rac.2025.113.1.org05
RACSG.2025;113(01):66-77
Recibido: 07/01/2025 | Aceptado: 28/02/2025

ORIGINAL

MARTE: OBJETIVO GEOLÓGICO Y ASTROBIOLÓGICO Y PRIMER DESTINO PLANETARIO DE LA HUMANIDAD

MARS: GEOLOGICAL AND ASTROBIOLOGICAL TARGET AND FIRST PLANETARY DESTINATION OF HUMANKIND

Jesús Martínez Frías[1,2]
1. Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM)
2. Académico Numerario de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España

RESUMEN
La humanidad se está abriendo al espacio en toda su dimensión interdisciplinar. La geología planetaria y astrobiología vienen demostrando, desde hace decenios, que son cruciales en este proceso. Marte es nuestro primer destino planetario y el planeta que, por primera vez, convertirá a la próxima generación en la primera generación interplanetaria. En este artículo se abordan algunas cuestiones candentes y actuales, donde ambos campos de conocimiento convergen en la investigación y exploración del planeta rojo y se contextualiza el papel de la geología planetaria, a distintos niveles, en las actuales hojas de ruta astrobiológicas, destacando su relevancia científica y académica.

Palabras clave: Marte; Geología planetaria; Astrobiología; Investigación; Humanidad.

ABSTRACT
Humankind is opening up to space in its whole interdisciplinary dimension. Planetary geology and astrobiology have been demonstrating, for decades, that they are crucial in this process. Mars is our first planetary destination, and the planet that, for the first time, will make the next generation the first interplanetary generation. This article addresses some ongoing issues, where both fields of knowledge converge in the research and exploration of the Red Planet. Likewise, the role of planetary geology is contextualized, at different levels, in the currently-active astrobiological roadmaps, highlighting its scientific and academic relevance.

Keywords: Mars; Planetary geology; Astrobiology; Research; Humankind.

Correspondencia
Jesús Martínez Frías
Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España
Calle Valverde, 22 · 28004 · Madrid, España
E-mail: secretaria@rac.es

INTRODUCIÓN

Marte siempre ha fascinado a la humanidad. Desde la mitología clásica (probablemente incluso mucho antes) a la ciencia, el planeta rojo, constituye un elemento más, que ejemplifica, nuestra curiosidad e interés ancestral por adentrarnos en los misterios del cosmos.

La geología planetaria nos viene permitiendo, desde hace decenios, contribuir a un mayor conocimiento del "planeta rojo", su origen y evolución, recomponiendo el intrincado rompecabezas de su tremenda transformación paleoambiental (Martínez-Frías & Madero, 2004; Martínez-Frías et al., 2008; Martínez-Frías, 2009; USGS, 2023, Martínez-Frías, 2024). Marte ha sufrido una enorme transformación. En sus

primeras etapas evolutivas, hace miles de millones de años, el planeta ha pasado de tener un ambiente pasado húmedo, con una atmósfera más densa y rica que la actual y la existencia de agua líquida estable en su superficie (con ríos, lagos, torrentes e incluso un posible gigantesco océano en su hemisferio norte), a un Marte actual sin prácticamente actividad geodinámica, más yermo y sin apenas energía (Ehlmann et al. 2011; Matsubara et al. 2013; Ramirez y Craddock, 2018) (Fig.1). Obviamente, esto enlaza directamente con sus condiciones de habitabilidad, con la exploración de su cada vez más completo registro geológico y con la búsqueda de posibles biomarcadores en sus diferentes contextos geológicos, principalmente sedimentarios, aunque también hidrotermales.

