

# FUNDAMENTOS CONCEPTUALES Y DIDÁCTICOS

## DEL CÁLIDO VENUS A LOS HELADOS COMETAS, PASANDO POR LAS GUERRAS MARCIANAS: ALGUNAS CLAVES DEL SISTEMA SOLAR

*From hot Venus through Martian wars to icy comets: Some keys of the Solar System*

Francisco Anguita (\*) y Montserrat Domingo (\*\*)

### RESUMEN

*En este trabajo planteamos algunos temas básicos en Ciencias Planetarias, organizados en torno a varias cuestiones: ¿Cuáles son las variables que determinan la estructura final de un sistema planetario? ¿Qué diferencias y similitudes de fondo existen entre planetas y estrellas? ¿Qué podemos decir sobre las fuentes de la energía de los planetas? Y, ¿qué nos dicen las historias climáticas y térmicas de los planetas terrestres? ¿Qué procesos condicionan el paisaje de un cuerpo planetario? Y, por último, ¿qué significa la vida en el contexto de las Ciencias Planetarias?*

### ABSTRACT

*This work deals with some basic topics in Planetary Sciences, shaped as a list of questions: Which are the variables determining the final structure of a planetary system? Which are the basic differences, and similarities, between planets and stars? What do we know on the energy sources of a planet? Which lessons are to be learnt from the climatic and thermal stories of terrestrial planets? Which processes frame the planetary landscapes? And lastly, which is the role of life in a planetary context?*

**Palabras clave:** Sistema Solar, Geología planetaria, Planetología comparada

**Keywords:** Solar System, Planetary Geology, Comparative Planetology

### INTRODUCCIÓN

Un profesor de Química que conocimos hace años utilizaba la expresión “residuo seco” para referirse a la síntesis última y definitiva de un concepto. Es precisamente ese tipo de síntesis el que querríamos ofrecer en este artículo sobre nuestro sistema planetario. Por desgracia, el Sistema Solar es aún un terreno apenas explorado, como lo prueba el hecho de que cada misión espacial proporcione un número elevado de sorpresas. El residuo seco sobre el Sol y sus satélites deberá esperar a algún otro siglo: en este momento, cualquier síntesis sobre este conjunto de cuerpos será cualquier cosa menos definitiva. Algo no tan ambicioso pero más factible es sugerir pistas sobre conceptos muy amplios y que tengan una vertiente didáctica: es decir, que sean utilizables en clase, por ser muy visuales, por prestarse a análogos poderosos o por alguna otra circunstancia. Hay docenas de libros sobre el Sistema Solar, pero no es tan fácil encontrar catálogos de dudas, los mapas de esas regiones mal exploradas en las que se debaten ahora mismo los científicos planetarios. Navegar por estas aguas inciertas sí es un empeño realizable, que for-

mularemos bajo la forma de seis preguntas, dirigidas a definir lo que sabemos y lo que ignoramos sobre:

- La relación entre las propiedades de una nebulosa en contracción y el posible sistema planetario resultante.
- Las características fundamentales de estrellas y planetas.
- Las interacciones entre los miembros de una familia planetaria.
- Los tipos, y duración, de la energía que encierran los planetas.
- La relación entre energía producida y liberada por los cuerpos planetarios, y sus ritmos de producción y emisión.
- La interacción entre las dinámicas interna y externa (incluyendo el clima) en un planeta.
- La relación entre la evolución planetaria y la posible aparición de vida.

(\*) Departamento de Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid. E-mail: [anguita@geo.ucm.es](mailto:anguita@geo.ucm.es)

(\*\*) Departament de Geografia, Facultat de Lletres, Universitat Autònoma, 08193 Bellaterra (Barcelona). E-mail: [montserrat.domingo@uab.es](mailto:montserrat.domingo@uab.es)

### Primera pregunta

## ¿A QUÉ SE DEBE QUE EL SISTEMA SOLAR TENGA DETERMINADAS CARACTERÍSTICAS, Y NO OTRAS?

*Lo que sabemos sobre el origen de los sistemas planetarios*

Hasta este momento, no ha habido necesidad de dudar de que los sistemas planetarios se originen a partir de una nebulosa que se contrae, una teoría astronómica hija del Siglo de las Luces. Los datos recientes que apoyan esta idea son:

Muchas estrellas jóvenes están envueltas en nubes de gas y polvo con forma de disco.

En algunos de estos discos hay zonas *limpias*, como si cuerpos en formación estuviesen barriendo el material suelto; mientras que en otras se detectan caídas de objetos hacia la protoestrella. Todos estos fenómenos coinciden con los predichos en la teoría nebular.

Normalmente, la contracción de nebulosas produce sistemas múltiples de estrellas; sólo una de cada tres veces, estrellas aisladas como el Sol. Contra lo que se creía hace poco, tanto las estrellas solitarias como las agrupadas pueden tener planetas a su alrededor.

*Lo que, en cambio, desconocemos sobre nuestros orígenes*

¿Qué características de una nebulosa permiten la génesis y persistencia de planetas en órbita de la estrella?

¿Por qué los 113 sistemas exoplanetarios<sup>1</sup> descubiertos hasta ahora no se parecen en su distribución de masas al Sistema Solar, sino que constan de uno o más planetas gigantes muy cercanos a la estrella? [*Hot Jupiters* o “planetas jovianos periestelares”]

Si hay planetas de tipo terrestre en algunos, en muchos, o incluso en todos esos sistemas exoplanetarios.

¿Serán los gigantes gaseosos y los de roca y metal los dos únicos tipos de planetas posibles en el Universo?

*Y algunas sugerencias interesantes, aún por comprobar*

El que se formen estrellas aisladas o agrupadas se ha relacionado con la velocidad de rotación de la nebulosa (Figura 1).

Si la pequeña muestra de exoplanetas conocidos es representativa, las nebulosas con más elementos pesados tienen más probabilidades de dar lugar a estrellas con planetas.

