

ADIÓS A LA ASTENOSFERA

Bye-bye, asthenosphere

Francisco Anguita*

RESUMEN

La idea de un nivel profundo que se deformase plásticamente (“astenosfera”) surgió de la mano de la isostasia, pero se convirtió en un imperativo con la revolución movilista. Creyendo que el manto inferior era demasiado rígido para fluir, los geofísicos de los años 60 se apresuraron, con una conducta que se nos antoja muy poco científica, a proclamar, basándose en la existencia de zonas dispersas del manto superior con velocidades sísmicas bajas, que habían identificado el “necesario” nivel de despegue de la litosfera respecto al resto del manto. La dependencia artificial del paradigma movilista con respecto a esta capa llevó a muchos científicos a inauditas defensas de una astenosfera global contra los datos que ellos mismos presentaban. La tomografía sísmica, que ha revelado que todo el manto terrestre fluye, ha permitido una vuelta, aún incompleta, a la realidad, en la que la astenosfera comienza a ser descartada tanto por innecesaria como por inexistente. Sin embargo, apenas se han producido rectificaciones explícitas, y tanto muchos textos como artículos científicos siguen empleando el viejo término. El surgimiento, evolución y defunción de este concepto puede servir como un excelente ejemplo de aula sobre el funcionamiento de la Ciencia real.

ABSTRACT

The notion of a deep plastic layer (“asthenosphere”) in the Earth was born soon after isostasy was accepted as an important tenet in Earth Sciences. With the mobilist revolution, asthenosphere became a “must” and, judging the lower mantle too rigid to flow, geophysicists of the 60’s hurried, acting in what now seems a very unscientific manner, to claim they had located the necessary layer in low seismic velocity areas of the upper mantle. The created dependence on the asthenosphere concept of the plate tectonics paradigm brought about incredible situations, in which scientific teams defended the idea of a global plastic layer in the upper mantle against the face value of their own data. Seismic tomography, which has shown a flow through the whole mantle, has marked a return, still incomplete, to reality, where the asthenosphere concept is being discarded as unnecessary and (especially) non-existent. Nevertheless, explicit retractions of this concept have been scarce, whereby it is still present in many textbooks and scientific articles. We contend that the appearance, evolution and demise of this term can constitute an excellent classroom example of the workings of real Science.

Palabras clave: Astenosfera, litosfera, tectónica de placas, historia de la Geología.

Keywords: Asthenosphere, lithosphere, plate tectonics, history of Geology.

INTRODUCCIÓN: el nacimiento

En 1914, el geólogo norteamericano Joseph Barrell propuso, para explicar el equilibrio isostático (definido por su compatriota Clarence Dutton sólo quince años antes), dividir la Tierra sólida (excluido el núcleo) en dos zonas: una rígida de unos 100 km de grosor, sobre otra plástica y de profundidad indefinida. La Sismología estaba naciendo, por lo que, lógicamente, Barrell no tenía datos numéricos en los que sustentar su propuesta; pero los términos que sugirió para estas dos unidades (litosfera [“esfera de roca”] y astenosfera [“esfera débil”]) han tenido una larga carrera en las Ciencias de la Tierra.

En 1926, el sismólogo alemán Beno Gutenberg halló que en algunas zonas la velocidad de las ondas sísmicas decrecía ligeramente (alrededor de un 5%) entre 100 y 200 km de profundidad, y atribuyó este efecto a una disminución en la rigidez del material en estas áreas (Fig. 1). La mayoría de los especialistas, sin embargo, consideró sus pruebas insuficientes: la principal objeción era que la zona de sombra no era totalmente “oscura”, sino que contenía diversos ecos sísmicos. Por este motivo, la idea de un nivel de baja velocidad sísmica quedó ignorada hasta los años 60.

(*) Depto. de Petrología y Geoquímica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid.
E-mail: anguita@geo.ucm.es

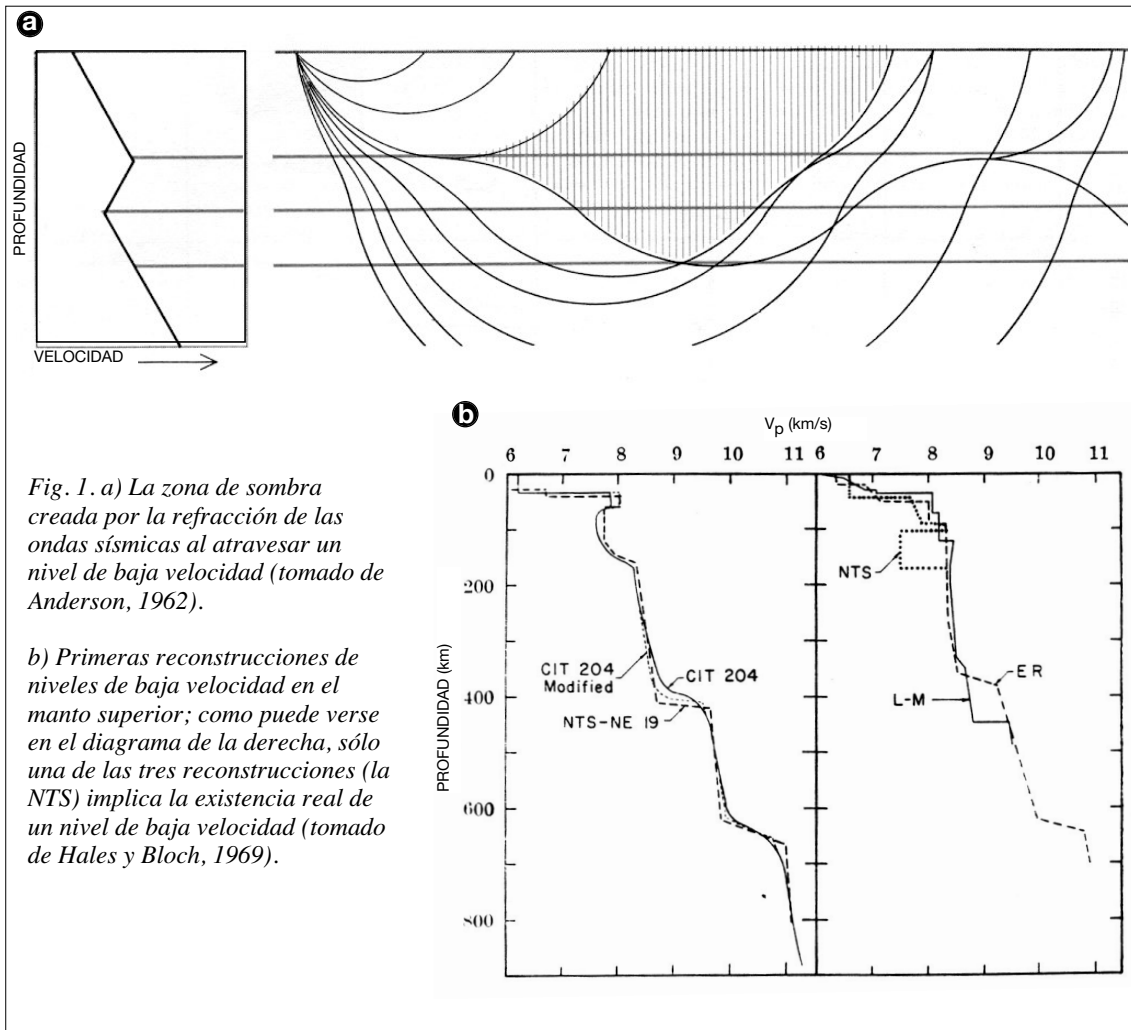


Fig. 1. a) La zona de sombra creada por la refracción de las ondas sísmicas al atravesar un nivel de baja velocidad (tomado de Anderson, 1962).

