

ARTÍCULOS

Marte: experimentos de simulación y misiones de exploración espacial

Mars: simulation experiments and space exploration missions

Sandra Ignacia Ramírez Jiménez

ORCID: 0000-0002-4344-0896/ramirez_sandra@uaem.mx

Centro de Investigaciones Químicas (CIQ), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)/Sociedad Mexicana de Astrobiología

Marisela Aguirre Ramírez

ORCID: 0000-0002-9764-0324/marisela.aguirre@uacj.mx

Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ)

Pável Uliánov Martínez Pabello

ORCID: 0000-0002-8591-0622/pavel.martinez@ciencias.unam.mx

Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

RESUMEN

Se describen las características que hacen de Marte uno de los planetas de mayor interés en astrobiología. Se presenta información sobre las misiones de exploración espacial que han visitado al planeta, así como las que lo han estudiado remotamente. Se comentan algunas de las evidencias que sustentan la presencia de agua líquida en el pasado y en las actuales condiciones del planeta rojo, con especial énfasis en lo que esto significa para las investigaciones relacionadas con el estudio de ambientes análogos al de Marte. Se concluye con menciones de las misiones de exploración y algunas investigaciones orientadas hacia las futuras misiones tripuladas que se enviarán a Marte.

PALABRAS CLAVE

astrobiología, Marte, exploración, planeta, marciano, agua, bacteria

ABSTRACT

The characteristics that make Mars one of the most interesting planets in astrobiology are described. Information on the space exploration missions that have visited the planet is presented, as well as those that have studied it remotely. Some of the evidence that supports the presence of liquid water in the past and in the current conditions of the red planet is mentioned, with special emphasis on what this means for the investigations related to the study of analogous environments of Mars. The article concludes with mentions of the exploration missions and some research focused on the future manned missions that will be sent to Mars.

KEY WORDS

astrobiology, Mars, exploration, planet, martian, water, bacteria

Características generales e importancia astrobiológica de Marte

Marte, el cuarto planeta rocoso del sistema solar, ha sido objeto de fascinación y estudio desde tiempos ancestrales. Se localiza a 1.52 unidades astronómicas del Sol; gira sobre su propio eje en 24 horas y 37 minutos, con lo que se define un sol o un día marciano, y completa un año marciano en 687 días terrestres (tabla 1, p. 3). Su tamaño es de apenas una décima parte del tamaño de la Tierra, su masa es un orden de magnitud menor y todo ello resulta en que la gravedad de su superficie sea de sólo un tercio de la gravedad terrestre. Tiene una inclinación de 25.2° respecto a su eje de rotación, lo cual favorece la existencia de cuatro estaciones, como en la Tierra. Las temperaturas predominantes en Marte son bajas; el promedio ronda los 210 Kelvin (K), que equivalen a -63 °C. Un día muy cálido en el ecuador puede alcanzar los 303 K (30 °C), mientras que en los polos se han registrado temperaturas de hasta 133 K (-140 °C) en invierno.

La atmósfera marciana es cien veces menos densa que la terrestre (tabla 1, p. 3); por lo tanto, la radiación proveniente del Sol y la cósmica irradian su superficie con altas dosis. La atmósfera de Marte está compuesta principalmente por dióxido de carbono (CO₂), con porcentajes menores de argón (Ar) y nitrógeno molecular (N₂), así como por pequeñas cantidades de oxígeno molecular (O₂) y otros gases minoritarios, como monóxido de carbono (CO) y vapor de agua (H₂O) (Mahaffy et al., 2013). La corteza superficial de Marte la componen rocas basálticas, por lo que, en términos mineralógicos, las regiones terrestres más parecidas a la superficie del planeta rojo son los desiertos basálticos de los volcanes hawaianos (Ming et al., 1988).

El característico color rojo de la superficie marciana se debe a la presencia de óxidos de hierro (FeOx). Estudios muy recientes han comenzado a analizar el interior del planeta, que parece estar formado principalmente por rocas silicatadas, mientras que el núcleo puede estar compuesto por una aleación de hierro, níquel y azufre. La misión InSight de la agencia espacial norteamericana NASA (National Aeronautics and Space Administration), que actualmente se encuentra en la superficie de Marte (tabla 2 , pp. 5-8), podrá revelar la naturaleza del interior del planeta rojo.

Los asteroides Fobos y Deimos quedaron atrapados en la órbita de Marte y se convirtieron en sus satélites naturales. Ambos tienen un diámetro menor que el de la Luna, 22.2 km y 12.6 km, respectivamente, y se cree que en ellos pueden existir reservorios de agua congelada (Cordell, 1985).

Marte ha sido uno de los planetas más estudiados y explorados. Existen registros de observaciones realizadas por antiguas civilizaciones, como la sumeria, egipcia, griega, china y maya. Con el desarrollo de instrumentos de observación como los telescopios fue posible conocer con más detalle algunas de las características de su superficie. La resolución de los primeros telescopios que se apuntaron hacia Marte era de entre 100 y 200 km por cuadro. Curiosamente, fue el reporte del astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli relativo a las

observaciones de Marte realizadas durante la oposición del 5 de septiembre de 1877 con ayuda de un telescopio de 22 cm, lo que originó la idea de que Marte estaba habitado como la Tierra.

