

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**VIDA EN EL PERMAFROST DE  
LA ANTÁRTIDA Y MARTE**

Autor: Daichend, Ana M<sup>a</sup> Alexandra

Tutor: de Pablo Hernández, Miguel Ángel

2021



## Agradecimientos:

- A mi tutor Miguel Ángel de Pablo Hernández por inspirarme y proporcionarme toda la atención y ayuda para la elaboración de este trabajo.
- Y a mi familia, a la que dedico la realización de este Trabajo de Fin de Grado, por apoyarme siempre y ayudarme a superarme a mí misma.

## **Resumen:**

La superficie de Marte es inhóspita y extremadamente árida con una temperatura media anual de  $-63^{\circ}\text{C}$  y con elevadas dosis de radiación en superficie. En la Tierra existen formas de vida capaces de sobrevivir en ambientes extremos donde se creía imposible, que abren la posibilidad de que ocurra algo similar en Marte. Ya que la superficie de Marte resulta totalmente inhabitable, cabe preguntarse si la vida podría haberse desarrollado o subsistir en los suelos congelados. Estos suelos congelados, o permafrost, se encuentra también en la Tierra, donde sus características en la Antártida son las más similares a las marcianas. Si hay vida en este permafrost, es interesante conocer qué tipo de organismos, en qué condiciones y qué les permite sobrevivir en ese medio. Del mismo modo, saber las características del permafrost marciano resulta relevante para poder ver si existen similitudes entre ambos y, de esta manera imaginar si la vida marciana habría de darse de una manera similar o es no. Para ello se ha realizado una revisión bibliográfica sobre las condiciones del permafrost de la Tierra y de Marte además de las formas de vida en el permafrost antártico y suposiciones de vida marciana. Esto ha dado lugar a resultados muy interesantes en cuanto a las múltiples similitudes que hay entre ambos tipos de permafrost y las adaptaciones que presentan los seres vivos para sobrevivir en medios tan extremos.

**Palabras clave:** Permafrost, Antártida, Marte, vida microbiana, astrobiología

## **Abstract:**

The Surface of Mars is inhospitable and extremely arid territory with an average annual temperature of  $-63^{\circ}\text{C}$  and with high doses of radiation on the surface. On Earth there are life forms capable of surviving in extreme environments where we thought it was impossible, which open the possibility of a similar case happening on Mars. Since the surface of Mars is totally uninhabitable, we wonder if the life could have developed or subsisted in frozen soils. These frozen soils, or permafrost, are also found on Earth, where their characteristics in Antarctica are the most similar to martian ones. If there is life in this permafrost, it is interesting to know what kind of organisms live there, in what conditions and what allows them to survive in that environment. In the same way, knowing the characteristics of the Martian permafrost is relevant to be able to see if there are similarities between them and we could imagine if Martian life should happen in a similar way or not. To this end, we made a bibliography review about permafrost conditions of Earth and Mars as well as life forms in Antarctic permafrost and assumptions of Martian life. This has led to very interesting results in terms of the multiple similarities between both types of permafrost and the adaptations that living organisms present to survive in such extreme environments.

Key words: Permafrost, Antarctica, Mars, microbial life, astrobiology.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Posibilidad de vida más allá del planeta Tierra</b> .....	1
<b>1.2. Objetivos</b> .....	4
<b>1.3. Metodología</b> .....	4
<b>2. ANTÁRTIDA</b> .....	5
<b>2.1. Condiciones ambientales</b> .....	5
<b>2.2. Permafrost y sus características</b> .....	6
<b>2.3. Formas de vida</b> .....	7
<b>2.4. Valles Secos</b> .....	9
<b>2.4.1. Clima</b> .....	10
<b>2.4.2. Vida</b> .....	10
<b>3. MARTE</b> .....	11
<b>3.1. Conocimiento general</b> .....	11
<b>3.2. Condiciones ambientales</b> .....	12
<b>3.2. Permafrost y sus características</b> .....	14
<b>3.3. ¿Vida en Marte?</b> .....	18
<b>3.3.1. Experimentos de condiciones simuladas</b> .....	19
<b>3.3.2. Microorganismos sintetizadores</b> .....	20
<b>4. Discusión</b> .....	21
<b>4.1. La vida en el permafrost de Marte</b> .....	21
<b>4.2. Reflexión</b> .....	22
<b>5. Conclusiones</b> .....	23
<b>Referencias</b> .....	25