b) Primeras reconstrucciones de niveles de baja velocidad en el manto superior; como puede verse en el diagrama de la derecha, sólo una de las tres reconstrucciones (la NTS) implica la existencia real de un nivel de baja velocidad (tomado de Hales y Bloch, 1969).

LOS GEOFÍSICOS RESCATAN UN VIEJO TÉRMINO: la coronación del nivel que hacía falta

En 1962, Don Anderson, un prestigioso geofísico de CalTech, intentó resolver las objeciones anteriores argumentando que el nivel plástico debía ser muy heterogéneo "...realmente este nivel está lleno de heterogeneidades..." (Anderson, 1962, p. 4). Además, presentaba a continuación sus propias pruebas, basadas en los ensayos nucleares subterráneos de los años 50: "Las explosiones nucleares subterráneas han hecho posible por fin una prueba experimental controlada del análisis de Gutenberg. El tiempo, la energía y la localización de las explosiones se conoce con tal precisión que un solo ensayo proporciona datos de una calidad excelente"... "Visto en detalle, el nivel de baja velocidad se extiende desde unos 60 hasta unos 250 km" (id, p. 4)... "Estudios recientes de las ondas superficiales en nuestro laboratorio del Instituto de Tecnología de California y en la Universidad de Columbia han demostrado por vez primera que el nivel de baja velocidad está presente tanto bajo los

océanos como bajo los continentes" (id, p. 7)... "Indican que esta capa es de hecho un fenómeno global"... "Este trabajo... demuestra que la zona de baja velocidad es necesaria para explicar las frecuencias observadas" (id, p. 7).

Y sin embargo, Anderson reconocía a continuación que aún quedaba mucho por explicar: "La comparación de las trayectorias sísmicas oceánicas con las continentales muestra que las ondas se deceleran más bajo los océanos. Evidentemente, las diferencias geológicas entre las cuencas oceánicas y las masas continentales no están limitadas a la corteza, sino que se extienden a varios cientos de kilómetros de profundidad en el manto" (id, p. 7). Como veremos en seguida, estas diferencias se han revelado cruciales (la palabra precisa sería fatales) para el concepto de un nivel universal de baja velocidad. ¿Por qué Anderson no suaviza la necesidad de su interpretación hasta tener mejores datos? La clave está en las palabras con las que cierra su artículo: "...la existencia de este nivel plástico hace la idea de la deriva continental mucho más aceptable

(2) Por ejemplo, en un reciente libro de Biología y Geología para 1º de Bachillerato (Cabrerizo et al., 2002) se define la astenosfera de una forma convencional para, 18 páginas más adelante, afirmar en un encarte que muchos geólogos dudan de su existencia.

de lo que había parecido hasta ahora” (id, p. 9). Sin duda una razón interesante, pero que revela un sesgo incompatible con la neutralidad que hay que esperar de los científicos, que deberían dejar que los datos hablasen, en vez de dejarse influir por sus teorías favoritas.

Es importante subrayar que en este momento (principios de los años 60, y con la ruptura movilita flotando ya en el ambiente [1953, paleomagnetismo; 1954, sismicidad profunda en planos inclinados]), la vieja astenosfera de Barrell y el nuevo nivel de baja velocidad sísmica de Anderson eran dos conceptos bien diferenciados; como veremos en el apartado siguiente, ambos se fundieron en uno solo al calor de la revolución. Algunos efectos de la confusión que ha seguido están aún impresos en muchos libros de texto².

Los sismólogos siguieron buscando el nivel universal de baja velocidad sísmica a lo largo de toda la década de los 60. Los párrafos siguientes, tomados de Hales y Bloch (1969), demuestran que la empresa no era nada sencilla: “*De modo que parece que, por los datos de ondas de superficie, debería haber un nivel universal de baja velocidad de las ondas P. Es posible que no se observe porque se marque en el segmento final de la curva de tiempos de viaje señalada PQ en la figura 2. La otra posibilidad que hay que considerar es que las capas de baja velocidad en las áreas cratónicas sean muy finas y escapen a la detección por ese motivo*” (Hales y Bloch, 1969, p. 932). Los subrayados son nuestros, y entre ellos queremos destacar el debería haber, porque creemos que refleja un intento subliminal de forzar los datos de forma que encajen con la hipótesis de trabajo.

Esta deformación de la realidad llega a su colmo poco después. En 1972, y en la prestigiosa revista *Tectonophysics*, el geofísico norteamericano Anton Hales llega a escribir: “*Sin embargo, me arriesgo a pronosticar que los estudios subsiguientes mostrarán que la zona de baja velocidad es un rasgo general y necesario del manto superior*”. (Hales, 1972, p. 476)]. Una afirmación nacida, sin duda, de la desesperación. Y una apuesta perdida: en 1981, el mismo Hales escribe en un tono desencantado: “*No está claro en absoluto si existe una zona de baja velocidad debajo de las regiones cratónicas o de plataforma [zonas continentales menos antiguas], o en todo caso a qué profundidad estaría situada, y por tanto a qué profundidad los continentes se deslizan sobre el manto*”. (Hales, 1981, p. 1).

PRIMERAS ESCARAMUZAS ASTENOSFÉRICAS

El tectónico canadiense John Tuzo Wilson había sido el primero en proclamar, en 1967, que se había producido una revolución en las Ciencias de

la Tierra. Vladímir Vladimírovich Belousov, jefe de filas de los tectónicos soviéticos, le replicó que las Ciencias de la Tierra no podían basarse sólo en la geología de las cuencas oceánicas, por importantes que fuesen los descubrimientos recientes. Entre un sinfín de objeciones contenidas en el debate que ambos sostienen en 1968 en la revista *Geotimes*, plantea una sobre el motor, el gran escollo en el que tropezó Alfred Wegener: “*Nadie ha demostrado que las corrientes de convección profundas, que son necesarias para su teoría, existan realmente, o incluso que puedan existir*”. (Belousov, 1968, p. 17). Responde Wilson: “*Si el flujo ocurre, tiene lugar en la astenosfera o nivel de baja velocidad de la sismología (Anderson, 1962), que se encuentra entre los 50 y unos pocos cientos de kilómetros de profundidad*”. (Wilson, 1968, p. 22).