Una estrella evaporaría la atmósfera de un planeta gaseoso muy próximo en pocos millones de años (Ma). Por ello se piensa que estos planetas han debi-

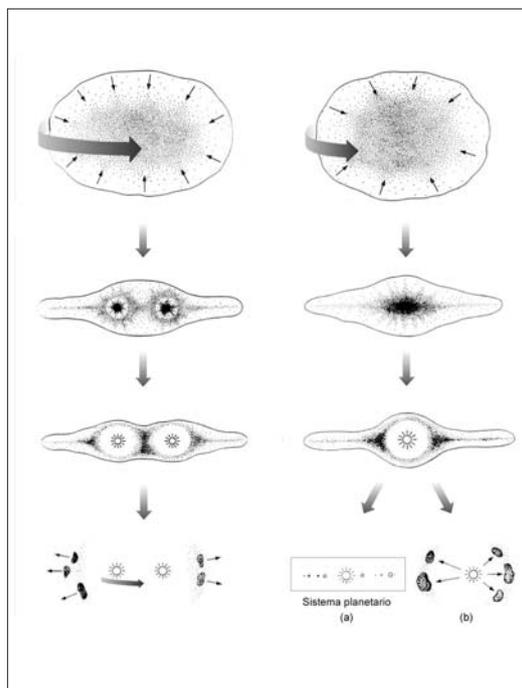


Fig. 1. Ilustración de William Hartmann de las condiciones teóricas de formación de un sistema de planetas, que sólo sería posible cuando la nube protoestelar girase lentamente (derecha) y el viento solar no dispersase el material en órbita (caso b). En todos los otros casos (como en las nebulosas de giro rápido, izquierda, que darían lugar a estrellas múltiples) no se formarían planetas. El esquema, no tan antiguo (1993) ha quedado desbordado por la realidad de los sistemas exoplanetarios.

do de migrar desde órbitas más alejadas, siguiendo trayectorias en espiral al perder energía por rozamiento con el polvo residual de la fase nebular. Si Júpiter y sus compañeros no han hecho igual se debe quizás a que la nebulosa solar quedó limpia rápidamente.

Los planetas jovianos periestelares parecen destinados a caer sobre la estrella. Este *canibalismo* estelar está apoyado por el exceso en algunas estrellas de isótopos (<sup>6</sup>Li) típicos de planetas.

Al migrar, los planetas gigantes absorberían o expulsarían de sus órbitas a los planetas menores a los que se acercasen.

Esto podría explicar el descubrimiento reciente de los llamados *planetas libres*, que no giran en torno a ninguna estrella; pero también podría tratarse del resultado del colapso de pequeñas nebulosas. En algunas zonas de nuestra galaxia, los planetas abundan más que las estrellas. (Figura 2) ¿Será esta estadística local aplicable al Universo en su conjunto?

(1) Como observa José Antonio Caballero en un artículo de este mismo número, el término “extrasolar” significa literalmente fuera del Sol. Como no hay planetas dentro del Sol, el término “exoplanetas” es preferible.

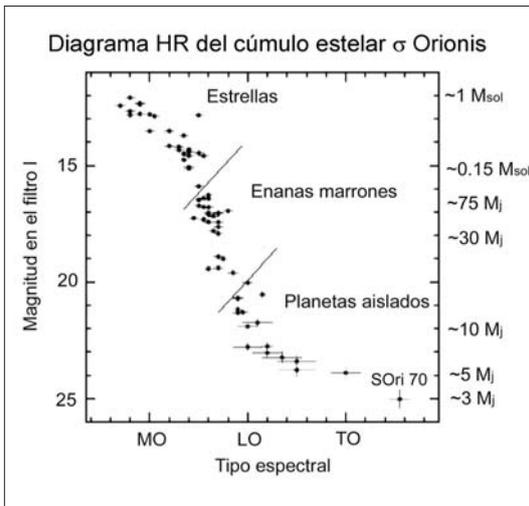


Fig. 2. Estrellas, enanas marrones y planetas en la nebulosa de Orión. En Zapatero (2002).

Además de los dos tipos solares de planetas de nuestro sistema, se han propuesto planetas de hierro, o de carbono, o también oceánicos. Éstos tienen dos posibles orígenes: un planeta de hielo (como Urano o Neptuno) migratorio, que se funde cerca de la estrella, o bien un planeta un poco mayor que la Tierra, con más capacidad de retener volátiles en su superficie (Figura 3).

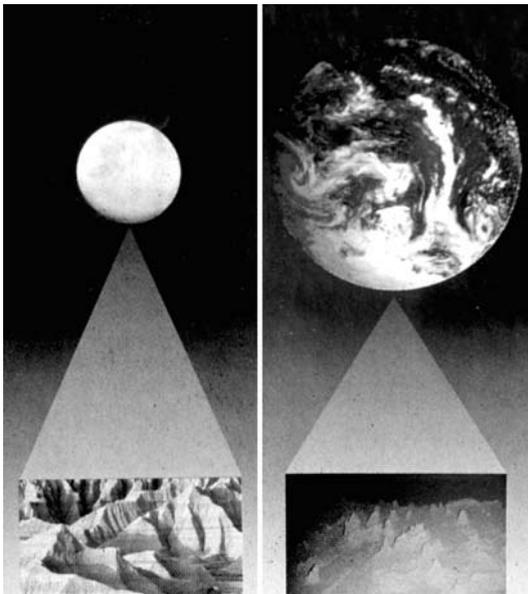


Fig. 3. Un planeta con menor masa que la Tierra (izquierda) pero situado a la misma distancia del Sol tendría muy pocos volátiles, por lo que sería un lugar desértico; además, su interior se enfriaría más deprisa, con lo que su litosfera sería más rígida y podría soportar montañas más altas. Por el contrario, un planeta con mayor masa que la Tierra (derecha) tendría más volátiles en su exterior y más calor en su interior: resultado, un planeta oceánico de relieves (sumergidos) muy suaves, y prolongada actividad tectónica y volcánica. Modificado de Lissauer (1999).

## Segunda pregunta ¿TIENEN EL SOL Y LOS PLANETAS UNA DINÁMICA COMPARABLE?

*Lo que sabemos sobre estructura interna y energía de estrellas y planetas*

El Sol produce energía por fusión nuclear y la emite por radiación en su zona interna y por convección en la externa. (Figura 4)

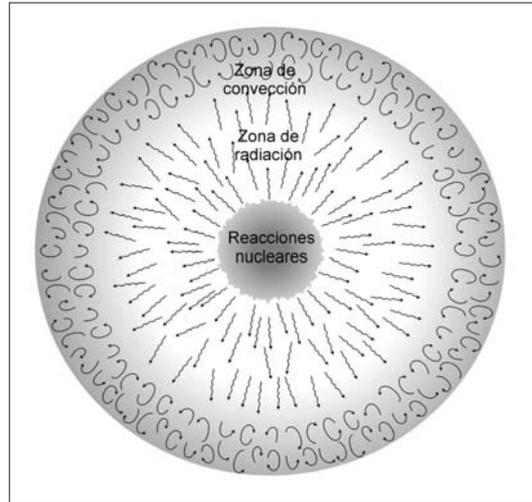


Fig. 4. Un esquema del interior del Sol. El calor generado en el núcleo es transferido primero por radiación y luego por convección. La materia del núcleo solar está tan caliente que cada partícula comunica su energía térmica a las contiguas, sin tiempo para generar corrientes. La convección se produce sólo en la parte exterior de la fotosfera.

Los planetas albergan tres tipos de energía: de acreción (de los impactos *fundacionales*), radiactiva, y mareal (por la deformación interna causada por la atracción de los cuerpos vecinos). Los planetas gigantes son esencialmente máquinas convectivas movidas por energía térmica generada en su formación, mientras que en los terrestres se discute la aportación de cada fuente. Algunos satélites son *máquinas mareales*, que obtienen su energía de los planetas a los que orbitan.