Tabla 1
Características de Marte comparadas con las de la Tierra

Característica	Marte	Tierra
Distancia al Sol (10 ⁶ km)	228	150
Perihelio (UA)	1.381	0.98
Afelio (UA)	1.666	1.02
Periodo orbital (días terrestres)	686.971	365.256
Velocidad orbital promedio (km/s)	24.007	29.78
Periodo de rotación	24 h 37 m	23 h 56 m 4.1 s
Masa (kg)	6.4171 × 10 ²³	5.972 × 10 ²⁴
Densidad media (g/cm ³)	3.93	5.514
Radio ecuatorial (km)	3 397	40 075
Gravedad en la superficie (m/s ²)	3.711	9.807
Inclinación axial	25.19°	23.44°
Temperatura en la superficie (K)		
Mínima	130	184
Media	210	288
Máxima	308	330
Radiación UV recibida en la superficie	≥ 190 nm (UVC, UVB, UVA)	≥ 290 nm (UVB, UVA)
Presión en la superficie (kPa)	0.636	101.325
Compuestos orgánicos	Clorobenceno y dicloroalcanos (C ₂ -C ₄) en ppb	Abundantes y diversos
Composición atmosférica (% volumen)	95 de CO ₂ , 1.93 de Ar, 1.89 de N ₂ , 0.146 de O ₂ , 0.056 de CO, 0.021 de H ₂ O _v , 0.01 de NO _x	78.08 de N ₂ , 20.95 de O ₂ , 1.00 de H ₂ O _v , 0.93 de Ar, 0.04 de CO ₂ , 0.00182 de Ne, 0.00052 de He, 0.00017 de CH ₄ , 0.00011 de Kr, 0.00006 de H ₂
Agua líquida	Salmuera en la superficie y en el subsuelo	Océanos, mares, lagos, ríos, acuíferos subterráneos
Satélites naturales	Fobos y Deimos	Luna

Fuente: Elaboración propia.

En ese reporte, Schiaparelli afirmaba haber observado regiones claras y oscuras sobre la superficie marciana y asociaba las regiones claras con grandes extensiones de hielo de agua localizadas en los polos marcianos. Esos hielos se derretían e inundaban las tierras bajas a través de una red de canales, alimentando mares, lagos y golfos ubicados entre las masas continentales localizadas hasta 60 grados latitud norte. Es justamente la palabra *canales* la que origina toda la historia. El término originalmente utilizado por Schiaparelli fue el vocablo italiano *canale*, con el que se refería a las líneas o vetas oscuras que separaban a los continentes marcianos —las regiones claras que él observó— de los cuerpos de agua y que formaban una intrincada red desde los polos hacia el resto del planeta.

Cuando el reporte escrito de Schiaparelli se tradujo del italiano al inglés, la palabra *canale* se transcribió erróneamente como *canals*, término que hace alusión a un cauce artificial por donde se conducen las aguas. Aun cuando el mismo Schiaparelli especifica en su reporte que la red de vetas que él describió puede explicarse perfectamente con base en la geología del planeta rojo, son justamente esas vetas y sus registros sobre la existencia de cuerpos de agua observables desde la Tierra lo que se convierte en la base del mito sobre la existencia de avanzadas civilizaciones marcianas capaces de construir vastos sistemas de canales de irrigación que podían llevar el agua derretida de los polos hacia las tierras bajas marcianas.

Marte atrae el interés de la comunidad científica por diversas razones, entre ellas, la posibilidad de determinar si allá surgió también la vida y, de ser el caso, si ésta comparte o compartió las características de la vida terrestre o si son distintas. Las misiones que en décadas recientes han estudiado a Marte directamente o a la distancia presentan evidencias cada vez más claras de que el agua líquida, un requerimiento indispensable para todo ser vivo, existió sobre su superficie y que en la actualidad puede estar presente en el subsuelo marciano e inclusive, por cortos periodos, sobre la superficie. Estas dos premisas constituyen en buena medida la base de los proyectos de exploración de Marte, de innumerables estudios de laboratorio y de la preparación del envío de seres humanos a ese planeta para establecerse en pequeñas comunidades.

Exploración de Marte

La era moderna de la exploración de Marte comenzó el 14 de julio de 1965, cuando el orbitador Mariner 4 (tabla 2 pp. 5-8) sobrevoló el hemisferio sur del planeta a una distancia ligeramente menor a los 10 000 km y logró captar una veintena de fotografías con la mejor resolución para la época (5 km por cuadro). Estas imágenes demostraban tajantemente la inexistencia de canales o alguna otra construcción atribuible a una avanzada civilización marciana, pero sí reportaban una superficie llena de cráteres y los ya conocidos hielos polares que sufrían cambios estacionales; es decir, que se derretían en las épocas de alta temperatura, contrayendo su extensión, y que se congelaban durante los tiempos de baja temperatura,

ampliando nuevamente su área superficial. Esta coincidencia del comportamiento del hielo polar con las observaciones de Schiaparelli contribuyó a mantener la idea de la existencia de agua líquida sobre la superficie de Marte, ya que en ese tiempo aún no se sabía de qué estaban hechos esos hielos polares, pero por su brillo se especulaba que eran hielos de agua.

En 1971, otro orbitador, el Mariner 9, identificó estructuras geológicas notables en Marte, como el Monte Olimpo, los tres volcanes de la región de Tharsis, el sistema de cañones de Valles Marineris, enormes lechos secos que parecían haber sido labrados por ríos y extensos campos con dunas. Años más tarde, la misión Vikingo (Viking), formada por los orbitadores y vehículos robóticos gemelos Vikingo 1 y Vikingo 2, logró posarse exitosamente sobre la superficie de Marte o amortizar los respectivos vehículos robóticos. El primero el 20 de julio de 1976 y el segundo el 3 de septiembre de 1976 (tabla 2, pp. 5-8). Los instrumentos científicos a bordo de estos vehículos realizaron los primeros experimentos orientados a conocer los procesos químicos del suelo de Marte, analizar con detalle los componentes de su atmósfera y determinar la presencia de vida marciana.

Además de estas misiones pioneras, la tabla 2 (pp. 5-8) enlista todas las misiones que han sido exitosas en la exploración de Marte. Es notable que, en años recientes, las agencias espaciales de países como India, China y los Emiratos Árabes Unidos van teniendo participaciones importantes en el conocimiento de Marte. Los estudios realizados por todas estas misiones permiten reunir información detallada sobre la geología y la química de la atmósfera y de la superficie de Marte; acerca de las evidencias actuales que indican que en el pasado Marte tuvo agua líquida sobre la superficie y que inclusive en la actualidad aún puede ser posible encontrar agua líquida en lugares específicos, así como de los registros de vida pasada o presente.