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Posibilidad de vida más allá del planeta Tierra

Desde hace miles de años, a lo largo de la historia científica, la gente se ha cuestionado cómo se originó la vida y qué es lo que permite que surja. En un principio, se creía que la vida no se formó en el planeta Tierra en cuestión, si no que procedía de algún lugar del espacio (Luque et al., 2009). Esta teoría, conocida como “panspermia”, explica que la vida se iba propagando a los diferentes cuerpos del Sistema Solar por medio de meteoritos y cometas (Luque et al., 2009). Hallazgos sobre una amplia variedad de moléculas biológicamente relevantes en meteoritos actúan como respaldo de la hipótesis anterior (Aerts et al., 2014). Por ejemplo, el meteorito que en 1969 aterrizó en Murchison, Australia, contenía restos orgánicos y aminoácidos (que podían deberse a una contaminación de la muestra). También, el meteorito marciano ALH84001, hallado en la Antártida en 1984, parecía contener indicios de vida unicelular y moléculas biológicamente relevantes (McKay et al., 1996; Aerts et al., 2014), sin embargo, más adelante se estableció que no podía descartarse una posible contaminación del hielo antártico (Luque et al., 2009). Por otro lado, otros intentaron probar, mediante experimentación, que la vida podía formarse en la propia Tierra a partir de unas condiciones especiales (experimento de Miller y Urey) (Luque et al., 2009).

En lo que sí está de acuerdo la comunidad científica es que para que exista la vida tal y como la conocemos en la Tierra, basada en el Carbono, ya sea originaria del propio planeta o externa, se necesitan tres requisitos: la presencia de agua líquida, compuestos orgánicos y energía libre (Achberger et al., 2017). Sin embargo, no podemos estar seguros de que no existan otras posibilidades u otros factores que favorezcan el desarrollo de la vida (Luque et al., 2009).

La prioridad actual es la búsqueda de biomarcadores, compuestos orgánicos cuya presencia sugiere que hay vida o la hubo en el pasado en la Tierra, y podría darse de la misma manera en Marte (Sephton and Carter, 2015). Sin embargo, estos biomarcadores se degradan con el tiempo y las condiciones ambientales influyen mucho en su preservación (Aerts et al., 2014).



En este escenario, resulta de especial interés conocer los límites que permiten la vida, ya que desconocemos hasta qué condiciones ambientales son capaces de resistir los organismos vivos. En la Tierra se han encontrado ambientes con condiciones especialmente extremas para la vida como pueden ser la alta salinidad o acidez, las grandes diferencias de temperatura o la sequedad, donde había formas de vida denominadas extremófilas (Aerts et al., 2014), en condiciones que se consideraban imposibles. Esto se debe a que los organismos presentan diversas adaptaciones para habitar en tan singulares lugares como puede ser la resistencia al frío (Berlemont et al., 2011).

A pesar de todo, no sabemos si existen formas de vida en Marte, por ello, es importante estudiar los ejemplos análogos en la Tierra y mediante biomarcadores asociados podemos acercarnos a pensar qué buscamos y dónde exactamente (Aerts et al., 2014).

En la Tierra se relaciona la existencia de vida con la presencia de agua líquida, y, en consecuencia y por simple deducción, lo primero que se plantea en la búsqueda de vida en Marte es encontrar agua, buscar evidencias de si existe en la superficie o cerca de ella, o si pudo haber existido en el pasado (Luque et al., 2009) ya que el agua resulta imprescindible para que las comunidades microbianas (al menos como las conocemos en la Tierra) realicen sus ciclos metabólicos, incluso en ambientes extremos (Achberger et al., 2017).

La presencia de agua líquida en superficie depende de la composición del planeta y las condiciones climáticas o ambientales existentes como la presión y la temperatura. A su vez, estas son consecuencia de la presencia y distancia al Sol, lo que influye en gran medida en el efecto de su atmósfera (Luque et al., 2009). De esta manera, la Tierra y Marte son dos planetas rocosos que se constituyen básicamente de un núcleo metálico rodeado de una extensa capa de silicatos. Y según los estudios en ciencias planetarias, Marte es el planeta con el “medio ambiente” más similar al terrestre (Luque et al., 2009).