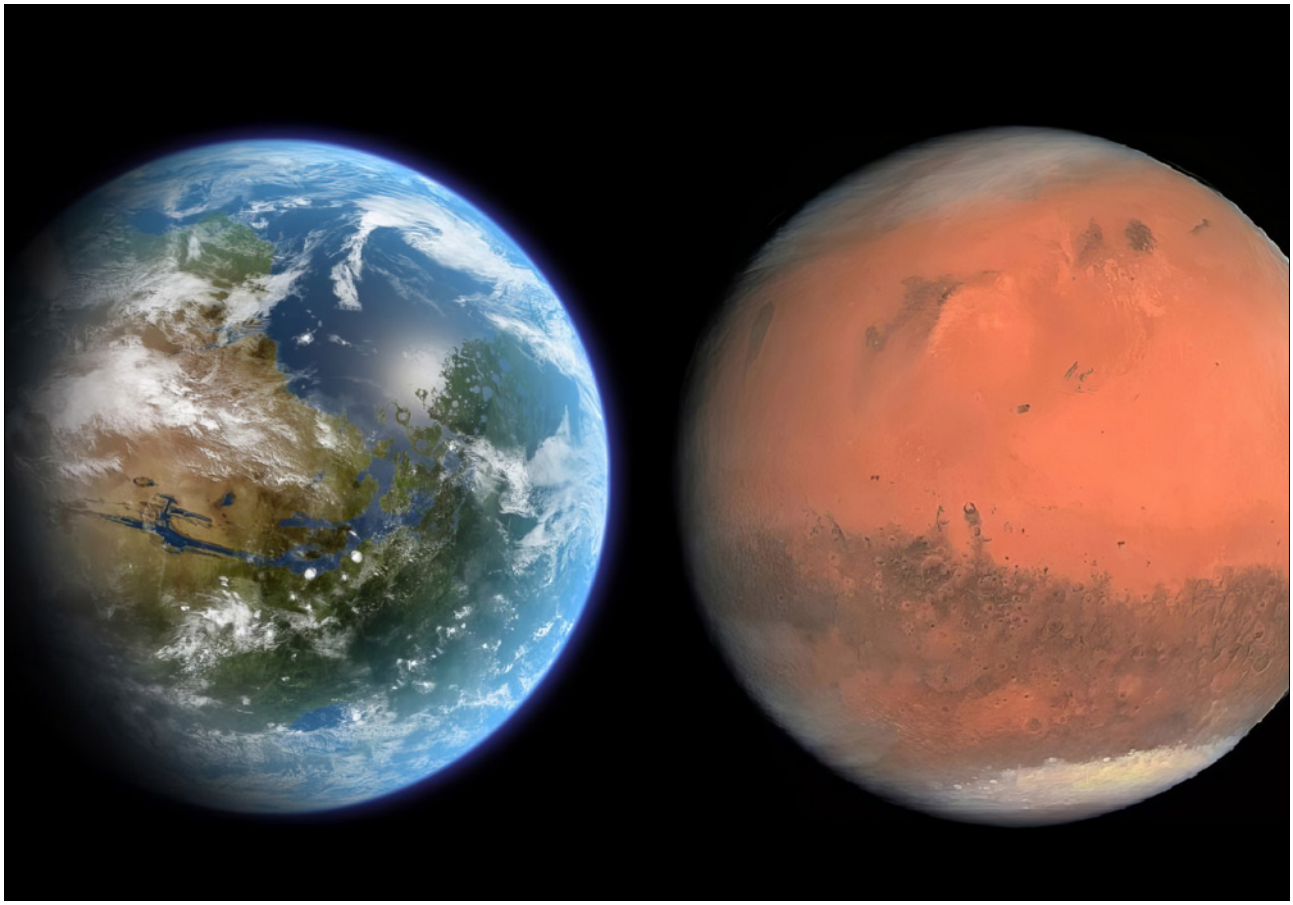

Figura 1. Marte ha sufrido una evolución a lo largo de su historia planetaria, desde un Marte "húmedo" con la presencia de agua líquida en su superficie y una atmósfera más parecida a la de la Tierra y volcanes activos, hasta el Marte actual, que ha perdido su energía y vitalidad geológica. Imagen: Daein Ballard/ESA

Se puede decir que todas las misiones a Marte (TPS, 2003) tienen una directriz geológica previa, que marca sus objetivos científicos generales. Sin remontarnos a los Viking de los años 70 --y centrándonos en los últimos ***rovers***, los MER (Mars Exploration Rover), el Curiosity (Mars Science Laboratory) y el Perseverance (Mars 2020) (Fig. 2)--, el hecho de poder contar con información cartográfica geológica, e interpretaciones de modelos paleoambientales de los sitios de aterrizaje constituye, sin duda, un factor crucial.

Sería pretencioso por mi parte abordar en esta contribución todo lo realizado en Marte en más de medio siglo de investigación y exploración, con misiones de diferentes países y agencias espaciales. Sin embargo, sí considero apropiado focalizar los ***cuatro pilares*** sobre los que se sustenta actualmente la misma, en el ámbito de la geología planetaria y astrobiología (Martínez-Frías, 2015):

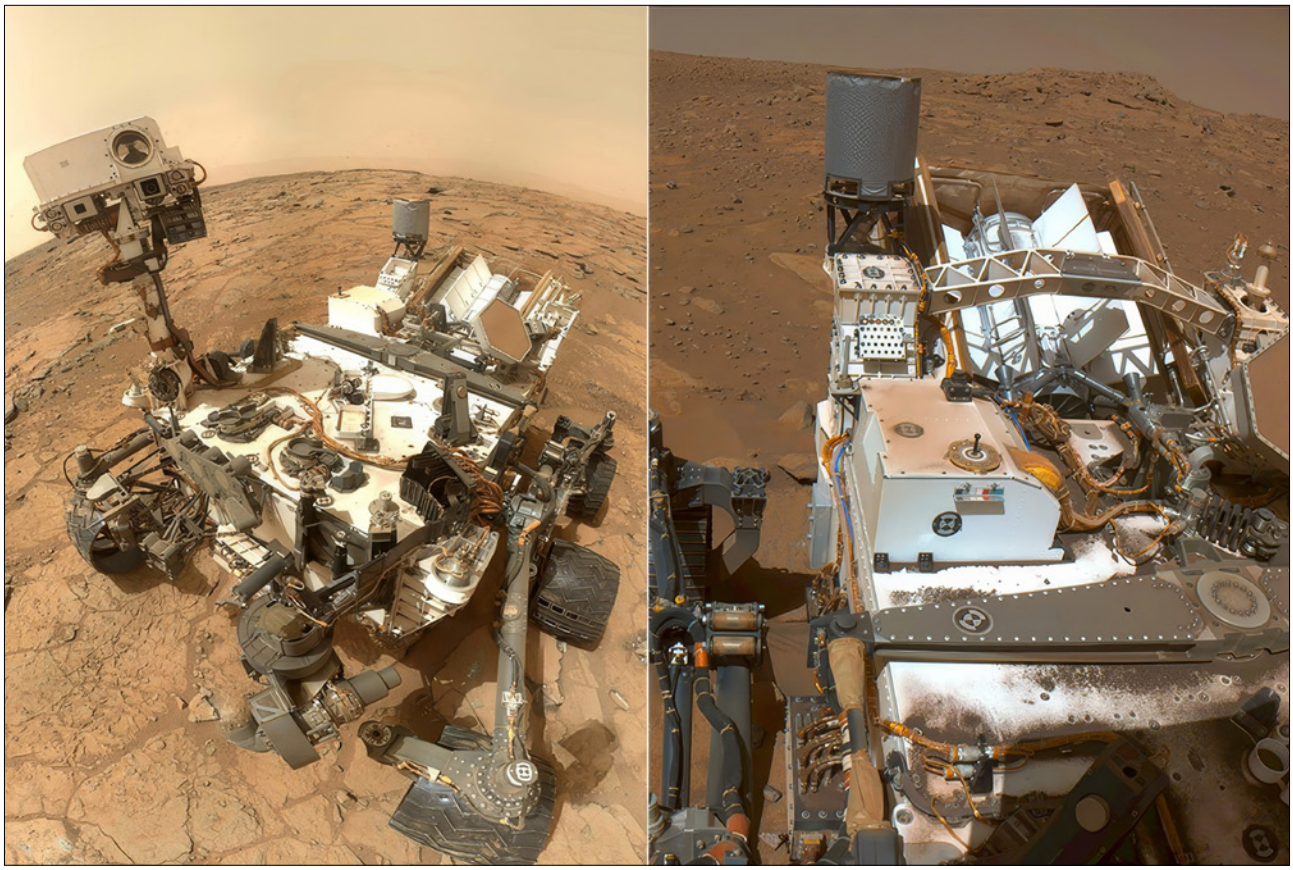

Figura 2. Fotografías reales en Marte de los rovers Curiosity (izquierda) y Perseverance (derecha). Misiones, NASA-MSL y NASA-Mars2020. Imágenes: NASA/JPL-Caltech/MSSS

- meteoritos de Marte;
- misiones a Marte, incluyendo orbitadores, aterrizadores (landers) y rovers (TPS, 2003);
- cámaras de simulación planetaria y
- análogos de Marte.

