

EL CAMPO MAGNÉTICO DE MARTE: implicaciones evolutivas

Francisco Anguita
Profesor de Geología Planetaria
Universidad Complutense

Cuando la exploración del planeta rojo ha alcanzado uno de sus puntos culminantes, con dos vehículos de superficie y tres orbitadores activos simultáneamente, es el momento adecuado de preguntarse, una vez más: ¿Por qué Marte? Las respuestas a esta pregunta son múltiples:

1 - Marte tiene las claves de la evolución planetaria, ya que es un muestrario perfecto (y perfectamente dosificado) de rocas de todas las edades, y por tanto el único planeta con un registro completo de la historia del Sistema Solar.

2 - Marte tiene un historial espectacular de cambios climáticos globales, con pérdidas repetidas de la casi totalidad de su atmósfera. A su lado, las glaciaciones e invernaderos terrestres son suaves juegos planetarios.

3 - Marte *podría* guardar la clave del origen de la vida, ya que hay múltiples evidencias de que sus condiciones iniciales no difirieron mucho de las de la Tierra.

4 - Marte es la gran meta tecnológica del Sistema Solar: el único planeta *interesante* (con todos los respetos a Mercurio) al que se podrían realizar viajes tripulados con la tecnología actual, y quizás también (con permiso de Venus) el único que se podría terraformar.

Así pues, los atractivos marcianos, tanto desde un punto de vista científico como considerando el prisma de la aventura, son múltiples, lo que justifica el título de este artículo. En lo que sigue, tomaremos uno de los temas que ha sido objeto de debate científico recientemente – el campo magnético fósil de Marte- como ejemplo de las posibilidades de integración de los muchos aspectos interesantes que existen en la investigación del planeta vecino.

Un descubrimiento inesperado

Todo comenzó por accidente. Debido a causas que nunca se conocieron, uno de los paneles solares de la sonda *Mars Global Surveyor (MGS)* se torció, lo que obligó a modificar la estructura de la misión, prolongando por precaución la fase de aerofrenado atmosférico destinada a circularizar la órbita de la nave. En esta etapa transitoria, que abarcó desde el otoño de 1997 hasta finales de 1998, la sonda pasó repetidamente muy cerca (hasta un mínimo de 101 kilómetros) de la superficie del planeta. A estas cotas tan bajas, el magnetómetro de a bordo comenzó a registrar valores significativos de magnetismo. Puesto que Marte carece de un campo magnético dipolar como el terrestre, era evidente que se trataba de un magnetismo remanente, es decir, un antiguo campo grabado -fossilizado,

podríamos decir- en las rocas de la corteza marciana. El hecho tenía precedentes en el Sistema Solar, ya que las rocas lunares también tienen impreso un magnetismo fósil. Sin embargo, había dos datos sorprendentes: el magnetismo, que estaba distribuido de forma muy irregular sobre el planeta, tenía en muchas zonas unos contrastes mucho mayores, hasta ~ 3.000 nanoteslas, que las rocas terrestres (la intensidad media del campo magnético terrestre es de $3 \cdot 10^{-5}$ teslas). ¿Había sido el campo magnético marciano más intenso que el terrestre? Una segunda característica concitó aún más la atención de los especialistas, y despertó la curiosidad de muchos científicos: como en la Tierra, el magnetismo remanente de las rocas marcianas presentaba máximos y mínimos alternantes, con una estructura bandeada.