Centrándonos en la posibilidad de vida en Marte, en las primeras misiones no se obtuvieron resultados positivos de trazas biológicas (Abyzov et al., 2006), pero cada vez se emplean más instrumentos de análisis con mayor precisión y resolución, capaces de detectar más compuestos orgánicos y en menores

proporciones, lo que amplía las posibilidades de encontrar trazas de vida, si es que existe o existió (Aerts et al., 2014).

Las investigaciones microbiológicas en las capas de hielo subterráneo de Marte pueden ser más prometedoras (Abyzov et al. 2006), ya que el permafrost marciano podría albergar vida microbiana de una forma similar al permafrost terrestre (Aerts et al., 2014).

Antes de poder detectar vida en Marte, debemos saber si es posible la existencia de vida en el permafrost, y qué tipo de vida, con el fin de realizar los experimentos adecuados mediante los instrumentos científicos más específicos embarcados en los vehículos y sondas que se envíen en el futuro a ese planeta.

Por ello resulta crucial investigar previamente entornos análogos en la Tierra que se asemejen a condiciones presentes o pasadas de Marte (Guglielmin and Vieira, 2014), lo que supone un especial interés en el conocimiento del permafrost antártico.

Se considera la Antártida como uno de los extremos climáticos más severos del planeta ya que, es el lugar más ventoso, frío y seco de la Tierra (Luque et al., 2009). Por ello se considera que tanto la capa de hielo como el permafrost antártico pueden ser análogos terrestres de gran parte del planeta Marte (Abyzov et al., 2006) y es que, en base a las características climáticas y propiedades del permafrost antártico, donde podemos encontrar una gran variedad de formas de vida (Frias et al., 2010; Berlemont et al., 2011; Achberger et al., 2017), se plantea la posibilidad de que, si el permafrost marciano se encuentra en condiciones parecidas, también podríamos encontrar formas de vida similares (Goordial et al., 2016).

Si hubo en el pasado formas de vida en Marte, es posible que estas se encuentren en un “estado de reposo” como los microorganismos en el permafrost antártico que son capaces de volver a metabolizar una vez se encuentran en condiciones menos extremas (Abyzov et al., 2006).

El creciente conocimiento y comprensión de los procesos superficiales en Marte han despertado un especial interés por los estudios de los Valles Secos de la

Antártida, como uno de los análogos terrestres naturales más cercanos (Figura 1) (Zawar-Reza and Katurji, 2014).



Fig. 1: Valles Secos de la Antártida y superficie de Marte respectivamente (Fuente: NASA)

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es conocer si sería posible la vida en el permafrost de Marte, partiendo del conocimiento científico actual sobre las formas de vida capaces de vivir en el permafrost terrestre, en concreto en la Antártida, y de las condiciones ambientales y permafrost de Marte. Para ello se realizará una revisión bibliográfica sobre las condiciones y las características del permafrost en ambos ambientes, y sobre las formas de vida que se han podido caracterizar en el permafrost antártico para discutir si esas formas de vida podrían sobrevivir en el permafrost de marciano.

## 1.3 Metodología

Este trabajo, de carácter bibliográfico, se basa en la revisión exhaustiva y crítica de diversas publicaciones, siendo estas en su mayoría artículos de revistas científicas.

La búsqueda bibliográfica ha sido completamente digital y se han empleado varios buscadores, entre ellos el servicio de biblioteca de la universidad, Web of Science y Google Scholar.

Las palabras clave utilizadas se escribieron en inglés ya que, de esta manera, el número de resultados obtenidos era mayor que si se escribía en español.

Al inicio de la búsqueda resultaba de interés conocer qué es el “*permafrost*” y cuáles son sus características, ya que este término actuaría de núcleo de la temática a tratar. Buscando “*permafrost*” y “*Antarctica*” se obtuvieron 3.899 resultados y utilizando “*permafrost*” y “*Mars*” 2.387. También se realizaron búsquedas de relación directa entre “*Antarctica*” y “*Mars*” consiguiendo un número de resultados de 4.188.