Tabla 2
Misiones exitosas enviadas a Marte

Misión (agencia espacial a cargo) y fecha de lanzamiento	Fecha de llegada a Marte y principales logros
Mariner 4 (NASA) 28 de noviembre de 1964	14 de julio de 1965 Primer sobrevuelo exitoso en un planeta distinto a la Tierra que obtuvo las primeras 22 fotografías de la superficie de Marte. Permitió además obtener experiencia y probar las capacidades de ingeniería de la época para realizar vuelos interplanetarios de larga duración.
Mariner 6 (NASA) 25 de febrero de 1969	31 de julio de 1969 Estudia la superficie y la atmósfera de Marte desde los sobrevuelos realizados para preparar futuras investigaciones orientadas a la búsqueda de vida extraterrestre. Demuestra que la tecnología de la época es adecuada para misiones interplanetarias de larga duración. Obtiene los primeros espectros de emisión en infrarrojo y ultravioleta de Marte, mide la refracción de la atmósfera, determina la composición del casquete del polo sur, mide la presión de la superficie y realiza estimaciones sobre la masa, el radio y la forma del planeta rojo.

Mariner 7 (NASA) 27 de marzo de 1969	5 de agosto de 1969 Misión gemela de la Mariner 6 que viajó un poco más hacia el sur de Marte. Su máximo acercamiento ocurrió a 3 430 km de la superficie marciana, lo que la convirtió, en ese entonces, en el objeto construido por la humanidad que más se había acercado al planeta rojo.
Mariner 9 (NASA) 30 de mayo de 1971	14 de noviembre de 1971 Primera nave de exploración espacial que orbita exitosamente un planeta distinto a la Tierra; como resultado obtuvo imágenes del 70% de la superficie de Marte y realizó estudios de los cambios estacionales de su atmósfera y superficie.
Mars 5 (SSP) 25 de julio de 1973	12 de febrero de 1974 Primera nave soviética que se inserta exitosamente en la órbita marciana para fotografiar la superficie del planeta y obtener información sobre la composición, estructura y propiedades de su atmósfera y del hemisferio sur.
Viking 1 (NASA) 20 de agosto de 1975	20 de julio de 1976 Primera nave en posarse sobre la superficie de Marte o amartizar en Chryse Planitia. Fotografió sus alrededores, recolectó muestras de la superficie para analizar su composición y buscar evidencias de vida, determinó la composición de la atmósfera, estudió la meteorología y colocó algunos sismómetros.
Viking 2 (NASA) 9 de septiembre de 1975	3 de septiembre de 1976 La nave se posó en la superficie de Marte, en la región de Utopia Planitia, para realizar estudios semejantes a los de la nave gemela Viking 1. La información recolectada y los análisis realizados por los orbitadores y las naves de la misión Viking permitieron una visión más completa de Marte en su época.
Phobos 2 (SSP) 12 de julio de 1988	29 de enero de 1989 Esta misión soviética realizó un análisis remoto de Marte y de Fobos, uno de sus satélites naturales.
Mars Global Surveyor (NASA) 7 de noviembre de 1996	11 de septiembre de 1997 Orbitador diseñado para obtener imágenes de alta resolución de la superficie de Marte y realizar estudios acerca de su topografía y gravedad; sobre el papel del agua y del polvo en su superficie y atmósfera; del tiempo y el clima, así como sobre la existencia y evolución del campo magnético marciano.
Mars Pathfinder (NASA) 4 de diciembre de 1996	4 de julio de 1997 Misión formada por la nave Pathfinder, que funcionó como una estación fija, y el vehículo robótico Sojourner. Estaba preparada para evaluar nuevas estrategias de amartizaje centradas en el uso de paracaídas, retropropulsores y bolsas de aire; en la evaluación de tecnologías de comunicación entre la nave y el vehículo robótico, así como entre el vehículo robótico y un operador en la Tierra.
2001 Mars Odyssey (NASA) 7 de abril de 2001	24 de octubre de 2001 Orbitador que durante tres años analizó la mineralogía de la superficie de Marte y midió la cantidad de radiación recibida en la superficie del planeta para la preparación de futuras misiones tripuladas.

Mars Express (ESA) 2 de junio de 2003	25 de diciembre de 2003 El Mars Express Orbiter, elemento principal de la misión, se dedicó a obtener imágenes de alta resolución (10 m por cuadro), analizar la mineralogía y la composición atmosférica, determinar la circulación atmosférica global y la interacción entre la atmósfera y el subsuelo marcianos. La nave Beagle 2, que también integraba esta misión, se perdió durante su descenso hacia Marte, el 25 de diciembre de 2003.
Mars Exploration Rover A (MER-A) (NASA) 10 de junio de 2003	4 de enero de 2004 El vehículo robótico Spirit, componente principal de esta misión, fue el primero con la capacidad para desplazarse sobre la superficie marciana del orden de 100 m por día. Sus objetivos se centraron en la caracterización de la geología del cráter Gusev, que pudo haber albergado un lago de agua en el pasado, así como en el estudio del clima marciano y en recolectar información para preparar la futura exploración tripulada de Marte.
Mars Exploration Rover B (MER-B) (NASA) 7 de julio de 2003	25 de enero de 2004 Esta misión llevó al Opportunity, el segundo vehículo robótico gemelo del Spirit, a la superficie de Marte. Sus objetivos se centraron en caracterizar la geología de la región de Terra Meridiani y recolectar información para preparar la futura exploración tripulada de Marte.
Mars Reconnaissance Orbiter (NASA) 12 de agosto de 2005	10 de marzo de 2006 Orbitador que obtiene fotografías de alta resolución, analiza remotamente el clima y las estaciones durante un año marciano, busca sitios con evidencias de actividad acuosa e hidrotermal y ubica sitios de amortizaje para que futuras misiones recolecten muestras de la superficie de Marte que puedan ser traídas de regreso a la Tierra.
Phoenix (NASA) 4 de agosto de 2007	25 de mayo de 2008 Vehículo robótico dedicado a estudiar la geomorfología de las planicies del norte de Marte, la mineralogía y la química del regolito, los hielos y el clima polares, así como la composición de la atmósfera durante su descenso.
Mars Science Laboratory (NASA) 26 de noviembre de 2011	6 de agosto de 2012 Estuvo a cargo del vehículo robótico Curiosity, diseñado para explorar el ambiente del cráter Gale, un sitio seleccionado por sus altas posibilidades (antiguas o actuales) de albergar vida.
Mangalyaan (ISRO) 5 de noviembre de 2013	24 de septiembre de 2014 Orbitador diseñado para estudiar la morfología de la superficie, así como la mineralogía y la atmósfera de Marte.
Mars Atmosphere and Volatile Evolution (NASA) 18 de noviembre de 2013	22 de septiembre de 2014 Orbitador dedicado a analizar la atmósfera alta y la ionosfera marcianas, así como su interacción con el viento solar para evaluar la pérdida de compuestos volátiles en función del tiempo.
ExoMars (ESA-Roscosmos) 14 de marzo de 2016	16 de octubre de 2016 Orbitador equipado para analizar los gases de la atmósfera marciana a una altura de 400 km. El vehículo robótico Schiaparelli evaluó novedosas tecnologías de descenso que complementan esta misión.
InSight (NASA) 5 de mayo de 2018	26 de noviembre de 2018 Estación ubicada en la región de Elysium Planitia para determinar la formación y evolución de los planetas terrestres mediante el estudio de la estructura interna de Marte, su actividad tectónica y la tasa de impactos por meteoritos durante un año marciano.