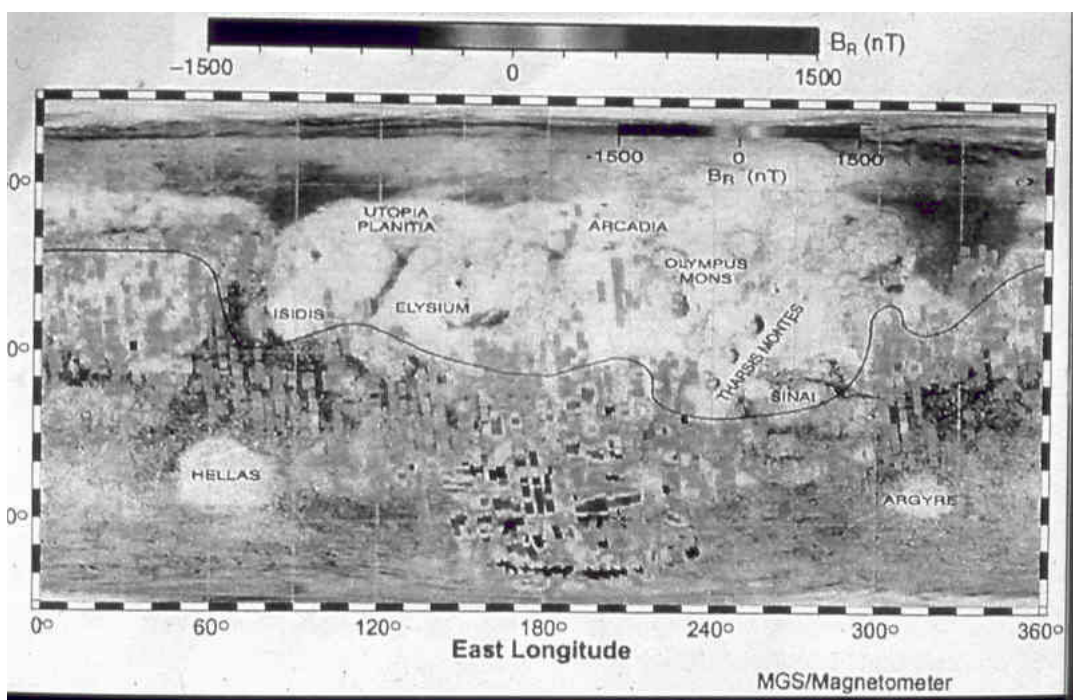


Fig1. Anomalías magnéticas lineales en Marte. Como se ve, las más intensas están situadas en el hemisferio sur, al suroeste del gran domo de Tharsis.

La revista *Science* tituló la noticia “Signos de tectónica de placas en un Marte recién nacido”.

¿Tuvieron Marte y la Tierra unos inicios paralelos?

En el continuo reciclaje de las placas litosféricas, que llamamos tectónica de placas y está movido por la convección térmica del manto, las dorsales oceánicas juegan el papel de una fábrica de rocas basálticas, que forman los fondos de los océanos. En los basaltos cristalizan magnetita y otros minerales magnéticos, que al formarse adquieren, como brújulas microscópicas, la dirección del campo magnético. Pero el campo no es estable, y aproximadamente cada millón de años invierte su polaridad; las rocas, obedientes, apuntarán sucesivamente al Norte o al Sur, por lo que su magnetismo remanente se sumará o se restará al campo actual. Éste es el origen del conocido bandeado magnético del fondo oceánico, que en la

revolución en Ciencias de la Tierra de los años 60 constituyó una de las piezas clave para demostrar la creación de corteza oceánica. Y ésta es la explicación del titular de *Science*: desde nuestro geocentrismo instintivo, un bandeado de anomalías magnéticas equivale a tectónica de placas. Sin embargo, la explicación movilista se derrumbó en pocas semanas: salvo excepciones muy localizadas, las rocas marcianas con magnetismo remanente eran las de las tierras altas, es decir las equivalentes a las rocas de los continentes terrestres. Y aunque también la corteza continental terrestre presenta anomalías magnéticas alargadas, éstas se forman por colisión de fragmentos oceánicos en una zona de subducción (es decir, de destrucción de litosfera), un proceso incapaz de explicar la geometría de las bandas marcianas.