La convección es la forma de transmisión de energía que domina abrumadoramente en la Tierra. Su única zona líquida interior, el núcleo externo, produce un campo magnético precisamente por convección. En sus zonas sólidas (el núcleo interno y el manto), la convección se ha detectado por el alineamiento de los minerales, que se refleja en la anisotropía de las ondas sísmicas. La única zona no convectiva es la litosfera, donde el calor se transmite por conducción. (Figura 5)

Estrellas y planetas se asemejan en contar con un almacén profundo de energía que es canalizada al exterior, en parte por convección. Este gradiente térmico impide el colapso de las estrellas a pesar de su

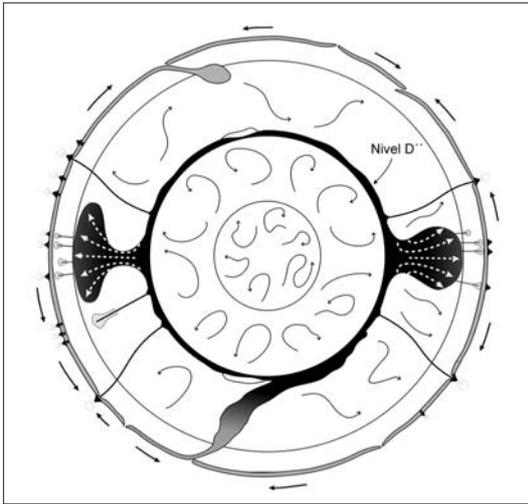


Fig. 5. Un esquema moderno del interior de la Tierra, dominado por la convección desde el núcleo interno hasta el manto, donde los penachos térmicos de diferente envergadura compensan la subducción hasta el nivel D'', en la base de aquél. Esta representación no es tan diferente a la de Athanasius Kircher (hacia 1650) que figura en la portada de esta revista. En Courtillot et al. (2003).

baja densidad media, y es la causa de los relieves planetarios (tipo orógenos, como el Himalaya, o tipo cúpula térmica, como el domo de Tharsis, en Marte). En la Tierra, algunos de estos relieves (como el triángulo de Afar, en África Oriental) se originan a partir de anomalías térmicas que surgen de la base del manto (Panning y Romanowicz, 2004).

La gravedad es la otra fuerza que controla la evolución de estrellas y planetas. Impide que el gas de las fotosferas estelares se disperse en el espacio, y constituye el flujo de retorno en los planetas convectivos (subducción, Figura 5).

#### Lo que ignoramos sobre la energía planetaria

El origen de la energía interna de la Tierra. La opinión mayoritaria es que se trata de energía causada por fisión de los isótopos radiactivos  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ . Sin embargo, los tres primeros se concentran en la corteza, que es un nivel pasivo en la dinámica terrestre; y el núcleo, que es la capa más caliente, sólo podría contener pequeñas cantidades de

$^{40}\text{K}$ , pero también podría carecer totalmente de isótopos radiactivos (ver Kargel y Lewis [1993] para un debate sobre este tema).

Las incógnitas sobre la energía producida por otros planetas son, lógicamente, mucho mayores. Como los isótopos productores de calor se concentran en las rocas, la energía radiactiva sólo podría ser importante en los planetas terrestres.

#### Sugerencias interesantes a comprobar

La incógnita sobre la distribución de los isótopos radiactivos en el interior de la Tierra ha dado lugar a una postura, minoritaria, según la cual la mayor parte de la energía aún almacenada en el interior de la Tierra es calor fósil conservado desde su origen.

Un dato curioso sobre este debate se puede llevar fácilmente al aula. Dados los radios del núcleo externo (3.470 km) e interno (1.250 km), una simple calculadora de bolsillo nos permite apreciar lo poco que se ha enfriado la Tierra a lo largo de su historia: el volumen del núcleo interno, que se supone solidificado a partir de la gran catástrofe térmica que formó el núcleo líquido, supone menos del 5% del volumen total de éste. Esta lentísima cristalización implicaría que el núcleo retiene casi toda su energía original.

#### Tercera pregunta

### ¿SON COMPARABLES LAS HISTORIAS CLIMÁTICAS E HIDRÁULICAS DE LOS PLANETAS TERRESTRES?

*De estos datos sobre el aire y el agua estamos razonablemente seguros*

Los planetas terrestres dotados de atmósfera presentan los datos térmicos que indica la tabla I:

De esta tabla podemos deducir que la temperatura de un planeta depende, mucho más que de su distancia al Sol, de la densidad de la cubierta nubosa (que en Venus rechaza casi todo el calor solar) y de la cantidad de gases de invernadero en su atmósfera.

La Tierra está atravesando un periodo interglacial, como lo atestigua el retroceso de los glaciares que hasta hace 20.000 años estuvieron cubriendo buena parte de sus latitudes medias.

Nuestro planeta tiene un volumen de agua que cubriría todo el globo (si éste fuese una esfera sin re-

| Planeta                                   | Distancia (UA) | Radiación solar ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | Albedo | Temperatura Teórica | Temperatura real (media) | Efecto invernadero |
|---|----------------|--|--------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| Venus                                     | 0,7            | 2620   | 0,76   | -44                 | +477                     | 521                |
| Tierra                                    | 1              | 1368   | 0,30   | -18                 | +15                      | 33                 |
| Marte                                     | 1,5            | 589  | 0,25   | -63                 | -55                      | 8                  |
| <i>Temperaturas en grados centígrados</i> |                |  |        |                     |                          |                    |

Tabla I. Datos climáticos de los planetas terrestres

lieve) con un océano universal de 3.000 m de profundidad [Equivalente Global de Agua, o EGA = 3.000 m]. Su relación D/H (deuterio / hidrógeno) es de  $1,6 \cdot 10^{-4}$  (o sea, 160 átomos de deuterio en cada millón de hidrógenos).

*Sobre esto otro, en cambio, nadamos en un mar de dudas*

Durante el 15% de su historia, la Tierra ha experimentado climas glaciales, con parte de su hidrosfera helada sobre sus continentes. No se conoce la causa de las glaciaciones, un problema acentuado por su distribución en el tiempo: casi todas las glaciaciones tuvieron lugar en los últimos 1.000 Ma, cuando el Sol estaba emitiendo más energía, a medida que su núcleo almacenaba más helio.

Marte también parece tener dos tipos de climas, uno (el actual) gélido y con una atmósfera residual, y otro fresco y con atmósfera densa. No se sabe cuántas veces, ni con qué duración, el planeta ha gozado de este segundo clima, el tiempo de los canales.

El origen de los océanos terrestres es menos sencillo de lo que parece. Según las hipótesis clásicas de formación de los planetas, en la zona interna del Sistema Solar debía de existir muy poca agua (muy pocos volátiles, en general).