El primer punto a subrayar es que la confusión ya se ha producido, porque Wilson utiliza como idénticos dos conceptos muy distintos: uno, un nivel (la astenosfera) definido de forma puramente teórica y sin más apoyo que la existencia de compensación isostática, y otro (la capa de baja velocidad sísmica) que como acabamos de ver está prendido con alfileres de datos de tan poca calidad que su nivel inferior queda en el limbo. Podemos imaginar que en estos “pocos cientos de kilómetros de profundidad”, Wilson está intentando meter como puede dos conjuntos disjuntos de datos sísmicos: los que en algunas áreas permiten detectar una zona de sombra hasta unos 250 km de profundidad, y los batiseísmos que Hugo Benioff y otros autores habían detectado en la orla circumpacífica, y cuyos focos llegaban hasta los 670 km. Muchos profesores (y hasta algún alumno) nos hemos preguntado repetidamente sobre cómo encajar estas dos cifras tan dispares⁽³⁾: ahora sabemos que ninguna de las dos (pero especialmente la primera) eran significativas. Los perplejos no hemos sido sólo nosotros, sino también los científicos⁽⁴⁾: estas peras y manzanas seguirán siendo una china en el engranaje de la tectónica de placas durante los siguientes treinta años.

El segundo elemento interesante en la respuesta de Wilson es el condicional con el que comienza: la astenosfera está mal definida y peor entendida, pero se ha convertido en un elemento necesario de la nueva tectónica global (porque, podría parafrasearse, si la astenosfera no existiese, ¿dónde podría tener lugar el flujo?). Ya no sólo es necesaria (como en 1914) para justificar la isostasia sino, aún más importante, para que los continentes puedan moverse, como está claro, por tantos datos, que lo hacen.

Podemos entender que Vladímir Vladimírovich no quedase convencido. En 1979 se enzarzó en otro debate abierto (en la revista *EOS*) con Celal Sengör y Kevin Burke, dos tectónicos de la Universidad de Nueva York. En el curso del cual salió del armario

(3) La pregunta típica era: “Pero, ¿hasta dónde llega la astenosfera?”. Un ejemplo de este caos conceptual y gráfico se puede ver en el libro “*Geología: procesos internos*” de Anguita y Moreno (1978, Fig. 1.27).

(4) Ver el título del artículo de Barruol et al. (1997) en la lista de referencias. ¡Qué alivio comprobar que el caos era universal!

el viejo fantasma de las diferencias entre el manto que hay bajo los continentes y el existente bajo los océanos. Belousov (1979, p. 208) argumenta: “*Los datos sísmicos (Sipkin y Jordan, 1975) indican que las diferencias entre la estructura profunda de los continentes y la de los océanos se extienden hasta profundidades mínimas de 400 kilómetros*”. Estas diferencias expresaban la dificultad (tal y como vimos que reconocía Hales en el apartado anterior) de encontrar regiones de baja velocidad sísmica debajo de los continentes. Si la litosfera bajo algunas zonas continentales (los cratones) alcanzaba los 400 km de grosor, el nivel de baja velocidad sísmica, que (cuando se podía detectar) terminaba hacia los 250 o 300, no servía en absoluto como nivel de despegue. Los continentes estarían “anclados” (mediante lo que después se empezaron a llamar *keels*, quillas) en el manto profundo. Y si, para resolver este problema, se prolongaba la astenosfera hasta los 670 km, ¿qué significaba entonces el nivel de baja velocidad sísmica? Oigamos la respuesta de Sengör y Burke (Belousov, id, p. 208): “*Las pruebas sísmicas de la existencia de raíces de 400 km bajo algunos continentes no son incompatibles con la tectónica de placas, como explican claramente Sipkin y Jordan (1975). Sin embargo, estudios posteriores parecen indicar pequeñas diferencias entre el manto subcontinental y el suboceánico. El cambio de interpretación se debe en parte a la apreciación de la dependencia de la atenuación sísmica con la frecuencia, y en parte al reconocimiento de que el carácter de los registros sísmicos de las islas oceánicas es quizás atípico*”. Una hermosa manera de escudarse en tecnicismos para no decir nada; es importante subrayar que, aunque EOS es una revista leída sobre todo por geofísicos, el debate tenía un tono muy general, y en su presentación se advertía que muchos de sus lectores ni siquiera estarían familiarizados con la tectónica de placas: es decir, que constituía una excelente ocasión para argumentar con claridad sobre el estado físico del manto bajo los continentes.

¿Qué es lo que decían exactamente los tan citados Sipkin y Jordan? Que las ondas sísmicas viajan claramente más despacio bajo los océanos, de forma que “*...las diferencias observadas en tiempos de viaje, junto con los datos de dispersión de las ondas superficiales, implican que las diferencias en la estructura de los continentes y océanos persisten hasta una profundidad superior a 400 km, y quizás a través de todo el manto*” (Sipkin y Jordan, 1975, p. 1483). En suma, que Belousov tenía razón en este punto (las elucubraciones de Sengör y Burke sobre las islas oceánicas se refieren a la discusión que Sipkin y Jordan hacen de la supuesta pluma de las Galápagos, y no tiene absolutamente nada que ver con el tema de la astenosfera). La frase que hemos subrayado nos parece importante, porque vuelve a rescatar el concepto primero de astenosfera, tal como la definió Barrrell: un nivel plástico que abarcaba todo el manto bajo la litosfera.

En una publicación simultánea, Jordan acuñó un nuevo término, *tectosfera*, para esta litosfera tan

gruesa; pero poco después (Jordan, 1978, p. 544), lo repudió por innecesario, ya que reconoció que coincidía con el de litosfera; lo hemos presentado porque lo volveremos a encontrar un poco más adelante.

COMIENZA LA DISIDENCIA

Que, contra lo que afirmaban Sengör y Burke, los datos de Sipkin y Jordan entrañaban un problema para el concepto de un nivel universal de baja velocidad sísmica lo puso de relieve el redactor de geofísica en la revista *Science* cuando, años después (Kerr, 1986, p. 934) escribía “*La conclusión de Jordan de que estas anomalías sísmicas eran producidas por raíces continentales permanentes creó una controversia a finales de los años setenta, en parte porque la teoría de formación de las placas requería placas finas*” y: “*Resolver esta diferencia es la tarea que aguarda ahora a sismólogos y petrólogos*” (id, p. 933).

