

Estado actual de algunas cuestiones de Geofísica geológica ⁽¹⁾.

II

Origen y alteraciones de continentes y mares

El examen de estos asuntos requiere decir antes algunas palabras sobre las hipótesis relativas al origen de nuestro sistema solar. Todas concuerdan en admitir que los cuerpos del sistema proceden de una masa primera única y cabe dividirlos en dos grupos: las que explican la formación de los planetas, como consecuencia de la *rotación* de una masa que, al ir aumentando su velocidad durante la contracción, vence la fuerza de gravitación que unía sus partes, sustentada por Laplace, Roche y otros; y las que atribuyen los planetas a masas desprendidas del Sol por las *mareas*, con sus correspondientes protuberancias, determinadas en aquel astro por haberse aproximado, cuando ambos seguían sus trayectorias, una estrella de mayor magnitud. Los norteamericanos Chamberlin y Moulton fueron quienes primero (1909) desarrollaron esta última clase de hipótesis con la llamada «planetesimal», en la que se supone que los planetas estarían desde su origen constituidos por partículas sólidas o «planetesimos», y que su volumen iría acrecentándose por acumulación de polvo cósmico y planetesimos. Posteriormente, Jeans y Jeffreys, admitiendo la formación de los planetas como consecuencia de las mareas antes descritas, suponen que constituirían núcleos, primero, gaseosos como el Sol, y luego, en estado líquido, pasando, por fin, gradualmente al estado sólido, por enfriamiento debido a la radiación por la superficie. En la actualidad, acaso tengan más partidarios las teorías de este segundo grupo.

Origen de continentes y mares.—La formación de continentes y mares se explica partiendo de la hipótesis de Chamberlin y Moulton, según la cual la Tierra fué desde el principio sólida del modo siguiente (2): Desde su origen giraría alrededor de la línea de sus polos, y si admitimos un aumento de velocidad de rotación, tendería a un achatamiento, con esfuerzos superficiales de compresión, hacia los polos, y de tensión en el Ecuador, existiendo unas regiones intermedias sin esfuerzos que se fijan hacia los 30° de latitudes N. y S. Los esfuerzos de tracción, irradiando de los polos, determinarían grietas en la sólida y rígida costra, que admitiremos fueron tres simétricas a 120°, que llegarían hasta las referidas latitudes de 30° N y Sur. Si dichas tres grietas de cada hemisferio difieren en 60° de longitud con las del otro y suponemos unidos sus extremos por líneas oblicuas entre los paralelos 30° N. y S., tendremos dividida la superficie terrestre en seis segmentos cuadrilaterales, que, unidos con el centro, constituyen pirámides. Las referidas grietas podrían ser las separaciones de continentes

y mares, pues, efectivamente, algo análogo se observa en las partes de la Tierra, limitadas por los Atlántico, N. y S.; Pacífico, N. y S.; Océano Indico y depresión del Mediterráneo al Golfo Pérsico. Estas son las regiones que corresponden a las pirámides deprimidas, contiguas a las levantadas, que forman los continentes, y para explicar el hundimiento de aquéllas, o sea de los océanos, se supone que las primitivas circulaciones atmosféricas, debidas a las diferencias de temperaturas de las regiones ecuatorial y subpolares, influenciadas por la rotación terrestre, producirían movimientos giratorios, en virtud de los cuales se depositarían los más pesados planetesimos hacia las regiones centrales de los torbellinos, con el consiguiente aumento de peso sobre las bases de las correspondientes pirámides, lo que determinó su descenso y que resultaran dichas regiones, que constituyen los océanos, con rocas más densas que las que forman las zonas elevadas o continentales.