¿Tuvieron también Venus y Marte océanos? Sus relaciones D/H son respectivamente 75 y 5 veces mayor que la terrestre. Como el deuterio, por su mayor masa, se evapora con más dificultad que el hidrógeno, estos coeficientes han sido interpretados por algunos especialistas como indicios de océanos evaporados masivamente. Otros argumentan, sin embargo, que el agua de Venus pudo evaporarse a

medida que surgía del interior (si es que existió en su interior).

Respecto a Marte sí está creándose un cierto consenso sobre la existencia de un pequeño mar, EGA = 156 m. El mayor inconveniente, la ausencia de carbonatos, parece resuelto con el reciente hallazgo de sulfatos, que implican que el agua marciana era muy ácida. Un simple 0,1% de  $\text{SO}_2$  disuelto inhibe la precipitación de carbonatos.

*Algunas ideas interesantes*

Marte podría estar atravesando un periodo interglacial, a juzgar por la mayor extensión de los depósitos glaciares que rodean a uno de sus casquetes glaciares (Figura 6). Sería interesante poder comprobar si el clima marciano y el terrestre han evolucionado en paralelo.

La mejor hipótesis para explicar la alternancia climática en Marte relaciona los periodos húmedos con épocas de vulcanismo intenso, que reconstruyen la atmósfera extrayendo volátiles del interior (Baker et al., 1991; Baker, 2001). (Figura 7).

Algunos climatólogos planetarios han querido aplicar también esta hipótesis a Venus, con el inconveniente de que casi toda la superficie de este planeta está cubierta por lavas recientes, que han borrado cualquier posible huella de climas antiguos.

A finales del siglo XX se puso de moda la hipótesis de que eran los cometas (~50% de agua) los que habían traído el agua a la Tierra. El problema es que, puesto que tienen que obedecer a la Segunda Ley de Kepler, los cometas deben de chocar a altísimas velocidades con la Tierra o sus vecinos, una situación más adecuada para expulsar volátiles que

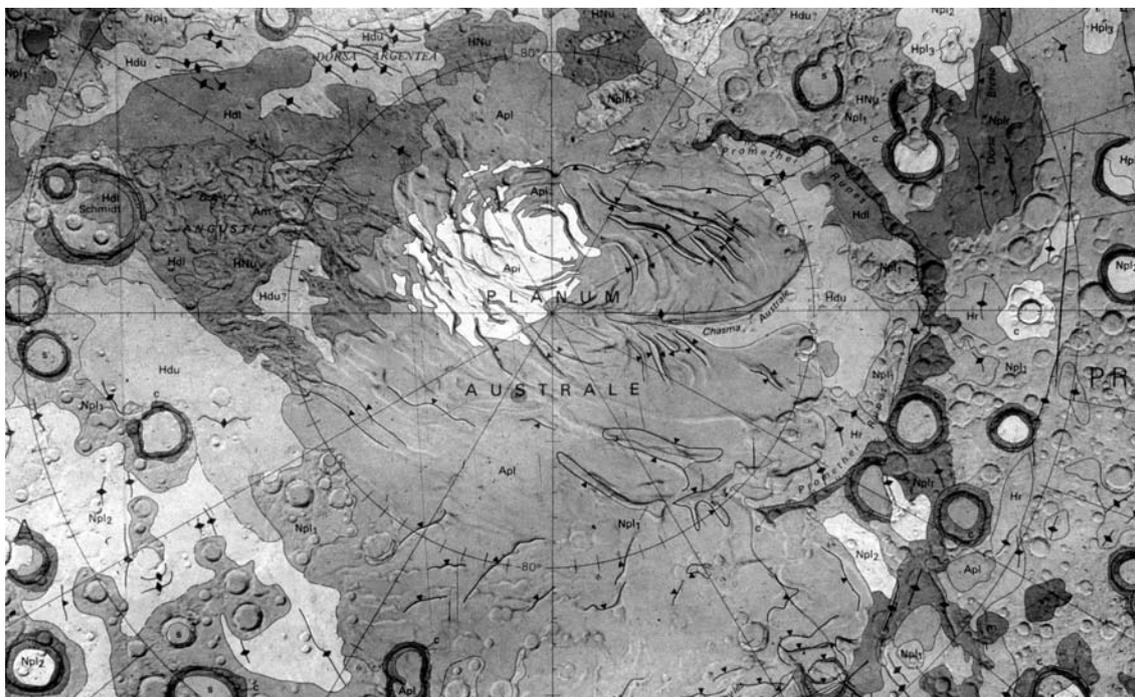


Fig. 6. Extensión cubierta por los glaciares en torno al Polo Sur de Marte: también los glaciares marcianos están retrocediendo.