Otros rasgos de la geología marciana sí parecen requerir una etapa, aunque sea breve, de tectónica de placas. En concreto, el escalón topográfico global de hasta cinco kilómetros de desnivel



Fig. 2. El gran escalón topográfico marciano en la zona de Mangala Valles, al suroeste de Tharsis.

que separa las tierras altas y las bajas (y que recibe el curioso nombre de *dicotomía marciana*) se parece demasiado a los taludes continentales de los océanos terrestres, formados cuando los continentes se separan. Si la dicotomía fue un límite subductivo, algunas anomalías lineales (como las de la región denominada Arabia Terra, la única zona de tierras altas al Norte del Ecuador marciano) podrían explicarse por subducción bajo la dicotomía. Pero

para el magnetismo remanente localizado más al Sur no hay ninguna explicación de detalle que resista el análisis. El equipo a cargo del magnetómetro de la *MGS* propuso, como alternativa un tanto desesperada, que se tratase de grandes pliegues, ya que estas estructuras generan simetría respecto a un plano axial; pero advertían que la solución creaba más problemas que resolvía. Otros autores han sugerido que las bandas son en realidad conjuntos de diques basálticos: para explicar el magnetismo detectado, éstos tendrían que tener una profundidad mínima de 35 kilómetros; la alternancia de polaridades positivas y negativas resultaría de la migración lateral de la zona de inyección del magma. El inconveniente de esta solución es que unas intrusiones magmáticas tan descomunales sólo son posibles en una litosfera sometida a un intenso estiramiento, como el que tiene lugar en las dorsales oceánicas terrestres; pero las dorsales son, como vimos, fábricas de corteza oceánica, y las rocas marcianas magnetizadas son precisamente las de las tierras altas. En la Tierra la corteza continental se forma sobre las zonas de subducción. ¿Podría en Marte, por el contrario, haberse formado mediante un proceso análogo al de extensión del fondo oceánico?

Un extraño océano, y una *ventana* figurada

En 1969, los geoquímicos que estudiaron la primera hornada de rocas lunares advirtieron que todas las pertenecientes a las tierras altas presentaban una fuerte anomalía de la tierra rara europio. Este elemento tiene unas propiedades muy semejantes a las del estroncio, un alcalinotérreo que suele sustituir al calcio en sus minerales. Las rocas de las tierras altas lunares proceden de la cristalización de un magma, y en ellas abunda la plagioclasa, un mineral cálcico de baja densidad. La conclusión fue inmediata: la corteza de las tierras altas lunares se había formado por flotación, como la escoria de un alto horno, en la que el calcio había arrastrado al europio, a través del estroncio. Como la corteza lunar primitiva parecía haber cubierto toda la Luna, la superficie inicial de nuestro satélite tuvo que ser un océano de magma. Este espectacular concepto, muy discutido al principio, ha sido aceptado gradualmente por los científicos planetarios, no sólo para la Luna, sino también para los restantes planetas de tipo terrestre, incluyendo a la Tierra y Marte. En 1989, Kent Condie, de la Universidad de Nuevo México, lo incorporó a una idea más amplia, en la que sugería que después de la fase de alta temperatura con océanos globales de magma, los planetas interiores se habían enfriado exponencialmente, y que en esta etapa de decadencia térmica debían de atravesar inexorablemente lo que llamó “ventana de tectónica de placas”, el intervalo térmico comprendido entre la adquisición de una litosfera rígida y el enfriamiento del manto que haría imposible la convección.