Admitiendo, como suponen Jean y Jeffreys, que la Tierra fué líquida en sus principios, existirían, una vez solidificada, enormes tensiones en su superficie, que, según Jeffreys, determinarían grietas verticales que se rellenarían por el magma, constituyendo enormes diques que luego desaparecieron, pero de los cuales dan idea las estrías de la Luna, aún visibles, merced a que en ella no ha habido denudación y, por consecuencia, tampoco sedimentación. Limitaríanse por aquellos diques, extensos sistemas poligonales, y fijándonos en uno de los grandes polígonos, se comprende que su superficie se enfriaría ya menos que el magma por ella recubierto; al contraerse éste, arrastraría al polígono, tendiendo a cerrarse las grietas por las presiones entre este polígono y los que le rodeasen; pero como aquéllas estaban soldadas por el magma que entre ellas había ascendido hidrostáticamente, constituyendo por su solidificación los antedichos diques, se encorvarían los polígonos, deprimiéndose sus bordes, que se hundirían en el magma. Si admitimos que la densidad del magma aumenta con la profundidad, los bordes de los polígonos, que al hundirse se volverían a fundir, como estarían constituidos por materiales menos densos que el magma, darían lugar a una materia fundida más ligera, que subiría hasta situarse en la parte central del polígono que habría quedado elevada con respecto a los bordes. Resulta, según lo expuesto, que se formarían regiones centrales, semejantes a los actuales continentes, con materiales debajo de su superficie menos densos que los que se hallarían hacia sus deprimidos bordes, los cuales, unidos y cubiertos por magma, constituirían los fondos marinos. Esta explicación de cómo han podido formarse los mares y continentes, está de acuerdo con los resultados del estudio de las compensaciones isostáticas y con las teorías más plausibles sobre la formación de montañas y regiones elevadas, por lo que parece preferible a la anterior. La circunstancia de que los grandes océanos Pacífico, Atlántico, Indico, presentan regiones menos profundas hacia sus

(1) Véase REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, n.º 2.441, página 523.

(2) James Johnstone, *An introduction to Oceanography*. Londres, 1923.

centros, se explica por Jeffreys porque siendo las rocas bajo los mares, a juzgar por sus lavas volcánicas comparadas con las continentales, más básicas que bajo los continentes, contendrán más materia radioactiva, y en virtud de consideraciones térmicas, deduce que el enfriamiento bajo los océanos es bastante mayor que bajo los continentes, lo que determinará la contracción de sus capas de rocas; pero como en la superficie conservarán temperatura casi constante por su contacto con las frías aguas marinas, se contraerán menos que en las partes profundas, determinándose una especie de abarquillamiento que elevará la región central y hundirá los bordes junto a los continentes, en cuyas proximidades podrán formarse *geosinclinales*, acompañados a veces de fracturas corticales.

El geofísico alemán A. Wegener dió a conocer, en 1910, su original y notable teoría de las translaciones continentales, de lo que algo se ha dicho anteriormente al tratar de la constitución de la corteza terrestre, según la cual, conservándose el actual eje de rotación casi inalterable, los continentes van desplazándose hacia el W. Admite que una delgada capa de sial, de unos 30 km, recubriese primitivamente la Tierra, sobre la cual la atracción luni-solar determinaría mareas que, entre otros fenómenos, darían lugar a que tendiese el sial a deslizar sobre el sima, retrasándose su movimiento de rotación de E. a W. con respecto al del resto del globo y produciéndose, por consiguiente, una tendencia hacia un movimiento relativo en dirección W. Originaríanse así fricciones y esfuerzos que darían lugar a jirones, los cuales fraccionarían el sial en masas que constituirían los primitivos continentes. Estos irían derivando hacia el W., a modo de enormes «icebergs» flotando, con bases sumergidas acaso 100 km, en la masa de sima que constituiría y constituirá aún el fondo de los océanos. En defensa de su teoría, invoca Wegener varios argumentos, entre los que son principales: el geográfico, especialmente considerando los bordes occidentales de Europa y Africa y los orientales de ambas Américas, que pueden llevarse a que casi ajusten por completo, interponiendo al N. la Groenlandia, cual si procediesen del desgarramiento de una gran masa cortical; el paleoclimático, que explica las épocas de grandes glaciares, porque las correspondientes masas continentales se encontrarían próximas a los polos, y el paleontológico, pues sin recurrir a los puentes continentales o sea uniones, hoy hundidas en los océanos, entre los actuales continentes, explica la coexistencia de especies fósiles en continentes ahora separados, porque fueron un solo continente posteriormente desgarrado. Esta hipótesis, todavía en período de evolución, tiene muchos opositores, aun en la misma Alemania, para los cuales los argumentos geográficos, que fueron los que la motivaron, pueden ser accidentes en las formas; la explicación de los grandes glaciares es una más que añadir a las dadas y deja sin explicar la existencia de algunos; la coexistencia de especies puede obedecer a otras causas que acaso descubran en su día las investigaciones biológicas o a que tal vez existieran los puentes continentales. Como objeciones principales se presentan la de que los datos astronómicos no permiten afirmar la existencia, en los tiempos hasta los que alcanzan las observaciones, de variaciones en las coordenadas geográficas de los Observatorios, y la aún más importante, de que Jeffreys y otros deducen

