

## CAPÍTULO 3

### LA ATMÓSFERA DE MARTE

Si queda entre la tertia luz y Marte, la luz del Sol será descolorida: por verla será de almas circuida su belleza que excede a todo arte.

Francesco Petrarca (1304-1374).

El estudio de las atmósferas planetarias forma parte hoy en día de un campo de conocimiento sorprendentemente amplio, que abarca tanto los aspectos observacionales, desde superficie y plataformas espaciales, como aspectos puramente teóricos. A través de complejas simulaciones numéricas se pueden describir procesos geofísicos en general, y en particular también algunos de los que tienen lugar en la atmósfera. Dentro de las áreas de investigación que contribuyen al conocimiento en este campo conviven estudios de marcado carácter pluridisciplinar. Algunos se ocupan del origen y evolución de las atmósferas, incluyendo la dinámica de estas, sus balances energéticos globales o la transferencia radiativa y sus aspectos fotoquímicos; otros abordan los procesos de interacción de la atmósfera con la superficie y la respuesta a variaciones en sus fronteras, haciendo uso de técnicas de teledetección. En el caso concreto de Marte, también son muy relevantes los estudios sobre el proceso de «amartizaje» de las diferentes misiones que se llevan a cabo. Los planetas Marte y Tierra son dos vecinos próximos, pero «diferentes». Comparativamente, Marte tiene una masa muy pequeña (10% de la masa terrestre) y un radio menor, aproximadamente la mitad que el de la Tierra. Además de las diferencias en masa y tamaño hay que destacar otras que son muy relevantes. Por ejemplo,

la gravedad en la superficie es poco más o menos un tercio del valor terrestre, y además contiene rocas y metales de alta densidad. No obstante, es destacable que rota aproximadamente con la misma velocidad y en el mismo sentido que la Tierra: su eje de rotación tiene una inclinación de  $25,2^\circ$ , que es un valor superior, aunque no exageradamente alejado del de la Tierra ( $23,4^\circ$ ). Sin embargo, otro parámetro orbital muy relevante, como es la excentricidad de su órbita alrededor del Sol ( $0,093$ ), es mucho mayor que en el caso de la Tierra ( $0,017$ ), lo que se traduce en grandes diferencias en la irradiación solar (energía recibida por unidad de superficie y longitud de onda) máxima recibida entre ambos hemisferios. En la Tabla 1 se muestran algunas de estas diferencias en las características planetarias de la Tierra y Marte.

Tabla 1: Diferencias en algunos parámetros planetarios entre la Tierra y Marte.

|                                       | Tierra | Marte  |
|---------------------------------------|--------|--------|
| Oblicuidad ( $^\circ$ )               | 23,44  | 25,19  |
| Masa ( $\times 10^{24}$ kg)           | 5,974  | 0,642  |
| Radio medio (km)                      | 6371   | 3397   |
| Altura escalada (km)                  | 7,5    | 11     |
| Excentricidad órbita                  | 0,0017 | 0,0093 |
| Gravedad en la superficie ( $m/s^2$ ) | 9,80   | 3,71   |

Para distinguir entre un día solar en la Tierra y en Marte se utiliza el término «sol», con el que se hace referencia a la duración de un día solar en Marte. Este representa el tiempo que tarda Marte en realizar una rotación alrededor de su propio eje, que es de 24,62 horas. Por consiguiente, el año marciano, es decir, una vuelta completa de Marte alrededor del Sol, abarca 668,60 *soles*, lo que equivale a 686,98 días solares de la Tierra, esto es, casi dos veces mayor que un año en la Tierra. Las estaciones en Marte (Figura 1) son de casi el doble de duración que las terrestres y están definidas por la longitud solar ( $L_s$ ) o ángulo que forma Marte con el Sol, medido desde el equinoccio de primavera del hemisferio norte, donde  $L_s$  toma el valor de  $0^\circ$ , que se considera el de referencia, y que corresponde al equinoccio de primavera cuando el Sol atraviesa el punto Vernal ( $L_s = 0^\circ$ ) en su tránsito del hemisferio sur al norte. El solsticio de verano ocurre cuando la longitud solar es

$L_s = 90^\circ$ , el equinoccio de otoño para  $L_s = 180^\circ$  y el solsticio de invierno para  $L_s = 270^\circ$ . El perihelio marciano (mínima distancia al Sol en la órbita elíptica de dicho planeta) se da en la posición orbital  $L_s = 251^\circ$ , justo antes del principio del invierno, y su afelio (cuando se encuentra en el punto de su órbita más alejado del Sol) en  $L_s = 71^\circ$ , antes del comienzo del verano.