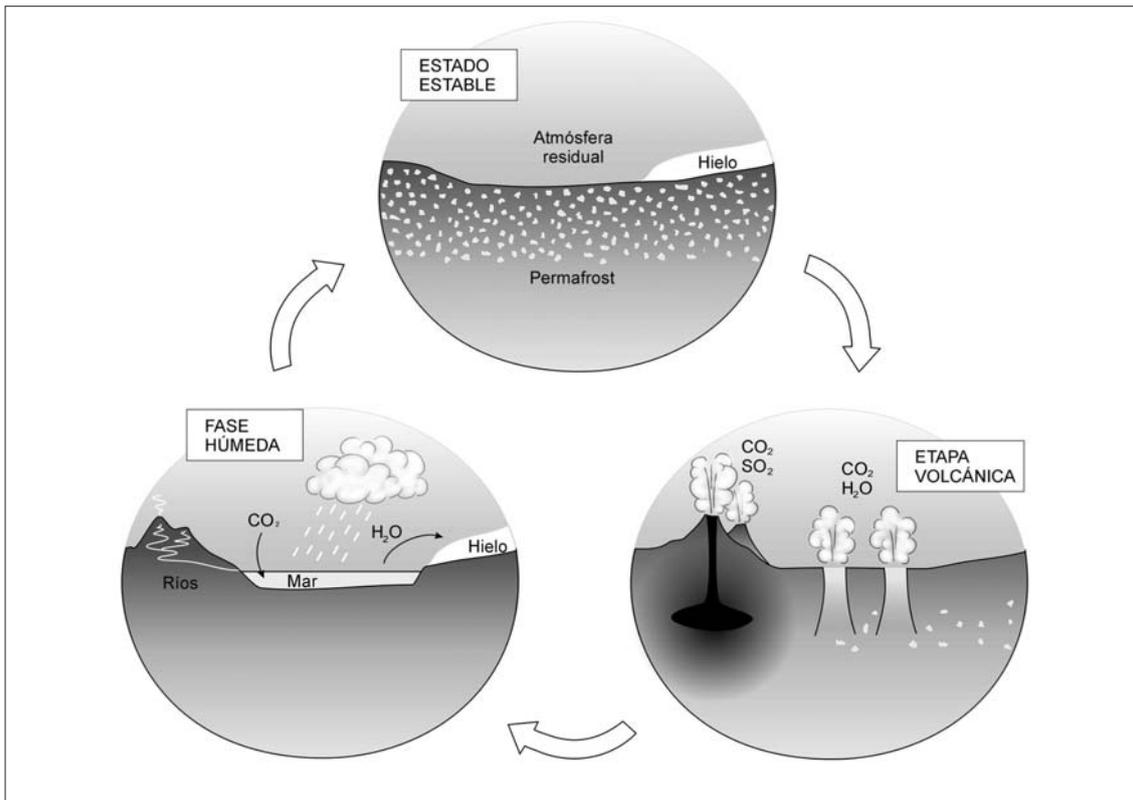


Fig. 7. El ciclo volcánico-climático marciano, según Victor Baker. Las épocas frías y secas como la actual (a) podrían dar paso a otras húmedas y menos frías si se produjesen erupciones volcánicas masivas (b), que expulsasen a la atmósfera gases de invernadero y fundiesen el permafrost. El efecto invernadero desencadenado permitiría precipitaciones, escorrentía, y lagos o mares (c). Pero el clima volvería a enfriarse cuando la nueva atmósfera comenzase a perderse en el espacio: el océano se sublimaría y se condensaría en los casquetes polares y, de nuevo, en el permafrost. Modificado de Baker (2001)

para depositarlos. Además, la relación D/H de los cometas conocidos es el doble de la terrestre.

Ante esta dificultad, otros científicos planetarios piensan en aguadores más próximos, como asteroides, que aunque con menor contenido de agua (entre 10 y 0,5%), chocarían a velocidades menores debido a sus órbitas más parecidas a las de los planetas (~ alcances de autopista, en vez de conductores kamikaze).

#### Cuarta pregunta ¿Y LAS HISTORIAS TÉRMICAS?

Algunas cosas que sabemos sobre cómo los planetas emiten su energía

La Tierra produjo más rocas magmáticas durante tres periodos bien definidos de su historia, a los 2.700, 1.900 y 1.200 Ma (Figura 8).

En la actualidad, libera su energía por convección de su interior, que arrastra la capa rígida externa o litosfera. Este movimiento explica el magmatismo y las deformaciones que vemos en las rocas de la corteza.

El 90% de la superficie de Venus está cubierto por lavas emitidas en una etapa corta y relativamen-

te reciente (quizá hace tan solo 500 Ma) de su historia. Sobre estas lavas (que están rotas y plegadas) han seguido acumulándose productos volcánicos, aunque a un ritmo menor.

En Marte, al contrario que en Venus, encontramos vulcanismo muy antiguo coexistiendo con otro reciente. Algunos edificios de la provincia volcánica

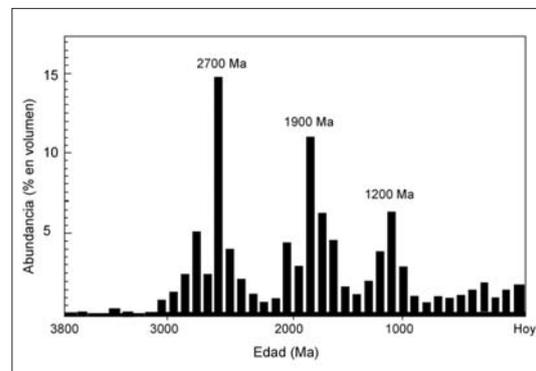


Fig. 8. La producción de rocas ígneas (o sea, las precedentes de la consolidación de magmas) en el interior del planeta no sigue una ley exponencial, sino que se agrupa en torno a tres máximos. En Condie (1998).

más importante, el domo de Tharsis, han podido ser activos durante miles de millones de años.

Ni en Venus ni en Marte existen huellas de un reciclaje actual de la litosfera.

#### Incógnitas sobre las historias térmicas

La causa de los máximos térmicos en la Tierra es uno de los problemas clásicos de la Geología. Incluye uno de los grandes *misterios* de la historia del planeta: la causa de que la mayor parte de los continentes surgiesen en un corto intervalo de tiempo, entre 2.700 y 2.500 Ma.

Por el contrario, el episodio térmico global de Venus es un problema muy reciente, ya que no se descubrió hasta mitad de los años 90, en las imágenes de la sonda *Magallanes* de la NASA. Algunos planetólogos se preguntan si este episodio de magmatismo masivo podría ser el último de una serie, como parece haber sucedido en nuestro planeta.

No hay pruebas a favor ni en contra de que el magmatismo marciano sea continuo o discontinuo. Tampoco hay hipótesis sólidas sobre la causa de que la mayor parte del magmatismo se haya concentrado en el domo de Tharsis a lo largo de toda la historia del planeta.

La comunidad científica está dividida respecto a si Marte conserva aún energía interna suficiente para mantener una actividad volcánica y tectónica significativa. El bando *Marte vivo* gana posiciones muy lentamente (Hartmann *et al.*, 1999; Hartmann y Berman, 2000; Burr y Mc Ewen, 2002; Márquez *et al.*, en prensa), pero esta *guerra marciana* implicará a toda una generación de planetólogos.

No se entiende el origen de la tectónica reciente venusina y marciana, ya que no hay reciclaje litosférico.

#### Algunas ideas interesantes sobre magmatismo y tectónica de los planetas terrestres

Recientemente (Condie, 1998) ha propuesto que los grandes periodos magmáticos de la Tierra se deben a avalanchas de material litosférico hasta la base del manto. El factor desencadenante sería la densificación del material en profundidad; su efecto, el desalojo de material (calentado por el núcleo) de la base del manto, y su subida en forma de penachos térmicos masivos.

Se discute si el episodio magmático venusino podría expresar un reciclaje transitorio de la litosfera. En todo caso, no ha dejado huellas visibles de ello (como cadenas de volcanes, por ejemplo).

Una propuesta aislada (Sleep, 1994) de tectónica de placas antigua en Marte (Figura 9) también gana adeptos poco a poco. Su principal evidencia es el gran escalón (5 km de desnivel medio, (Figura 10) que separa las tierras bajas del norte de las tierras altas, más craterizadas, al sur.

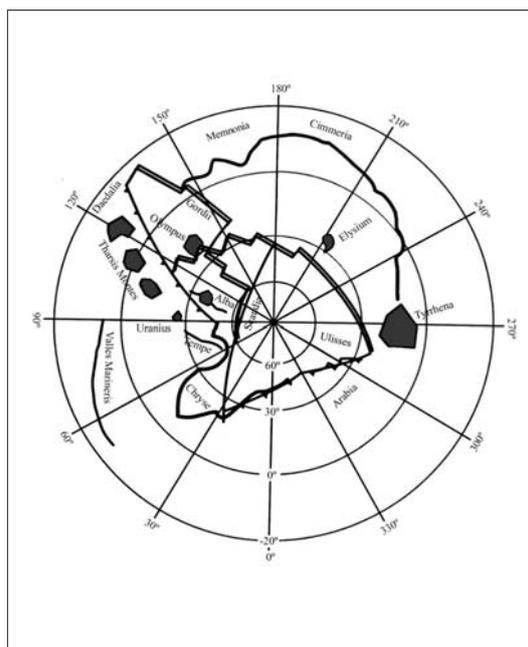


Fig. 9. Una de las configuraciones de la supuesta etapa de reciclaje litosférico en Marte. La línea gruesa irregular es la dicotomía, las líneas con triángulos son zonas de subducción, las dobles dorsales, y las zonas rayadas, volcanes. En Sleep (1994).



