

**FIRMA INVITADA****LA EXPLORACIÓN DE MARTE  
UNA BÚSQUEDA EXOBIOLÓGICA**

**ANGUITA, Francisco**  
*Profesor de Geología Planetaria*  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

A principios del año 2004, tres satélites científicos estudiaban el planeta Marte desde órbitas cercanas, mientras dos vehículos de superficie recorrían lentamente puntos de especial interés. Dos naves más estaban siendo construidas para aprovechar la próxima oportunidad (ventana) de lanzamiento, en 2005, y varias otras concluían su fase de diseño. En conjunto, un ambiente semejante al del ominoso comienzo de La guerra de los mundos, salvo que los que ahora observan, estudian y preparan la invasión de un planeta vecino no son los marcianos sino los habitantes de la Tierra. Cambia asimismo el objetivo final: se trata de satisfacer nuestra curiosidad científica, y no de arrebatar un mundo a sus habitantes indígenas. Salvo que, en algún futuro, los terrestres decidan que el estado actual de Marte no es el que más les conviene, y decidan, si son capaces de hacerlo, terraformar el planeta: es decir, transformarlo en un segundo hogar.

**¿POR QUÉ MARTE?**

Pero, ¿a qué viene esta insistencia con Marte? Sería interesante una encuesta amplia para averiguar cómo ve el hombre de la calle esta exploración sistemática de un planeta, tan diferente de la carrera hacia la Luna, sin la competición política y sin los astronautas-héroes. Adivino que la respuesta más citada se referiría a la búsqueda de vida; otras, quizás al agua. Y hay una postura anti-desarrollista extrema, que analizaré al final, y que rechaza explícitamente la exploración (tripulada) del Sistema Solar, al tildarla de ser un empeño no de la Ciencia sino del capitalismo industrialista. Seguramente muy pocas opiniones reflejarían la acuciante necesidad de los científicos planetarios de estudiar la evolución de otro cuerpo para así, al fin, tener un patrón contra el cual contrastar la biografía del nuestro. Y si la

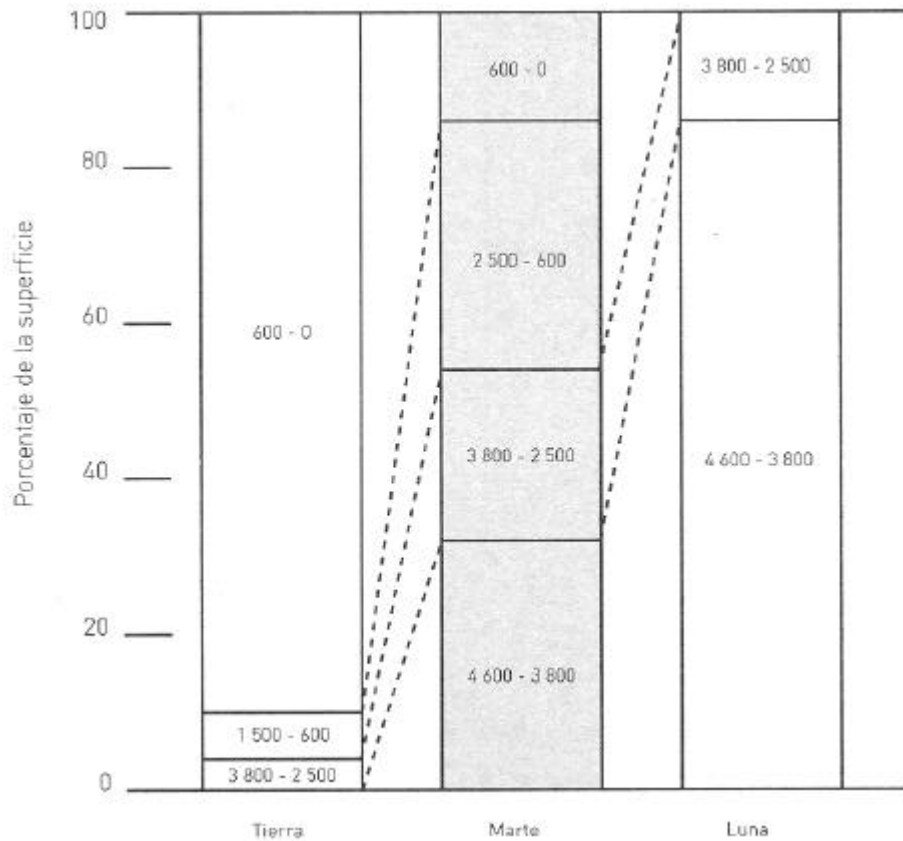
palabra necesidad parece demasiado sonora en un campo de Ciencia pura, bastará que pensemos en nuestro mal comprendido sistema climático para que convengamos en que no podemos avanzar mucho más en el estudio de la Tierra si no nos dotamos de la capacidad de generalizar.

Es evidente que el actual proyecto de exploración de Marte está enfocado desde el prisma de la recién creada Astrobiología; es decir, centrado en la búsqueda de huellas de vida presente o pasada en el planeta. No es menos cierto que la estrella de esta exploración es la historia (compleja, por lo que vamos averiguando) del agua, y con ella del clima. Por último, ocurre que para desentrañar las idas y vueltas del clima marciano debemos comprender la evolución de su energía interna, expresada en la actividad de sus volcanes. Fuego, agua, vida, serán los hilos conductores de este intento de explicar qué estamos buscando en Marte y qué es lo que hemos encontrado hasta ahora.

## **UN REGISTRO HISTÓRICO INTACTO**

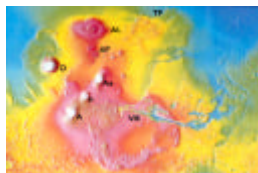
Marte ostenta un nivel de actividad geológica intermedio entre el terrestre y el lunar, lo cual se refleja nítidamente en la faz del planeta, que incluye rasgos muy primitivos, como enormes cráteres (cuencas) de impacto, junto a otros modernos como redes fluviales. Pero en conjunto, Marte es el cuerpo de rasgos y procesos geológicos más próximos a los del nuestro. Una característica esencial del planeta vecino es la homogénea distribución de edades de su superficie: mientras que en la Tierra apenas hay rocas antiguas y la Luna carece por completo de materiales modernos, Marte ofrece un equilibrio exquisito de rocas de todas las edades. La causa es su masa intermedia, que le ha proporcionado energía suficiente para renovar una parte importante de su superficie primitiva pero sin destruirla por completo, como ha sucedido, a través de erosión, vulcanismo o tectónica, en la energética Tierra.

La época más interesante a estudiar en este detallado libro de actas sucedió hace 4.000 millones de años. Todos los indicios coinciden en señalar que es en ese momento cuando surgió la vida en la Tierra, y que Marte pudo tener entonces un ambiente parecido al de nuestro planeta. Pero las rocas terrestres más antiguas halladas hasta ahora se formaron hace unos 3.850 millones de años, lo que convierte el tema del origen de la vida en un complicado laberinto científico. En cambio, las rocas de 4.000 millones de años forman un tercio de la superficie de Marte. Cuando podamos analizar muestras del planeta rojo se abrirá de par en par una puerta sobre la evolución inicial del Sistema Solar, que hasta ahora sólo hemos entrevisto. Un científico planetario ha dicho que Marte es el archivo perfecto para estudiar la historia del sistema: como un completo museo arqueológico al que un filántropo caprichoso hubiese añadido unas más que dignas plantas de arte moderno y contemporáneo.