Hope (UAE) 19 de julio de 2020	9 de febrero de 2021 Orbitador dedicado al estudio de la dinámica de la atmósfera marciana y su interacción con el espacio exterior y el viento solar.
Tianwen 1 (CNSA) 23 de julio de 2020	10 de febrero de 2021 Esta misión está formada por un orbitador y el vehículo robótico Zurong, diseñados para estudiar la topografía y geología de la región de Utopia Planitia, determinar el contenido de agua de la superficie, estudiar la ionosfera y el clima marcianos, cuantificar la gravedad y el campo magnético de Marte y estudiar su estructura interna.
Mars 2020 (NASA) 30 de julio de 2020	18 de febrero de 2021 Misión a cargo del vehículo robótico Perseverance, dedicada a investigar vestigios de vida pasada en el cráter Jezero, coleccionar muestras del suelo marciano y prepararlas para una futura recolección y regreso a la Tierra; así como para evaluar la producción de oxígeno molecular con los componentes de la atmósfera marciana. Transportó y liberó al Ingenuity, el primer helicóptero diseñado para volar en la tenue atmósfera de Marte, cuyo primer vuelo exitoso ocurrió el 19 de abril de 2021.

Fuente: Elaboración propia a partir de información obtenida de <https://mars.nasa.gov/mars-exploration/timeline/>

Nota: NASA: National Aeronautics and Space Administration
 SSP: Soviet Space Program
 ESA: European Space Agency
 ISRO: Indian Space Research Organization
 UAE: United Arab Emirates
 CNSA: China National Space Administration

Agua líquida en Marte

En 1996 se sugirió que el meteorito marciano ALH84001, denominado así por haber sido encontrado en el pueblo de Allan Hills, Estados Unidos, en 1984, parecía contener evidencias de actividad biológica, ya que al estudiar con detalle su interior se encontraron esférulas de carbonatos, hidrocarburos aromáticos policíclicos y unas estructuras semejantes a rodillos segmentados parecidas a nanofósiles bacterianos terrestres. Investigaciones posteriores no encontraron sustento científico para continuar apoyando esa propuesta inicial, y la conclusión de la comunidad científica es que no contiene evidencias contundentes de la presencia de vida en Marte.

A pesar de esta conclusión, los carbonatos encontrados en el meteorito ALH84001 son una prueba de que el agua corría sobre la superficie del Marte primitivo hace 4.1 miles de millones de años (4.1×10^9 años), al igual que en la Tierra (Scott et al., 1998). Existen además huellas geológicas, como canales secos, redes de valles fluviales, deltas y lechos de lagos, así como minerales hidratados como el yeso, la caolinita, la montmorillonita, la opalina y la goetita, que sólo podrían formarse por acción de agua líquida (Head et al., 2006). El conjunto de estas evidencias indica que, efectivamente, en el pasado Marte tuvo agua líquida sobre la superficie. ¿Entonces qué le ocurrió a esa agua?

Una de las teorías más aceptadas indica que el agua líquida de la antigua superficie de Marte se perdió irreversiblemente debido a una serie de desafortunados sucesos que comienzan con la pérdida del campo magnético marciano. Este campo magnético probablemente se perdió a consecuencia del fuerte impacto que un cuerpo masivo tuvo con Marte hace 4.0×10^9 años, lo que ocasionó que la atmósfera primitiva marciana fuera erosionada por el viento solar, ya que no había un campo magnético que la protegiera.

El pequeño tamaño de Marte y su menor fuerza de atracción gravitacional tampoco ayudaban a retener los componentes de la adelgazada atmósfera. En ausencia de ésta, los reservorios acuosos de la superficie fueron evaporándose y llevando el agua hacia las capas altas de la atmósfera, en donde se fotolizó irreversiblemente; es decir, la radiación solar separó a las moléculas de agua (H_2O) en sus componentes elementales —hidrógeno molecular (H_2) y oxígeno molecular (O_2)—, que se perdían hacia el espacio exterior, lo que dio paso al actual planeta árido.

Recientemente, el orbitador Mars Express, de la Agencia Espacial Europea (ESA, European Space Agency), descubrió un cuerpo acuoso a 1,5 km debajo de la superficie del polo sur de Marte, con una extensión de aproximadamente 20 km y que puede contener altas concentraciones de sales, lo cual permite que el agua pueda mantenerse en estado líquido (Orosei et al., 2018). Algunas observaciones realizadas con el instrumento Omega, del mismo orbitador, han identificado la presencia de arcillas, las cuales se forman cuando algunos minerales del magma tienen un contacto prolongado con agua líquida.