Una revisión de la bibliografía nos muestra que sólo algunos sismólogos estuvieron a la altura de la misión. En el primer congreso de la Unión Europea de Geofísica (en Estrasburgo, primavera de 1981), los geofísicos Giorgio Panza (Bari) y Stephan Müller (Zürich) protestaban: “*Una litosfera atenuada subyace el Rift Central Europeo, que se extiende desde el Mar del Norte hasta el Golfo de Lion. [Sin embargo], Escandinavia muestra una notable diferencia, con su casi total ausencia de un nivel astenosférico de baja velocidad. Nuestra principal conclusión es que hace falta revisar críticamente los modelos esquemáticos de tectónica de placas propuestos hasta la fecha...*” (Panza y Müller, 1981, p. 99).

En el mismo sentido se manifestaban otros geofísicos. Tozer (1981), afirmaba: “*A menudo se ha sugerido que el límite entre litosfera y astenosfera está a unos 100 km de profundidad...Sin embargo, si uno se pregunta cómo son definidos estos niveles, descubrirá en seguida una cuestión francamente confusa y controvertida. Los sismólogos parecen creer que la astenosfera es un hecho basado en observaciones, y en concreto en la disminución con la profundidad de la velocidad de las ondas S en el manto superior; pero esto me parece un intento equivocado de resolver un viejo problema, más que el resultado de una evaluación cuidadosa de la naturaleza de éste...*” (p. 281), y: “*...creo, como expongo en adelante, que (por razones teóricas básicas), hay que rechazar la idea de un nivel de silicatos parcialmente fundidos en el manto superior*” (p. 282).

LA ETAPA DE TRANSICIÓN: los datos chirrían cada vez más fuerte, pero muchos geofísicos miran hacia otro lado

Durante la década de los 90 se produjeron avances revolucionarios en la instrumentación geofísica, en especial la tomografía axial por ordenador, que

permitió radiografiar el interior de la Tierra. Para el tema de la astenosfera, esto supuso un trance crítico: ahora ya no se podía hablar de las esperanzas de que el nivel de baja velocidad sísmica se confirmase en el futuro, porque el futuro había llegado. Como vamos a ver, esta revolución tecnológica resultó demoledora para la idea de Gutenberg; sin embargo, como todas las revisiones, aunque sean parciales, de un paradigma, ésta no se produjo fácilmente. Por ejemplo, en dos trabajos publicados (en 1982 y 1986) en la revista *Tectonophysics*, un grupo de geofísicos de universidades noruegas y suecas seguían proclamando la existencia de astenosfera entre unos 100 y 400 km (Fig. 2a), a pesar de que sus datos (Fig. 2b, c, d) decían lo contrario: que este nivel (y también la litosfera) estaba ocupado por un revoltijo de zonas con diferentes velocidades sísmicas, unas mayores y otras menores que la media del manto. En otras palabras, que las zonas más calien-

tes (y por tanto más susceptibles de fluir) no formaban un nivel continuo, sino 'islas térmicas' separadas entre sí por zonas rígidas.

Esto es ya evidente en el primero de estos trabajos (Husebye y Hovland, 1982), pero llega a su colmo en el segundo (Husebye et al., 1986), que es mucho más detallado pero que, sobre todo, tiene el *pecado* añadido de formar parte del proyecto más ambicioso de la historia de la geofísica en Europa: la "Geotransversal europea" (European Geotraverse), una sección tomográfica de todo el manto superior desde el Cabo Norte hasta el Mediterráneo. Hubiese sido un momento excelente para desmontar la parte astenosférica del paradigma, pero probablemente esto es mucho más de lo que se puede pedir a un proyecto multinacional y multimillonario: hay demasiada política en la *Big Science* como para aspirar a que acoja revoluciones en su seno.