Estos cuatro pilares conceptuales, y también metodológicos, son los que nos permiten comprender mejor cómo ha sido su origen y evolución planetaria y también desarrollar nuevos modelos y establecer directrices científicas para futuras exploraciones. En síntesis, han contribuido, entre otros aspectos, a:

- conocer aspectos de Marte antes de enviar una misión, gracias a la información contenida en meteoritos marcianos, eyectados como consecuencia del impacto de enormes objetos (probablemente asteroidales) contra su superficie;
- realizar ensayos termodinámicos sobre simulantes y rocas marcianas, analizando su composición y alteraciones de manera controlada en las cámaras de Marte (Muñoz-Caro et al., 2006a). Algunos de estos ensayos tienen una importancia astrobiológica crucial, ya que engarzan con cuestiones ligadas a la habitabilidad superficial y subsuperficial y
- establecer determinadas zonas de la Tierra, llamadas análogos de Marte (Muñoz-Aragón et al., 2017; Léviellé, 2023), que se vienen utilizando como laboratorios naturales para la prueba de prototipos de ingeniería y el uso de espectrómetros portátiles similares a los que llevarán los *rovers*, validar modelos mineralógicos y geoquímicos, seleccionar estándares a efectos de comparaciones sobre mineralogía y petrología interplanetaria, entrenar astronautas sobre geología planetaria y astrobiología, etc.

En este artículo se abordarán algunos de estos aspectos, intentando: 1) contextualizar el conocimiento actual sobre el planeta rojo en el marco de la evolución histórica de su exploración e investigación; 2) definir cuáles son, hasta el momento, las zonas más interesantes o candentes, cuya geología marca la presencia en ellas de misiones y concretamente ***rovers*** y 3) establecer cómo han variado los objetivos científicos, en paralelo al mayor y mejor conocimiento geológico del planeta y, desde el punto de vista astrobiológico, compartiendo el interés por la búsqueda de huellas de vida pasada o presente con el de la futura habitabilidad humana.

ALGUNAS CUESTIONES GEOLÓGICAS Y ASTROBIOLÓGICAS EN RELACIÓN CON MARTE

En la actualidad nos podemos hacer algunas preguntas interesantes desde el punto de vista geológico y astrobiológico acerca del planeta rojo:

- ¿Cuáles son actualmente los motivos para explorar geológicamente Marte?
- ¿Qué nos ha aportado y nos aporta la comprensión de la geología terrestre enfocándola como geología planetaria?
- ¿Podríamos encontrar biomarcadores de vida pasada en minerales, sedimentos y rocas de Marte gracias a los estudios geológicos?
- ¿Qué supone la evolución secuencial de objetivos científicos, en el contexto de la transformación sufrida por Marte en el ámbito de su habitabilidad?
- ¿Cuáles están siendo los resultados de los orbitadores y los ***rovers*** desde una directriz geológica de sus actividades y rutas?
- ¿De qué manera desde la Tierra podemos también complementar los datos de las misiones a Marte?

La contestación a estas cuestiones, que irá desgranándose más adelante, es crucial para comprender las estrategias de investigación actualmente en desarrollo.

Marte forma parte de los denominados planetas terrestres o telúricos. Es decir, que estudiando Marte avanzamos no solo en el conocimiento sobre su origen y evolución, sino también en el del propio contexto planetario del que forma parte la Tierra, como también Venus y Mercurio (la Luna tuvo un origen posterior).

No debemos olvidar que nuestro planeta posee una importante energía interna y actividad geodinámica, interna y externa, que ha hecho que queden solo retazos de los materiales y procesos más prístinos. Es decir, no existen apenas lugares en la Tierra donde se preserven las propiedades originales de lo que ocurrió hace más de 4500 millones de años. El estudio geológico de Marte, junto con el de los meteoritos asteroidales más primitivos e indiferenciados (las condritas, Muñoz-Caro & Martínez-Frías, 2006) está siendo fundamental para comprender mejor los orígenes de la Tierra y de la vida.

Además, existe, otro motivo de gran relevancia para explorar geológicamente Marte: la planetología comparada Tierra-Marte nos permite desarrollar modelos evolutivos comparativos acerca de los cambios globales, tanto desde el punto de vista litosférico como atmosférico. En este sentido, sabemos que Marte ha sufrido una tremenda transformación geológica, ambiental y climática (básicamente, su parón geodinámico, pérdida del agua líquida y su cambio hacia un modelo global marciano de mayor aridez) (Hartmann et al. 2001), de la que podemos y debemos aprender para el futuro de la sostenibilidad de la Tierra y la vida.

La geología terrestre extrapolada a la geología planetaria es la que nos está proporcionando las claves para desentrañar los procesos ocurridos en el planeta rojo a lo largo de su registro geológico y paleoambiental. Entre todos ellos, el volcanismo ha sido de especial relevancia, por su extensión al conjunto del planeta (Fig.3).

Los principios geológicos identificados en la Tierra, válidos para establecer marcos geodinámicos, mineralogenéticos, geofísicos y geoquímicos a diferentes escalas, pueden extrapolarse a Marte y al resto de planetas de tipo rocoso (en cierto modo también a las lunas heladas), en las que el hielo es el mineral o la roca principal que forma parte de sus cortezas y mantos.