### LOS FUEGOS INTERNOS

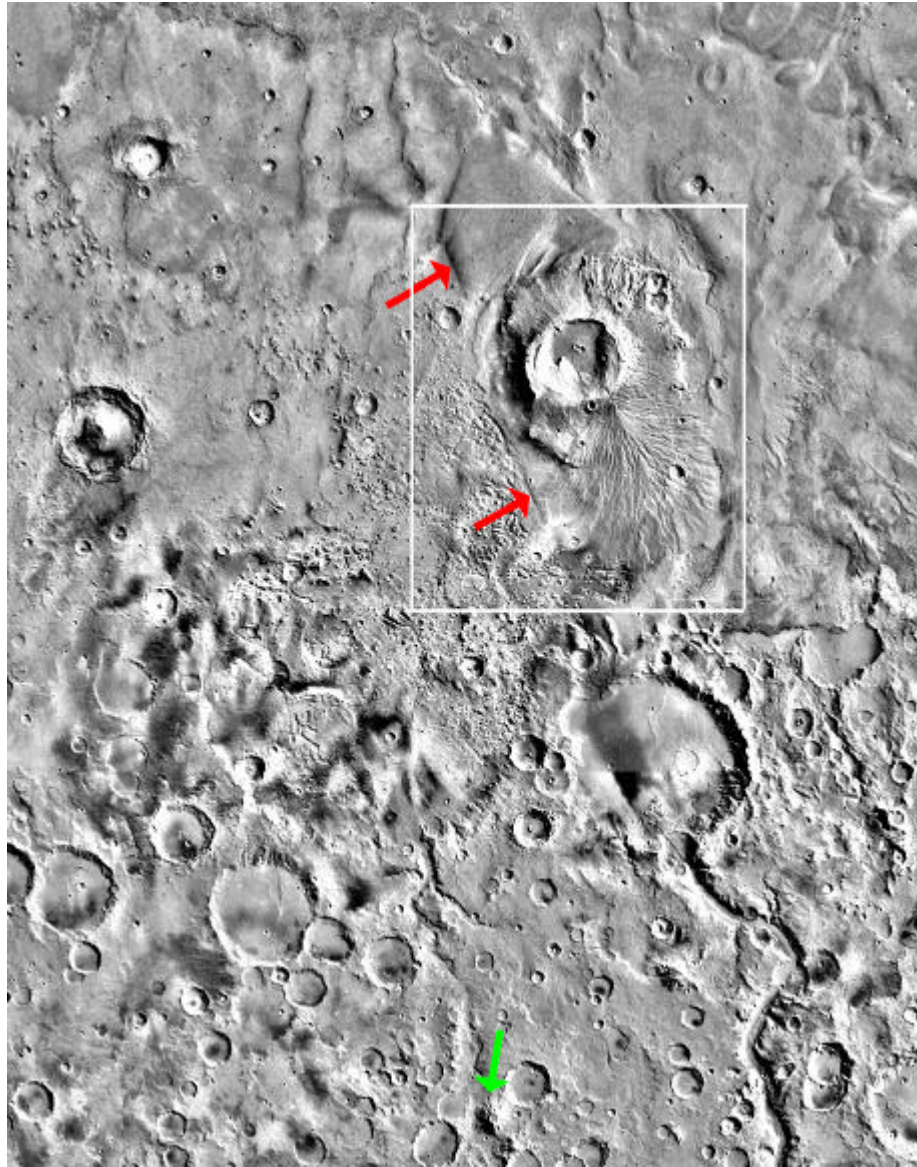
Como en todo el Sistema Solar, el vulcanismo es el proceso geológico más visible en Marte. Curiosamente, el pequeño planeta (su radio es de 3.400 km, frente a los 6.378 de la Tierra) posee algunos récords de tamaño: la provincia volcánica de Tharsis es una cúpula circular de 5.000 km de diámetro, y ocupa por tanto un hemisferio (el occidental) casi completo. Allí reinan los gigantes del Sistema Solar, encabezados por Olympus Mons (800 km de diámetro en la base, 27 km de altura sobre el radio medio del planeta), los tres Montes de Tharsis (Arsia, Pavonis y Ascraeus) con 15 km de altura media, Alba Patera, un extraño volcán casi plano pero de 1.000 km de diámetro basal, y otra docena de edificios menores. Como veremos enseguida, esta gran bóveda podría encerrar el secreto del cambiante clima de Marte.



Una característica que distingue al vulcanismo de Tharsis del terrestre es su longevidad. Mientras que en nuestro planeta las provincias volcánicas se apagan en unas decenas de millones de años, Tharsis ha encadenado al menos 3.000 millones de años de actividad sostenida. La diferencia se achaca a la inmovilidad de la superficie de

Marte respecto a su interior: mientras que la viajera corteza terrestre se lleva consigo los productos volcánicos, la estática superficie de Marte permite que éstos se acumulen en el mismo lugar. De todas formas, no acabamos de comprender qué clase de anomalía térmica en el interior de un planeta puede producir un vulcanismo tan prolongado. Estudios de detalle de los grandes edificios volcánicos marcianos han demostrado que su actividad es espasmódica: protagonizan erupciones muy intensas durante varios millones de años y luego descansan durante periodos cientos de veces mayores. Esta característica ha podido ser importante en la historia del clima, ya que los volcanes pueden ser considerados como extractores de gases del interior de un planeta; y muchos gases (como el vapor de agua, o el dióxido de carbono) retienen las radiaciones infrarrojas, provocando efectos de invernadero, por lo cual son actores decisivos en los cambios climáticos.