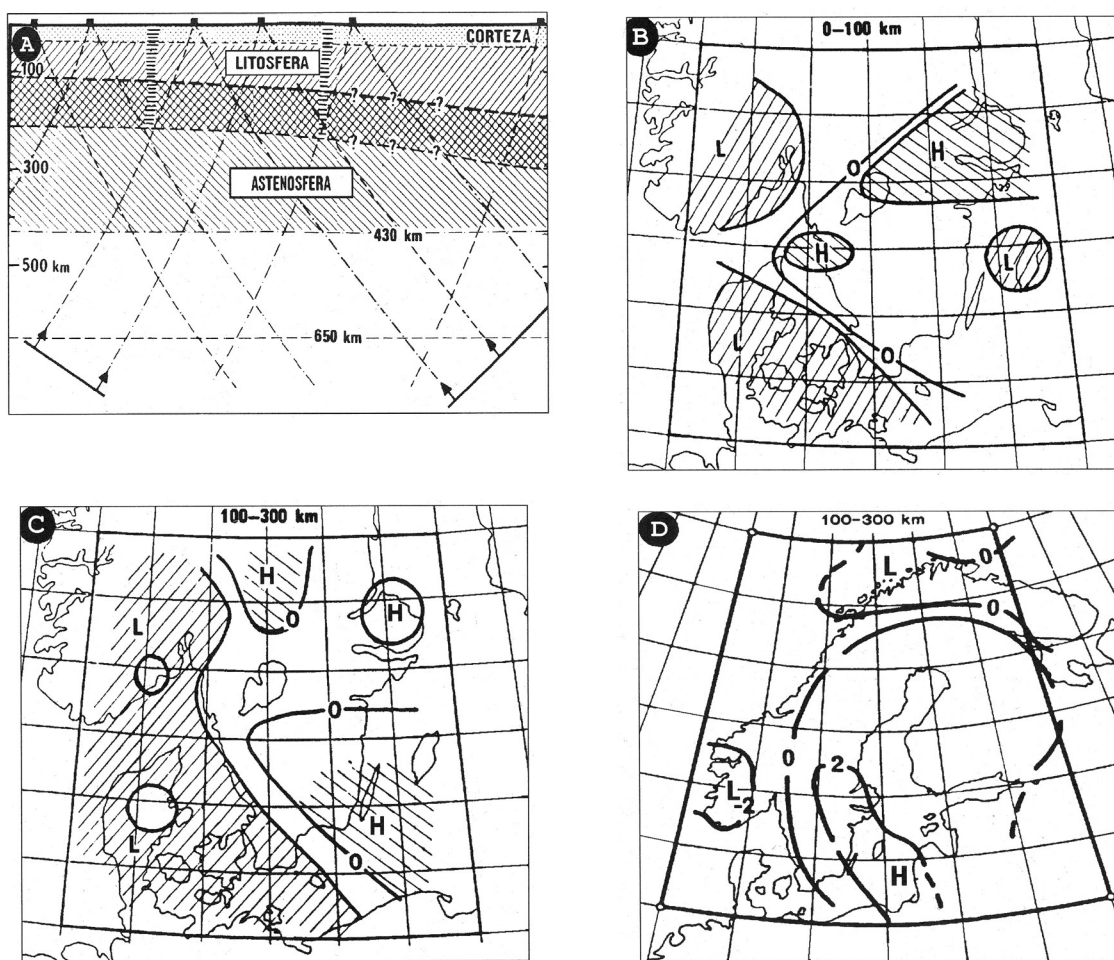


Fig. 2. A) Litosfera y astenosfera ideales (rayados diagonales; el cuadrículado es una zona transicional) bajo el Sur de Escandinavia. B), C) Los datos de tomografía sísmica que supuestamente se resumían en la sección (a); las zonas de manto caliente (velocidades bajas, L) están dispersas entre las de manto neutro o frío (H), tanto en la litosfera (0-100 km) como en la supuesta astenosfera (100-300 km), sin formar nunca un nivel continuo (tomado de Husebye et al., 1986). D) Velocidades sísmicas para la profundidad teórica de la astenosfera para el conjunto de Escandinavia. Contra la presunción de un nivel plástico a esta profundidad, la mayor parte de la región muestra velocidades sísmicas altas, o sea rocas muy rígidas (tomado de Husebye y Hovland, 1982).

Esta misma línea de ambigüedad, el ignorar un problema incómodo, ha dominado los estudios del manto a lo largo de la mayor parte de la década de los 90. Algunos autores (p. ej., Solarino et al., 1996) han seguido enfatizando el carácter regional de las anomalías de velocidad sísmica en el manto superior; otros más, como Garetskii et al. (1996), Perchuc y Thybo (1996) y Pavlenkova (1996), han subrayado además la existencia de diversos niveles de baja velocidad en el manto superior. La característica común de estos niveles es su pequeño grosor (en general entre 15 y 25 km): por ejemplo, en el primer trabajo citado se definen tres niveles (65 a 80, 90 a 100 y 120 a 140 km), cuya profundidad varía además según las zonas. Ninguna sorpresa: Hales y Bloch (1969) ya sospechaban lo mismo veintisiete años antes. Naturalmente, esta diversidad implica que esos niveles son discontinuos (Perchuc y Thybo hablan de extensiones horizontales menores de 20 km); peor aún, el grupo de Garetskii reconoce que bajo algunos cratones simplemente no existe ninguna capa de baja velocidad: “*Under the continents, its occurrence is not ubiquitous*” (Garetskii et al., 1996, p. 479), a pesar de lo cual realizan, en la introducción de su artículo, una detallada historia de la astenosfera entendida como nivel de baja velocidad sísmica.

En su conjunto (y aun sin pretenderlo), estas interpretaciones de los retrasos de las ondas sísmicas hacen insostenible la versión tradicional de la astenosfera que figura aún en nuestros libros de texto. Aunque la existencia de células convectivas de miles de kilómetros de anchura y sólo 200 de profundidad fue desde el principio una propuesta inaceptable, incluso en la tectónica de placas clásica, la “solución advectiva” (la astenosfera como un nivel no convectivo pero sí de despegue) ha seguido formando una parte básica del paradigma movilista. Sin embargo, los datos de los 90 han hecho indefendible también esta última posición. Si bien podemos imaginar un nivel de despegue de 200 km de espesor, es difícil que uno de 10 o 20 km sirva para este propósito, porque el rozamiento sería demasiado grande; y si el nivel en cuestión es una serie disjunta de manchas térmicas, la situación se vuelve insostenible. En todo caso, y puesto que se reconocen múltiples capas de baja velocidad, ¿cuál sería el significado físico de las otras, algunas de ellas situadas en plena litosfera? Estas paradojas, sin embargo, no se explicitan en ninguno de los trabajos que las hacen inevitables.

EL PRINCIPIO DEL FIN: últimos clavos en el ataúd de la astenosfera

Junto a estos estudios que esquivaban el fondo de la cuestión, otros empezaron a atacar frontalmente la idea. Por ejemplo, la existencia de anisotropías (diferencias en la velocidad de las ondas sísmicas según su dirección) en las “quillas” cratónicas fue documentada casi simultáneamente en 1995 por Mooney para Suráfrica (Fig. 3) y en 1996 por Bormann et al. para Europa Central, e in-

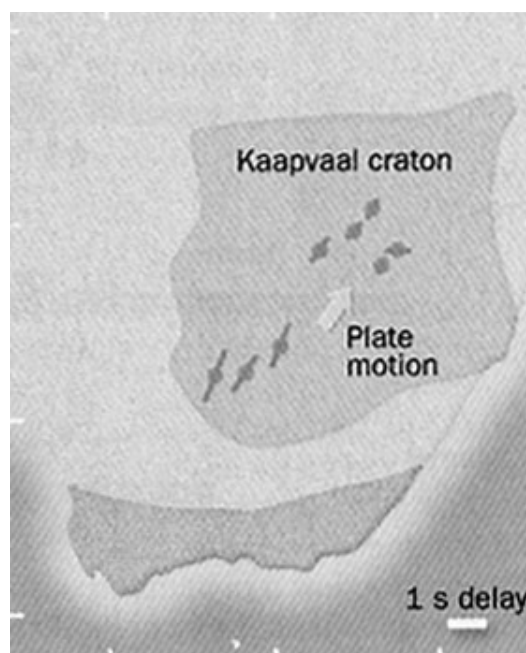


Fig. 3. Estas anisotropías en el cratón de Kaapvaal se originan a profundidades de 150 a 400 km. Como un manto fluido tendría que ser isótropo, este resultado confirma que los cratones tienen quillas rígidas de gran profundidad (tomado de Mooney, 1995).

terpretada como un reflejo de alineaciones de minerales en el sentido del flujo causadas por el “navegar” de los bloques continentales a través del manto (un poco como los arañazos en el casco de un buque, aunque impresos en toda la masa de la raíz). Esto indicaba la permanencia de estas protuberancias inferiores de los continentes, modeladas por el flujo a lo largo de miles de millones de años. Las implicaciones eran de suma importancia: ninguno de los niveles de baja velocidad detectados a menos de 200 km de profundidad servían como niveles de despegue, ya que la tectosfera viajaba como un bloque solidario bastante más grueso.