A lo largo de la búsqueda bibliográfica se emplearon varias palabras clave en diversas combinaciones para obtener resultados más focalizados en aspectos biológicos o de búsqueda de vida en Marte y sus análogos terrestres, entre ellos: “*life*”, “*microbial life*”, “*astrobiology*”, “*climate*”, “*Curiosity*”, “*McMurdo Dry Valley*”.

De todos los resultados obtenidos, los criterios a seguir en la selección de la bibliografía se reflejaron en forma de filtros en los buscadores digitales. Finalmente se han sintetizado un total de 59 artículos científicos, 1 informe técnico, 1 libro y 1 página web. Se escogieron aquellos que eran más recientes y actualizados, en su mayoría a partir del 2000, para incluir las últimas novedades. Se buscaba que los contenidos fueran acordes al tema y las revistas consultadas eran en general pertenecientes al campo de las ciencias planetarias.

## **2. ANTÁRTIDA**

### **2.1. Condiciones ambientales**

La Antártida es el continente con las condiciones climáticas más severas de nuestro planeta (Camacho and Fernández Valiente, 2005). Es el lugar más frío, ventoso y seco cuyas características se deben en parte por la ubicación geográfica en cuanto a la cantidad de radiación solar que recibe (Zawar-Reza and Katurji, 2014). Normalmente se la califica como un ambiente inhóspito ya que las condiciones climáticas son muy restrictivas (Camacho and Fernández Valiente, 2005). La meseta polar antártica tiene una temperatura media anual en la superficie de  $-37^{\circ}\text{C}$  (Achberger et al., 2017) y hasta  $-55^{\circ}\text{C}$  en la estación Vostok. Es precisamente debido a esta dureza del medio y las dificultades logísticas que las mediciones sobre el clima en las estaciones meteorológicas

automáticas (AWS) se ven obstaculizadas (Zawar-Reza and Katurji, 2014). Otro de los responsables de este duro clima, que afecta a gran parte del continente, son los vientos catabáticos, estos se forman casi constantemente cuando hace extremo frío y parten de un nivel más elevado a zonas más bajas inclinadas (Zawar-Reza and Katurji, 2014).

Debido a estas condiciones, el continente está formado en parte por un amplio casquete de hielo continental que se han ido expandiendo incluso más allá de las tierras emergidas, formando una banquisa (Achberger et al., 2017).

Desde hace años, se ha observado un calentamiento global y, según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, este está afectando al permafrost antártico generando graves consecuencias (Bernstein et al., 2008).

## **2.2. Permafrost y sus características**

La importancia sobre el permafrost cada vez cobra más importancia (Guglielmin and Vieira, 2014), debido a su similitud con la superficie marciana, este medio es perfecto para la realización de pruebas de instrumentos para futuras misiones a Marte, estos pueden ser, por ejemplo, prototipos de sensores de temperatura del suelo (Smith and McKay, 2005; Ramos et al., 2012). Este permafrost se puede encontrar en diferentes partes de la Tierra como el Ártico, norte de Alaska, Siberia, etc. (Dobinski, 2011), sin embargo, para este trabajo resulta de mayor interés el permafrost de la Antártida.

La definición de permafrost, según la Asociación Internacional de Permafrost, es el suelo y todo lo que este contiene en su interior (roca, sedimentos, materia orgánica, agua, etc.) que permanece a una temperatura por debajo de los 0°C por al menos 2 años consecutivos (International Permafrost Association, 2021). El permafrost generalmente se encuentra en zonas donde la temperatura anual del aire está por debajo de -1°C, aunque también depende de las propiedades térmicas del sustrato (Dobinski, 2011; Campbell, Affleck and Sinclair, 2018). En la Antártida, el permafrost antártico ocupa tan solo el 0,36% (49.800 Km<sup>2</sup>) de la superficie del continente vinculado a las zonas libres de hielo.

