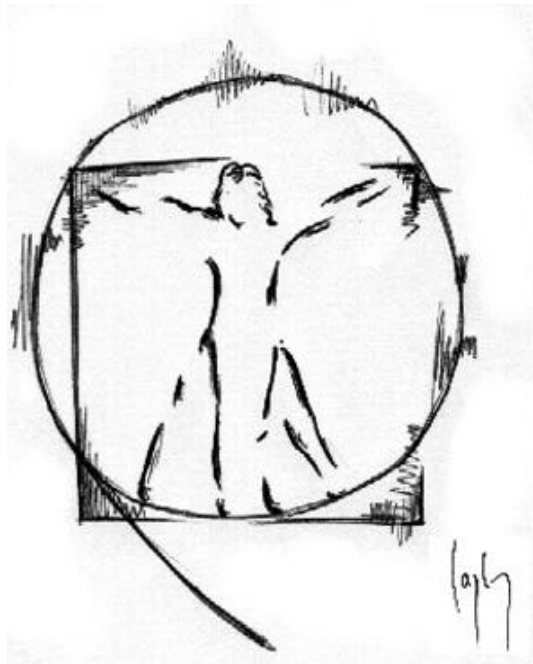


**Radiación ultravioleta solar en Marte:
Implicaciones biológicas y búsqueda de ambientes
potencialmente habitables**



Carmen Córdoba Jabonero
Laboratorio de Geología Planetaria
Centro de Astrobiología, Madrid
cordobajc@inta.es

La frase mas excitante que se puede oír en ciencia, la que anuncia nuevos descubrimientos,
no es "¡Eureka!" (¡Lo encontré!) sino 'Es extraño ...'

Isaac Asimov.

Introducción.

Marte es el cuarto planeta desde el Sol y suele recibir el nombre de Planeta Rojo, sobre todo por el característico color rojo que fue observado por los astrónomos a lo largo de la historia.

Antes de la exploración espacial, Marte era considerado como el mejor candidato para albergar vida extraterrestre. Los astrónomos creyeron ver líneas rectas que atravesaban su superficie. Esto condujo a la creencia popular de que algún tipo de inteligencia había construido algún tipo de canalizaciones de agua. Otra razón que condujo a los investigadores a esperar la presencia de vida en Marte eran los cambios estacionales de color en la superficie del planeta. Este fenómeno llevó a especular sobre la posibilidad de que las condiciones de la superficie produjeran un florecimiento de la vegetación durante los meses cálidos y un estado de latencia durante los períodos más fríos.

En Julio de 1965, la nave Mariner 4 de la NASA, transmitió 22 imágenes cercanas de Marte. Todo lo que se podía ver era una superficie con muchos cráteres y canales de origen natural pero ninguna evidencia de canales artificiales o agua circulante. Finalmente, en Julio y Septiembre de 1976, las sondas Viking 1 y 2 se posaron sobre la superficie de Marte [1]. Los tres experimentos biológicos realizados por las sondas descubrieron una actividad química muy fuerte en el suelo marciano, pero no suministraron ninguna evidencia clara sobre la presencia de microorganismos vivos en el suelo cercano a las sondas. Por otro lado, otros instrumentos no encontraron signo alguno de química orgánica en los dos puntos de aterrizaje, pero sí suministraron un análisis preciso y definitivo de la composición de la atmósfera marciana y se encontraron trazas de elementos no detectados con anterioridad.

Además, Marte es un planeta que recibe en su superficie radiación ultravioleta (UV) solar con una fuerte componente biológicamente muy perjudicial (UV-C y UV-B), lo que influye notoriamente en el deterioro de la superficie en vistas de poder encontrar algún signo de vida [2, 3, 4].