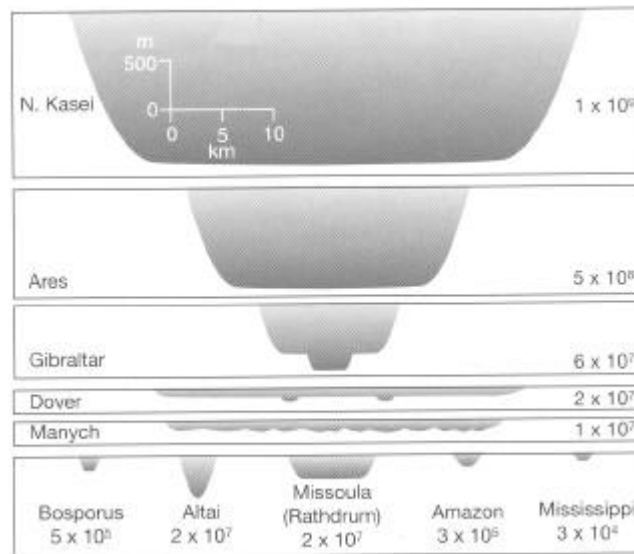
En el resto del planeta, el vulcanismo es de menor envergadura. Un volcán interesante, por su parecido con los terrestres y por ser un protagonista oculto de una de las misiones robóticas de 2004 (la del vehículo Spirit al cráter de impacto Gusev) es Apollinaris Patera. Como las del Mauna Loa, en la isla de Hawaii, las lavas más recientes de este gran volcán en escudo han surgido de una grieta de su flanco. A su vez, esta fisura se prolonga hasta el canal Ma'adim, el cual desemboca en el citado cráter Gusev. ¿Por qué se eligió este cráter como punto de aterrizaje de la sonda? Los motivos fueron tres: primero, las imágenes orbitales mostraron que el cráter contiene una gran cantidad de sedimentos, lo que significa que estuvo ocupado en algún momento por un lago; segundo, los sedimentos son el tipo de materiales donde, en la Tierra, encontramos fósiles; y por último, la presencia de volcanes cercanos hace pensar en la posibilidad de que la corteza de esta zona esté aún caliente, con lo que parte del hielo atrapado en ella (y detectado en grandes cantidades precisamente por los actuales orbitadores) se halle en estado líquido, creando un medio adecuado para la vida. La zona Gusev-Apollinaris es un ejemplo perfecto de cómo diferentes sistemas marcianos deben estudiarse en interconexión para resolver el problema de la hipotética existencia de vida pasada o presente en el planeta.



### EN LA PISTA DEL AGUA

Los caudales de agua que en algunos momentos circularon por la superficie de Marte convierten en liliputienses a los mayores ríos terrestres. El contraste entre el Marte húmedo que vio circular aquellas ingentes masas líquidas por los llamados "canales de inundación" y el actual planeta desértico obliga a reconocer

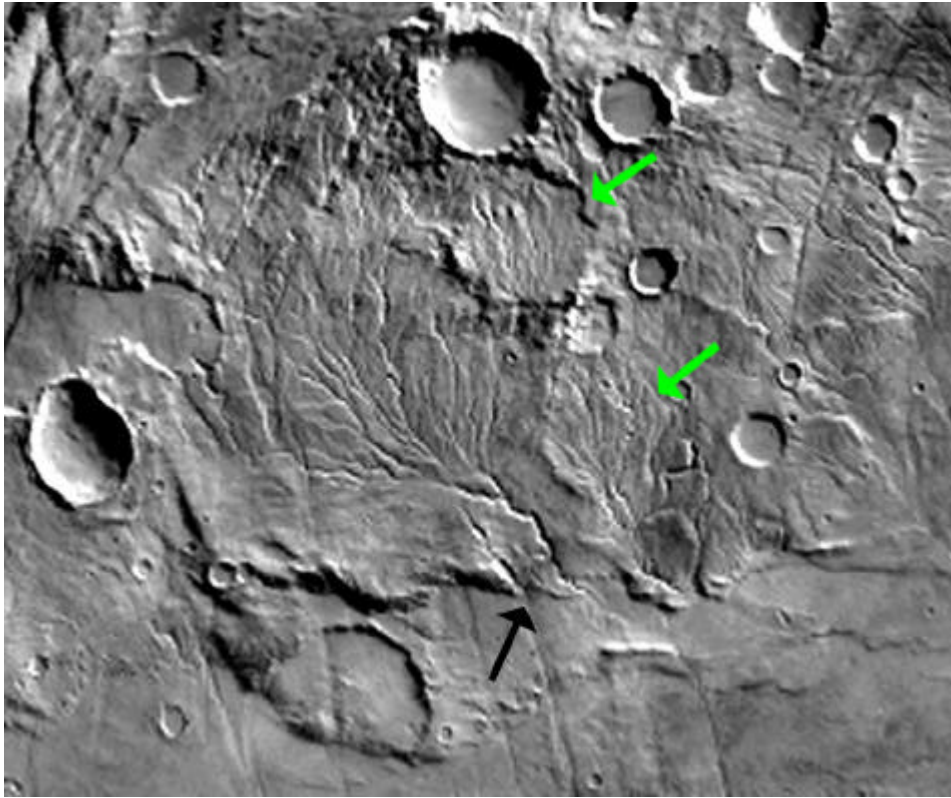
que Marte es el gran ejemplo del concepto de Cambio Climático Global en el Sistema Solar. Y que indiscutiblemente el gran problema científico a resolver en Marte es el origen y destino de su agua líquida. Sin embargo, no todos los cauces secos marcianos son gigantes: existen redes fluviales de geometría y dimensiones terrestres.



Algunas de ellas parecen haberse generado por socavamiento, es decir, a causa del hundimiento de una zona bajo la que circuló una corriente de agua subterránea. Otras, en cambio, debieron formarse mediante precipitaciones y escorrentía (flujo superficial de agua).

## LOS CICLOS CLIMÁTICOS MARCIANOS

En este tema, un dato decisivo es que muchos de los canales fluviales muestran señales de haber fluido más de una vez. Estas huellas de flujo múltiple han sido leídas como una demostración de que el clima marciano es cíclico, experimentando drásticos cambios globales entre un extremo húmedo y otro desértico. Este concepto es relativamente nuevo en las ciencias marcianas, ya que fue propuesto por vez primera en 1994, por el equipo del hidrogeólogo Victor Baker, de la Universidad de Arizona. Según Baker, los canales de inundación fueron excavados durante un largo periodo, entre 2.000 y 1.000 millones de años, y el desencadenante de su formación fue un episodio de vulcanismo masivo en Tharsis. Los volcanes extrajeron del interior del planeta un importante volumen de compuestos volátiles, sobre todo agua y dióxido de carbono. Una parte de ellos formó una atmósfera densa



alrededor del planeta; y, cuando ésta se saturó en agua, una variante del diluvio universal se abatió sobre Marte, rellenando sus depresiones con un océano que, según los datos del robot Opportunity, contenía abundantes sales disueltas.

Baker llamó Oceanus Borealis a este antiguo cuerpo de agua, cuyo fondo seco contemplamos hoy en las llanuras septentrionales de Marte. El volumen de este mar sería de 65 millones de kilómetros cúbicos, la vigésima parte del conjunto de los océanos terrestres, y alcanzado una profundidad media de 1.700 metros (la del Atlántico es de 3.500 metros). Probablemente Borealis fue acompañado por otras masas de agua de diferentes extensiones, como los lagos detectados en el fondo de Valles Marineris y en muchos cráteres de impacto, que habrían servido como cuencas provisionales de drenaje interno y almacenes de sedimentos transportados por los ríos. El ejemplo del cráter Gusev alimentado por el canal Ma'adim, que vimos antes, debió ser común en las épocas húmedas.