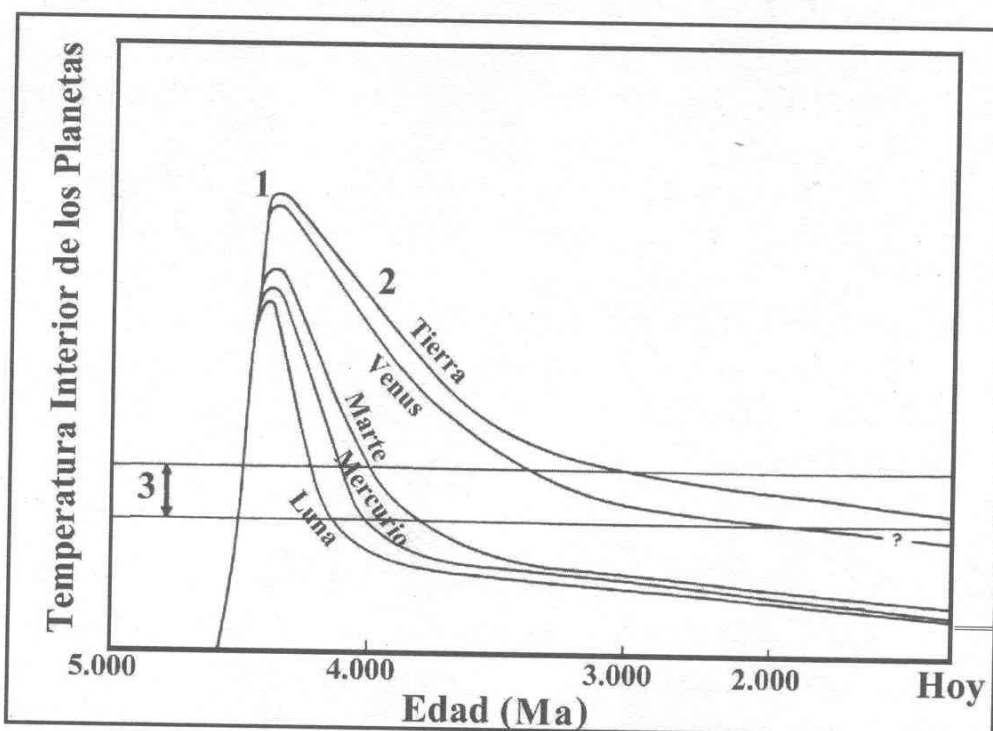


Fig. 3. La evolución térmica tipo de los planetas terrestres pasa por una fase inicial de alta temperatura (1) y luego decrece exponencialmente. (2) coincide con la etapa del Gran Bombardeo Asteroidal, y (3) es la Ventana de tectónica de placas explicada en el texto.

Según Condie, Marte habría atravesado su ventana de tectónica de placas durante unos 100 o 200 millones de años (Ma), hace unos 4.000 Ma.

Es evidente que el campo magnético marciano debió de marcarse en las rocas de su corteza en estas fases iniciales de alta temperatura. Una idea atractiva, aunque minoritaria, es que el campo se originase a partir del océano de magma, cuya base (un fluido convectivo a alta presión) pudo generar un magnetismo de hasta 0,1 tesla, que se imprimiría en las primeras rocas consolidadas. Sin embargo, tanto los científicos a cargo del magnetómetro de la MGS como los que después han intervenido en la discusión prefieren pensar en un campo generado por una dinamo autoinducida radicada en el núcleo marciano. Es decir, un modelo geocéntrico, dentro del cual caben sin embargo dos variantes. La observación crítica es que las grandes cuencas de impacto (Hellas y Argyre, con 2.000 y 800 km de diámetro), que se suponen formadas hace entre 4.000 y 3.900 Ma, no presentan magnetismo remanente. Puesto que en estas estructuras tuvieron que formarse grandes lagos de lava (es decir, la situación ideal para la adquisición de magnetismo remanente), esto significa que no existía un campo magnético apreciable en Marte en aquella época. Esta ausencia se ha interpretado de dos maneras: o bien el campo magnético se había extinguido ya, o bien aún no había comenzado a actuar. La mayoría de los geofísicos planetarios son de la primera opinión. Su principal argumento es que, puesto que la corteza donde se hallan las grandes bandas magnetizadas parece anterior a las cuencas de impacto, el pensar en un campo post-impactos equivaldría a imaginar dos etapas de magnetismo marciano separadas por un intervalo sin magnetismo: la navaja de Occam chirría con una solución de este tipo, defendida sin embargo por Gerald Schubert, de la Universidad de California, uno de los geofísicos planetarios de más prestigio.