Por lo tanto, Marte puede ser considerado un planeta auto-esterilizante, es decir, la combinación de la radiación UV solar que alcanza la superficie, la extrema sequedad del suelo y la naturaleza oxidante de la química del suelo impiden la formación de organismos vivos en el suelo marciano. Sin embargo, permanece abierta la pregunta sobre la existencia de vida en Marte en un pasado lejano o de la presencia actualmente de condiciones óptimas quizás estacionales de habitabilidad en otras zonas del planeta, como puede ser en su subsuperficie, en donde hasta ahora no se ha realizado ningún estudio concreto. Solamente con la sonda Beagle 2 de la misión Mars Express de la ESA, que llegar a Marte a finales de Diciembre de 2003, se obtendrán los primeros datos de la subsuperficie de Marte, además de contar con un sensor UV que registrará los primeros datos experimentales de radiación UV que alcanza la superficie de Marte [3], a fin de contrastar los resultados obtenidos hasta entonces por medio de modelos de transferencia radiactiva [2, 3, 4].

1. Radiación UV solar en Marte.

1.1 La atmósfera marciana.

La radiación UV solar que alcanza la superficie de Marte está fundamentalmente determinada por su atmósfera, tanto en magnitud como en rango espectral. La atmósfera de Marte es bastante diferente de la atmósfera de la Tierra. Está compuesta fundamentalmente por dióxido de carbono (CO₂) con pequeñas cantidades de otros gases. En la tabla 1 se puede ver la gran diferencia en composición de las atmósferas de Marte y de la Tierra [5, 6].

Tabla 1. Composición (%) de las atmósferas de la Tierra y Marte.

Componente	Tierra	Marte
CO ₂	0.33	95.32
N ₂	78.08	2.7
Ar	0.93	1.6
O ₂	20.95	0.13
CO	0.19×10^{-4}	700×10^{-4}
O ₃	$0 - 12 \times 10^{-4}$	$0 - 0.0008 \times 10^{-4}$
H ₂ O	$0 - 0.04 \times 10^{-4}$	$0 - 0.00086 \times 10^{-4}$
Ne	18.2×10^{-4}	2.5×10^{-4}
Kr	1.14×10^{-4}	0.3×10^{-4}
Xe	0.09×10^{-4}	0.08×10^{-4}

Como se puede ver, el componente mayoritario de la atmósfera de Marte es el CO₂, que equivaldría al aire (N₂+O₂) en la Tierra; además este "aire marciano" puede contener incluso 1/1000 veces menos de agua que nuestro aire, pero esta pequeña cantidad puede condensarse, formando nubes que se desplazan por las zonas altas de la atmósfera o remolinos alrededor de las laderas de los sobresalientes volcanes. Existe la evidencia de que en el pasado una atmósfera más pesada podría haber permitido que el agua circulase sobre el planeta. Rasgos físicos que asemejan costas, gargantas, cauces e islas sugieren que alguna vez grandes ríos marcaron al planeta. También el CO₂ sufre ciclos estacionales de congelación-sublimación a lo largo del año, lo que provoca que la presión atmosférica varíe también. Así por ejemplo, la presión diaria media medida por la sonda Viking 1 en invierno bajó hasta 6.8 mbar, aunque en otras estaciones del año subió hasta 9.0 mbar; en el caso de la sonda Viking 2 las presiones fueron de 7.3 y 10.8 mbar, respectivamente. En comparación, la presión media de la Tierra es de unos 1000 milibares. La temperatura media registrada en Marte es -63°C con una temperatura máxima de 20°C y un mínimo de -140°C. En la Tabla 2 se comparan la presión y la temperatura superficial de Marte con la Tierra [5].

Tabla 2. Presión y temperatura en la superficie de la Tierra y Marte.