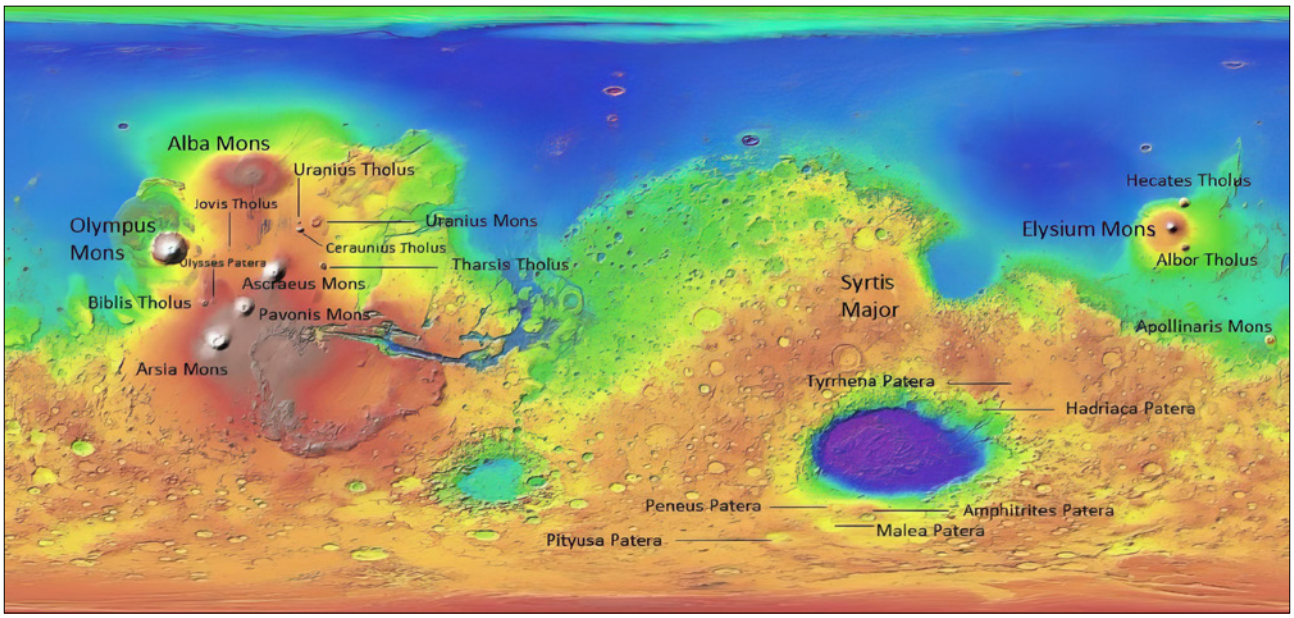

Figura 3. Mapa topográfico de Marte, donde se muestra la denominada "dicotomía litosférica" de sus dos hemisferios y algunos de sus principales volcanes. Imagen: ASA/USGS/USGS Astrogeology Center/Secosky

En relación con la tercera cuestión sobre los biomarcadores, planteada previamente, es gracias a la geología planetaria que:

- se están identificando los paleoambientes más apropiados para su preservación, considerando las condiciones hostiles para la vida de la superficie del planeta;
- se está evaluando y comprobando experimentalmente el papel de las arcillas y de los ambientes sedimentarios "de baja energía", como facilitadores de la conservación de posibles biofirmas de vida pasada, si es que existió y
- se está analizando cómo los minerales y el polvo regolítico basáltico constituyen elementos de protección frente a la actual radiación UV marciana (entre 200-400 nm) (Muñoz-Caro et al., 2006). Mediante experimentos mineralógicos realizados en las cámaras de simulación de ambientes planetarios), se ha comprobado que con tan solo 300 micras de polvo volcánico basáltico, o con 1 mm de jarosita o yeso es suficiente (Martínez-Frías et al. 2006) para que una supuesta colonia microbiana que habite a esa escasa distancia de la superficie, pueda estar resguardada de dicha radiación UV.

Con respecto a la evolución secuencial de los objetivos científicos, existe un tránsito –realmente un salto tecnológico-- desde las antiguas misiones de los MER ("Mars Exploration Rover") a las actuales y futuras del Curiosity, Perseverance y la Mars Sample Return (y otras en desarrollo). Esta evolución ha pasado por tres etapas esenciales (Green, 2014):

- la búsqueda de ambientes habitables;
- la exploración de huellas de vida pasada o presente (bíomarcadores);
- la caracterización de las condiciones de habitabilidad para futuras misiones tripuladas. Hay que tener en cuenta que estas etapas no son incompatibles ni excluyentes entre sí, pero sí describen, de forma general, los objetivos esenciales del último cuarto de siglo de exploración del planeta rojo. En el propio ***rover*** Perseverance ya se detecta esta evolución con un instrumento, el MOXIE ("Mars OXygen In situ resource utilization Experiment") que está generando oxígeno a partir del CO2 mayoritario de la atmósfera de Marte, ligado directamente a la futura habitabilidad humana (Hecht et al. 2024), o en las cápsulas cilíndricas en las que estamos incorporando muestras que vendrán a la Tierra para su investigación detallada a través de la futura misión de recuperación de muestras de la NASA "Mars Sample Return" (Fig. 4).

Como se expondrá más adelante, ambos aspectos relacionados con la habitabilidad de microorganismos y de humanos forman parte de la hoja de ruta de NASA ("NASA Astrobiology Roadmap") que en un principio estaba más enfocado a la vida microbiana y sus biomarcadores.

nes, que dan lugar a estructuras impactogénicas de decenas e incluso cientos de km de diámetro, también producen la movilización de fluidos atrapados en las rocas, propiciando una actividad geodinámica que origina nuevos procesos y contribuye a la creación de nichos con agua líquida, donde la vida podría emerger.