La batalla por confirmar la realidad del océano marciano se ha centrado en identificar sus posibles líneas de costa. En torno a este tema se mantiene un debate muy vivo, complicado por el hecho innegable de que, como en todos los planetas

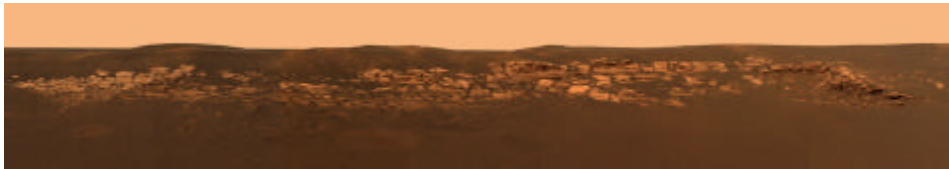
marinos, las costas son elementos móviles, que evolucionan en función del clima (cuando los glaciares crecen, el mar se retira) y también de las fuerzas internas del planeta (si una zona se levanta, el mar retrocede). La Figura 6 representa un típico ejemplo de un canal de inundación difuminándose en un terreno bajo, discurriendo entre lo que parecen sus propios sedimentos. Seguramente veríamos muchos paisajes semejantes si los océanos terrestres se desecasen.





Según todos los indicios, una de estas costas hoy convertidas en desierto fue el lugar de aterrizaje del robot de la NASA Opportunity en Enero de 2004. A causa de su insignificante topografía y de estar a caballo del ecuador, la región se llama Meridiani Planum, y es un área de transición entre las tierras altas y bajas de Marte. El interés por esta zona se remonta al año 2000, cuando el equipo de Philip Christensen, un geólogo planetario de la Arizona State University, descubrió en los datos de un espectroscopio de la sonda Mars Global Surveyor la huella de hematites de grano grueso, un óxido de hierro que en la Tierra se forma por precipitación en medio acuoso. La superficie cubierta por esta formación era de unos 180.000 km<sup>2</sup>, algo más de un tercio de la extensión de España. Este dato, junto a la potencia calculada, unos 300 metros, indicaba unas condiciones de depósito de cierta estabilidad, tanto en el espacio como en el tiempo. La NASA seleccionó este lugar como objetivo de uno de los dos vehículos lanzados en 2003.

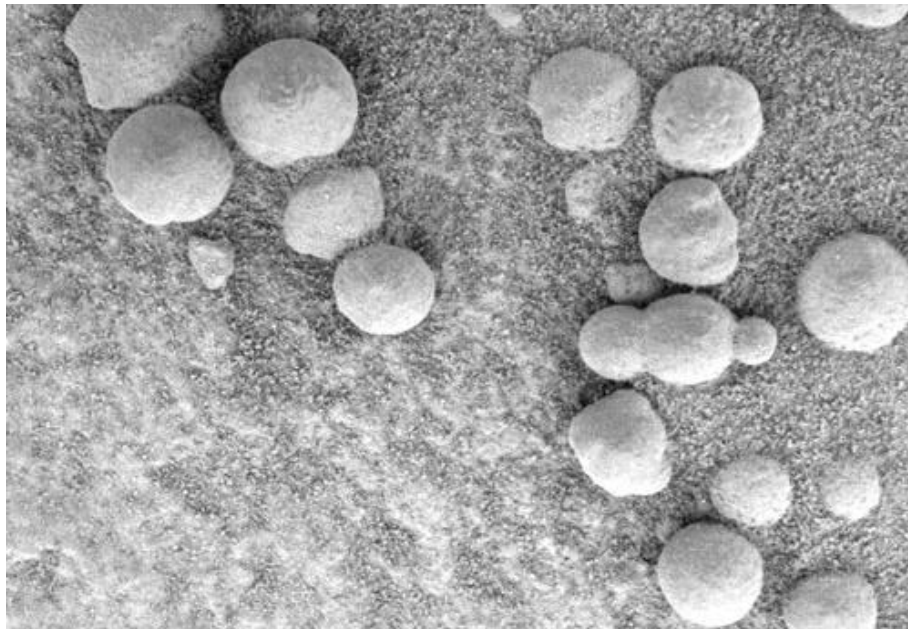
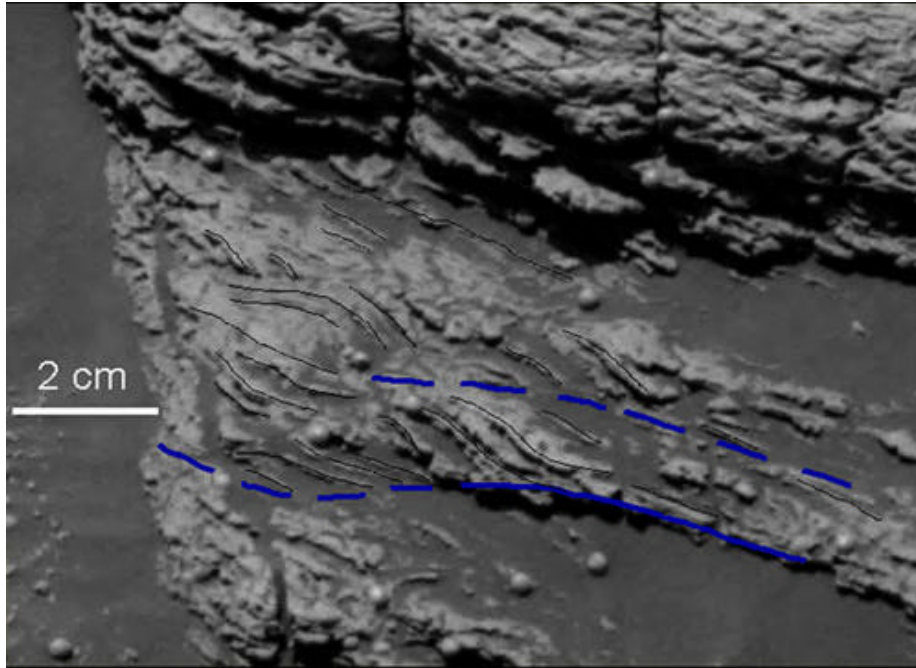
La suerte jugó a favor: era el quinto aterrizaje en Marte, y por fin una sonda pudo estudiar un afloramiento (es decir, una roca no movida). Éste (Figura 7) se halla en la pared de un pequeño cráter, y los análisis químicos indicaron que estaba formado por rocas salinas, con predominio de sulfatos (hasta 30% en peso) y contenidos menores pero significativos de cloruros.



Estos rasgos químicos son típicos de sedimentos precipitados a partir de salmueras (soluciones saturadas en sales), lo que significa que probablemente estas rocas representan una masa de agua evaporada. Dos rasgos destacan en el afloramiento:

- La laminación cruzada (Figura 8) indica flujo y reflujo de una corriente de agua a pequeña velocidad, quizá entre 10 y 50 cm/s; es decir, la velocidad típica de un oleaje suave modelando un fondo somero. A partir de estas estructuras, los sedimentólogos concluyeron que la zona debió de ser una línea de playa. Combinados con los datos analíticos, estas estructuras permiten afirmar que el punto fue la ribera de un mar o un lago salados.

- Las esférulas de hematites (Figura 9) son concreciones, es decir minerales que crecieron dentro del sedimento. Aunque son demasiado pequeñas para permitir un análisis individual, un análisis indirecto (el análisis de una zona con esférulas menos el del sedimento) confirmó la sospecha de que estaban compuestas por este óxido de hierro.