	Tierra	Marte
Presión atmosférica (mbar)	1013 mbar	4 - 7 mbar
Temperatura (mín.)	-90°C	-140°C
Temperatura media	15°C (288 K)	-63°C (210 K)
Temperatura (máx.)	60°C	20°C

1.2 Atenuación atmosférica de la radiación UV.

Entre los gases que componen la atmósfera de Marte, el dióxido de carbono (CO_2) y el ozono (O_3) son los principales que absorben la radiación UV. El CO_2 es el responsable del “corte” de la radiación UV a longitudes de onda $\lambda < 200$ nm, papel que en la Tierra juega el aire, es decir, el oxígeno (O_2) del aire. En cuanto al O_3 , a diferencia de la Tierra, en Marte no existe la llamada “capa de ozono” que protege la superficie, los niveles son muy bajos, se consideran valores normales en Marte el 1 % del ozono terrestre, por Ej. , 350 Unidades Dobson, D.U.), por lo que radiación UV de longitud de onda entre 200 y 300 nm (UV-C, principalmente) consigue llegar a la superficie. Por el contrario, en la Tierra la radiación UV que llega es de $\lambda > 290$ nm (UV-B y UV-A).

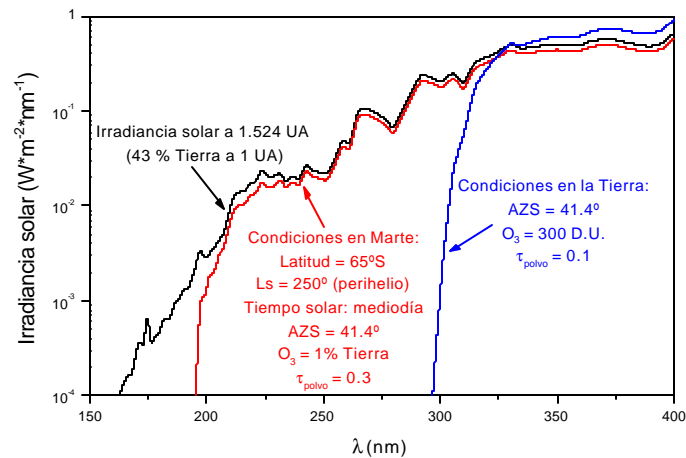


Fig. 1. Irradiación UV a una distancia de 1.524 UA desde el Sol, y la recibida en la superficie de Marte y de la Tierra.

En la Figura 1 se muestra la irradiación UV solar que reciben Marte y la Tierra en la superficie (se muestra también el espectro solar que Marte recibe a 1.524 Unidad Astronómica, UA), obtenida para cada caso por medio de un modelo de transferencia radiativa [4, 6] bajo determinadas condiciones atmosféricas (la nomenclatura de algunos parámetros que aparecen en esta figura se explica más adelante en el texto). Esta diferencia espectral es muy importante por la gran implicación biológica que conlleva: la exposición de los organismos a la radiación UV-C ($\lambda < 280$ nm) y parte del UV-B (280-320 nm) es sumamente perjudicial para los procesos biológicos que gobiernan el desarrollo y evolución de tales organismos (se explicará en mayor detalle en el siguiente apartado). La

idea de que la presión hubiera sido mucho mayor en el pasado, incluso hasta ser similar a la de la Tierra actual (1 bar, aprox.), indica que el "corte" espectral de la radiación UV en Marte hubiera sido a longitudes de onda mayores, pero aún así hubiera seguido llegando suficiente radiación UV-C a la superficie para no permitir el desarrollo de materia biológica.

Otro factor atmosférico que también influye en la propagación de la radiación UV hasta la superficie es la dispersión por los aerosoles presentes en la atmósfera, principalmente el polvo en suspensión. Y Marte es caracterizado por poseer un alto contenido de polvo, incluso llegando a producirse las famosas "tormentas de polvo", sobre todo en el hemisferio sur, que puede durar varios días. Además, hay que señalar que tanto los gases como el polvo a su vez pueden tener una distribución espacial y temporal muy variable, por lo que los niveles de UV en el planeta pueden sufrir también variaciones.