Fig. 10. La dicotomía marciana en la zona de Mangala Vallis, a 5°S – 150°W. Nótese la interrupción brusca de los canales, y también la reactivación de uno de ellos.

Esta última idea se enmarca en otra (Condie, 1989) según la cual todos los cuerpos de tipo terrestre atraviesan una etapa térmica en la que están lo bastante fríos como para tener una litosfera rígida pero aún bastante calientes como para que su interior siga en convección. Esta etapa, por tanto, sería de reciclaje litosférico, lo que su autor llama *ventana de tectónica de placas* (Figura 11). Muchos de los efectos de esta idea siguen sin comprobarse, pero el principal (que los planetas se enfrían siguiendo curvas exponenciales) se ha revelado falso.

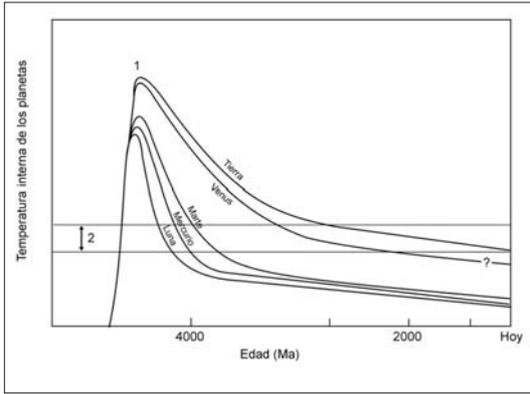


Fig. 11. Hipótesis sobre las historias térmicas de los planetas terrestres y la Luna. 1 es el máximo térmico durante el cual los planetas se diferenciaron. 2 es la ventana de tectónica de placas, el intervalo de tiempo en el que el planeta se ha enfriado lo bastante para poseer una litosfera, pero no lo suficiente como para impedir la convección. Nótese que la ordenada no tiene valores numéricos: la idea es sólo una hipótesis de trabajo, con no pocos inconvenientes. En Condie (1989).

### Quinta pregunta ¿CUÁLES SON LOS FACTORES CRÍTICOS QUE DEFINEN LOS PAISAJES PLANETARIOS?

#### Lo que sabemos sobre paisajes planetarios

En la Tierra, los paisajes son el resultado de las interacciones de la energía interna con la de origen solar, en un entorno caracterizado por una elevada humedad y grandes variaciones térmicas, que mueven una activa atmósfera.

En Marte sólo los campos de dunas (Figura 12) se deben a la circulación atmosférica; nuestras imágenes de Venus son demasiado toscas para detectar cosas parecidas, aunque se ven algunas elipses de dispersión de piroclastos.

El resto de los paisajes planetarios se deben a la acción de la gravedad, el vulcanismo, la tectónica (Figura 13), o los impactos.

En un cuerpo sin atmósfera, la única competencia de la gravedad es el impacto de meteoros, grandes al principio de la evolución planetaria, pero casi siempre muy pequeños en tiempos recientes. Éstos contribuyen a redondear paisajes como el de la Luna.

Los paisajes relictos, o fosilizados, los más antiguos de la Tierra, pueden datar del final del Proterozoico (600 o 700 Ma). En cambio, en planetas sin atmósfera, o con atmósferas deshidratadas, los paisajes pueden durar miles de millones de años: por eso encontramos cuencas de impacto, en Marte o la Luna, que datan del gran bombardeo asteroidal que culminó hace 3.900 Ma.



Fig.12. Dunas transversales en el fondo de Nirgal Vallis, a 27°S 44°W en la región de Noachis Terra, Marte. Imagen Malin Space Science Systems.



Fig. 13. Cadenas plegadas en Venus. Una llanura volcánica ha sido plegada y cabalgada en dos direcciones, N-S y WNW. La imagen está centrada en 44°S-348°E, y mide 450 km de anchura. JPL/NASA.

Los paisajes relictos más espectaculares del Sistema Solar son las cuencas fluviales marcianas (Figura 14), que pueden tener de 1.000 a 2.000 Ma e indicaron, desde los primeros reconocimientos detallados del planeta, la existencia de paleoclimas húmedos.

Algunos sedimentos de Marte se han identificado como de origen glaciario. Pueden tener edades de pocos millones de años, una prueba de actividad climática reciente en Marte.

*Y las cosas que se nos escapan*

No está aún claro si hemos encontrado relieves equivalentes a los continentes terrestres. El enigmático escalón marciano tiene un perfil muy parecido al de un talud continental, el borde real de un continente. Pero, ¿se formó de igual manera?

Tampoco se conoce el origen de los grandes relieves venusinos de envergadura continental, las llamadas mesetas corticales (Figura 15). Lo que sí se sabe es que su estructura profunda es distinta, ya que la gravimetría ha permitido resolver que estos relieves venusinos carecen de engrosamientos inferiores, las raíces de los continentes terrestres.

En general, la renovación global de la superficie de Venus no nos permite conocer si la presente superficie, sólo condicionada por la tectónica y el vulcanismo, es la heredera de remotas morfologías anteriores, quizá fluviales o marinas, anteriores al riguroso clima actual.



Fig. 14. Mangala Valles, una cuenca fluvial en el ecuador marciano. Este tipo de canales se denomina de desbordamiento, ya que inundan toda la llanura, generando cauces múltiples. Mosaico Viking centrado en 7°S-152°W, de 150 km de anchura. JPL/NASA.