## MARTE Y RÍO TINTO: LA CONEXIÓN DEL HIERRO



Así pues, el agua que se infiltró por estos sedimentos estaba muy cargada de hierro, lo que acentúa la similitud de las condiciones paleoambientales de Meridiani Planum con las del Río Tinto, en Huelva (llamado así por transportar en disolución grandes cantidades de hierro, Figura 10), donde actualmente investigadores de la NASA están intentando encontrar análogos para las condiciones del Marte primitivo. Ahora bien, para disolver el hierro es preciso que el agua sea extremadamente ácida, como la del Río Tinto, cuyo pH oscila entre 0,9 y 2,8. La acidez del agua marciana, deducida a partir de los datos de Opportunity, resultó ser la explicación al mayor misterio geoquímico de aquel planeta: la ausencia de carbonatos. En la Tierra los carbonatos, minerales muy comunes (forman, por ejemplo, las rocas calizas) precipitan en los fondos marinos a partir del dióxido de carbono atmosférico; en general, con intervención de seres vivos. En Marte, con una atmósfera formada básicamente por aquel gas, los especialistas llevan treinta años buscando, inútilmente, los carbonatos que según la lógica terrestre deberían de haber precipitado en el fondo de Oceanus Borealis. La solución del enigma es la aparente acidez del agua marciana: un simple 0,1% de óxidos de azufre (que disueltos en agua forman ácido sulfúrico) basta para inhibir la precipitación de carbonatos, por abundante que sea el carbono en la atmósfera.

Ahora bien, ¿fue Meridiani Planum una playa oceánica, o la ribera de una laguna? Aquí volvemos a encontrar el debate sobre la situación de las líneas de costa de los océanos, mares o lagos marcianos. En 1997 se propuso que la línea de costa de Oceanus Borealis pasaba precisamente por Meridiani Planum; pero en 1999, el equipo de James Head, planetólogo de la Universidad de Brown, descartó esta línea porque su cota tenía desniveles de hasta 2.000 metros. Sin embargo, en 2003 el argumento inicial ha sido retomado por un joven científico español especialista en Marte, Alberto Fairén, con nuevos datos como la cartografía de los canales, que se interrumpen precisamente en esta zona. Fairén ha propuesto que Oceanus Borealis duró casi mil millones de años, desde 4.400 hasta unos 3.500 millones de años, y que Meridiani Planum fue una de sus playas.

En la Conferencia Lunar y Planetaria celebrada en Marzo de 2004, el director científico de la misión Mars Exploration Rovers, Steven Squyres, proclamó que el robot Opportunity había aterrizado precisamente en la costa del océano marciano. Si ello se confirma en el futuro, habrá que volver a celebrar a la diosa casualidad como una de las grandes contribuyentes a los hallazgos científicos, ya que el punto de aterrizaje tuvo una desviación de 24 kilómetros con respecto al previsto en el diseño de la misión.

## EL AGUA Y LA VIDA

No está en absoluto demostrado que el agua sea un requisito imprescindible para la vida. Según el astrobiólogo Benton Clark, de la Universidad de Colorado, "el agua no define la vida; es tan sólo un aspecto de nuestro medio ambiente". Todos los líquidos ofrecen interesantes ventajas para los seres vivos: disuelven y movilizan moléculas y permiten las reacciones químicas necesarias para asimilar sustancias del medio. Pero cualquier molécula que sea polar (es decir, que tenga cargas positivas en un extremo y negativas en el otro) es un buen disolvente, y por ello un candidato interesante a servir de líquido biológico. Por ejemplo, el amoníaco, como sabe cualquiera que haya necesitado quitar manchas de grasa. Otro astrobiólogo, Steven Benner, de la Universidad de Florida, afirma que puede concebir químicas vitales que se desarrollen en mezclas de amoníaco y metano, e incluso en ácido sulfúrico (como en el guión de la serie cinematográfica "Alien"). Pero un problema serio del amoníaco es que sólo es líquido a temperaturas inferiores a  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$  (lo que usamos como disolvente es una disolución de amoníaco en agua). Como la velocidad de las reacciones químicas es proporcional a la temperatura, cualquier ser vivo que dependiese del amoníaco tendría un metabolismo tremendamente lento; por ello, no es fácil imaginar la evolución de una biosfera que dependiese del amoníaco. En cuanto a los hidrocarburos (que quizá formen mares en Titán), no son moléculas polares, lo que significa que no son buenos disolventes.

Por estas razones, la búsqueda de vida, al menos en la parte interior del Sistema Solar, se ha convertido en el rastreo del agua. En lo que se refiere a Marte, esta pesquisa ha tenido dos momentos culminantes en el pasado: la misión Viking, en 1976, y el debate sobre los indicios de vida en el meteorito marciano ALH84001 veinte años después. Como es sabido, los experimentos biológicos de los Viking dieron un saldo negativo, mientras que el debate sobre los indicios de vida en el meteorito se ha ido apagando en los últimos años, con resultado también desfavorable a la opción biológica. En este último caso, el argumento decisivo lo proporcionaron los análisis isotópicos, que hallaron en ALH84001 importantes cantidades de carbono 14. Este carbono pesado se forma en la atmósfera terrestre, y es tan inestable que es imposible que provenga de Marte, ya que se habría descompuesto hace millones de años. Esto indicó que al menos una parte, quizá la mayor, de la materia orgánica que contenía el meteorito (en forma de hidrocarburos aromáticos) era un producto de contaminación terrestre.

El último contraataque del grupo de David McKay, de la NASA, que defendía las huellas de vida, se basó en la identidad de forma y tamaño de algunos de los cristales de magnetita del meteorito con los sintetizados por un grupo de bacterias marinas denominadas "magnetotácticas". Se trata de una de las muchas maravillosas estrategias adaptativas que adoptan los seres vivos. Estas bacterias metabolizan

hierro y lo hacen precipitar en su medio interno como magnetita; se cree que utilizan ésta como una brújula interior para orientarse en busca del gradiente óptimo de nutrientes en el fondo marino. Las consecuencias eran realmente abrumadoras: si McKay tenía razón, no sólo demostraba la existencia de vida extraterrestre, sino algo mucho más importante: que toda la vida, en todos sus posibles asideros, utilizaba estrategias idénticas. Si en Marte existían un campo magnético y mares (y aparentemente este planeta poseía ambas cosas hace 4.000 millones de años), las bacterias marcianas desarrollaban una estrategia magnetotáctica. ¿Significaba esto que todas las biosferas experimentaban evoluciones paralelas si el medio físico lo permitía?

Esta bella línea argumental duró solamente unas semanas: el tiempo necesario para que un equipo rival (McKay siempre los tuvo en abundancia) lograra sintetizar magnetitas "magnetotácticas" aplicando fuertes presiones (como las un impacto) a otros minerales de hierro presentes en el meteorito. En realidad, la fuerza del argumento pro-biológico era sólo teórica, porque no tenía en cuenta el contexto: ALH84001 era una piroxenita, una roca formada por el enfriamiento de un magma en las profundidades de la corteza marciana. A no ser que las hipotéticas bacterias marcianas pudiesen sobrevivir en el magma (es decir, a más de 1.000 °C de temperatura) los cristales de magnetita no les hubiesen sido de ninguna utilidad.