Por último, otros factores que afectan a los niveles de UV que alcanzan la superficie son la distancia al Sol, ya que influye en la radiación solar que llega a Marte, así como el ángulo zenital solar (AZS) que se calcula por medio de determinados parámetros geométricos y orbitales. Las diferencias de tales parámetros respecto a la Tierra se resumen en la Tabla 3 [5].

Tabla 3. Parámetros geométricos y orbitales de la Tierra y Marte.

Parámetro	Tierra	Marte	relativo a la Tierra
Masa (Kg)	1.49×10^{25}	1.64×10^{24}	0.11
Densidad Media (g/cm^3)	5.52	3.94	0.71
Radio Ecuatorial (km)	6400	3400	0.53
Distancia media al Sol (km)	1.496×10^8	2.2794×10^8	1.524 (UA)
Período Rotacional (horas terrestres)	23.9	24.6	1.03
Período Orbital (días terrestres)	365	687	1.88
Excentricidad	0.016	0.093	5.81
Inclinación del eje ($^\circ$)	23	25	1.09
Gravedad superficial en el ecuador (m/s^2)	9.8	3.72	0.38
Factor atmosférico de escala (m)	~ 8	~ 11	1.38

Entre estos parámetros, las diferencias más notables son la distancia media al Sol, ya que de este modo Marte al estar más lejos que la Tierra recibe solamente el 43 % de la radiación solar que llega a la Tierra, de la cual un 9 % aproximadamente es la radiación UV, así como la duración del año marciano (casi dos años terrestres) y la excentricidad (casi 6 veces mayor), lo que provoca que las estaciones del año sean de diferente duración en cada hemisferio, es decir, el verano marciano dura menos en el hemisferio sur que en el norte, al contrario que el invierno, por lo que existen grandes diferencias de temperaturas entre los

dos hemisferios, siendo el polo sur mucho más frío que el norte, aunque por otro lado también a su vez recibe mucha más radiación solar.

En la Figura 2 se muestra un “mapping” de la radiación UV que recibe la superficie de Marte en condiciones de un contenido no muy alto de polvo atmosférico (espesor óptico $\tau_{\text{polvo}} = 0.32$), y con un perfil atmosférico cuya presión y temperatura superficiales son de 6 mbar y 210 K, respectivamente. La longitud aerocéntrica (Ls) es un parámetro que define el año marciano, dividiendo la órbita sideral en 360°, de los que cada porción de 90° expresa una estación anual, con el origen (Ls = 0°) en el equinoccio de primavera (hemisferio norte). Como se puede observar en la Figura 2 el hemisferio sur recibe más radiación UV que el hemisferio norte, habiendo así una descompensación de ambos hemisferios, como ya se ha comentado anteriormente. En la Tierra, sin embargo, la distribución de la radiación UV que reciben ambos hemisferios es casi simétrica.

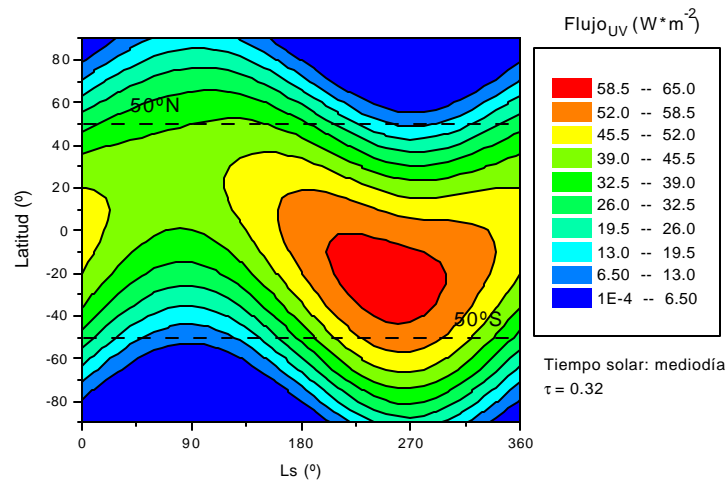


Fig. 2. Radiación UV solar en la superficie de Marte al mediodía solar ($\tau_{\text{polvo}} = 0.32$).