Cada vez hay más evidencias de que el Marte primitivo no sólo tuvo agua líquida, sino también una temperatura global mucho más templada que la actual y, en general, condiciones adecuadas para que surgiera la vida. Pero ese escenario de un planeta habitable cambió dramáticamente hace 3.6×10^9 años. Curiosamente, tanto el registro fósil como algunas evidencias químicas indican con certeza que en esa época la vida ya existía en la Tierra. ¿Pudo haber surgido la vida en Marte cuando el agua líquida existía sobre su superficie? De ser el caso, ¿esa génesis fue semejante o distinta a la terrestre?

Más aún, existen propuestas que definen un origen para la vida en Marte antes que en la Tierra. Estas cuestiones son las que continúan impulsando la exploración del planeta rojo y las que, de alguna manera, ayudan a definir algunas propuestas de investigación en los laboratorios terrestres. Si bien es prácticamente imposible lograr una recreación de los ambientes del Marte primitivo, la información proporcionada por las misiones de exploración permite conocer muchas de las condiciones del Marte actual, y el estudio de la habitabilidad de la superficie marciana se ubica entre las particularmente importantes.

Las misiones Viking, Phoenix, Curiosity, Perseverance y ExoMars (tabla 2, ver pp. 5-8) han utilizado técnicas como la pirólisis, la cromatografía de gases y la espectrometría de masas para identificar remanentes de vida pasada, específicamente compuestos orgánicos. Sin

embargo, ésta no es una tarea fácil, ya que compuestos como los percloratos (ClO_4^-), recientemente detectados en la superficie de Marte, reaccionan con la materia orgánica, degradándola y complicando su identificación (Hecht et al., 2009; Martínez Pabello et al., 2019; Sutter et al., 2017). Esto quiere decir que la ausencia de grandes concentraciones de compuestos orgánicos en Marte no necesariamente implica la ausencia de vida, ya que ésta pudo haber surgido o estar presente, pero las moléculas indicativas de su presencia son oxidadas de manera natural por esos percloratos.

Los percloratos son entidades altamente tóxicas para una gran variedad de microorganismos. A pesar de ello, en la Tierra existen lugares con altas concentraciones de perclorato de magnesio ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$) habitados por bacterias extremófilas de los géneros *Pseudomonas*, *Azospira* o *Dechloromonas*. En ausencia de oxígeno, algunas de estas bacterias pueden utilizar a los oxianiones clorados, entre los que se encuentra el perclorato, pero también el clorato (ClO_3^-), como aceptores de electrones porque cuentan con enzimas específicas como las nitrato y perclorato reductasas, con las que pueden transformarlos químicamente para obtener energía química.

La existencia de microorganismos terrestres capaces de utilizar a los percloratos en su metabolismo permite visualizar la superficie de Marte como un ambiente potencialmente habitable, es decir, con la posibilidad de albergar alguna forma de vida microscópica conocida en la Tierra. El carácter higroscópico de los percloratos se refleja en su capacidad para absorber agua y formar salmueras o disoluciones que contienen una alta concentración de percloratos y muy poca agua. Estas salmueras podrían no sólo permitir la presencia de agua en la actual superficie de Marte, sino además abatir el punto de fusión de la disolución formada y lograr que el agua exista en estado líquido aun cuando la temperatura sea menor a los 253 K (-20 °C).

Adicionalmente, la búsqueda de vida en el subsuelo marciano se ha fortalecido debido al reciente descubrimiento de cuerpos acuosos subterráneos (Orosei et al., 2018), en donde probablemente también existan salmueras que se hayan convertido en microambientes subterráneos adecuados para preservar la vida que pudo haber emigrado desde la superficie cuando ésta se volvió adversa. Se sabe también que en el subsuelo existen minerales arcillosos que pueden contener pequeñas burbujas de aire y que la radiación disminuye considerablemente a partir de los 20 cm de profundidad, aunque la falta de nutrientes (material orgánico) sigue siendo una limitante de consideración.

Estudios de simulación sobre la habitabilidad de Marte

La vida en la Tierra ha demostrado ser tenaz y capaz de existir en prácticamente cualquier rincón del planeta siempre que pueda disponer de agua líquida, aun de forma limitada. Los organismos que han colonizado estos ambientes inhóspitos terrestres son los organismos

extremófilos (Ramírez, 2010), de particular relevancia para los estudios de búsqueda de vida que se realizan en Marte.

Por ejemplo, los endolitobiontes, como los descubiertos en la región de Atacama en Chile, son interesantes por su capacidad de habitar en el interior de pequeños granos de arena; los psicrófilos, como aquellos de los valles secos de la Antártida, donde la temperatura varía de -15 a -30 °C, o los halófilos, como los de la cuenca Qaidam en China, que se han adaptado para vivir en concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) de hasta 35%, un porcentaje de salinidad diez veces superior al promedio de los océanos terrestres. Éstos y otros tipos de extremófilos se consideran modelos biológicos adecuados para estudiar la habitabilidad de los objetos de interés astrobiológico del sistema solar.

En 2014, el astrobiólogo Charles Cockell propuso una definición operativa para la habitabilidad: un ambiente habitable es aquel que tiene las condiciones necesarias para que al menos un organismo se encuentre activo y pueda mantenerse, crecer o reproducirse. Algunos de los experimentos de simulación de ambientes marcianos que pueden realizarse en un laboratorio de investigación se centran en evaluar esa actividad empleando modelos biológicos, que frecuentemente corresponden a microorganismos como bacterias o arqueas. La tabla 3 (pp. 12 y 13) contiene información relativa a experimentos que evalúan la resistencia o viabilidad de ciertos microorganismos cuando son expuestos a alguna o algunas condiciones que simulan determinado aspecto del ambiente marciano. En algunos casos incluso se utiliza un material análogo al suelo de Marte.

A partir de la detección de perclorato en la superficie de Marte (Hecht et al., 2009), se han propuesto nuevos experimentos de simulación para evaluar la tolerancia, supervivencia y crecimiento de microorganismos en presencia de éste y otros óxidos del cloro. Se ha demostrado incluso la tolerancia de altas concentraciones de estas sales en microorganismos mesófilos como *Bacillus subtilis* (Wadsworth y Cockell, 2017), con lo que se expanden los límites de la habitabilidad y la posible adaptación de vida en ambientes acuosos en el subsuelo de Marte.