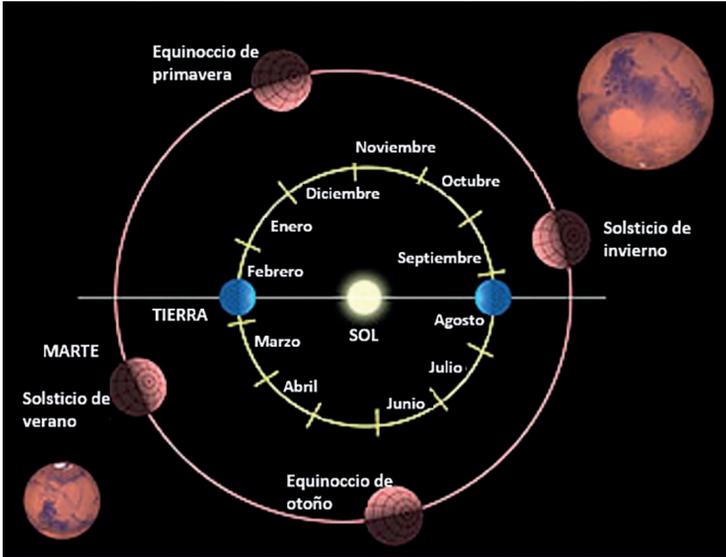


Figura 1: Ilustración esquemática con las estaciones terrestres y marcianas.

Otro aspecto de gran relevancia a la hora de estudiar la atmósfera de Marte, concretamente cuando se trata de la circulación atmosférica marciana, es la topografía del planeta (Figura 2). El hemisferio sur tiene una altitud media 5 km mayor que la del norte, lo que debería ocasionar una circulación atmosférica más intensa en la primavera y el verano del hemisferio sur (Joshi *et al.*, 1995; Richardson y Wilson, 2002). Esto, junto con la asimetría en la insolación recibida en ambos hemisferios, redundaría en una fuerte circulación atmosférica y cizalladura del viento (diferencia en la velocidad y/o dirección del viento entre dos puntos próximos), factores muy relacionados con la aparición de mucho polvo en suspensión durante la llamada «estación de tormentas de polvo», que tiene lugar principalmente entre  $180^\circ$  y  $330^\circ$  de  $L_s$ .

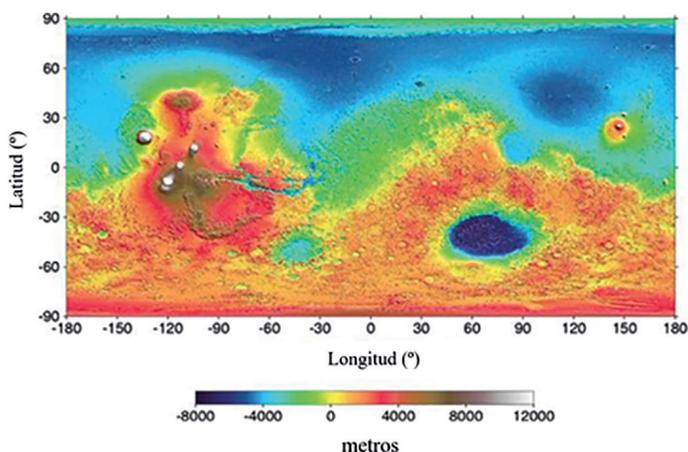


Figura 2: Topografía de Marte. Obtenida a partir de los datos del «Mars Orbiter Laser Altimeter» (MOLA), en la que se puede apreciar como la orografía se concentra extremadamente en el hemisferio sur.

Todas estas consideraciones juegan un papel más o menos importante a la hora de estudiar las características de la atmósfera de Marte. En este capítulo mostramos una visión panorámica de la misma, comparándola con su homóloga terrestre. En primer lugar, analizamos las características generales de la atmósfera. Después nos fijamos en el cielo de Marte, sus nubes y la precipitación. A continuación indagamos sobre una parte de la atmósfera de gran interés: la capa límite planetaria. Seguidamente mostramos la importancia del polvo atmosférico y del balance de energía en superficie, para finalmente concluir el capítulo con la climatología del planeta.

### **1. Características generales**

Al igual que la Tierra, Marte cuenta con una capa gaseosa que rodea al planeta: su atmósfera. Sin embargo, esta posee una serie de particularidades que la hacen diferente de la terrestre, por ejemplo: su estructura térmica vertical, las distintas capas que la conforman o su composición química. Además, la baja gravedad de Marte, unida a la práctica ausencia de campo magnético, hace que la parte más alta de la atmósfera resulte fácilmente expuesta al arrastre del viento solar, fomentando la pérdida de masa atmosférica marciana (Sánchez-Cano, 2018). En la Figura 3 se muestran los perfiles estándar de temperatura del aire en la

Tierra y en Marte, es decir, su variación con la altura (o equivalentemente, con la presión) desde la superficie. Estos son valores promediados, y como se puede apreciar las atmósferas de ambos planetas mantienen marcadas diferencias.