Esta derrota parcial no supuso sin embargo la muerte definitiva de la idea. Aunque hoy apenas tiene partidarios, la hipótesis de la vida en el meteorito de Marte no ha influido negativamente en la valoración de este planeta como una posible cuna de otra biosfera en los primeros tiempos de la evolución del Sistema Solar. Muy razonablemente, un exobiólogo se preguntaba, en plena batalla, si alguien podría resolver el problema del origen de la vida en la Tierra con una sola roca de apenas dos kilos que apareciese una mañana en su mesa sin etiqueta de procedencia.

Por lo tanto, mientras esperamos la caída, o el hallazgo, de nuevos meteoritos marcianos (o, aún mejor, las primeras muestras marcianas en laboratorios terrestres), podríamos saludar, como hacía un escritor entusiasmado por la noticia, "...a las infinitas personas, fieras, aves, insectos y bacterias que pueblan las infinitas galaxias... en esta fraternidad cósmica de los átomos". El anuncio de David McKay, que para algunos fue tan solo una serpiente de verano de la NASA, acabó, a través de la creación del National Astrobiology Institute, cambiando la faz de la investigación del Sistema Solar, impulsada por la nueva especialidad de la Astrobiología.

### **¿SEMILLAS DE VIDA A TRAVÉS DEL ESPACIO?**

La simple sospecha de la existencia de microorganismos en una roca procedente de Marte abre a la Biología unas perspectivas abrumadoras, incluso más de

lo que implica la etimología de la palabra "exobiología". Por ejemplo, ¿es tan neutral como parece la expresión "microorganismos marcianos"? ¿No sería mejor emplear el término "microorganismos hallados en Marte"? La distinción no es una sutileza: si rocas de Marte pueden llegar a la Tierra y aterrizar en ella en aceptables condiciones de conservación, ¿qué ha podido impedir a la biosfera terrestre colonizar Marte por medio de este juego de billar interplanetario? Así resucita la vieja idea de la "panspermia", la dispersión de la vida a través del Universo.

Jay Melosh, un especialista en impactos de la Universidad de Arizona, publicó hace algunos años un interesante trabajo con un divertido título de canción folk: *The rocky road to panspermia*, ("El pedregoso camino a la panspermia"). En él proponía algunos originales factores que favorecerían el intercambio de material biológico entre planetas: por ejemplo, al caer sobre un planeta, un asteroide de diez kilómetros de diámetro perfora en la atmósfera un agujero que tarda en cerrarse unos minutos, durante los cuales parte del material fragmentado puede aprovechar para escapar. ¿Cuánto de este material es fecundo, o sea rico en materia orgánica? Desde luego, no el del fondo del cráter, esterilizado por una onda de choque cuya presión puede alcanzar el medio millón de atmósferas; pero sí el material superficial que, expulsado lateralmente, puede mantenerse siempre por debajo de 100 °C, y por lo tanto transportar microorganismos vivos. A la velocidad de escape mínima, este material, fragmentado en bloques de tamaño métrico, atravesaría cien kilómetros de atmósfera en unos diez segundos, empujado por una enorme masa de material estéril a alta temperatura. Según Melosh, los impactos que han creado cráteres de más de cien kilómetros de diámetro han debido expulsar millones de toneladas de rocas con materia orgánica, en bloques protegidos de los rayos cósmicos.

Algunos han propuesto una versión más sutil de la panspermia, en la cual sólo escaparían del campo de atracción terrestre los fragmentos más finos (entre un centímetro y una fracción de milímetro) de la nube de partículas despedida por los impactos; luego, este material podría ser empujado por el viento solar hasta la órbita de Marte y más allá. Hay que reconocer que el camino, además de pedregoso, no es sencillo: con o sin viento solar, queda un viaje de millones de años por el espacio interplanetario, seguido de una caída apenas frenada por una tenue atmósfera. Pero en cualquier caso, ninguna hazaña que una espora terrestre típica no pueda realizar. Estos divertimentos teóricos podrían llegar a ser importantes: si alguna vez encontramos en Marte microorganismos con mecanismos bioquímicos exactamente iguales a los terrestres, deberemos pensar seriamente en esta "neopanspermia". O bien en un solo Modelo Universal de Construcción de la Vida.

Teniendo en cuenta los respectivos valores de las velocidades de escape, (5,0 km/s para Marte, 11,1 km/s para la Tierra) está claro que es mucho más sencillo traer a la Tierra rocas marcianas que al contrario. En este hipotético viaje biológico de Marte a la Tierra jugamos con una biosfera no demostrada pero fácil-

mente exportable. Sin embargo, lo más interesante es la perspectiva histórica: el origen de la vida en nuestro planeta coincidió paradójicamente con el máximo del bombardeo de asteroides que se ha llamado Gran Bombardeo Terminal. Una época, sin duda, de intenso intercambio de material entre los planetas terrestres, en la cual los cuerpos de pequeña masa serían los exportadores óptimos. Y aquí surge la individualidad de Marte, un planeta lo bastante masivo para retener una atmósfera importante (y así tal vez servir de plataforma para una biosfera, aunque precaria) pero al mismo tiempo lo bastante pequeño para no convertirse en un profundo pozo gravitacional.

En último término, y como ha dicho un exobiólogo, lo que necesitamos para tener alguna probabilidad de éxito en la búsqueda de vida fuera de la Tierra es una teoría general de los sistemas vivos. Porque sólo podemos identificar cosas que comprendemos.

## LA HISTORIA DE MARTE

Por todo lo que hemos visto, parece evidente que el agua estuvo presente en la superficie de Marte al principio de la historia del planeta, y también en momentos definidos de su evolución posterior; pero enclaustrada en la corteza durante el resto del tiempo. La historia del agua en Marte se podría sintetizar así:

- 4.500 a 4.000 millones de años: La mayor parte de la atmósfera primitiva del planeta se perdió pronto, tanto a través del escape al espacio propiciado por la escasa gravedad como mediante expulsión en los grandes impactos que crearon las cuencas.
- ¿4.000? a 3.500 millones de años: Construcción de una atmósfera secundaria (de agua y CO<sub>2</sub>) como resultado del vulcanismo en la región de Tharsis. Se genera un campo magnético dipolar, como el terrestre, que contribuye a proteger a la atmósfera de la erosión del viento solar. Ésta es una de las posibles causas de que este periodo gozase de una atmósfera densa, de precipitaciones y probablemente de un mar en la depresión del norte. Los canales más antiguos se generaron entonces. Es el primer Marte azul, la imagen de un planeta acogedor opuesta a la del desierto rojo actual.
- 3.500 a ¿2.000? millones de años: Desaparece el campo magnético. El agua y el CO<sub>2</sub> se pierden en el espacio, pero también se depositan en los casquetes glaciares y (quizá) en algunos depósitos de carbonatos en la corteza.
- En algún momento mal definido en el tiempo (pero probablemente entre - 2.000 y -1.000 millones de años) se producen, a favor de una reanudación masiva del vulcanismo, surgencias catastróficas de agua que inundan las

llanuras ecuatoriales labrando los enormes cauces de inundación y rellenando, quizá por última vez, la cuenca de Oceanus Borealis. Durante este tiempo se genera una atmósfera densa, probablemente efímera.

