva o separación continental relativa. Demostrar con un modelo matemático que esas velocidades corresponden a las predicciones teóricas es un problema de investigación actual, aún no satisfactoriamente resuelto. Sin embargo, no hay duda de que cualitativamente la convección térmica de Bénard-Rayleigh es una justificación dinámica plausible de la idea de Wegener. Contrariamente a los argumentos avanzados por Wegener, este nuevo argumento ya está aceptado por una gran parte de la comunidad científica internacional. Así, a los casi sesenta años de la revolucionaria publicación de Wegener, parece ser que empezamos a entenderla. Numerosos científicos están empeñados en ello. ■ M. G. V. y J. S. (Departamento de Física de la Universidad Autónoma de Madrid).

OPS

«OVILLOS DE BABAI»,
EL LIBRO
POSTUMO DE OPS
Libro-«poster»

«ENCUESTAS A LOS TRABAJADORES». Vaak Karsunke, Gunther Weyraff, Karl Marx
Un texto inédito de Marx de primordial importancia para las ciencias sociales.

«ANTOLOGIA DE LA CIENCIA-FICCION EN LENGUA CASTELLANA»
Una muestra representativa de la ciencia-ficción en lengua castellana.

«CARTAS». Conde de Cabarrús
Estudio preliminar de José Antonio Maravall
El pensamiento político del fogoso ilustrado en sus propios textos y analizado por el profesor Maravall.

CASTELLOTE
EDITOR