Argumenta que, por lo que sabemos del campo magnético lunar, éste surgió abruptamente hace 4.000 Ma, quizá a favor de la energía liberada por la solidificación del núcleo interno de la Luna. Sin embargo, nuestro propio campo magnético nos cuenta una historia muy distinta: tenemos pruebas de que existe desde hace al menos 3.800 Ma, pero sólo hace unos 1.000 Ma comenzó a solidificarse el núcleo interno, que actualmente ocupa nada más el 5% del total; de forma que no parece que la existencia de un núcleo interno sólido sea un requisito indispensable para un campo magnético. Por último, los partidarios del campo inicial tienen un último as en la manga: ALH84001, el meteorito que hasta hace poco ha sido el principal campo de batalla sobre la vida en Marte, tiene una magnetización remanente adquirida hace más de 4.000 Ma. Por mi parte, he confirmado mediante contajes de cráteres la gran antigüedad de las zonas de magnetismo remanente más intenso, que presentan edades de retención de cráteres siempre superiores a 3.000 Ma.

Así pues, Marte sería, como la Luna, un cuerpo planetario demasiado pequeño para retener largo tiempo su calor interno, que se agotaría pronto, dejándonos como herencia la huella –nítida- de un campo magnético, junto a otra, más borrosa, de una posible litosfera móvil. Pero, como sucede siempre en las ciencias fronterizas, lo que ignoramos es mucho más interesante que lo que creemos saber: el “modelo lunar” deja demasiadas preguntas en el aire. Por ejemplo:

- ¿Coincidió el magnetismo marciano con la hipotética fase de tectónica de placas?