que no resultan suficientes las fuerzas que Wegener cree que determinaron el movimiento los macizos continentales. Parece, pues, prudente aguardar a que nuevas investigaciones vengan a reforzar los argumentos hasta ahora presentados en defensa de esta interesante teoría.

Alteraciones de continentes y mares.—La formación primitiva de los continentes y mares es uno de los más arduos problemas geológicos, por lo que las teorías que acaban de exponerse sólo sirven para dar cuenta del estado actual de la cuestión, sin que pueda admitirse ninguna como definitiva, aun cuando la de Jeffreys parezca, por ahora, la más satisfactoria. Conviene, no obstante, llamar la atención sobre la circunstancia de que, prescindiendo de la teoría de Wegener, concuerdan las otras dos expuestas en admitir que las grandes depresiones oceánicas se han encontrado siempre donde actualmente se hallan. Esta creencia, basada en la naturaleza tan distinta de los depósitos de las regiones profundas de los océanos y los que constituyen las rocas sedimentarias, que aun cuando sean de origen marino corresponden a depósitos de no gran profundidad, así como en el concepto que se tiene de los continentes y mares aceptando la compensación isostática y en otras consideraciones, va ganando bastantes partidarios entre los que se dedican a estudios geofísicos y oceanográficos.

Parece, a primera vista, que está en contradicción con lo precedentemente expuesto la gran cantidad de rocas con fósiles marinos que se encuentran en el interior de los actuales continentes, pero su estudio revela que los animales a que corresponden dichos fósiles indican que aquellas rocas se formaron en costas o mares de profundidad escasa, comparada con las de los abismos existentes en los grandes océanos actuales. Por consiguiente, aun cuando los bordes de éstos pudieron extenderse mucho más y aun recubrir los actuales continentes, en la actualidad está, como se ha dicho, muy generalizada la idea de que sus regiones más profundas no han cambiado de posición desde que aparecieron los continentes y los océanos.

Los bordes de los continentes, comprendiendo en ellos extensiones de algunos cientos de kilómetros dentro del mar y otras también considerables en los mismos continentes, están sujetos a frecuentes, geológicamente hablando, cambios de posición, produciéndose transgresiones marinas cuando el mar avanza y regresiones si retrocede. Estas transgresiones y regresiones pueden producirse por la erosión de las costas y sedimentaciones en las regiones litorales; pero cuando son considerables, se deben principalmente a movimientos corticales, bien constituyendo los plegamientos que originan las montañas, de cuya formación se tratará después, que dan lugar a regresiones o produciéndose los llamados *movimientos epirogénicos*, semejantes a lentos giros de superficies extensas, por virtud de los cuales las regiones costeras afectadas se inclinan en dirección al mar o hacia los continentes, con las consiguientes transgresiones y regresiones marinas. Casi todas las explicaciones que se han dado de estos movimientos, los atribuyen a la condición de fluidez o plasticidad de las capas profundas corticales y se consideran como fenómenos de origen semejante a los movimientos orogénicos o productores de montañas. Según Dutton, el equilibrio isostático que reina en la corteza terrestre,

sufre perturbaciones en los bordes continentales, por rebajarse por erosión los continentes y rellenarse con sus productos las regiones marinas próximas a aquéllos. El estado anisostático así creado determina movimientos corticales, tanto orogénicos como epirogénicos, pudiendo predominar o aun producirse solamente los de una u otra clase.