Otros trabajos afrontaron aún más directamente la cuestión: un grupo francoamericano (Barruol et al., 1997) acababa su estudio de la propagación de las ondas sísmicas bajo el Este de Norteamérica con dos importantes propuestas. La primera se refería al cratón norteamericano: “...en el núcleo cratónico, los retrasos [de las ondas] son máximos donde la raíz de alta velocidad aparece en las imágenes tomográficas al menos hasta los 300 km, lo que sugiere una anisotropía impresa en el manto superior bajo el cratón. La ausencia de una zona de baja velocidad bajo estas raíces de alta velocidad puede indicar que no hay astenosfera mecánica bajo el cratón. Esto implicaría que todo el manto superior bajo el cratón norteamericano podría moverse coherentemente, y por lo tanto, que la “tectosfera” (tal como la definió Jordan en 1975) podría estar directamente acoplada al manto inferior”. Este párrafo merece varios comentarios: el primero, que la sísmica clásica (retrasos de las ondas) se ve ahora confirmada por la nue-

va (imágenes tomográficas). El segundo, que vuelve a aparecer la astenosfera primigenia, la de Barrell (todo el manto por debajo de la litosfera).

El otro descubrimiento del equipo francoamericano nos pone en la pista real de lo que pueden significar las bajas velocidades sísmicas locales: “La buena correlación de esta anomalía [una anomalía de baja velocidad que la tomografía permite detectar en el Atlántico Norte y que llega hasta los 250 km de profundidad] con los montes submarinos de Nueva Inglaterra sugiere que podría tratarse del rastro fósil del punto caliente que creó estos montes submarinos...” ¿Y si “manchas” de anomalías térmicas antiguas hubiesen quedado estratificadas en el manto superior oceánico, y los necesitados geofísicos de los sesenta las hubiesen tomado por un nivel semifundido universal? Las investigaciones de los últimos años han permitido responder afirmativamente a esta pregunta: los penachos térmicos tienden a frenarse al llegar al manto superior (Anguita, 1996, Fig. 2), y a esparcir en él material caliente que puede persistir allí durante cientos de millones de años. Esas zonas tendrán, a lo largo de esos periodos, un nivel de baja velocidad sísmica (este proceso se explica con más detalle en Anguita y Hernán, 1999). La ilusión de una astenosfera universal surgió del análisis de los datos de estas regiones, tanto como de la ignorancia intencionada de los datos del resto de las regiones.

El trabajo del equipo de Barruol tuvo el valor simbólico de haberse presentado en el Congreso de la Unión Europea de Geociencias...también en Estrasburgo: dieciséis años después de la protesta de Panza y Müller, la revisión de los modelos más esquemáticos de la tectónica de placas estaba a punto de producirse.

EL DERROCAMIENTO: la revolución tomográfica alcanza sus últimas consecuencias

En 1993, el National Research Council, la máxima institución científica norteamericana, había publicado una especie de compendio sobre Ciencias de la Tierra, que denominó *Solid Earth Sciences and Society*. En él, y dentro del capítulo denominado *Understanding our active planet*, había (p. 53) una clara definición de la astenosfera versión Gutenberg: “...la astenosfera, una región de unos cuantos cientos de kilómetros en el manto superior caracterizada por la baja velocidad de las ondas S, donde los materiales se acercan a su punto de fusión y donde puede estar concentrado el flujo del manto...”. Sin embargo, paradoja flagrante, en este mismo artículo (p. 34) se ilustra una sección de la Tierra (Fig. 4) en la que la astenosfera simplemente ha desaparecido. ¿Motivo? La circulación total en el manto detectada por la tomografía sísmica al definir la subducción de la litosfera hasta el núcleo. Tras el trabajo pionero de Dziewonsky y Woodhouse (1987) en este sentido, hubo un aluvión: Tackley et al. (1993), Vidale (1994), Wyssession (1996), Van der Hilst et al. (1997), resumidos por Kerr en 1997 en una noticia de reminiscencias novelescas: 20.000 leguas bajo la Tierra.

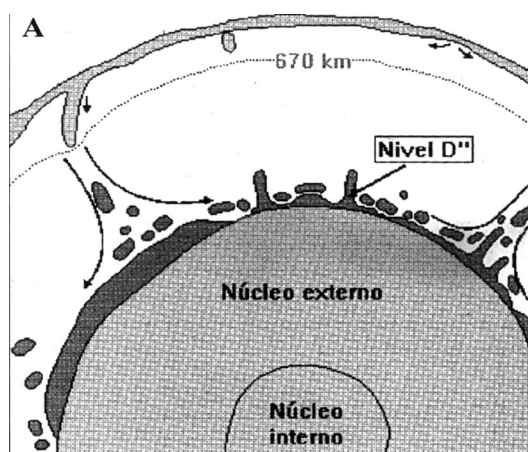


Fig. 4. La dinámica global del manto terrestre. Tras sufrir una densificación mineralógica a los 670 km, la litosfera subduce en cascada hasta el núcleo, formando en nivel discontinuo D'', cuya capacidad de reciclado se desconoce. Al mismo tiempo, zonas especialmente calientes del núcleo impulsan penachos térmicos desde la base del manto (tomado de National Research Council: *Solid Earth Sciences and Society*, 1993).

Por fin, y puesto que todo el manto fluye, los datos habían convertido en innecesario un nivel donde se concentrase el flujo del manto. La astenosfera no había sido la única víctima de este avance: las dorsales también habían sido destronadas, y por el mismo motivo: si la subducción llegaba al núcleo, también las corrientes ascendentes deberían surgir de él, y todos los datos (tanto tomográficos como geoquímicos y dinámicos [p. ej., Ziegler, 1993]) indicaban que las dorsales tenían fuentes de alimentación someras, salvo en las áreas (como Islandia) en las que coincidían con un punto caliente.

Así pues, la situación transicional que representaba *Solid Earth Sciences and Society* duró muy poco. En un libro sobre dinámica terrestre publicado en 1999 (*Dynamic Earth: Plates, plumes and mantle convection*, del australiano G.F. Davies) podemos leer:

¿Un nivel de despegue?

La idea de que las placas se deslizaban sobre un nivel de muy baja viscosidad situado bajo la litosfera se originó al principio de la historia de la tectónica de placas. Sin embargo, el argumento que acabamos de presentar [que el esfuerzo requerido para que el manto sublitosférico arrastre las placas no precisa de un nivel de baja viscosidad entre ambos] demuestra que tal nivel es innecesario para explicar los movimientos de las placas. De hecho, las velocidades de éstas pueden ser justificadas en términos generales con un manto de viscosidad uniforme. Además, y como ya se demostró, una capa de unos 100 km de espesor no sirve como nivel de despegue a no ser que su viscosidad sea tres o cuatro órdenes de magnitud menor que la del manto adyacente. (Davies, 1999, p. 330).