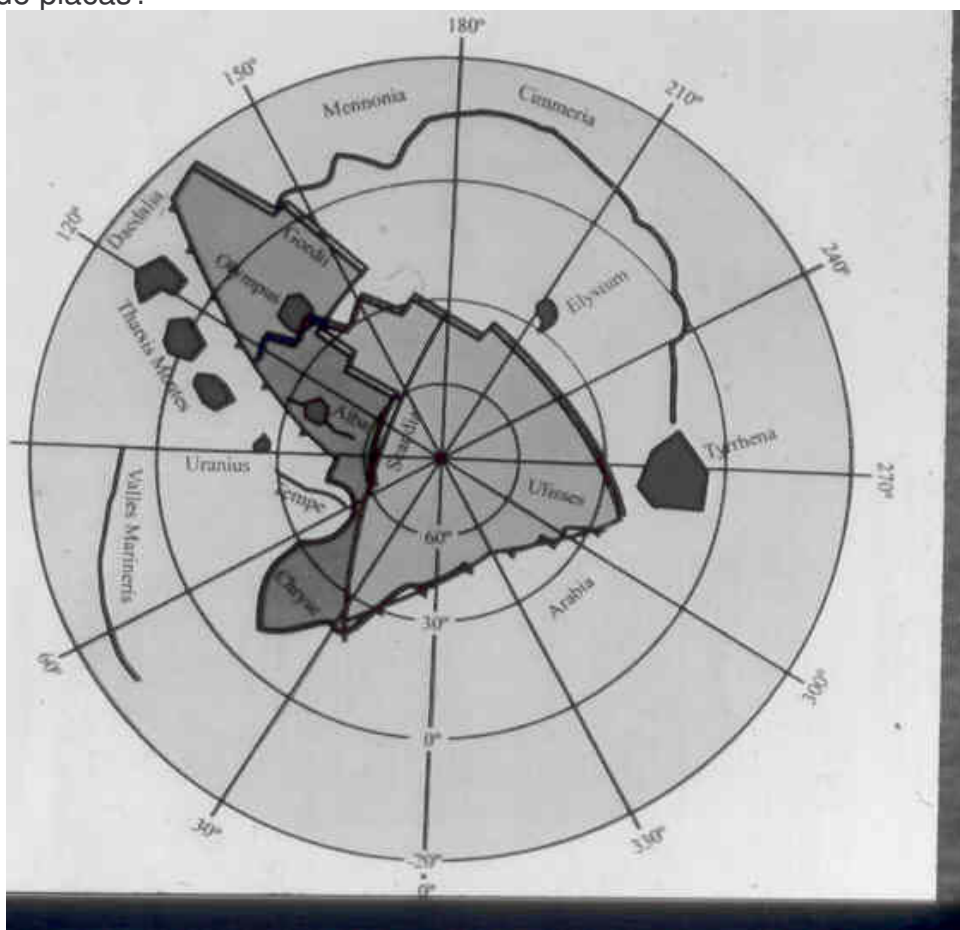


Fig. 4. Situación hipotética de las placas litosféricas móviles en el hemisferio norte de Marte hace 4.000 millones de años.

Si lo hizo, ¿se trató de una casualidad, o de un *efecto dominó*, con el calor del núcleo provocando tanto el campo magnético como convección en el manto?

- ¿Por qué el campo marciano parece tan intenso? En principio, la intensidad del magnetismo debería depender del tamaño y temperatura del núcleo, y ambas dimensiones tienen que ser menores en Marte que en la Tierra. Como veremos en seguida, quizá la clave esté en la mineralogía de los minerales de hierro presentes en de Marte, que podrían ser más magnetizables que los terrestres.
- ¿Cuál es el origen real del bandeo, teniendo en cuenta las dificultades de la explicación intrusiva? Algunas interpretaciones de la geometría del magnetismo remanente sugieren geometrías en espiral, aún más difíciles de interpretar.
- ¿Por qué, si el campo ya se había extinguido hace 4.000 Ma, los meteoritos SNC (de Shergotty, Nakhla y Chassigny, las localidades de caída de los primeros tipos de meteoritos provenientes de Marte) siguen presentando un magnetismo remanente importante, como las 4.000 nanoteslas del meteorito de Nakhla, que cristalizó hace *sólo* 1.300 Ma?

Pero, de todas las cuestiones sin respuesta fácil, la más paradójica es: ¿Cómo conjugar un campo magnético de vida tan corta con un vulcanismo que, según diversas evidencias,