1.3 Radiación UV biológicamente activa.

La sensibilidad de los organismos a la radiación UV solar viene determinada por el llamado espectro de acción biológica (BAS, Biological Action Spectrum). Dicho espectro expresa relativamente (normalizado a 300 nm) el daño producido por la exposición a la radiación UV en un determinado proceso biológico que tiene lugar en un organismo. En la Figura 3 se pueden ver varios ejemplos de los espectros de acción de los blancos biológicos más importantes [7-11].

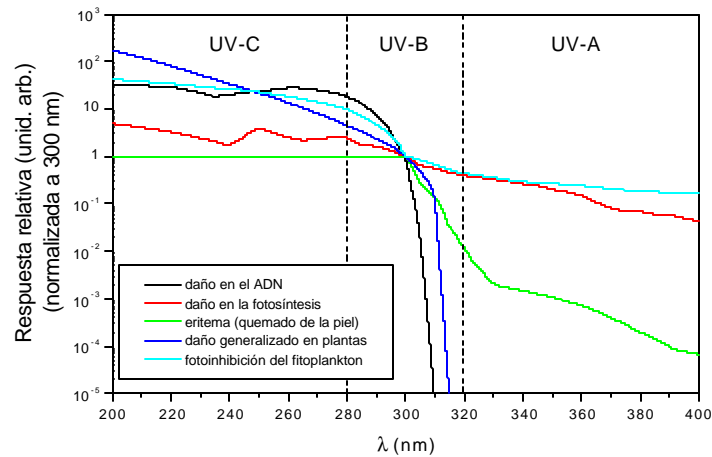


Fig. 3. Espectros de Acción Biológica (BAS).

Como se puede ver, en general, para todo espectro de acción, el daño será mayor cuanto menor sea la longitud de onda de la radiación recibida por un organismo, aunque dependiendo de la clase de organismo, cada parte del espectro UV solar afectará de una manera diferente a cada uno de ellos. Así, la radiación UV-C es la más perjudicial en todos los procesos; la radiación UV-B afectará mucho más al ADN que a otros blancos; mientras que el UV-A influirá más en el fitoplancton, la fotosíntesis y el eritema que en otros procesos. En cuanto a la dosis biológica efectiva recibida por cada uno de los procesos biológicos dependerá también del tiempo de exposición a la radiación UV.

2. Los polos de Marte: ambientes potencialmente habitables.

Dada la atmósfera actual de Marte, como ya se ha indicado anteriormente, una gran cantidad de radiación UV del rango de 200 – 300 nm (UV-C, principalmente) consigue llegar a la superficie, al contrario de lo que ocurre en el caso de la Tierra, en que generalmente $\lambda > 290$ nm (UV-B y UV-A) es la única radiación UV que alcanza la superficie terrestre gracias a la capa de ozono que posee (ver Figura 1). Esto provoca, entre otros factores, que la superficie de Marte sea considerada un medio extremo y hostil con un alto grado de oxidación para la aparición y desarrollo de microorganismos.

Por este motivo, y con el fin de buscar un candidato “potencialmente habitable” entre los diversos ambientes marcianos capaz de poseer las condiciones óptimas necesarias para ello, se podría pensar lógicamente que fuera en la subsuperficie donde se pudieran encontrar tales “señales biológicas”, ya que sería el medio adecuado donde existiría la suficiente protección contra la radiación UV. Y es precisamente este tema lo que está todavía por explorar.