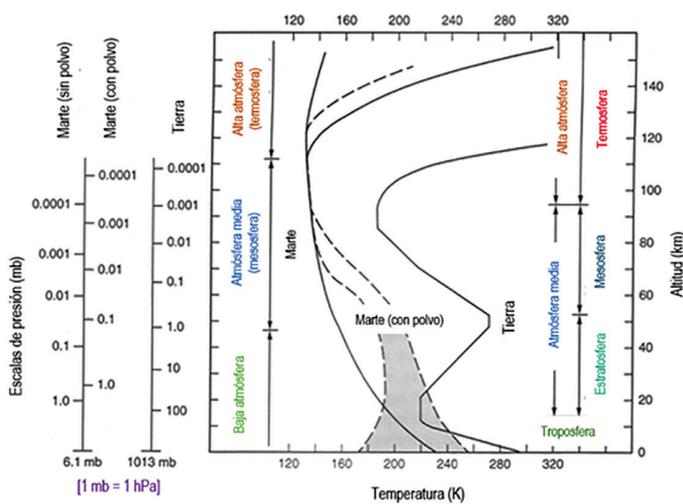


Figura 3: Variación con la altura (o presión, escalas a la izquierda del gráfico) de la temperatura de la atmósfera en Marte y la Tierra junto con las diferentes capas atmosféricas en ambos planetas. En el caso de Marte se muestran diferentes posibilidades para los casos de la presencia o ausencia de polvo en suspensión, que modificaría considerablemente el perfil térmico. Adaptado de Zurek (1992).

La Tierra presenta cuatro capas muy diferenciadas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. Estas se encuentran separadas por zonas de transición (tropopausa, estratopausa y mesopausa), generalmente de unos pocos kilómetros, pero bien definidas y en las que la temperatura permanece aproximadamente constante. Por su parte, siguiendo la nomenclatura más frecuente (Kieffer *et al.*, 1992), en Marte se pueden distinguir tres capas: baja atmósfera, atmósfera media (mesosfera) y alta atmósfera (termosfera). A altitudes de unos 100 km, es decir, cerca de la mesopausa, existe gran similitud en la presión en ambos planetas. Por encima de esta altura, las temperaturas aumentan debido a la absorción de la radiación ultravioleta extrema (Haberle *et al.*, 2017). Sin embargo, la mesosfera marciana (50-100 km) está carac-

terizada por una casi constancia en los valores de temperatura. En este caso, la altura de la mesopausa varía significativamente según la opacidad atmosférica, que a su vez está influenciada por diversos factores como son el polvo atmosférico y la estacionalidad.

Marte se caracteriza por experimentar episodios de tormentas de polvo capaces de cubrir prácticamente todo el planeta durante un tiempo significativamente largo. Cuando tienen lugar estos eventos, el polvo transportado se calienta, formándose zonas casi isotermas o inversiones de temperatura profundas, que son comparables al efecto del calentamiento debido al ozono en la Tierra. La baja atmósfera de Marte está caracterizada por la transferencia radiativa y convectiva con la superficie, factores clave en la formación de una capa límite planetaria que ostenta un ciclo diurno sometido a fuertes variaciones de su espesor y estabilidad atmosférica, tal y como se verá posteriormente. Otras características diferenciadoras de la atmósfera marciana son su composición química y su densidad, la cual a su vez influye directamente en la presión atmosférica. La atmósfera marciana es muy tenue, unas 100 veces menos densa que la terrestre (Tabla 2). El valor de la presión media global en su superficie es de aproximadamente 6,1 hPa, lo cual representa menos del 1% del valor terrestre de referencia (1013 hPa), aunque es variable según la época del año.