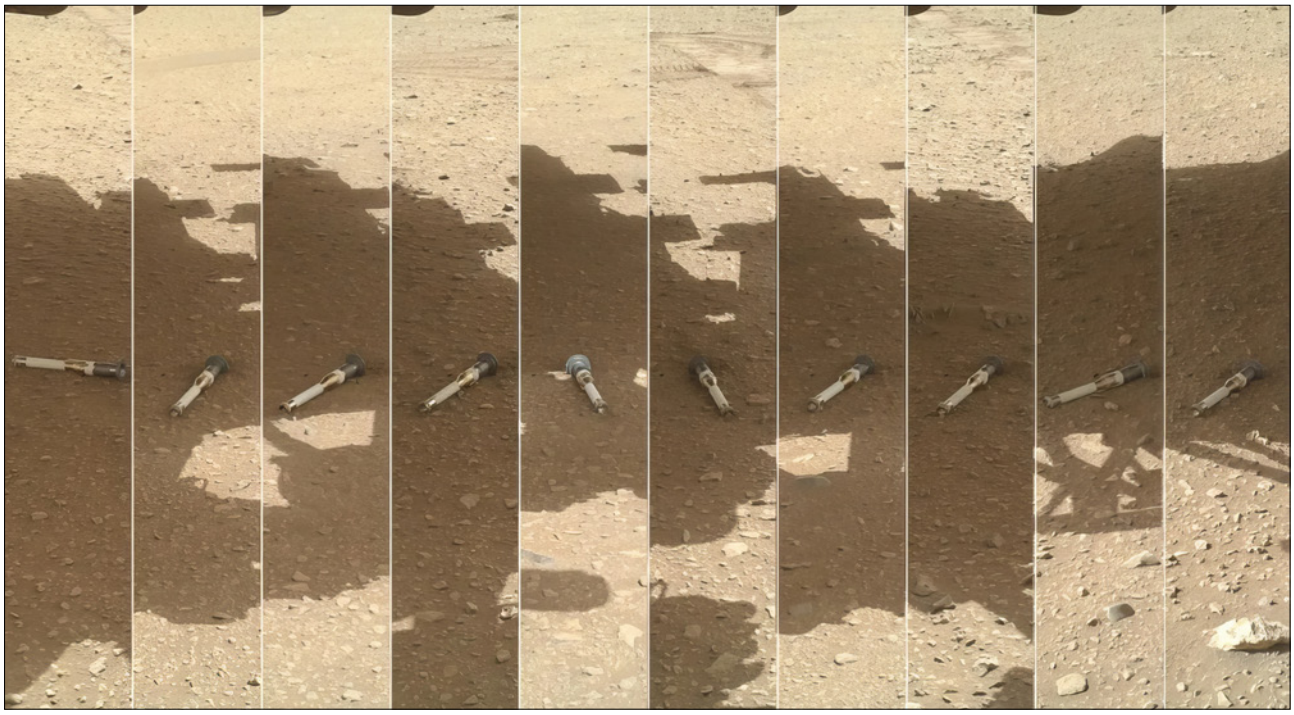

Figura 4. Combinación de imágenes tomadas mostrando los tubos de muestras "in situ" en Marte, tras ser depositados sobre el suelo marciano por el rover Perseverance. En el futuro serán recuperados por la misión Mars Sample Return. Imagen: NASA/JPL-CALTECH/MSSS

Siguiendo el esquema planteado, los resultados que están obteniendo los orbitadores (que realizan estudios geológicos desde la órbita marciana) y los ***rovers***, principalmente los MER (Spirit y Opportunity), Curiosity y Perseverance, evidencian la importancia de la geología planetaria en sus objetivos y definición de rutas. No es casual que Opportunity, Curiosity y Perseverance hayan aterrizado en grandes cráteres de impacto: Gusev, Gale y Jezero, respectivamente (Green & Cabrol, 1997; Barlow, 2010; Robbins & Haynek, 2012). Geológicamente, este tipo de cráteres son, por distintas razones, zonas muy relevantes de exploración geológica y astrobiológica: a) gracias al desmantelamiento generado por el impacto, permiten investigar bajo la superficie marciana, tanto materiales y procesos geológicos y b) las altas condiciones de presión y temperatura originadas por estas colisio-

Tanto en Gusev como en Gale y Jezero, se identificaron antiguos lagos (Mangold et al. 2021; Losa-Adams et al. 2021; Goldspiel, 2023). Cada uno de ellos posee características geológicas adicionales, más allá de los cráteres en sí mismos, que los ejemplifican como zonas de exploración planetaria y búsqueda de vida (minerales de la arcilla, ópalo, carbonatos, delta, cambios en la escorrentía superficial, materiales correspondientes al Marte antiguo acuoso, etc.).

El ***rover*** Opportunity, gemelo del Spirit que aterrizó en el cráter Gusev, tuvo como objetivo geológico el estudio de la zona de Meridiani Planum. Y lo hizo guiado por la presencia de un mineral (la hematites). Estudios previos habían confirmado el origen hidrotermal de este óxido de hierro, lo que conllevaba explorar otra región marciana relacionada con el agua, pero en un

contexto diferente al lacustre. Además, en esta zona, el ***rover*** Opportunity descubrió la jarosita (Klingelhofer et al. 2004), importantísima por ser un mineral que requiere agua líquida para formarse, siendo, por tanto, un geoindicador de habitabilidad. Una anécdota interesante para España es que la jarosita fue descubierta y definida en nuestro país a nivel mundial en el Barranco del Jaroso, Sierra Almagrera, Almería (Martínez Frías et al. 2004), constituyendo esta zona por ello la Localidad Tipo Mundial y un análogo de Marte de primer nivel, en relación con este tipo de ambientes (Fig.5).

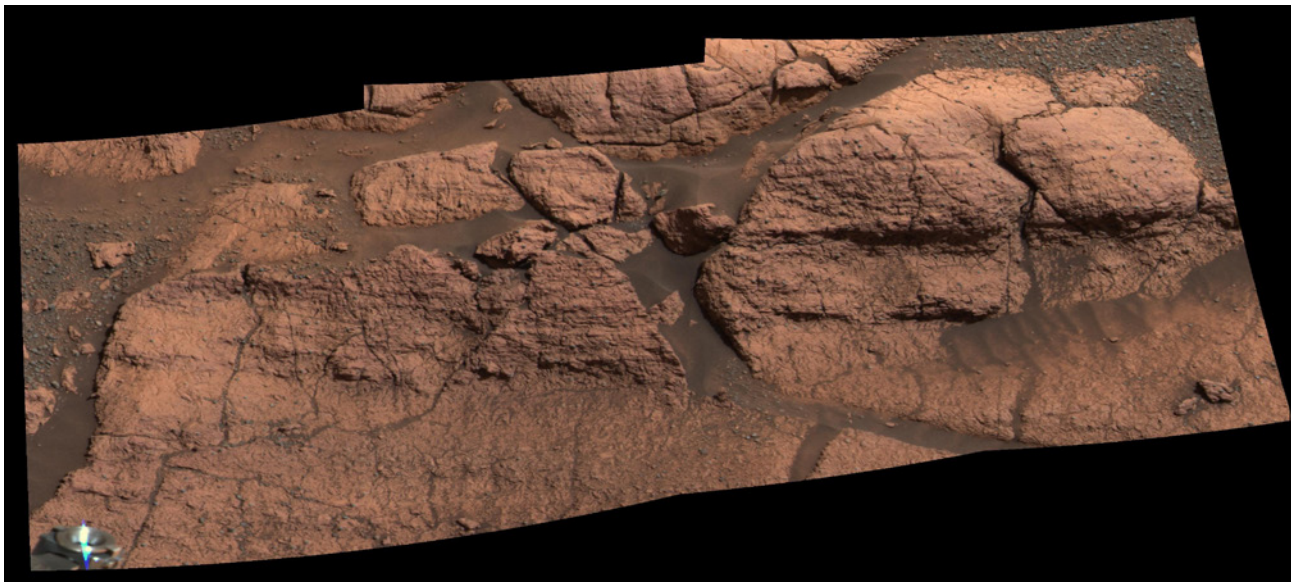

Figura 5. Mosaico de imágenes tomado por la cámara del "Mars Exploration Rover"-Opportunity correspondiente al afloramiento marciano de "El Capitán", donde se detectó la presencia de jarosita. Imagen: NASA.