Durante todos los periodos de pérdida de atmósfera, el hielo (tanto de agua como de CO<sub>2</sub>) cubre buena parte del planeta. No sabemos casi nada de las glaciaciones antiguas; pero se sospecha que pudieron ser muy diferentes a las terrestres, debido a la inestabilidad del eje de giro: como un barco de poca quilla, Marte cabecea mucho más intensamente que la Tierra, pudiendo llegar su eje a inclinaciones de más de 45° (la actual es de 24°, casi idéntica a la terrestre). Cuando está muy inclinado, los polos son los lugares más cálidos y el Ecuador el más frío.

- Se ha propuesto que la última glaciación marciana duró entre hace 2.100.000 y 400.000 años, y que cubrió de hielo el planeta hasta una latitud de 30° (en la Tierra, la correspondiente a Arabia). Si algunos de nuestros antepasados más ilustres, las especies de homínidos erectus, habilis y heidelbergensis llegaron a interesarse por los cielos, no hubiesen encontrado en Marte inspiración guerrera alguna, puesto que hubiesen visto un astro de una brillante blancura: es el Marte blanco, en oposición a la imagen actual del planeta rojo.

## LOS FUTUROS DE MARTE

### ¿Misiones tripuladas?

La exploración del Sistema Solar por robots es cara; la exploración humana, carísima: la factura de un viaje tripulado a Marte asciende al coste de cien misiones robóticas. Entonces, ¿por qué astronautas? ¿Es realmente necesario que dejemos nuestras huellas en Marte? Esta cuestión ha sido debatida intensamente a lo largo de la década de los noventa, porque las dos posturas (exploración robótica, exploración humana), y también la sintética (exploración robótica como fase previa de la exploración humana), tienen parecido número de partidarios entre los defensores de la exploración espacial. Entre los argumentos a favor de la presencia humana en los viajes a Marte se cuentan los siguientes:

- Hay funciones en las que un robot no puede suplir a un científico.
- Los avances tecnológicos colaterales serán mayores en el caso de la exploración tripulada, ya que el mantenimiento de la vida en medios hostiles como son el espacio o la superficie marciana requiere mayores refinamientos técnicos.
- La exploración tripulada promoverá más vocaciones científicas.



- El envío de tripulaciones sería el primer paso para la emigración masiva al Sistema Solar, necesaria para aliviar la crisis demográfica en la Tierra.

- El público necesita héroes, personas que sean admirables no por su capacidad muscular o por su atractivo físico sino por su destreza técnica y su capacidad científica.

- Nuestra tendencia a viajar a todos los lugares adonde nuestra tecnología nos ha permitido llegar.

Es bastante evidente que ninguno de estos motivos resulta crucial: los robots y la tecnología mejorarán, con o sin viajes tripulados; hay muchas formas menos costosas (por ejemplo, mejorar las condiciones de trabajo del profesorado en la enseñanza secundaria) de estimular las vocaciones científicas; no hay emigración interplanetaria que pueda compensar el nacimiento de 250.000 nuevos jóvenes *Homo sapiens* cada día (muchos más a medida que nos adentremos en el futuro); y en cuanto al culto a los héroes y la compulsión a viajar, probablemente no forman parte de las grandes preocupaciones del grueso de la humanidad actual. Éste será uno de los debates que sobre la exploración del Sistema Solar deberá ser planteado, dentro de los modelos alternativos de sociedad, a lo largo del presente siglo.

### **El futuro más lejano: ¿Terraformación o autocontención?**

Marte es hoy un mundo helado, donde la vida organizada parece imposible; sin embargo, todo lo que hemos aprendido en el curso de nuestra exploración del planeta indica que en otras épocas, quizás incluso recientes, su clima fue templado. ¿Podría este clima ser restaurado? ¿Sería posible devolver a la superficie la atmósfera y la hidrosfera, hoy en parte congeladas en los polos y el subsuelo? ¿Podría Marte llegar a ser habitable por plantas terrestres y eventualmente por seres humanos? La respuesta técnica a estas preguntas se llama "terraformación": la transformación del ambiente de un planeta para hacerlo habitable por la fauna y flora terrestres. De todos los mundos que hemos visitado en nuestros primeros viajes por el Sistema Solar, tan sólo Marte es susceptible de terraformación. Nuestro conocimiento del planeta es aún tan imperfecto que nadie sabe si la idea es realmente factible, pero su simple enunciado la ha hecho ya enormemente popular; pues si resultase realizable, la humanidad habría ganado un segundo planeta donde vivir. Sin embargo, el tema tiene implicaciones muy diversas. Aunque materialmente es nada más que ingeniería planetaria, las consecuencias filosóficas y éticas son profundas: ¿Tiene el ser humano derecho a subvertir el ambiente de un planeta?

Técnicamente, el problema se puede descomponer en dos: uno, hacer Marte habitable por las plantas terrestres, y dos, convertirlo en un hábitat para el hombre. La distinción tiene su base en que las necesidades fisiológicas de plantas y animales son muy distintas: las primeras pueden vivir con una presión atmosférica mínima de

diez milibares (no mucho mayor que la marciana actual, que llega a los ocho), pero necesitarían un mínimo de un milibar de oxígeno, que es mucho más de lo que existe en Marte. En cuanto a los animales, somos mucho más exigentes: no nos conformamos con menos de una presión de aire de quinientos milibares, de los que al menos ciento treinta milibares deben ser de oxígeno y trescientos de nitrógeno. En cuanto a temperaturas, flora y fauna tenemos parecidos gustos: sólo nos sentimos cómodos con temperaturas medias entre 0 °C y 30 °C (Tierra, 15 °C; Marte, -55 °C). Teniendo en cuenta lo primero, está claro que convertir a Marte en habitable para las plantas es una tarea mucho más sencilla que hacer del planeta un segundo hogar para la humanidad.

El punto de arranque del proceso de terraformación es calentar el planeta para licuar sus reservas subterráneas de agua y CO<sub>2</sub>. De los sistemas propuestos, el único que parece verosímil es aumentar el efecto invernadero inyectando en la atmósfera marciana algún gas que retenga las radiaciones infrarrojas. De éstos, los más eficientes parecen ser los clorofluorocarbonos, los tristemente célebres causantes del agujero de ozono en la Tierra (naturalmente, habría que usar una variante que no destruyese el futuro ozono). El proceso sería efectivo con un ritmo de producción semejante al que hubo en la Tierra antes de la prohibición de estos gases. Al elevarse la temperatura, se fundiría el CO<sub>2</sub> de los polos y el suelo; mucho después, el hielo de agua. El dióxido de carbono y el vapor de agua pasarían a la atmósfera, incrementando el efecto invernadero. Los cauces secos volverían a ser valles fluviales, y hasta Oceanus Borealis podría volver a llenarse de nuevo.