La simulación y experimentación de ambientes del Marte actual es uno de los proyectos de investigación que se realizan en el Laboratorio de Simulación de Ambientes Planetarios del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, en colaboración con investigadores del Laboratorio de Biología Celular y Molecular de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. En particular, se evalúa la capacidad de algunas bacterias halófilas y halotolerantes para adecuarse a las condiciones del suelo marciano: presencia de cloratos y percloratos, atmósfera rica en N₂, altas dosis de radiación ultravioleta y condiciones de microgravedad.

Tabla 3
Experimentos de simulación enfocados en la habitabilidad de Marte

Experimento	Organismo	Fenotipo	Suelo	Referencia
Células liofilizadas en 5 g de lava, expuestas a N ₂ ultrapuro (65 mm de mercurio) o vacío, a temperatura constante (25 °C) o periodos alternados de 25 o -25 °C. Viabilidad celular y virulencia, hasta 10 meses de experimentación.	<i>Klebsiella pneumoniae</i> y <i>Clostridium botulinum</i>	Bacterias gramnegativas formadoras de cápsulas y grampositivas formadoras de endosporas	Lava triturada	Hawrylewicz et al., 1962
Viabilidad de las esporas en la superficie de naves espaciales, radiación UV (máx. 15 min), -10 °C y 8.5 mbar, CO ₂ ultrapuro.	<i>Bacillus subtilis</i>	Bacteria grampositiva, mesófila formadora de esporas	NE	Schuerger et al., 2003
Viabilidad celular a temperatura extrema y desecación en MSC; temperatura de -60 °C por 6 horas, 6 mbar y 98% de CO ₂ .	<i>Halococcus dombrowskii</i> y <i>Halobacterium</i> sp. NRC-1	Arqueas halófilas, halococos y halobacilos	NE	Stan-Lotter et al., 2002
Viabilidad de las esporas en MSC; atmósfera de CO ₂ , ~20 °C y presión promedio de 12.5 mbar.	<i>B. subtilis</i>	Bacteria grampositiva, mesófila formadora de esporas	NE	Nicholson et al., 2005
Viabilidad en MSC; integridad celular y de biomarcadores. Atmósfera de CO ₂ , -10 °C, presión promedio de 8.5± 0.2 mbar, espectros de UVC (200-280 nm), UVB (280-315 nm) y UVA (315-400 nm).	<i>Chroococcidiopsis</i> sp. 029	Bacteria fotoautótrofa, crioendolítica	JSC Mars-1 y suelo gneis ^a	Cockell et al., 2005
Producción de metano como indicador de la viabilidad celular; CO ₂ como fuente de carbono.	<i>Methanosarcina barkeri</i> , <i>Methanobacterium formicicum</i> , <i>Methanothermobacter wolfeii</i> , <i>Methanobacterium wolfeii</i> y <i>Methanococcus maripaludi</i>	Arqueas quimiolitótrofas, metanótrofas	JSC Mars-1	Kral et al., 2004
Supervivencia de la comunidad en MSC. Mantenimiento de la versatilidad metabólica y oxidación de glucosa. Atmósfera de CO ₂ , -60 a 4 °C, 9 o 13 mbar y radiación UV (<200 nm).	Comunidad microbiana	Bacterias de ambiente desértico, gramnegativas y productoras de esporas	Salten Skov	Hansen et al., 2005

Crecimiento a altas concentraciones de perclorato y clorato de sodio.	<i>Halobacterium</i> strain NRC-1, <i>Hbt. salinarum</i> R1, <i>Haloferax volcanii</i> , <i>Hfx. mediterranei</i> , <i>Hfx. denitrificans</i> , <i>Hfx. gibbonsii</i> , <i>Haloarcula marismortui</i> , <i>Har. vallismortis</i> y <i>Halomonas elongata</i>	Halófilas heterotrófas (ocho arqueas y una bacteria)	NE	Oren et al., 2014
Viabilidad de células planctónicas en presencia de perclorato y sulfato o peróxido de hidrógeno, y radiación UV (254 nm).	<i>B. subtilis</i>	Bacteria grampositiva, mesófila, formadora de esporas	Sílice granulado o hematita	Wadsworth y Cockell, 2017
BIOMEX ^b , 7 días, de -10 a 45 °C en 8 horas por 48 ciclos, en 95.55% de CO ₂ , 2.7% de N ₂ , 1.6% de Ar, 0.15% de O ₂ y ~370 ppm de H ₂ O, 4.5 × 10 ⁶ y 8.4 × 10 ⁶ kJ/m ² .	Tres dominios (Archaea, Bacteria y Eukarya)	Metanógenos, fotosintéticos y psicrófilos polares y alpinos	P-MRS y S-MRS ^c	De Vera et al., 2019
En Trex-Box ^d se colocaron monocapas o múltiples capas de bacterias planctónicas o esporas de <i>Aspergillus niger</i> , las cuales habían sido desecadas por cinco meses en PBS o medio rico. El Trex-Box se colocó en el interior del MARSBOX ^e y las muestras fueron expuestas a condiciones análogas por más de 5 horas (UV de 280-400 nm), -51 °C (mín.) y 21 °C (máx.), 5-10 mbar, 95% de CO ₂ , 1.9% de Ar, 2.6% de N ₂ , 0.17% de O ₂ , 0.07% de CO).	<i>Salinisphaera shabanensis</i> , <i>Buttiauxella</i> sp. MASE-IM-9, <i>Staphylococcus capitis</i> subsp. <i>capitis</i> , <i>Aspergillus niger</i>	Dos bacterias gramnegativas extremófilas, una bacteria patógena grampositiva y las esporas pigmentadas de un hongo patógeno filamentosos	NE	Corteseo et al., 2021

Fuente: Elaboración propia.

Nota: NE: no ensayado.

MSC (siglas en inglés): cámara de simulación de Marte.

PBS (siglas en inglés): amortiguador de fosfatos.

Trex-Box (acrónimo en inglés): caja de transporte y exposición.

MARSBOX: Microbes in Atmosphere for Radiation, Survival, and Biological Outcomes Experiment.