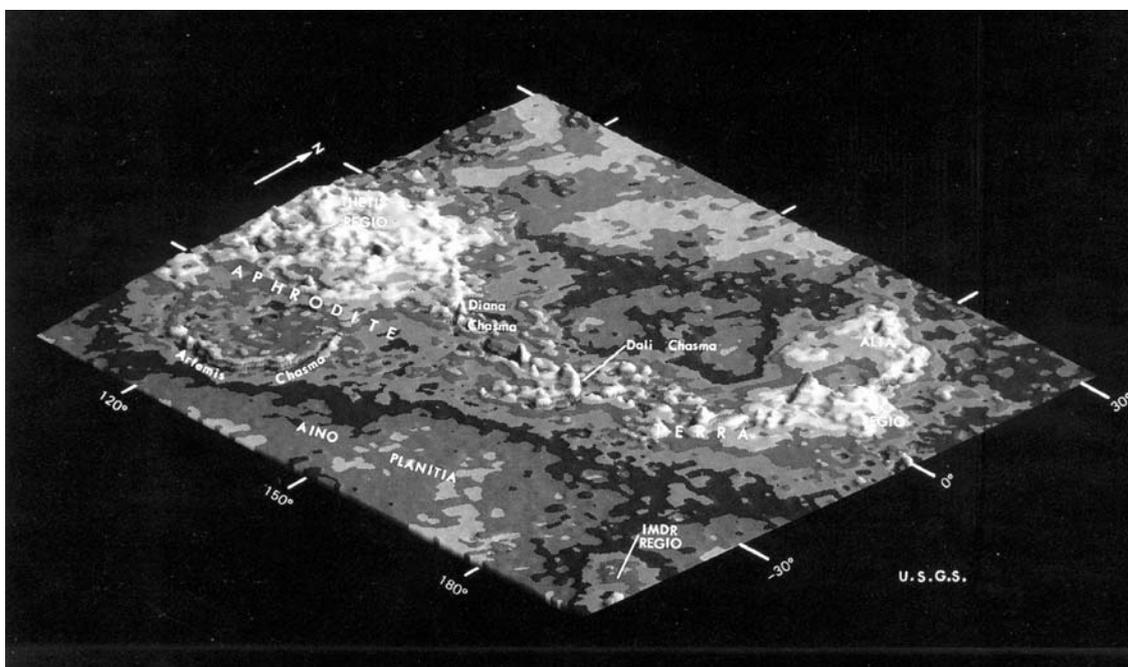


Fig. 15. La meseta de Aphrodite Terra, en el ecuador de Venus, se levanta sobre grandes llanuras volcánicas. Diana Chasma y Dali Chasma, en el centro, son valles de rift, Artemis Chasma, la estructura circular de la izquierda, que mide 2.100 km de diámetro, da idea de las dimensiones. Se desconoce si las mesetas corticales son el equivalente de los continentes terrestres. Mosaico del USGS.

### Algunas sugerencias de interés sobre el relieve planetario

Un geomorfólogo marciano sería cualquier cosa menos uniformista, ya que rara vez vería algo salvo tormentas de polvo, que no le servirían para entender prácticamente nada del pasado de su planeta.

Sin embargo, hay un *actualismo espacial* geomorfológico: los domos volcánicos se parecen, los frentes de cabalgamiento tienen igual aspecto rugoso en imágenes de satélite, las inundaciones dejan las llanuras igualmente devastadas.

En la Luna, prácticamente toda la superficie es un paisaje relictivo; en Marte, un tercio de la superficie tiene unos 4.000 Ma; en la Tierra hay un 1% de más de 3.500 Ma: cerca de la cuarta parte inicial de nuestra historia está casi completamente borrada.

### Sexta pregunta ¿EXISTE ALGUNA RELACIÓN ENTRE LA EVOLUCIÓN PLANETARIA Y LA POSIBLE APARICIÓN DE VIDA?

#### Algunas pocas cosas que sabemos sobre la vida

En la Tierra, la vida se originó rápidamente: las rocas sedimentarias poco metamorfizadas de 3.850 Ma (zona de Isua, Groenlandia) ya contienen una distribución isotópica empobrecida en  $^{13}\text{C}$ : la firma de la vida. En un calendario de un año, esa edad

equivale a un 26 de Febrero.

Teniendo en cuenta que los organismos más primitivos tienen afinidades termófilas, una mayoría de los científicos que se dedican al tema creen que el origen pudo estar en ambientes hidrotermales.

La vida tiende a colonizar todos los ambientes y a utilizar todos los recursos. Este oportunismo se pone de relieve comparando un inventario del carbono en la Tierra en su conjunto con el del Sol (es decir, la nebulosa solar, que se toma como unidad): la proporción de carbono terrestre es 2.000 veces menor. Y sin embargo, en la biosfera terrestre el carbono es 13 veces más abundante que en el Sol: la biosfera ha aumentado su concentración inicial unas 25.000 veces (Figura 16).

#### Pero lo importante seguimos sin saberlo

Lo cierto es que el origen de nuestra biosfera sigue siendo una de las fronteras más complejas e incomprensibles de la Ciencia moderna.

Sobre todo, seguimos a ciegas sobre un viejo tema: ¿Es la vida un fenómeno común, o por el contrario algo extremadamente raro?

Y, en concreto, ¿qué probabilidades de vida existen en otros cuerpos del Sistema Solar?

#### Alguna sugerencia digna de atención

Puesto que hay pruebas de que la vida en la Tierra surgió hace cerca de 4.000 Ma, y también de que

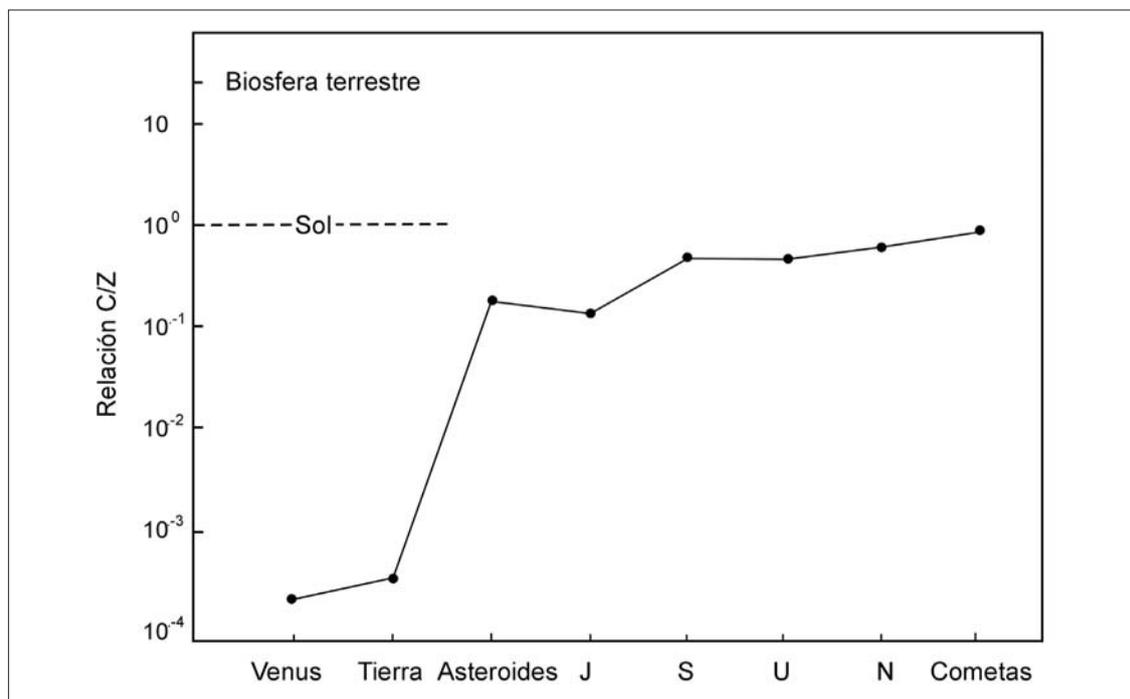


Fig. 16. Una hazaña de ingeniería planetaria. En comparación con su abundancia inicial en la Tierra, la concentración de carbono en la biosfera es 25.000 veces mayor. Si realizamos la comparación con la abundancia en el Sol, sigue siendo 13 veces mayor. Los seres vivos han conseguido un hábitat favorable a través de un proceso de captación del escaso carbono existente en el interior del planeta. Esta figura significa que la Vida puede sobrevivir en medios teóricamente hostiles. E incluso, al convertir la geoquímica en bioquímica, puede alterarlos, preparándolos para la llegada de los seres capaces de hacerse preguntas. En McKay (1991).

por aquellas fechas Marte poseía un ambiente similar, la pregunta es: ¿por qué no en Marte?