¿Durante cuánto tiempo debería estar funcionando este proceso para que Marte fuese habitable por vegetales? Un cálculo (que se reconoce muy impreciso) resulta en un período mínimo de cien años para la fusión del CO<sub>2</sub> más superficial. En ese momento, Marte tendría una atmósfera de CO<sub>2</sub> con una presión de dos bares (o sea, el doble de la terrestre), y algo de oxígeno y agua; pero la fusión del hielo más profundo podría requerir plazos del orden de cien mil años. Desde el momento en que la presión atmosférica llegase a ser de un tercio de la terrestre, los astronautas podrían prescindir de sus trajes espaciales y usar sólo un aparato para respirar como los que llevan los submarinistas. Las plantas producirían oxígeno como subproducto de la fotosíntesis; pero el rendimiento de este mecanismo, la única forma conocida de cambiar la composición de la atmósfera de un planeta, es extremadamente lento (para las prisas humanas): en el mejor de los casos, la atmósfera de Marte sólo sería respirable por el hombre al cabo de cien mil años. Se especula, por supuesto, que el empleo de organismos desarrollados especialmente mediante ingeniería genética podría acortar este plazo. Sin embargo, el techo del proceso no es la eficacia de la fotosíntesis, sino la tendencia del oxígeno producido a combinarse de nuevo con la materia orgánica, oxidándola. En la Tierra, sólo el enterramiento rápido (por sedimentos) de la materia vegetal impide que ésta se

oxide. En Marte, haría falta algo semejante para que el oxígeno tuviese ocasión de acumularse en la atmósfera.

Una de las muchas incógnitas del proceso es si la atmósfera y la hidrosfera producidas en la terraformación serían estables. En teoría, el principal mecanismo de degradación de una atmósfera de dos bares de CO<sub>2</sub> es la precipitación de carbonatos, como el carbonato cálcico, CaCO<sub>3</sub>. Pero, afortunadamente para los ingenieros planetarios, este mecanismo tampoco es rápido: los minerales necesitan al menos diez millones de años para volver a capturar la atmósfera. Sólo si el ser humano durase tanto tiempo en Marte tendría que buscar algún mecanismo para devolver a la atmósfera el CO<sub>2</sub> secuestrado en los carbonatos.

Por último, queda el debate ético: ¿Tiene la humanidad derecho a romper en su beneficio el equilibrio climático de otro planeta? ¿A introducir en él especies intrusas? ¿Sólo si el planeta es absolutamente estéril? ¿Y si no lo es? ¿Tienen derechos las bacterias? Cuando tomamos antibióticos las matamos a millones y nadie llama a eso un crimen; pero en el caso de Marte (y suponiendo que existan) no se trataría simplemente de bacterias, sino de otra biosfera. ¿Y si quedase en Marte solamente vida residual en hábitats extremos, como el interior de rocas profundas en algunas zonas volcánicas? ¿Se podría llamar a esto biosfera? Muchos opinan que aun en este caso la importancia de una vida nativa surgida con independencia de la terrestre (salvo si se demostrase que la panspermia es correcta) sería tan grande que estarían justificadas las mayores precauciones para evitar el riesgo de exterminarla.

En el extremo de estas posturas conservacionistas se encuentran ecologistas radicales como Jorge Riechmann, que en su libro "Gente que no quiere viajar a Marte" sostiene que el hombre moderno debe "autocontenerse", porque no todo lo que es tecnológicamente factible es también deseable. Intuye que en estos planes de huida del planeta Tierra subyace un desprecio por su conservación. Sospecha que no es la curiosidad científica el motor principal de la exploración del Sistema Solar, sino la necesidad de nuevas inversiones del capitalismo industrial, junto con el reto de demostrar que no hay límites al progreso económico y tecnológico.

Sin duda, un debate que va más allá de la ética y que arraiga en los distintos modelos de sociedad que compiten en este principio de siglo. Nadie tiene el privilegio de permanecer neutral en esta batalla; tampoco la Ciencia básica, esta vieja institución antes encerrada en una torre de marfil y hoy abierta a todos los vientos. Por mucho que tenga que ofrecer sobre la historia de un planeta fascinante.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Anguita, F. Historia de Marte: mito, exploración, futuro. Planeta, 1998.
- Beatty, J.K., Peterson, C. y Chaikin, A. (Eds.). The new Solar System. Sky Pub. Corp. y Cambridge University Press, 1999.
- Carr, M. The surface of Mars. Yale University Press, 1981.
- Carr, M. Water on Mars. Oxford University Press, 1996.
- Cattermole, P. Mars. Chapman & Hall, 1992.
- De Pater, I. y Lissauer, J. Planetary Sciences. Cambridge University Press, 2001.
- Hartmann, W.K. Moons and planets. Wadsworth, 1990.
- Kargel, J.S. y Strom, R.G. Cambio climático global en Marte. Investigación y Ciencia, 244, 44-53, 1997.
- Kieffer, H. H. (Ed.) Mars. University of Arizona Press, 1992.
- Riechmann, J. Gente que no quiere viajar a Marte. Catarata, 2004.
- Varios autores. Mars. Nature, 412, 207-253, 2001.

**FIGURAS**

1. La distribución por edades (en millones de años) de las superficies de la Luna, Marte y la Tierra. Casi el 90% de nuestro satélite está formado por rocas muy antiguas, y lo contrario sucede en nuestro planeta. Marte es un caso intermedio.
2. El domo de Tharsis. Con 5.000 km de diámetro, esta gran cúpula de 10 km de altura es un rasgo de envergadura planetaria, que alberga grandes volcanes (O, Olympus Mons; A, Arsia Mons; P, Pavonis Mons; AS, Ascreaus Mons; AL, Alba Patera) y fallas (VM, Valles Marineris; TF, Tempe Fossae; AF, Alba Fossae).
3. Apollinaris Patera (recuadrado) y, al sur, el cráter de impacto Gusev, de 300 km de diámetro.
4. Comparación entre los caudales (en m<sup>3</sup>/s) supuestos para los grandes canales de inundación marcianos (Kasei y Ares Vallis) y los mayores ríos terrestres, Amazonas y Mississippi.
5. Warrego Vallis, una red fluvial marciana semejante a las terrestres. Las flechas señalan antiguos cráteres de impacto erosionados por las corrientes.
6. Maumee Vallis: desembocadura en un océano hoy desecado.

7. Este escarpe de sólo medio metro de altura, fotografiado por el robot Opportunity en Meridiani Planum, está formado por rocas salinas depositadas cuando Oceanus Borealis se desecó.
8. Estos planos curvados y truncados se interpretan como las marcas dejadas en la superficie de los sedimentos de Meridiani Planum sedimentado por corrientes de flujo y reflujos.
9. Conjunto de esférulas de hematitas fotografiadas por Opportunity. Fueron depositadas por aguas ácidas y ricas en hierro, como las de Río Tinto.
10. El Río Tinto, en Huelva. Sus ácidas aguas tienen una gran capacidad de disolver hierro.