El suelo desnudo y expuesto a las condiciones atmosféricas de la Antártida se divide en una capa activa y una capa de permafrost debajo (Zawar-Reza and Katurji, 2014). La capa activa antártica, en comparación con el permafrost, es más delgada y está sujeta a ciclos de congelación y descongelación (Dobiński, 2020), por tanto, también se define como la profundidad hasta donde las temperaturas anuales se elevan por encima de 0°C (Liu et al., 2018). Debido a la existencia de periodos sin congelación, en la capa activa tienen lugar los procesos biológicos, hidrológicos y geológicos (Liu et al., 2018), generalmente mucho más activos en comparación con el permafrost que permanece siempre congelado y cuyo espesor está relacionado con su edad (Dobinski, 2011). Globalmente, se estima que la mayor parte del permafrost proviene del Pleistoceno tardío o el Holoceno (Guglielmin and Vieira, 2014), aunque esto no significa que no sufriera fluctuaciones en el pasado. Para ambas capas, el régimen térmico está estrechamente relacionado con la temperatura del aire y la cubierta de nieve (Zawar-Reza and Katurji, 2014).

Además, existen dos tipos de permafrost, húmedo cuando contiene diferentes cantidades de hielo, o seco cuando se trata de roca sólida sin agua (Dobinski, 2011). La forma más común es la que contiene agua en forma de hielo, el único sitio donde se encuentra permafrost seco es en algunas regiones de los Valles Secos de la Antártida como University Valley (Goordial et al., 2016). El paisaje en el interior de estos valles probablemente es uno de los más antiguos de la Tierra (Guglielmin and Vieira, 2014) donde se realizan estudios para detectar la capa activa, el permafrost y la cantidad de hielo presente (Campbell, Affleck and Sinclair, 2018). El estudio de este tipo de permafrost es de especial interés como análogo terrestre al permafrost marciano (Abizov et al., 2006).

### **2.3. Formas de vida**

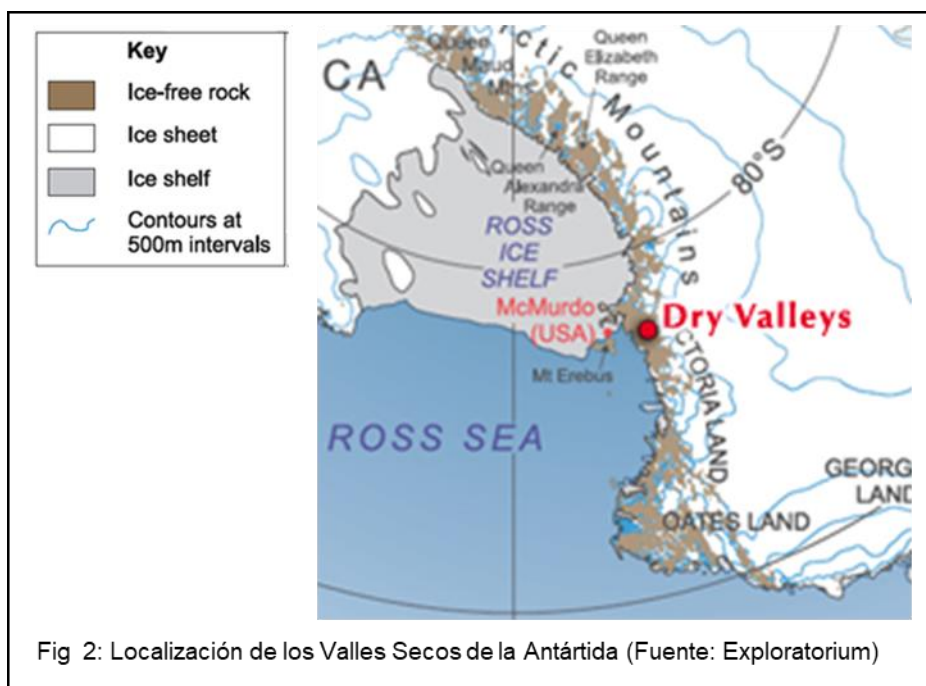
Las duras condiciones ambientales antárticas limitan considerablemente la diversidad de seres vivos que se pueden encontrar en este continente (Edwards et al., 2005). Sin embargo, aquellas zonas donde se puede encontrar agua líquida, supone una oportunidad para la vida (Camacho and Fernández Valiente, 2005) ya que las comunidades microbianas, generalmente quimiolitotróficas,