CONCLUSIÓN: revoluciones y rebatiñas

Este epitafio es el preludio del futuro en el que el término mismo de astenosfera empezará a desaparecer del léxico geológico. Paul Tackley, uno de los pioneros de la tomografía del manto, ha escrito (Tackley, 2000) para la revista *Science* un artículo de revisión de estos temas que comienza con las siguientes palabras, no novedosas pero sí muy claras:

La convección en estado sólido del manto terrestre (2.900 km de espesor) es el mecanismo motor de la tectónica de placas y de toda la actividad geológica asociada a ésta en la superficie de nuestro planeta, como son la deriva continental, la sismicidad, el vulcanismo y las orogénias. La convección en el manto y la tectónica de placas constituyen un solo sistema, en el que las placas oceánicas son la cubierta térmica superior, enfriada en la convección. El motor del lento movimiento de las placas y del manto es el calor radiactivo y el enfriamiento residual del planeta a través de sus 4.500 millones de años de historia (Tackley, 2000, p. 2002).

Ya no hay menciones a la astenosfera, sino radiografías del manto en las que aparecen superplumas y superzonas de subducción (Fig. 3 A del Documento 7). De cara al futuro, se podría discutir la posibilidad de mantener el término en su sentido original (el de Barrell: todo el manto por debajo de la litosfera). Sin embargo, esa opción (semejante a la de mantener otros términos, como el de geosinclinal, con acepciones limitadas) supondría introducir una seria ambigüedad en toda la Geología del siglo XXI. La *esfera débil* seguirá persistiendo unas décadas, por inercia, hasta su total desaparición, como un perfecto ejemplo histórico de las prisas que nunca deberían llevar los científicos, ni siquiera durante las revoluciones. Sería aconsejable que no persistiese en los libros de texto durante tan largo tiempo.

EPÍLOGO: algunas preguntas en el aire

¿Cómo se explican los perfiles sísmicos que muestran un nivel de baja velocidad en el manto superior?

Hay dos posibles explicaciones: o bien están realizados en zonas donde realmente existe una zona de baja rigidez en el manto superior (en general, material inyectado por un penacho térmico), o bien los datos no tenían una sola interpretación, y eran compatibles con un ascenso más lento de la velocidad (como en la figura 1b).

Si desaparece el concepto de astenosfera, ¿qué pasa con el de litosfera?

Permanece igual: la base de la litosfera es el comienzo del manto con capacidad de fluir, que ya no recibe un nombre especial. La base de la litosfera no es un plano nítido, sino la zona en la que los aumentos de temperatura y (sobre todo) de presión cambian las propiedades reológicas del material del manto.

¿Cómo afecta al concepto de isostasia la defunción de la astenosfera?

Algunas de las estructuras que la tomografía sísmica ha detectado en el manto profundo (como las superplumas de la figura 4) podrían ser no sólo zonas de distinta temperatura, sino también de distinta densidad. En diversas zonas se acumulan pruebas de que la forma del geoide (elevaciones o depresiones) no está justificada por las estructuras del manto superior. Islandia, por ejemplo, podría considerarse como el trofeo de una cucaña que está apoyada en el núcleo. En general, habrá que acostumbrarse a pensar en la frontera manto-núcleo como el nivel último de compensación isostática. Todo un triunfo para los amantes de la historia de la Ciencia, porque cuando Barrell acuñó el término de astenosfera estaba pensando precisamente en esto, en una capa de enorme espesor.

Si las placas subducidas llegan hasta el núcleo, ¿por qué la sismicidad acaba a los 670 km?

Los seísmos someros (hasta unos 50 km) se producen por unión de microgrietas que generan una falla. Sin embargo, este mecanismo no puede funcionar a alta presión, que impide la apertura de microgrietas. Se ha demostrado en el laboratorio que los seísmos de profundidad intermedia (hasta 400 km) se producen cuando la serpentina (olivino hidratado) existente en la placa que subduce se deshidrata a causa del calor: el agua expulsada de la red mineral contrarresta la presión y permite abrir microgrietas. En cuanto a los seísmos de foco profundo, se generan por la transformación de olivino en su fase densa (estructura tipo espinela), transformación que se produce a lo largo de estructuras llamadas (por no crear espacio sino absorberlo) *antigrietas*. La unión de antigrietas forma una falla, que causa el terremoto. Pero una vez que todo el olivino se ha transformado a espinela (proceso que, estadísticamente, acaba poco antes de los 500 kilobares, la presión reinante a unos 700 km de profundidad), ya no existe ningún mecanismo que pueda causar seísmos: la placa descendiéndose deformándose plásticamente, como una alfombra que se arruga. Estos procesos están explicados eficazmente en el artículo "Solución a la paradoja de los terremotos profundos", aparecido en el nº 218 de *Investigación y Ciencia* (Noviembre de 1994).

Entonces, ¿cómo se mueven las placas?

El manto sublitosférico las arrastra. Ahora el paralelo con la cacerola de sopa hirviendo es aún más próximo: las placas son la costra de grasa, la *espuma de la Tierra*, en la imagen del geoquímico francés Claude Allègre.

Y ahora, ¿qué hacemos sin astenosfera, con lo didáctica que era y lo bien que la entendían los alumnos?

Sugerimos dos cosas: una, utilizar su historia como ejemplo de lo que no se debería hacer en Ciencia; y dos, pasar el testigo de las bellas ideas moviéndose a un fenómeno que sí parece real (al menos, se descubrió cuando se estaba buscando otra

cosa, lo que supone una cierta garantía de objetividad): las cataratas subductivas gigantes que se producen en el manto nos dicen que las fuerzas que mueven la máquina Tierra son las dos energías más simples y más efectivas del Universo: un gradiente térmico y un campo gravitatorio. Calor y gravedad pueden explicar no sólo por qué se mueven los continentes, sino que podrían constituir el verdadero ritmo de la historia del planeta, como ha propuesto recientemente el tectónico Kent Condie (2000), en un esquema simple y prometedor. Pero esto es otra historia, para otro número de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

BIBLIOGRAFÍA

Debido al carácter histórico, y también controvertible, del artículo, nos ha parecido útil que el lector interesado pudiese consultar personalmente algunas de las fuentes citadas. Hemos seleccionado siete de ellas (ordenadas por orden cronológico, y señaladas como "DOCUMENTO 1", etc. tras su referencia), y que se pueden leer en la página web: <http://usuarios.lycos.es/aepect/astenosfera/documentos>

Anderson, D.L. (1962). The plastic layer of the Earth's mantle. *Scientific American*, 855 (Julio), 1-9. **DOCUMENTO 1**

Anguita, F. (1996). La evolución de la tectónica de placas: el nuevo interior de la Tierra. *Ens. Ciencias Tierra*, 3-3, 137-148.

Anguita, F. y Hernán, F. (1999). El origen de las Islas Canarias: un modelo de síntesis. *Ens. Ciencias Tierra*, 7-3, 254-261.

Anguita, F. y Moreno, F. (1978). Geología: procesos internos. Edelvives, Zaragoza, 200p.