Formación de las montañas

Todas las grandes cordilleras, Himalaya, Andes, Alpes, Pirineos, etc., están constituidas por rocas plegadas y dislocadas por fracturas. La manera cómo se han engendrado, ha sido una de las preocupaciones de los geólogos, que han propuesto varias explicaciones, sin que ninguna satisfaga por completo. Pueden separarse en dos grupos: las que suponen que el levantamiento se ha efectuado en virtud de esfuerzos principalmente horizontales que al actuar sobre la corteza han determinado plegamientos, que son el origen de las cordilleras; y las que atribuyen su levantamiento a fuerzas predominantemente verticales.

Los partidarios de la predominancia de los esfuerzos verticales se hallan principalmente entre los defensores de la teoría de las compensaciones isostáticas, por más que ésta es compatible con las ideas sustentadas por los del otro grupo. Las ideas expuestas por Dutton, consignadas al ocuparnos de los movimientos epirogénicos, se aplican también a los orogénicos, pues al rellenarse con los productos de la destrucción de los continentes las zonas marinas litorales, las situaciones anisostáticas, además de producir los referidos movimientos epirogénicos, empujarán las zonas cargadas contra las no cargadas o continentales, determinando el levantamiento de éstas. Estas ideas de Dutton tienen el inconveniente de atribuir las cordilleras a causas locales y no explican cómo los levantamientos de los sistemas de montañas hercinianos, alpinos, etc., hayan sido geológicamente simultáneos en tantas regiones del globo. Muy recientemente (1924), el Dr. Bowie, admitiendo que se formen geosinclinales en la superficie terrestre, por efecto de la sedimentación durante largo tiempo y consiguiente contracción con aumento de densidad en el bloque que se hunde, cree que los sedimentos, en virtud del metamorfismo por presión, se comprimirán, constituyendo minerales densos, pero que al llegar a regiones más profundas, con temperatura elevada, aumentarán de volumen, y explica el ascenso de las capas superficiales, por estar empujadas verticalmente por las infrayacentes que se hallen en las condiciones referidas. Se ha combatido esta explicación diciendo que, sin negar que las temperaturas elevadas de las regiones profundas pueden determinar empujes verticales, también darán lugar a las fuerzas horizontales, de que se tratará en seguida, determinando unas y otras los levantamientos de las cordilleras.

Las hipótesis que cuentan con más partidarios son las que admiten que las fuerzas horizontales en la corteza son la causa principal de los movimientos orogénicos. Tienen, como punto de partida, las ideas que dió a conocer en 1875 el célebre geólogo austriaco Suess, y expondremos las que nos parecen más admisibles, basándonos en los trabajos recientes de

Jeffreys y De Launay (1). Según el primero, sólo las fuerzas horizontales, originadas en virtud de la contracción termal de nuestro planeta, son capaces de desarrollar los considerables esfuerzos necesarios para producir los plegamientos que han dado lugar a las grandes cordilleras. Del estudio del enfriamiento de la Tierra, citado al ocuparnos de la constitución de la corteza terrestre, deduce Jeffreys que, desde su interior hasta unos 700 km de la superficie, no ha habido enfriamiento ni, por consiguiente, cambio de volumen; pero desde aquel nivel C_i , el enfriamiento irá aumentando hasta el nivel de enfriamiento máximo C_m , disminuyendo luego hasta la superficie C_s . Entre C_i y C_m cada capa se enfriará más que la que tiene debajo; pero impidiendo ésta la contracción a que llegaría si estuviese libre, adelgazará su espesor y estará sometida a esfuerzos de tensión. Por encima de C_m , cada capa tenderá a contraerse menos que la que tiene debajo y los esfuerzos de tensión serán cada vez menores hasta llegar a una capa C_o , que no sufrirá esfuerzos. Desde C_o hasta la superficie C_s habrá esfuerzos de compresión que irán aumentando, y como en las partes de la corteza no distantes de la superficie la materia conservará rigidez suficiente para constituir rocas, se producirán en éstas plegamientos y fracturas en los sitios en que presenten menos resistencia, constituyendo todo ello el estado inicial de las cordilleras.