Algunos incluso vuelven la cuestión del revés, teorizando sobre el serio problema que se plantearía si descubriésemos que en Marte no surgió la vida hace 4.000 Ma.

La búsqueda es, lógicamente, antropocéntrica (biocéntrica): buscamos seres bacterianos o semejantes en Marte, o en meteoritos marcianos. Los experimentos que diseñamos para sondear otras posibles biosferas son intentos de detectar funciones (como la fotosíntesis) de seres terrestres.

Un buen ejemplo de este, ahora, geocentrismo, es la sugerencia de que la tectónica de placas sea una propiedad indispensable de los planetas con una biosfera compleja. Su capacidad de alterar climas y ambientes le avalan.

Por ello la pregunta, retórica de puro repetida: "¿Seríamos capaces de reconocer una forma viva que no respondiese en absoluto a los patrones de la vida terrestre?". Es muy posible que no, pero esta confesión de ignorancia no ayuda a diseñar experimentos útiles para este caso hipotético. La gran esperanza exobiológica es que la vida, en cualquiera de sus versiones, provoque disequilibrios químicos detectables.

## CONCLUSIONES

1ª. Suponemos que los planetas abundan en el Universo, y sabemos que algunos no están ligados a estrellas: con los datos que hoy poseemos, nada se opone a una conclusión literalmente vertiginosa: los planetas podrían ser objetos tan abundantes como las estrellas. En cuanto a su composición y estructura, debemos estar abiertos a detectar planetas radicalmente distintos a los dos tipos básicos que conocemos.

2ª. Sólo muy recientemente hemos tenido datos que nos permiten considerar los sistemas planetarios como conjuntos muy dinámicos no sólo en su origen, sino también a lo largo de toda su historia. En concreto, hay que tener en cuenta las posibilidades de migración y *canibalismo* planetarios, así como de expulsiones del abrazo gravitatorio de la estrella.

3ª. Tanto estrellas como planetas funcionan como motores en los que la energía térmica confinada en su centro combate con la gravedad, que confina las estrellas y reactiva la convección planetaria.

4ª. Los planetas dotados de atmósfera muestran historias climáticas complejas, con disequilibrios bruscos que parecen condicionados, más que por el Sol, por la liberación esporádica (¿cíclica?) de máximos de energía interna. En la Tierra y Marte estas fluctuaciones climáticas parecen recaer en dos estados climáticos preferentes: glacial-tropical en la Tierra, y húmedo-seco en Marte.

5ª. Las evoluciones térmicas parecen también fluctuantes. Están por confirmar las avalanchas en el manto terrestre, y no sabemos si Marte experimenta periodos especialmente intensos de vulcanismo.

6ª. Los variados paisajes de la Tierra derivan tanto

de su capacidad de renovar el relieve mediante la interacción de sus placas litosféricas como de la actuación climática sobre esos relieves. En planetas sin humedad ni vida, los paisajes dependen esencialmente de la actuación de las fuerzas internas, y sólo la gravedad y los impactos pueden modificarlos ligeramente.

7ª. La vida sigue siendo, no ya un fenómeno incomprendido, sino una incógnita planetaria y universal, ya que suponemos que se asienta sobre uno de estos cuerpos (o sus satélites) de los que podría haber millones en el universo. Es capaz de modificar radicalmente el ambiente de un planeta, y en ello se basan nuestras mayores esperanzas para su detección fuera de la Tierra. Aún más que en los otros temas, aquí cabe esperar sorpresas radicales.

Dudo que nuestro colega químico se mostrase satisfecho con estos *residuos secos*; pero así son las ciencias de frontera. Nos arriesgamos a intentar un residuo del residuo con una pregunta sugerente:

¿Será representativo nuestro sistema de planetas?

## BIBLIOGRAFÍA

Baker, V.R. (2001). *Water and the Martian landscape*. Nature, 412, 228-236.

Baker, V.R., Strom, R.G., Gulick, V.C., Kargel, J.S., Komatsu, G. y Kale, V.S. (1991). *Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars*. Nature, 352, 589-594.

Burr, D.M. y McEwen, A.S. (2002). *Recent aqueous floods from the Cerberus Fossae, Mars*. Geophys. Res. Lett. 29, paper 13, 1-4.

Condie, K.C. (1989). *Origin of the Earth's crust*. Paleogeogr., Paleoclim., Paleocol., 75, 57-81.

Condie, K.C. (1998). *Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection?* Earth Planet. Sci. Lett., 163, 97-108.

Courtillot, V., Davaille, A., Besse, J. y Stock, J. (2003). *Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle*. Earth Planet. Sci. Lett., 205, 295-308.

Hartmann, W.K. (1993). *Moons and planets*. Wadsworth, Belmont, EE.UU.

Hartmann, W.K., y Berman, D.C. (2000). *Elysium Planitia lava flows: Crater count chronology and geological implications*. J. Geophys. Res., 105, 15011-15025.

Hartmann, W.K., Malin, M., McEwen, A.S., Carr, M., Soderblom, L., Thomas, P., Danielson, E., James, P. y Ververka, J. (1999). *Evidence for recent volcanism on Mars from crater counts*. Nature, 397, 586-589.

Kargel, J.S. y Lewis, J.S. (1993). *The composition and early evolution of Earth*. Icarus, 105, 1-25.

Lissauer, J.J. (1999). *How common are habitable planets?* Nature, 402 (suplemento), C11-C14.

Márquez, A., Fernández, C., Anguita, F. Farelo, A., Anguita, J. y de la Casa, M.A. (2004). *New evidence for a volcanically, tectonically, and climatically active Mars*. Icarus (en prensa)

Panning, M. y Romanowicz, B. (2004). *Inferences of flow at the base of Earth's mantle based on seismic anisotropy*. Science, 303, 351-353.

Sleep, N. H. (1994). *Martian plate tectonics*. J. Geophys. Res., 99, 5639-5655. ■