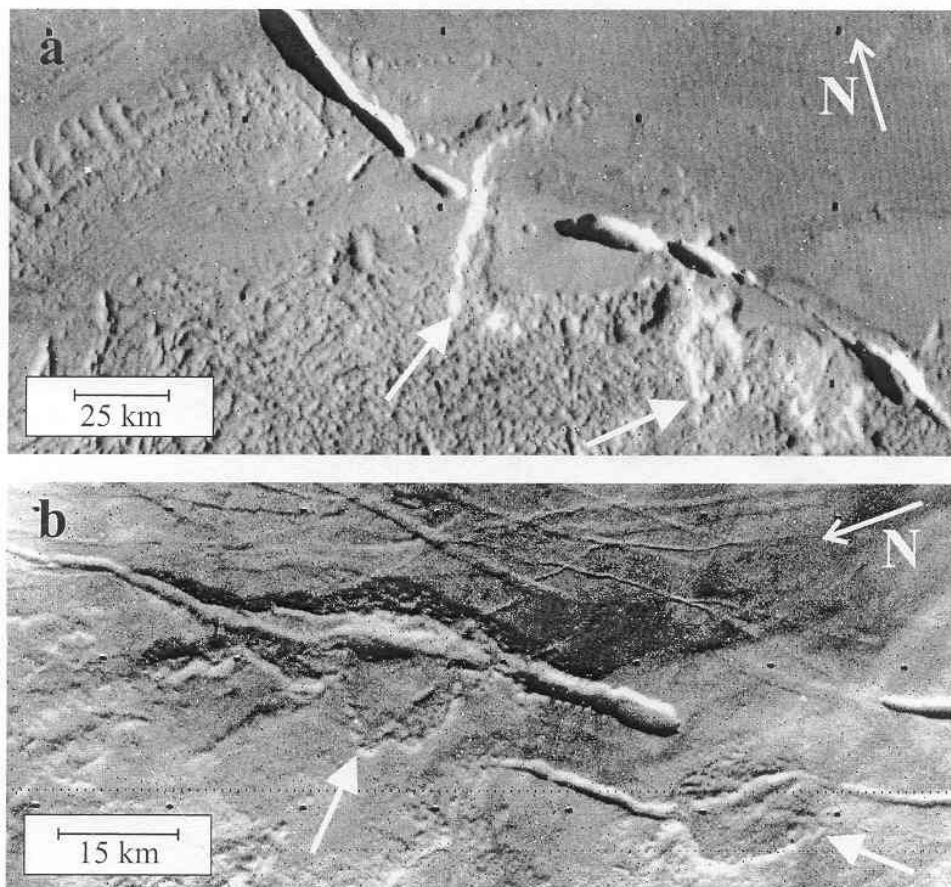


Fig. 5. Pruebas de vulcanismo subactual en Marte: lavas (flechas) surgiendo de grandes fallas al pie de los volcanes Arsia Mons (a) y Pavonis Mons (b).

persiste hasta el presente? En principio, los dos fenómenos deberían estar conectados: los núcleos de los planetas son grandes depósitos de energía – adquirida esencialmente durante la acreción-, de modo que parece inevitable que un núcleo caliente transmita su energía al manto, energía que se reflejará en la superficie en forma de vulcanismo y tectónica. En el Seminario de Ciencias Planetarias de la Universidad Complutense hemos probado recientemente que también la generación de grandes fracturas es una característica del Marte actual. Lo cual plantea otro problema añadido: ¿Qué mecanismo produce en Marte fallas transcurrentes de cientos de kilómetros de longitud, si la tectónica de placas se agotó hace miles de millones de años?

Recientemente, los geofísicos Francis Nimmo (Cambridge) y David Stevenson (CalTech), han propuesto una posible solución a una parte de estos problemas. Parten de un esquema semejante al de Condie, pero discuten que la historia térmica de Marte –o la de cualquier planeta- se reduzca a un aburrido enfriamiento exponencial. Según ellos, hace más de 4.000 Ma Marte atravesó con éxito, pero de forma efímera, su ventana de tectónica de placas. Durante esta corta etapa, el manto fue refrigerado eficazmente mediante la circulación convectiva; sin embargo, esta refrigeración hizo aumentar la viscosidad del manto, lo que significó el final de la fase de movilidad litosférica. A partir de este momento, el manto comenzó a acumular calor –de origen sobre todo radiactivo- hasta que su temperatura se acercó a la del núcleo. En un momento dado, hace unos 4.000 Ma, la diferencia de gradiente entre las dos capas fue tan pequeña que la convección en el núcleo quedó inhibida, ya que para que se establezca convección es imprescindible que haya una fuente de calor en la capa convectiva, pero también un nivel superior más frío. Ésta habría sido la causa de la defunción de la geodinamo marciana. Como puede verse, Nimmo y Stevenson dan hábilmente la vuelta al problema, haciendo de la tectónica de placas la causa, y no el efecto, del campo magnético de Marte: contra la noción más intuitiva, el efecto dominó comenzaría en la superficie y acabaría en el núcleo. Una virtud de este modelo es que podría explicar máximos térmicos relativos en las evoluciones planetarias: el caso más llamativo de estos episodios de manto caliente es el de Venus, cuya superficie parece haber sido inundada casi totalmente por lava hace unos 500 Ma.

Basta, sin embargo, con pasar revista a las preguntas anteriores para comprobar el largo camino que este modelo tiene aún que recorrer para ser considerado satisfactorio. El magnetismo remanente de los meteoritos SNC, producido más de 3.000 Ma después de la extinción teórica de la geodinamo, queda sin resolver, lo mismo que el origen del bandeo. La persistencia del vulcanismo podría tener una explicación parcial en el calentamiento del manto, pero el mismo Stevenson se pregunta si es razonable esperar 4.000 millones de años de vulcanismo en un planeta con el núcleo inactivo. Para complicar este aspecto, hay que recordar que suponemos que los volcanes marcianos son “puntos calientes”, es decir, que están –como los terrestres- alimentados por anomalías térmicas que surgen en la interfase manto-núcleo; pero esto sólo es posible con un núcleo notablemente más caliente que el manto. Lo cual significa que la hipótesis manto caliente-núcleo frío nos dejaría sin explicaciones para los volcanes gigantes del domo de Tharsis, algunos de los cuales tienen claros signos de actividad reciente.