Por último, desde la Tierra, podemos complementar la investigación de Marte, como se ha indicado en un principio, a través de los meteoritos de Marte y las cámaras de simulación planetaria y, sobre todo, gracias a los denominados análogos de Marte. En España tenemos una gran geodiversidad y riqueza geológica, que nos permite disponer de extraordinarios análogos que vienen utilizándose como laboratorios naturales, tales como Río Tinto, el Jaroso, Canarias, principalmente Lanzarote y Tenerife (Fig. 6), el Golfo de Cádiz y la región volcánica de Calatrava (Ciudad Real), entre otros (Martinez-Frías et al. 2017). Cada uno de ellos contribuye, como si se tratara de las piezas de un rompecabezas, a abordar distintos aspectos de la geodiversidad de Marte y a comprender muchos de los procesos geológicos allí ocurridos, así como a establecer criterios para definir zonas de habitabilidad e importancia astrobiológica.

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA DE MARTE EN LAS HOJAS DE RUTA ASTROBIOLÓGICAS

Una vez descritas las cuestiones geológicas y astrobiológicas más candentes en relación con el planeta rojo, parece procedente detallar cómo todo ello encaja en las hojas de ruta astrobiológicas. Para ello, un primer análisis lleva a trasladar los aspectos esenciales y generales de dichos ***roadmaps*** a los específicos relacionados con Marte. Básicamente son dos grandes hojas de ruta, de la NASA y la ESA, que comparten en lo esencial objetivos y metodologías similares (Des Marais et al., 2003; Hornek et al. 2016). El primero ("NASA Astrobiology Institute") fue el pionero y, además, el que ha conllevado una importante evolución y actualización conceptual, durante estos últimos 22 años, que viene marcando las directrices globales.

El primer tema abordado en la hoja de ruta se refiere a cómo empezó y se desarrolló la vida. Los estudios que se vienen desarrollando en Marte son cruciales a efectos de establecer modelos de planetología comparada sobre la emergencia de la vida. Hasta el momento, la vida en la Tierra es la única que conocemos y el hallazgo de vida pasada o presente en el planeta

Figura 6. Dos zonas importantes de investigación en España como análogos de Marte, sobre geología planetaria y astrobiología: arriba, zona de los Azulejos del Teide (Tenerife); abajo: Parque Nacional de Timanfaya (Lanzarote), Islas Canarias. Lanzarote se viene utilizando además como zona de instrucción de astronautas de la ESA, NASA y JAXA.

o de sus posibles biofirmas, permitiría comprender si los principios metabólicos de la vida más primitiva, siguen o no los mismos esquemas. A ellos habría que unir también, en caso de que se detectara, cómo ha sido la coevolución biológica y geológica del ecosistema donde esta ha emergido.

La segunda cuestión se refiere a la posible existencia de vida más allá de la Tierra, con objeto de establecer sus límites termodinámicos y ambientales. Los estudios que se vienen desarrollando en Marte, en los que la geología planetaria constituye una disciplina esencial, ayudan a comprender qué es lo que hace que un planeta sea habitable y también nos facilita el reconocimiento de biofirmas, estableciendo diferencias entre geo y bíomarcadores (Martínez Frías et al. 2007). Asimismo, si la vida en Marte emergió en su época de pasado acuoso y ya no existe, también contribuye a comprender sus causas y condicionantes (presión atmosférica, radiación, temperatura, etc).

El tercer punto se centra en el futuro de la vida en la Tierra y más allá. Aquí son dos los aspectos principales en los que la geología planetaria engarza con la astrobiología. El primero se centra en los aspectos relacionados con la búsqueda de vida en Marte (y otros cuerpos planetarios). El segundo se focaliza en todas las complejas variables relacionadas con las futuras misiones tripuladas. Para esto último, la geología planetaria también posee una importancia crucial en el ámbito de la habitabilidad per se y en la utilización de los denominados ISRU ("in situ resource utilization"). Solamente con un buen conocimiento geológico de las diferentes zonas Marte se podrá garantizar la habitabilidad de las futuras misiones tripuladas.

CONSIDERACIONES FINALES

La vida no ha dejado de conquistar otros ambientes desde que apareció en la Tierra, hace casi 4000 millones de años. Se ha extendido de los mares y océanos a los continentes y de éstos a la atmósfera. La humanidad continúa este proceso hacia el espacio y nosotros, nuestra generación, está siendo testigo de ello. Somos la generación que está viviendo los primeros pasos científicos, tecnológicos y socio-culturales que está dando el ser humano de la Tierra al Espacio, con todo lo que ello conlleva como desafío presente y futuro.

El espacio es un crisol interdisciplinar y también sociocultural. Estamos siendo conscientes de que la exploración y nuestra migración hacia el cosmos requieren visiones y acciones coordinadas, que comportan una imprescindible cooperación internacional. Una cooperación que puede generar sinergias, incluso más allá de lo esperado, propiciando una nueva percepción de nuestro planeta como un todo.

Hace tan solo 6 años, se cumplía el 50º Aniversario del primer alunizaje (Dunbar, 2024) protagonizado por Neil Armstrong, Edwin (Buzz) Aldrin y Michael Collins. A ellos, en el marco del programa Apolo, les siguieron otros 9 astronautas en un total de 11 misiones tripuladas a nuestro satélite, que completaron 367 órbitas alrededor de la Luna, 6 alunizajes y un tiempo total de permanencia allí de 81 horas y 5 minutos. La última misión tripulada (Apolo 17) se remonta a 1972. Tras todas ellas, ha habido muchas más, aunque sin presencia humana, desarrolladas por numerosos países. El programa Artemisa (Williams, 2024), en sus distintas fases (Fig.6), aborda estas cuestiones y continúa todo lo realizado hace ya medio siglo en las misiones Apolo y las sucesivas misiones robóticas enviadas por diferentes países; pero esta vez se centra en la Luna como objetivo táctico y en Marte como objetivo estratégico. El programa, aunque con algún retraso, ya está en desarrollo y se están obteniendo resultados espectaculares.