Barruol, G., Silver, P.G y Vauchez, A. (1997). Seismic anisotropy in the Eastern US: Is the plate 200, 400 or 670 km thick? *Terra Nova*, 9 (Abstr. Suppl. 1), 43. **DOCUMENTO 6**

Belousov, V.V. (1968). Debate about the Earth: An open letter to J. Tuzo Wilson. *Geotimes* (Diciembre), 17-19. **DOCUMENTO 2**

Belousov, V.V. (1979). Why do I not accept plate tectonics?, acompañado de Comments, por A.M.C. Sengör y K. Burke. *EOS*, 60-17, 207-211.

Bormann, P., Grünthal, G., Kind, R. y Montag, H. (1996). Upper mantle anisotropy beneath Central Europe from SKS wave splitting: effects of absolute plate motion and lithosphere-asthenosphere boundary topography? *J. Geodynamics*, 22, 11-32.

Cabrerizo, B., Sanz, M. Y Tavira, P. (2002). *Biología y Geología*, 1º de Bachillerato. Oxford Educación, Madrid, 371 p.

Condie, K.C. (2000). Episodic continental growth models: afterthoughts and extensions. *Tectonophysics*, 322, 153-162.

Davies, G.F. (1999). *Dynamic Earth: Plates, plumes and mantle convection*. Cambridge Univ. Press, 458 p.

Dziewonsky, A.M. y Woodhouse, J.H. (1987). Global images of the Earth's interior. *Science*, 236, 37-48.

Garetskii, R.G., Dankevich, I.V. y Karataev, G.I. (1996). Asthenosphere of the western East European craton. *Geotectonics*, 30, 478-485.

Green, H.W. (1994). Resolución de la paradoja de los terremotos profundos. *Inv. y Ciencia*, 218 (Noviembre), 48-55.

Hales, A.H. (1972). The travel times of P seismic waves and their relevance to the upper mantle velocity distribution. *Tectonophysics*, 13, 447-482.

Hales, A.H. (1981). The upper mantle velocity distribution. *Phys. Earth Planet. Int.*, 25, 1-11.

Hales, A.L. y Bloch, S. (1969). Upper mantle structure: are the low velocity layers thin? *Nature*, 221, 930-933. **DOCUMENTO 3**

Husebye, E.S. y Hovland, J. (1982). On upper mantle seismic heterogeneities beneath Fennoscandia. *Tectonophysics*, 90, 1-17.

Husebye, E.S., Hovland, J., Christoffersson, A., Åström, K., Slunga, R. y Lund, C.E. (1986). Tomographical mapping of the lithosphere and asthenosphere beneath Southern Scandinavia and adjacent areas. *Tectonophysics*, 128, 229-250.

Jordan, T.H. (1978). Composition and development of the continental tectosphere. *Nature*, 274, 544-548.

Kerr, R.A. (1986). The continental plates are getting thicker. *Science*, 232, 933-934.

Kerr, R.A. (1997). 20,000 leagues under the Earth. *Science*, 275, 614.

Mooney, W.D. (1995). Continental roots go with the flow. *Nature*, 375, 15. **DOCUMENTO 5**

National Research Council (1993). *Solid-Earth Sciences and Society*. National Academy Press, Washington. 346 p.

Panza, G.F. y Müller, S. (1981). The main features and the dynamic behaviour of the lithosphere-asthenosphere system in Europe. *Terra Cognita*, Sp. Issue, spring 1981, 99. **DOCUMENTO 4**

Pavlenkova, N.I. (1996). General features of the uppermost mantle stratification from long-range seismic profiles. *Tectonophysics*, 264, 261-278.

Perchuc, E. y Thybo, H. (1996). A new model of the upper mantle P-wave velocity below the Baltic Shield: indication of partial melt in the 95 to 160 km depth range. *Tectonophysics*, 253, 227-245.

Sipkin, S.A. y Jordan, T.H. (1975). Lateral heterogeneity of the upper mantle determined from the travel times of ScS. *J. Geophys. Res.*, 80, 1474-1484.

Solarino, S., Spallarossa, D., Parolai, S., Cattaneo, M. y Eva, C. (1996). Litho-asthenospheric structures of northern Italy as inferred from teleseismic P-wave tomography. *Tectonophysics*, 260, 271-289.

Tackley, P.J. (2000). Mantle convection and plate tectonics: toward an integrated physical and chemical theory. *Science*, 288, 2002-2007. **DOCUMENTO 7**

Tackley, P.J., Stevenson, D.J., Glatzmaier, G.A. y Schubert, G. (1993). Effects of an endothermic phase transition at 670 km depth in a spherical model of convection in the Earth's mantle. *Nature*, 361, 699-704.

Tozer, D.C. (1981). The mechanical and electrical properties of Earth's asthenosphere. *Phys. Earth Planet. Int.*, 25, 280-296.

Van der Hilst, R.D., Widiyantoro, S. y Engdahl, E.R. (1997). Evidence for deep mantle circulation from global tomography. *Nature*, 386, 578-584.

Vidale, J.E. (1994). A snapshot of whole mantle flow. *Nature*, 370, 16-17.

Wilson, J.T. (1968). A reply to V.V. Belousov. *Geotimes*, (Diciembre), 20-22. **DOCUMENTO 2**

Wysession, M.E. (1996). Continents of the core. *Nature*, 381, 373-374.

Ziegler, P.A. (1993). Plate-moving mechanisms: their relative importance. *J. Geol. Soc., London*. 150, 927-940. ■

Este artículo fue escrito con la finalidad de documentar un debate sobre la astenosfera surgido a raíz de unas declaraciones del autor del mismo al diario El País.

El País recogía unas manifestaciones de diversos profesores sobre los contenidos de geología en los nuevos currículos de enseñanza secundaria. Francisco Anguita, calificaba de "raro, cuando no anticuado", el programa de geología y biología del bachillerato de ciencias de la naturaleza y de la salud que se presentaba en aquellos momentos, que dedicaba un epígrafe y consagraba como "paradigma" una capa de la Tierra que se demuestra inexistente, o al menos con el papel que en la mayoría de libros de texto se le asigna.

Pero...¿Existe realmente la astenosfera...? ¿y si no existe...? ¿Cómo movemos los continentes...? ¿Cómo se explican los perfiles sísmicos que indican que hay un nivel de baja velocidad en el manto superior? Sin astenosfera, ¿sigue siendo válido el principio de la isostasia? Si la subducción llega hasta el núcleo, ¿por qué la sismicidad termina a los 670 km? ...

Estas preguntas fueron formuladas al autor, personalmente o mediante correo electrónico. Para dar respuesta a estas cuestiones, se escribió este artículo que entonces insertamos en una página web de nueva creación y a partir de la cual invitamos a los interesados a suscribirse a una lista abierta para iniciar un debate. Se puede leer una crónica de esta experiencia en este mismo número de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (página 204).

Josep Verd