Siguiendo este razonamiento, y dado el hecho de que el hielo puede atenuar considerablemente la radiación UV, sea hielo de H₂O como ocurre en la Antártida [12, 13] como hielo de CO₂ (hielo seco) [14, 15], un ambiente-candidato importante de protección frente a la radiación UV podrían ser los polos de Marte, ya que reunirían las condiciones ambientales necesarias, desde un punto de vista radiativo, para el desarrollo de “materia biológica” en las subcapas heladas de la superficie, compuestas de una primera

capa de hielo de CO₂, cuyo espesor varía a lo largo del año debido al ciclo estacional de deposición-sublimación del CO₂ atmosférico, como ya se ha comentado anteriormente, pudiendo llegar a ser de 1 metro de profundidad, y que cubre el suelo de *permafrost* donde se encuentra la capa de hielo de H₂O. Esta aparición-desaparición de la capa de CO₂ helado durante el año dará lugar a su vez a variaciones estacionales en los niveles de UV en la propia superficie y subsuperficie. Así, por ejemplo, podría estimarse la profundidad óptima en la capa de los polos de Marte donde se esperaría encontrar un entorno apropiado según las condiciones radiativas ambientales para encontrar algunas “señales de vida”. Y esto serviría como aplicación en futuras misiones con sondas destinadas a las altas latitudes de Marte, por ejemplo, para indicar hasta que profundidad habría que perforar para “encontrar” tales señales de vida.

Referencias:

1. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/viking.html>
2. Cockell C., D.C. Catling, W.L. Davis, K. Snook, R.L. Kepner, P. Lee and C.P. McKay. The Ultraviolet Environment of Mars: Biological Implications Past, Present, and Future. *Icarus* 146, 343-359 (2000).
3. Patel M.R., J.C. Zarnecki and D.C. Catling. Ultraviolet Radiation on the Surface of Mars and the Beagle 2 UV Sensor. *Planet. Sp. Sci.* 50, 915-927 (2002).
4. Córdoba-Jabonero C., L.M. Lara, A.M. Mancho, A. Márquez and R. Rodrigo. Solar ultraviolet transfer in the Martian atmosphere: biological and geological implications. *Planet. Sp. Sci.* 51, 399-410 (2003).
5. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>
6. Iqbal M. An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, 1983 (Original source: U.S. Standard Atmosphere. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976).
7. Setlow R. and B. Doyle. The action of radiation on dry Deoxyribonucleic acid. *Biochim. Biophys. Acta* 15, 117-125 (1954).
8. Jones L.W. and B. Kok. Photoinhibition of chloroplast reactions. I. Kinetics and action spectra. *Plant Physiol.* 41, 1037-1043 (1966).
9. McKinlay A.F. and B.L. Diffey. A reference action spectrum for ultraviolet-induced erythema in human skin. In *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations* (W. R. Passchler and B. F. M. Bosnjakovic, Eds.), Elsevier, Amsterdam, 83-87 (1987).
10. Green A.E.S., T. Sawada and E.P. Shettle. The middle UV reaching the ground. *Photochem. Photobiol.* 19, 251-259 (1974).
11. Cullen, J.J., P.J. Neale and M.P. Lesser. Biological weighting function for the inhibition of phytoplankton photosynthesis by ultraviolet radiation. *Science* 258, 646-650 (1992).
12. Perovich D.K. A theoretical model of ultraviolet transmission through Antarctic sea ice. *J. Geophys. Res.* 98 (C12), 22579-22587 (1993).
13. Cockell C.S. and C. Córdoba-Jabonero. Coupling of climate change and biotic UV exposure through changing snow-ice covers in terrestrial habitats. *Photochem. Photobiol.* 79(1) (2004).
14. Hansen G.B. Control of the radiative behaviour of the Martian polar caps by surface CO₂ ice: Evidence from Mars Global Surveyor measurements. *J. Geophys. Res.* 104 (E7), 16471-16486 (1999).

15. Córdoba-Jabonero C., M.R. Patel, M.P. Zorzano and C. Cockell. Assessment for the possibilities of habitability in martian polar environments. Proceedings of the 3rd European Workshop on Exo/Astrobiology, Madrid (Spain), November 18-20, 2003, *ESA SP-545* (2004).