2021 se definió como el "Año de Marte", con la llegada casi simultánea de tres misiones de países tan distantes como EEUU (NASA/Mars2020), China (Tianwen1) y Emiratos Árabes Unidos (HOPE). Como se ha descrito previamente, la Geología Planetaria ha demostrado -y está demostrando- ser decisiva para comprender el origen y los procesos de evolución de planetas, lunas, asteroides y, desde el punto de vista astrobiológico, para determinar las claves científicas de búsqueda de vida extraterrestre y también para nuestra futura migración al espacio. Ello constituye un signo inequívoco del cambio de paradigma en el que estamos inmersos y que, estoy convencido, marcará socioculturalmente a las próximas generaciones. Marte es el primer destino planetario de la humanidad en su salida al espacio; el planeta que, por primera vez, convertirá a la próxima generación (tal vez incluso a la ya existente) en la primera generación interplanetaria (Martínez-Frías, 2024). Un desafío científico y tecnológico en el que tanto la geología planetaria como la astrobiología están actuando como puntas de lanza interdisciplinares para la futura habitabilidad en el espacio. Esto requerirá,

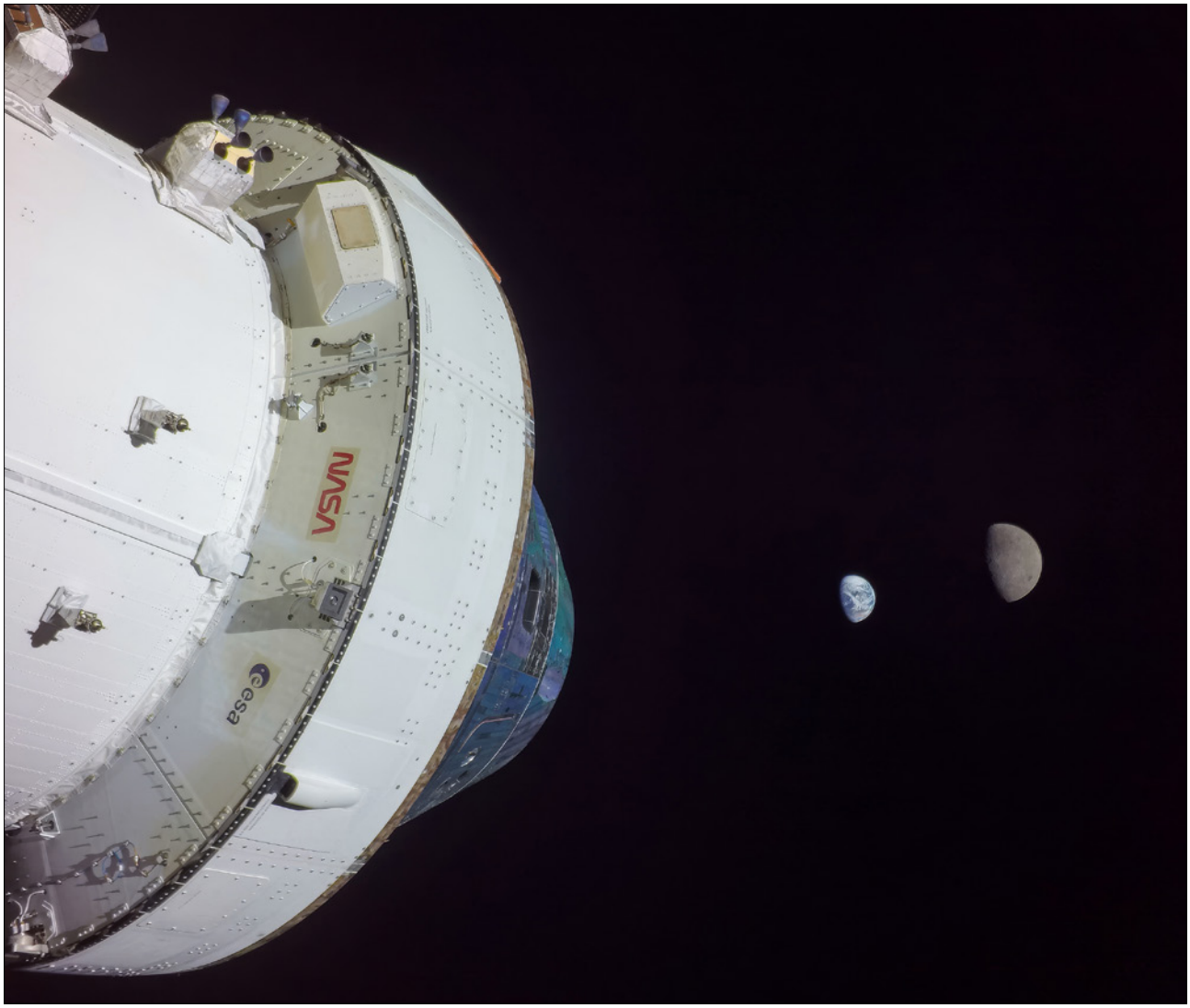

Figura 7. La nave Orión, la Tierra y la Luna capturadas durante la primera fase del programa Artemisa. Imagen: NASA.

como ya está ocurriendo, la cooperación internacional de las grandes agencias espaciales y también de algunos agentes privados. Es de esperar que estas sinergias fomenten la visión global de nuestro planeta como nuestra casa común, y que contribuya también a su sostenibilidad y a su protección.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor/a de este artículo declara no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Barlow, N.G. (2010) What we know about Mars from its impact craters GSA Bulletin; May/June 2010; v. 122; no. 5/6; p. 644–657; doi: 10.1130/B30182.1

2. Des Marais DJ, Allamandola LJ, Benner SA, Boss AP, Deamer D, Falkowski PG, Farmer JD, Hedges SB, Jakosky BM, Knoll AH, Liskowsky DR, Meadows VS, Meyer MA, Pilcher CB, Nealson KH, Spormann AM, Trent JD, Turner WW, Woolf NJ, Yorke HW. T. (2003) he NASA Astrobiology Roadmap. Astrobiology. 3(2):219-35. doi: 10.1089/153110703769016299. PMID: 14577870.

3. Dunbar, B. (2024) Apollo 50th https://www.nasa.gov/specials/apollo50th/

4. Ehlmann, B., Mustard, J., Murchie, S. et al. (2011) Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars. Nature 479, 53–60. https://doi.org/10.1038/nature10582

5. Goldspiel, J.M. (2023). Mars, Paleolakes. In: Gargaud, M., et al. Encyclopedia of Astrobiology. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65093-6_5600

6. Green, J. (2014) A Checkup on Future Mars Missions. Future Planetary exploration https://futureplanets.blogspot.com/2014/06/a-checkup-on-future-mars-missions.html

7. Green, E.A. & Cabrol, N.A. (1997) Limnologic Analysis of Gusev Crater Paleolake, Mars.Icarus Volume 130, Issue 2, December 1997, Pages 461-474

8. Hartmann, William & Neukum, Gerhard. (2001). Chronology and Evolution of Mars. Space Science Reviews - Space Sci Rev. 96. 165-194. 10.1023/A:1011945222010.