^aSuelo precámbrico del impacto de Haughton, en Canadá. Material rico en feldespatos, impactado a 60 Gpa aproximadamente hace 23 Ma.

^bBIOMEX and Mars Experiment. Se colocaron diversos organismos en el dispositivo EXPOSE-R2, embebidos o cultivados sobre regolitos análogos. Se emplearon líquenes, arqueas metanógenas, bacterias, cianobacterias, algas de hielo perpetuo, meristemo de hongo negro y briofitas, expuestos a condiciones simuladas de Marte.

^cP-MRS: regolito análogo con polisilicatos; S-MRS: regolito análogo con sulfato.

^dDispositivo rectangular (3,5 cm × 13,5 cm × 5,0 cm) de acero inoxidable donde se colocaron 64 muestras de discos de cuarzo que portaban los microorganismos.

^eCaja donde se introdujo la Trex-Box, en la cual se sustituyó la atmósfera artificial a presión controlada. Esta caja se montó en la góndola de un globo que se suspendió a ~38 km de altura (estratósfera).

Futura colonización de Marte

Además de las investigaciones orientadas a encontrar vestigios de vida pasada o presente en Marte, ha comenzado una nueva etapa en su exploración con el deseo de concretar una misión tripulada hacia el planeta rojo. En concreto, la NASA, en conjunto con la empresa de tecnología espacial SpaceX, dio inicio al programa Artemisa con la intención de instalar un campamento lunar en 2024 que ayude a preparar la primera misión tripulada hacia Marte. A otras empresas, como Blue Origin, Virgin Galactic y Lockheed Martin, también les interesa desarrollar en primera instancia el turismo espacial y posteriormente la llegada de humanos a Marte.

A principios de 2021 ocurrieron los primeros viajes de turismo espacial con tripulantes civiles. Para 2024, la ESA y la Agencia Espacial Rusa (Roscosmos) intentarán amartizar un vehículo móvil en Oxia Planum. Por su parte, la NASA y la ESA planean traer a la Tierra, en 2031, las muestras de suelo marciano que actualmente está colectando el vehículo robótico Perseverance. Para ese mismo año, la Agencia Espacial Japonesa (JAXA, por sus siglas en inglés) espera poder explorar Fobos y Deimos, los dos satélites naturales de Marte, para determinar si contienen agua. La preparación y construcción de estas misiones de exploración hacia Marte, así como los resultados que se van generando, son de utilidad para la preparación de la exploración humana no sólo de Marte, sino de otros objetos en el sistema solar.

Aunado a estos esfuerzos, en la Estación Espacial Internacional y en la estación espacial china se experimenta y estudian aspectos relativos a la sobrevivencia de los seres humanos en las condiciones del actual ambiente marciano. En la actualidad, varios campos científicos, como medicina, enfermería, robótica, geología, biología o botánica espacial, se ocupan de ello. Es precisamente en estos campos en los que el desarrollo de proyectos y la experimentación con microorganismos, plantas, alimentos o suelos análogos pueden ayudar en el establecimiento de una colonia humana con altas posibilidades de sobrevivir en Marte.

La terraformación de Marte implica cambios a nivel planetario y tiempos muy prolongados (cientos a miles de años) para lograr condiciones planetarias semejantes a las de la Tierra. Este proceso se planea en etapas; la primera es la llegada y el establecimiento de una colonia humana en el planeta rojo. Es evidente que esos primeros colonizadores sobrevivirán utilizando y aprovechando los recursos de Marte, combinándolos con materiales y recursos llevados desde la Tierra. La misión Perseverance ha sido capaz de formar oxígeno a partir del CO₂ atmosférico marciano, lo cual resulta vital para los humanos no sólo para respirarlo, sino para utilizarlo como combustible.

En la Estación Espacial Internacional se logró el crecimiento de diferentes plantas comestibles en condiciones de microgravedad y la cosecha de papas en ambientes simulados de Marte. Asimismo, se desarrollaron proyectos arquitectónicos de los primeros domos, construidos con regolito marciano en impresoras 3D, en donde habitarán los primeros colonizadores.

La terraformación también contempla calentar al planeta, engrosando su atmósfera al inyectarle gases de efecto invernadero para convertirlo en un planeta más cálido en el que el agua congelada vuelva a fluir y se restablezca un ciclo hidrológico.

El pasado y el presente de Marte se conocen con cierta precisión gracias a las observaciones realizadas por medio de telescopios terrestres y espaciales, a la información proporcionada por las misiones de exploración y a los resultados de los estudios que se llevan a cabo en los laboratorios de investigación. Pero el futuro de Marte aún está por escribirse. Las investigaciones que actualmente se hacen en el planeta rojo por misiones robóticas, así como los hallazgos que realicen sus futuros exploradores, contribuirán con nuevas páginas sobre este fascinante vecino planetario.