Deduce Jeffreys, por cálculos aproximados, que lo que se ha reducido la superficie de la Tierra, en virtud de los plegamientos debidos a la contracción por enfriamiento, teniendo en cuenta las consideraciones precedentes y la presencia de materia radioactiva, es del orden de $40 \times 10^3 \text{ km}^2$. Evaluando, muy por alto, lo que resulta efectivamente como reducción de la superficie terrestre por lo que se ha plegado al formarse sus cordilleras, en vista de las mediciones hechas en ellas, resulta del orden de $20 \times 10^3 \text{ km}^2$, que aun cuando sólo es la mitad de lo anteriormente consignado como lo que corresponde a la reducción por enfriamiento, hay que recordar que, aparte de omitirse plegamientos tapados por sedimentos posteriores y otros no importantes, pero sí numerosos, se prescinde de los que estén ocultos en los fondos marinos.

Como estos fondos deben estar constituidos por rocas más básicas y menos radioactivas, se habrán enfriado más que los continentes, y como sus rocas básicas son más resistentes que las ácidas continentales, habrán empujado los zócalos de los continentes, apilándose, en ciertos casos, sus rocas en plegamientos, apoyados en el macizo continental contiguo; así creen varios que se habrán originado las montañas, como los Andes y las Rocosas, que se encuentran sobre el Pacífico, debidas, según se acaba de exponer, a causa distinta de las formadas, según se ha dicho en el párrafo precedente.

Resulta de los estudios geológicos que las grandes cordilleras se han formado en determinadas épocas y simultáneamente, considerando los tiempos en el sentido geológico, en gran número de regiones del globo, siguiendo luego largos períodos de reposo en la actividad orogénica; basta, en efecto, recordar los sistemas de cordilleras huronianas, caledonianas, hercinianas, alpinas, levantados en las épocas cambria-

(1) Où en est la Géologie.—París, 1920.

na, siluriana, carbonífera y terciaria. Según la teoría de la contracción termal desarrollada por Jeffreys, se explica el carácter de intermitencias con que se forman las grandes cordilleras, porque los esfuerzos de compresión en las capas superiores a la que hemos llamado C_0 , irán aumentando de un modo continuo hasta que vencida la cohesión de las rocas más profundas, que se encontrarán a elevada presión y temperatura, pasarán a ser plásticas, mientras que las más cercanas a la superficie se fracturarán. Estas circunstancias son las que corresponden a un período orogénico, durante el cual, al irse adaptando las capas sobre la C_0 , irán desapareciendo los esfuerzos de compresión. Pero como el enfriamiento seguirá produciéndose de un modo continuo, las capas sobre C_0 volverán a comprimirse cada vez más, hasta que, pasado el tiempo necesario, se reproduzca nuevamente el fenómeno orogénico. El cálculo hace ver que las épocas de actividad han podido llegar a seis, teniendo en cuenta la probable edad de la Tierra, y aquella cifra no es de orden distinto a la que nos da la Geología como número de sistemas de cordilleras seguramente formados, debiendo advertir que no se sabe nada cierto respecto a si se formaron algunas durante los tiempos arcaicos.