necesitan de esta agua y fuentes de energía químicas, ya sean inorgánicas u orgánicas, para realizar sus ciclos metabólicos, (Achberger et al., 2017). Esto permite que hasta en las condiciones más extremas la vida sea posible, aunque la biosfera sea escasa y no muy diversa. Algunos estudios demuestran que existen formas de vida en los suelos antárticos que resisten a estos medios de temperaturas tan bajas (Frias et al., 2010; Berlemont et al., 2011), en base a la capacidad de algunos microorganismos del permafrost para crecer a temperaturas como  $-15^{\circ}\text{C}$  y metabolizar a  $-25^{\circ}\text{C}$  (Goordial et al., 2016). Esto se debe a las diversas adaptaciones que presentan para sobrevivir a temperaturas de congelación. Especies de bacterias antárticas poseen enzimas adaptadas al frío (Berlemont et al., 2011), también las hay que presentan estructuras especiales de formación de un halo de fibras alrededor de la pared celular y vesículas de membrana como materia extracelular, lo que les confiere un aspecto mucoso a las colonias y aumenta su capacidad de supervivencia (Frías et al., 2010). Otros descubrimientos demuestran la existencia de microorganismos viables, tanto procariotas como eucariotas, en estratos profundos de la capa de hielo antártica cuyas adaptaciones de envoltura les protegen de la lisis o daño molecular tras descongelarse de un “estado en reposo” durante largos periodos de anabiosis (Abyzov et al., 2006). En ocasiones se utilizan espectrómetros Raman para detectar esa resistencia a las bajas temperaturas (Edwards et al., 2005), sin embargo, las diferentes formas de vida no tienen únicamente que hacer frente a eso, también hay otras condiciones ambientales en la superficie antártica que hace que la vida sea muy dura, como puede ser la sequedad, falta de nutrientes y radiación UV y, a pesar de eso, se han identificado diferentes especies de hongos, musgos y líquenes resistentes a estas condiciones extremas (Onofri et al., 2004; de Vera et al., 2014; Gomes et al., 2018) que incluso recorren a protegerse en fisuras y grietas para sobrevivir (de Vera et al., 2014).

Estos descubrimientos en un entorno que antes se creía inhóspito para la vida, suscitó mayor interés por estudiar las formas de vida en la criosfera (Achberger et al., 2017; Aerts et al., 2014). Además, sus similitudes con Marte provocaron que estudios microbiológicos antárticos se usaran como análogos para pruebas de futuras perforaciones en Marte (Smith and McKay, 2005).

## 2.4. Valles Secos

Los Valles Secos de la Antártida son los ambientes que se consideran más duros del continente y de la Tierra (Aerts et al., 2014), en una región específica que se encuentran entre McMurdo Sound, el Mar de Ross y la capa de Hielo de la Antártida Oriental (Figura 2) (Liu et al., 2018).



Estos valles pueden ser los paisajes más antiguos de la Tierra (Guglielmin and Vieira, 2014) y abarcan un área de 15000 km<sup>2</sup> con aproximadamente el 30% de su área libre de nieve y de hielo (Heldmann et al., 2013) aunque con grandes depósitos de agua helada debajo de la superficie desnuda (Aerts et al., 2014) según los resultados de estudios realizados en la Estación McMurdo, (Campbell, Affleck and Sinclair, 2018). Este suelo rico en hielo se estima que podría llevar enterrado 8 millones de años (Head and Weiss, 2014). Una de las características más significativas de esta zona es que los valles más altos son los únicos lugares de la Tierra que se conoce que contienen grandes extensiones de permafrost seco (Heldmann et al., 2013), condición también presente en las regiones árticas marcianas (Mellon et al., 2008; Aerts et al., 2014).

El creciente conocimiento sobre las características de Marte ha despertado un especial interés en los Valles Secos de la Antártida como una de las regiones



más extensas y estudiadas del continente (Zawar-Reza and Katurji, 2014), considerado uno de los análogos terrestres naturales más cercanos al entorno marciano (Heldmann et al., 2013; Liu et al., 2018) y a finales de la década de 1960 se reconoció como tal (Léveillé, 2010), aunque no se debe olvidar que las condiciones en Marte son aún más duras.