9. Hecht, M.H., Hoffman, J.A & Steen, P. (2024) Summary report on the Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE) Tenth International Conference on Mars 2024 (LPI Contrib. No. 3007) 3057.pdf https://www.hou.usra.edu/meetings/tenthmars2024/pdf/3057.pdf

10. Horneck G, Walter N, Westall F, Grenfell JL, Martin WF, Gomez F, Leuko S, Lee N, Onofri S, Tsiganis K, Saladino R, Pilat-Lohinger E, Palomba E, Harrison J, Rull F, Muller C, Strazzulla G, Brucato JR, Rettberg P, Capria MT. AstRoMap European Astrobiology Roadmap. Astrobiology. 2016 Mar;16(3):201-43. doi: 10.1089/ast.2015.1441. PMID: 27003862; PMCID: PMC4834528.

11. Klingelhöfer G, Morris RV, Bernhardt B, Schröder C, Rodionov DS, de Souza PA Jr, Yen A, Gellert R, Evlanov EN, Zubkov B, Foh J, Bonnes U, Kankeleit E, Gütlich P, Ming DW, Renz F, Wdowiak T, Squyres SW y Arvidson RE. (2004) Jarosite and hematite at Meridiani Planum from Opportunity's Mossbauer Spectrometer. Science. 2004 Dec 3;306(5702):1740-5. doi: 10.1126/science.1104653. PMID: 15576610.

12. Léveillé, R. (2023). Mars Analogue Sites. In: Gargaud, M., et al. Encyclopedia of Astrobiology. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65093-6_939.

13. Losa-Adams, E., Gil-Lozano, C., Fairén, A.G. et al. Long-lasting habitable periods in Gale crater constrained by glauconitic clays. Nat Astron 5, 936–942 (2021). https://doi.org/10.1038/s41550-021-01397-x

14. Mangold, N.; Gupta, S. ; Gasnault, O. ; Dromart, G. ; Tarnas, J. D. ; Sholes, S. F.; Horgan, B.; Quantin-Nataf, C. ; Brown, A. J. ; Mouélic, S. Le ; Yingst, R. A.; Bell, J. F. ; Beyssac, O. ; Bosak, T. ; Calef, F. ; Ehlmann, B. L. ; Farley, K. A.; Grotzinger, J. P.; Hickman-Lewis, K. ; Holm-Alwmark, S. LU ; Kah, L. C.; Martinez-Frias, J.; McLennan, S. M. ; Maurice, S. ; Nuñez, J. I. ; Ollila, A. M.; Pilleri, P. ; Rice, J. W. ; Rice, M. ; Simon, J. I. ; Shuster, D. L. ; Stack, K. M.; Sun, V. Z. ; Treiman, A. H. ; Weiss, B. P. ; Wiens, R. C. ; Williams, A. J.; Williams, N. R. y Williford, K. H. (2021) Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars. Science, 374, 6568: 711- 717.

15. Martínez-Frías, J. y Madero, J. (2004) (Eds) Meteoritos y Geología Planetaria. Diputación Provincial de Cuenca, Ediciones Provinciales nº 23, 305p.

16. Martínez-Frías, J., Lunar, R., Rodríguez-Losada, J.A. y Delgado, A. (2004) "The volcanism-related multistage hydrothermal system of El Jaroso (SE Spain): Implications for the exploration of Mars Earth, Planets and Space 56: 5-8.

17. Martinez-Frias, J., Amaral, G. y Vázquez, L. (2006). Astrobiological significance of minerals on Mars surface environment. In: Amils, R., Ellis-Evans, C., Hinghofer- Szalkay, H. (eds) Life in Extreme Environments. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6285-8_4

18. Martinez-Frias, J., Lázaro, E. y Esteve-Núñez, A. (2007a) Geomarkers versus Biomarkers: Paleoenvironmental and Astrobiological Significance, AMBIO: A Journal of the Human Environment 36(5), 425-426

19. Martínez Frías, J. (2009) El geólogo planetario o astrogeólogo. En: La profesión de geólogo. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, ISBN: 978-84-9200-978-7, 201-218.

20. Martínez-Frías, J. (2015) Search for Life on Mars: an astrogeological approach. In: Kolb, V. (Ed.) Astrobiology: An Evolutionary Approach. 301-323.

21. Martínez-Frías, J., Mateo-Mederos, Mª E. y Lunar, R. (2017) The scientific and educational significance of geoparks as planetary analogues: the example of Lanzarote and Chinijo Islands UNESCO Global Geopark. Episodes 40-4:343-347.

22. Martínez-Frías, J. (2024) Geología Planetaria. La importancia de los análogos terrestres en la investigación paleoambiental y astrobiológica de Marte. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España. ISBN: 978-84-87125-86-7. 87p.

23. Matsubara, Y., Howard, A. D., y Gochenour, J. P. (2013) Hydrology of early Mars: Valleynetwork incision. J. Geophys. Res., 118(6), 1365-1387.

24. Muñoz Aragón, L., García Baonza, V. y Martínez Frías, J. (2017) Geodiversidad y geociencias planetarias. Análogos de Marte en España. Tierra y Tecnología. http://www.icog.es/TyT/index.php/2017/09/geodiversidad-y-geociencias- planetarias-analogos-de-marte-en-espana/

25. Muñoz-Caro, G.M., Mateo-Martí, E. & Martínez-Frías, J. (2006) Near-UV transmítanse of basalt dust as an analog of the Martian regolith: Implications for sensor calibration and astrobiology. Sensors 6:688-696.

26. Muñoz-Caro, G. & Martínez-Frías, J. (2006) Carbonaceous Dust in Planetary Systems: Origin and Astrobiological Significance. In Krüger, H. & Graps, A. (Eds), Dust in Planetary Systems, ESA/SP 643, 133-138.

27. Ramírez, R.M. y Craddock, R. (2018) The geological and climatological case for a warmer and wetter early Mars Nature Geoscience 11(4):230.

28. Robbins, S. J., and B. M. Hynek (2012), A new global database of Mars impact craters ≥1 km: 2. Global crater properties and regional variations of the simple-to-complex transition diameter, J. Geophys. Res., 117, E06001, doi:10.1029/2011JE003967.

29. TPS (2023a) https://planetary.s3.amazonaws.com/web/assets/pictures/mars- exploration-family-portrait-v13.jpg

30. USGS (2023) Astrogeology Science Center Home. U.S. Department of Interior | U.S. Geological Survey https://web.archive.org/web/20170706011251/https://astrogeology.usgs.gov/

31. Williams, C. (2024) Artemis. The Lates ton Artemis. https://www.nasa.gov/humans-in-space/artemis/#-missions

Si desea citar nuestro artículo:

Martínez Frías J. Marte: objetivo geológico y astrobiológico y primer destino planetario de la humanidad. RACSG.2025;113(01):66-77. rac.2025.113.1.org05