Se ha indicado precedentemente que los plegamientos originarios de las cordilleras no se distribuían uniformemente por la superficie terrestre, sino que se formaban en zonas donde las rocas ofrecían menos resistencias que en las circundantes. Esto ocurre cuando en virtud de grietas corticales, hundimientos debidos al peso de sedimentos acumulados u otras causas se han producido ya profundos surcos o bien hondos geosinclinales, sobre los que se han acumulado sedimentos sueltos o poco consolidados. Las dos paredes de la fosa en U constituyen las regiones delantera (vorland) y zaguera (ruckland) de Suess, que al sufrir movimientos en las épocas de actividad orogénica comprimirán los sedimentos, los cuales se irán plegando y levantando mediante un proceso, respecto al cual varían las opiniones, pero que, en líneas generales, está muy bien expuesto por De Launay, del que resulta que las laderas más abruptas y plegadas de la cordillera que se forme corresponderán a la región delantera, o sea la que, por ser la más resistente,

haya ejercido mayor empuje al comprimir los depósitos.

Wegener ha dado también, dentro de su teoría, una explicación del modo de formarse las montañas. Según dicho geólogo se originan, bien cuando las masas continentales en movimiento se aproximan hasta tocarse, pues al comprimirse se producirá el plegamiento del sial de sus bordes, o también por las arrugas que en éstos puede originar la resistencia que por su viscosidad opone el sima, que constituye bajo los sedimentos marinos todos los fondos oceánicos, al avance de los macizos continentales. Entre las objeciones que se han hecho a esta explicación de la formación de montañas, tiene mucha importancia la de que calculadas las fuerzas que se pondrían en juego, no serían capaces de vencer la acción de la gravedad en la proporción necesaria para producir la elevación de las cordilleras, pues aquellas fuerzas resultan de un orden de magnitud insignificante con respecto al peso de las masas que habría que levantar.

Resulta de todo lo precedentemente consignado, que la explicación que parece actualmente más satisfactoria para la formación de las grandes cordilleras, es la de que son debidas a plegamientos producidos por los esfuerzos predominantemente horizontales debidos al enfriamiento de la Tierra, pues tanto a las que admiten la preponderancia de los esfuerzos verticales como a la de Wegener, se oponen objeciones de gran peso. Pero esto no quiere decir que aquella teoría, que se conoce por muchos por el nombre de teoría de la contracción, explique con toda claridad el proceso de formación de las montañas, aun cuando concuerda con gran parte de los hechos observados, entre ellos con que sea menor la densidad en las capas bajo aquéllas, puesto que las formarán sedimentos que, aun cuando consolidados, serán probablemente menos densos que las rocas básicas circundantes.

Terminaremos haciendo resaltar que el incesante estudio de los fenómenos naturales, como los orogénicos y los demás de que se ha tratado en este artículo, aporta constantemente nuevos datos, que obligan a interpretaciones que unas veces afectan a detalles y otras a puntos esenciales, siendo en este último caso necesario modificar, muchas veces por completo, ideas que se tenían como casi definitivas.

N. PUIG DE LA BELLACASA
Profesor de la Escuela de C., C. y P.

Las cañerías de hormigón de portland

Es un hecho en la actualidad la falta de fe de la generalidad de los ingenieros (al menos con referencia a los de Caminos creo poder asegurarlo) en que tubos o caños de hormigón de portland puedan hacer el mismo oficio que los de hierro colado, en conducciones de agua, con suficiente margen de seguridad en cuanto a estabilidad y resistencia y en cuanto a evitación de escapes y filtraciones.

Y si un número no pequeño, de mis aludidos estimabilísimos compañeros, cree en la *posibilidad técnica* de la sustitución equificiente de los unos por los otros, es dando por sentado que al hormigón no falte la armadura de hierro y que el cálculo de resis-

tencia sea hecho según los principios y normas actuales de la Mecánica del hormigón armado; pero desconfiando, por lo mismo, de que la ventaja económica probable merezca la pena de arrostrar los inconvenientes de la permeabilidad inicial (que tienen por inevitable) y de la inestabilidad de las juntas (si bien ésta crean posible obviarla por la construcción continua *in situ*) y todos los riesgos que la desastrosa experiencia de multitud de cañerías del mismo material hace temer.

Algunos, muy contados, a quienes particulares circunstancias hayan puesto en el caso de estudiar con especial detenimiento y del único modo positivo (la