Tabla 2: Comparación termodinámica entre ambas atmósferas.

| Característica atmosférica (valores promedio)                        | Tierra  | Marte               |
|--|---------|---------------------|
| Constante de los gases $R$ ( $m^2s^{-2}K^{-1}$ )                     | 287     | 192                 |
| Capacidad calorífica a presión constante $c_p$ ( $m^2s^{-2}K^{-1}$ ) | 1010    | 730                 |
| Presión en superficie (hPa)  | 1013    | 6,1                 |
| Altura escalada (km)   | 7,5     | 11                  |
| Temperatura en superficie (K)  | 230–315 | 150–270             |
| Densidad del aire junto a la superficie ( $kg/m^3$ )                 | 1,2     | $1,5 \cdot 10^{-2}$ |

Tabla 3: Comparativa de la composición promedio (en %) de las atmósferas de Marte y la Tierra.

| <b>Gas</b>                    | <b>Tierra</b> | <b>Marte</b> |
|-------------------------------|---------------|--------------|
| Dióxido de carbono ( $CO_2$ ) | 0,035         | 95,32        |
| Nitrógeno ( $N_2$ )           | 78,08         | 2,70         |
| Oxígeno ( $O_2$ )             | 20,94         | 0,13         |
| Vapor de agua ( $H_2O$ )      | 0,4           | 0,02         |
| Argón ( $Ar$ )                | 0,93          | 1,60         |

La atmósfera de Marte está compuesta casi en su totalidad de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), con una proporción de vapor de agua sensiblemente menor que la terrestre, aunque experimenta grandes variaciones según la época del año y la zona de la atmósfera. En la Tabla 3 se muestra una comparación entre las composiciones químicas promedio de las atmósferas de ambos planetas.

La concentración de oxígeno molecular ( $O_2$ ) también es muy pequeña en Marte. Igualmente, la proporción de otro gas que globalmente no representa un porcentaje muy elevado ni en la Tierra ni en Marte, el ozono (molécula formada por tres átomos de oxígeno,  $O_3$ ), en la atmósfera marciana es muy inferior a la terrestre. En la Tierra, el ozono junto a la superficie se considera un contaminante, pero sin embargo es muy relevante a mayores altitudes, ya que proporciona una capa protectora esencial contra la luz ultravioleta solar, la cual es dañina para los seres humanos. Es en la estratosfera terrestre donde se alcanzan valores significativos de concentración de este gas, dando lugar a la denominada capa de ozono (en promedio, a 20-30 km de altura respecto a la superficie). Por su parte, Marte tiene tres capas de ozono diferenciadas, aunque son mucho más débiles que la de la Tierra y varían significativamente tanto en su posición como en el tiempo. De manera simplificada, se tiene, en primer lugar, una capa relativamente persistente entre la superficie del planeta y 30 km de altitud. Seguidamente aparece, solo durante la primavera y el verano del hemisferio norte, otra capa de ozono, a unos 30-60 km de altitud. Finalmente, el planeta cuenta con una capa de ozono de entre 35-70 km de altitud, únicamente sobre el polo sur, que está presente exclusivamente en el

invierno de este hemisferio. La generación o destrucción de ozono en diferentes zonas de la atmósfera de Marte viene regida, entre otros factores, por la dinámica de la circulación atmosférica. Por último, cabe indicar que la mayoría de las observaciones disponibles han encontrado una correlación inversa entre la concentración de  $O_3$  y la de vapor de agua en la atmósfera de Marte, es decir, que cuando uno de los dos gases aumenta, el otro disminuye, y viceversa.

Por otra parte, uno de los temas que ha suscitado un importante debate en la comunidad científica durante los últimos años es la presencia o ausencia de metano ( $CH_4$ ) en la atmósfera de Marte. El metano es un gas que en la Tierra suele ir ligado a procesos biológicos, aunque también existen otras fuentes de metano de carácter geofísico. Así, su posible relación con la presencia de algún tipo de vida en Marte confiere una gran importancia al hecho de detectarlo. Gracias a observaciones llevadas a cabo con diferentes instrumentos, se ha llegado a deducir que sí hay metano en la atmósfera de Marte. Sin embargo, analizando detalladamente y en conjunto todas estas observaciones independientes aparecen ciertas reticencias, de modo que aún no se puede concluir con seguridad sobre este tema. En primer lugar, porque algunas de las observaciones a partir de las cuales se infería que sí hay metano en Marte han resultado cuestionables. Además, los diversos resultados obtenidos indican rangos de valores de concentración de metano en la atmósfera marciana con grandes discrepancias entre sí. Aunque se consideran diferentes mecanismos de transporte, generación o destrucción de metano en Marte, estos aún no se han logrado comprender completamente. Ante estas discrepancias, las posibles explicaciones planteadas todavía no resultan totalmente satisfactorias para que los valores obtenidos puedan ser compatibles con las evoluciones temporales. Uno de los instrumentos enviados más recientemente en una de las misiones a Marte tiene el objetivo específico de detectar metano. Su precisión es mucho mayor que la de los instrumentos utilizados hasta ahora, de modo que en teoría sería capaz de detectar concentraciones de metano muy pequeñas. Sin embargo, por el momento las observaciones de este instrumento no permiten determinar que haya metano en Marte, lo cual resulta cuando menos llamativo, dado que otros instrumentos menos