Referencias

- Cockell, C. S., Schuerger, A. C., Billi, D., Friedmann, E. I. y Panitz, C. (2005). Effects of a simulated Martian uv flux on the Cyanobacterium, *Chroococcidiopsis* sp. 029. *Astrobiology*, 5(2), 127-140. <https://doi.org/10.1089/ast.2005.5.127>
- Cordell, B. M. (1985). The moons of Mars: A source of water for lunar bases and LEO. *Lunar bases and space activities of the 21st century*, p. 809. Lunar and Planetary Institute.
- Cortese, M., Siems, K., Koch, S., Beblo-Vranesevic, K., Rabbow, E., Berger, T., Lane, M., James, L., Johnson, P., Waters, S. M., Verma, S. D., Smith, D. J. y Moeller, R. (2021). MARSBOX: Fungal and bacterial endurance from a balloon-flown analog mission in the stratosphere. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.601713>
- De Vera, J. P., Alawi, M., Backhaus, T., Baqué, M., Billi, D., Böttger, U., Berger, T., Bohmeier, M., Cockell, C., Demets, R., De la Torre Noetzel, R., Edwards, H., Elsaesser, A., Faglarone, C., Fiedler, A., Foing, B., Foucher, F., Fritz, J., Hanke, F.,... Zucconi, L. (2019). Limits of life and the habitability of Mars: The ESA space experiment BIOMEX on the ISS. *Astrobiology*, 19(2), 145-157. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1897>
- Hansen, A., Merrison, J., Nørnberg, P., Lomstein, B. A. y Finster, K. (2005). Activity and stability of a complex bacterial soil community under simulated Martian conditions. *International Journal of Astrobiology*, 4(2), 135-144. [10.1017/S1473550405002557](https://doi.org/10.1017/S1473550405002557)
- Hawrylewicz, E., Gowdy, B. y Ehrlich, R. (1962). Micro-organisms under a simulated Martian environment. *Nature*, 193(497). <https://doi.org/10.1038/193497a0>
- Head, J. W., Marchant, D. R., Agnew, M. C., Fassett, C. I. y Kreslavsky, M. A. (2006). Extensive valley glacier deposits in the northern mid-latitudes of Mars: Evidence for Late Amazonian obliquity-driven climate change. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4), 663-671.
- Hecht, M. H., Kounaves, S. P., Quinn, R. C., West, S. J., Young, S. M. M., Ming, D. W., Catling, D. C., Clark, B. C., Boynton, W. V., Hoffman, J., Deflores, L. P., Gospodinova, K., Kapit, J. y

- Smith, P. H. (2009). Detection of perchlorate and the soluble chemistry of Martian soil at the Phoenix Lander site. *Science*, 325(5936), 64-67. [10.1126/science.1172466](https://doi.org/10.1126/science.1172466)
- Kral, T. A., Bekkum, C. R. y McKay, C. P. (2004). Growth of methanogens on a Mars soil simulant. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 34, 615-626. [10.1023/b:orig.0000043129.68196.5f](https://doi.org/10.1023/b:orig.0000043129.68196.5f)
- Mahaffy, P. R., Webster, C. R., Atreya, S. K., Franz, H., Wong, M., Conrad, P. G. y Gasnault, O. (2013). Abundance and isotopic composition of gases in the Martian atmosphere from the Curiosity Rover. *Science*, 341(6143), 263-266.
- Martínez-Pabello, P. U., Navarro-González, R., Walls, X., Pi-Puig, T., González-Chávez, J. L., De la Rosa, J. G., Molina, P. y Zamora, O. (2019). Production of nitrates and perchlorates by laser ablation of sodium chloride in simulated Martian atmospheres. Implications for their formation by electric discharges in dust devils. *Life Sciences in Space Research*, 22, 125-136. [10.1016/j.lssr.2019.02.007](https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.02.007)
- Ming, D. W., Morris, R. V., Bernhard, R. P. y Adams, J. B. (1988). Mineralogy of a suite of Martian analog soils from Hawaii. *Lunar and Planetary Science Conference*, 19.
- Nicholson, W. L., Schuerger, A. C. y Setlow, P. (2005). The solar UV environment and bacterial spore UV resistance: Considerations for Earth- to-Mars transport by natural processes and human spaceflight. *Mutation Research*, 571(1-2), 249-264. [10.1016/j.mrfmmm.2004.10.012](https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2004.10.012)
- Oren, A., Bardavid, R. E. y Mana, L. (2014) Perchlorate and halophilic prokaryotes: Implications for possible halophilic life on Mars. *Extremophiles*, 18(1), 75-80. [10.1007/s00792-013-0594-9](https://doi.org/10.1007/s00792-013-0594-9)
- Orosei, R., Lauro, S. E., Pettinelli, E., Cicchetti, A., Coradini, M., Cosciotti, B., Di Paolo, F., Flamini, E., Mattei, E., Pajola, M., Soldovieri, F., Cartacci, M., Cassenti, F., Frigeri, A., Giuppi, S., Martufi, R., Masdea, A., Mitri, G., Nenna, C.,... Seu, R. (2018). Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science*, 361(6401), 490-493. [10.1126/science.aar7268](https://doi.org/10.1126/science.aar7268)
- Ramírez, S. I. (2010). Las fronteras de la vida desde la perspectiva de los extremófilos. *Inventio. La Génesis de la Cultura Universitaria en Morelos*, 6(11), 57-66.
- Schuerger, A. C., Mancinelli, R. L., Kern, R. G., Rothschild, L. J. y McKay, C. P. (2003). Survival of endospores of *Bacillus subtilis* on spacecraft surfaces under simulated Martian environments: implications for the forward contamination of Mars. *Icarus*, 165(2), 253-276. [10.1016/S0019-1035\(03\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S0019-1035(03)00200-8)
- Scott, E. R., Krot, A. N. y Yamaguchi, A. (1998). Carbonates in fractures of Martian meteorite Allan Hills 84001: Petrologic evidence for impact origin. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(4), 709-719.
- Stan-Lotter, H., Radax, C., Gruber, C., Legat, A., Pfaffenhuemer, M., Wieland, H., Leuko, S., Weidler, G., Kömle, N. y Kargl, G. (2002). Astrobiology with Haloarchaea from Permo-Triassic rock salt. *International Journal of Astrobiology*, 1(4), 271-284. <https://doi.org/10.1017/S1473550403001307>

- Sutter B., McAdam, A. C., Mahaffy, P. R., Ming, D. W., Edgett, K. S., Rampe, E. B., Eigenbrode, J. L., Franz, H. B., Freissinet, C., Grotzinger, J. P., Steele, A., House, C. H., Archer, P. D., Malespin, C. A., Navarro-González, R., Stern, J. C., Bell, J. F., Calef, F. J., Gellert, R.,... Yen, A. S. (2017). Evolved gas analyses of sedimentary rocks and eolian sediment in Gale Crater, Mars: Results of the Curiosity rover's sample analysis at Mars instrument from Yellowknife Bay to the Namib Dune. *Journal Geophysical Research: Planets*, 122, 2574-2609. <https://doi.org/10.1002/2016je005225>
- Wadsworth, J. y Cockell, C. S. (2017). Perchlorates on Mars enhance the bacteriocidal effects of uv light. *Scientific Reports*, 7(4662). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04910-3>