Otros resultados de la *MGS* están contribuyendo a desenredar una parte de la maraña: por ejemplo, el experimento del espectrómetro de emisión térmica

ha avanzado en la caracterización geofísica y mineralógica del planeta. El hemisferio Norte emite más calor, lo que es coherente con su ausencia de magnetismo remanente, y con la suposición de que se trata de corteza más joven que la de las tierras altas del Sur. Sin embargo, y al contrario de nuestra *lógica terrestre*, las rocas de las tierras altas parecen basaltos, mientras que las de las zonas bajas parecen más ricas en sílice: es como si granitos y basaltos –los representantes típicos respectivos de las cortezas continental y oceánica de la Tierra- estuviesen cambiados en Marte. La abundancia de hierro en la superficie ha permitido calcular que la concentración de este elemento en el manto de Marte es del doble que la terrestre, lo que podría explicar los altos valores de la magnetización remanente: el campo magnético de Marte no habría sido tan intenso, sino que las rocas de este planeta son grabadoras de primera calidad. Por otra parte, la zona de Arabia Terra parece tener una corteza de espesor intermedio entre los de los dos tipos, lo que es compatible con la subducción y adelgazamiento cortical bajo esta región.

Implicaciones

Marte tuvo un campo magnético durante la etapa crítica de su evolución como planeta. Los especialistas en Arcaico calculan que en la Tierra la vida pudo surgir hace 4.000 a 4.400 Ma (dependiendo que se suponga el origen en un mar somero, o bien en torno a chimeneas hidrotermales profundas, que estarían más protegidas del bombardeo asteroidal). En esta misma época, Marte disfrutaba –gracias a la protección de su campo magnético contra la erosión por el viento solar- de una atmósfera densa, reflejada en los canales de desbordamiento más antiguos y –aunque esto es más especulativo- en la generalmente aceptada sugerencia de que Fobos sea un asteroide carbonáceo capturado, algo imposible sin contar con una atmósfera importante. Por tanto, es en el Marte primordial donde el modelo del océano transitorio parece más verosímil. Este Marte de clima benigno pudo, igual que lo hizo la Tierra en el mismo periodo, albergar vida de tipo bacteriano. En el debate en torno al meteorito ALH84001, el argumento del bando pro-biológico que más ha resistido los ataques de sus adversarios es el de los cristales de magnetita de forma exa-octaédrica truncada y monomagnéticos. En la Tierra, esta cristalografía parece exclusiva de la magnetita sintetizada por las bacterias magnetotácticas. Su hipotética existencia en Marte serviría para unir varios hilos sólo aparentemente inconexos de esta trama: el calor interno y su influencia en la posible fase de tectónica de placas; la comunidad del clima inicial de los planetas terrestres; el océano primordial de Marte (ya que la magnetita sólo es útil como bio-orientador en un medio líquido); y por último el origen multiplanetario -¿panspérmico?- de formas de vida dotadas de lo que podrían ser sorprendentes paralelismos metabólicos y fisiológicos con la biosfera terrestre. Este último argumento tiene sin embargo un lastre demasiado pesado, porque ALH84001 es una roca plutónica, o sea formada en una cámara magmática profunda, un ambiente en el que la natación tiene poco sentido, incluso en Marte.

El campo magnético aparece por lo tanto como el telón de fondo de todos estos temas de importancia capital: una propiedad del interior de los

planetas que, cada vez más, se revela decisiva para configurar la evolución, tanto térmica como climática y biológica, de los cuerpos planetarios.