### **2.4.1. Clima**

Los Valles Secos se consideran un desierto polar hiperárido con una alta radiación solar, fuertes vientos desecantes y ciclos de congelación y deshielo (Aerts et al., 2014; Liu et al., 2018). Presenta escasas precipitaciones, el equivalente anual de agua es de 2 a 50 mm en los fondos de los valles (Heldmann et al., 2013; Zawar-Reza and Katurji, 2014), por lo tanto, el agua líquida es escasa y predomina el hielo (Heldmann et al., 2013) ya que las temperaturas medias anuales del aire son de aproximadamente  $-20^{\circ}$ , por debajo del punto de congelación del agua (Aerts et al., 2014).

Entre los diferentes valles hay marcadas variaciones de microclimas y los vientos catabáticos son un rasgo característico (Zawar-Reza and Katurji, 2014) aunque los mismos Valles Secos pueden subdividirse en 3 zonas microclimáticas sobre la base de las condiciones ambientales estacionales. Podemos encontrar la zona de deshielo costero ( $<400\text{m}$ ) con las condiciones más factibles para la vida ya que en verano las temperaturas ascienden por encima de  $0^{\circ}\text{C}$  y presenta una capa activa húmeda, la zona mixta intermedia ( $400\text{-}1000\text{m}$ ) y la zona en tierras altas ( $1000\text{-}2500\text{m}$ ) donde incluso en verano las temperaturas medias del aire rondan los  $-10^{\circ}\text{C}$ , esta última zona se caracteriza por ser la más fría y seca (Goordial et al., 2016).

### **2.4.2. Vida**

Muchos estudios microbianos han centrado su búsqueda en la zona costera que es más cálida y húmeda y, por lo tanto, con condiciones menos extremas para la vida (Cary et al., 2010). Por ello, se sabe muy poco sobre la microbiología en

el permafrost de zonas altas (Goordial et al., 2016), precisamente las más parecidas a las condiciones de la superficie de Marte.

A pesar de que existen muchas zonas de suelo desnudo, los parches de nieve suponen una importante fuente de humedad para las poblaciones microbianas (Zawar-Reza and Katurji, 2014) y las duras condiciones ambientales no detiene la colonización de especies resistentes de líquenes (de la Torre Noetzel, 2016; Sancho et al., 2017) y micro hongos xerófilos o xerotolerantes que viven dentro de la porosidad de rocas, con adaptaciones que los protegen además de la radiación y la radiactividad (Onofri et al., 2004). Aun así, esta biomasa es baja y la vida generalmente busca refugio contra los efectos más nocivos de la desecación y la radiación bajo las gruesas capas de hielo (Aerts et al., 2014) o en fisuras y grietas (de Vera et al., 2014).

En University Valley, uno de los valles más fríos y secos de las zonas altas estables de los Valles Secos, se estudia la posibilidad de que existan microorganismos resistentes a muy bajas temperaturas (Goordial et al., 2016).

### **3. MARTE**

#### **3.1. Conocimiento general**

Marte es un planeta de tipo rocoso formado básicamente de un núcleo metálico y una extensa capa de silicatos que lo cubre (Luque et al., 2009). También se le conoce como el planeta rojo y es el que tiene el ambiente más similar a la Tierra, un día con poco más de 24 h, con estaciones, mismo sentido de rotación, una tenue atmósfera con blancas nubes y tormentas de polvo, dos casquetes polares que crecen en invierno, etc. (Luque et al., 2009).

Al ser un planeta más pequeño y alejado del Sol que la Tierra, se caracteriza por una atmósfera fría y tenue que evolucionó de una manera diferente a lo largo de la historia en comparación con la terrestre (Mangold et al., 2016). Esta atmósfera se ve afectada por el campo magnético que es muy débil en superficie, 6.000 veces menor que el terrestre, que se considera inactivo (Glassmeier et al., 2000). Sin embargo, esto no fue siempre así, existen evidencias de que en el pasado la

actividad volcánica era mayor, cuyos gases expulsados formaban una atmósfera más densa, y el agua fluía en la superficie de Marte formando valles y canales de inundación e incluso se cree que un océano con sales disueltas denominado *Oceanus Borealis* cubrió el planeta y este habría almacenado 65 millones de km<sup>3</sup> de agua con una profundidad media de 1.700 m (Baker et al., 1991).

Por todo lo descrito anteriormente, Marte se puede considerar un planeta de interés para la búsqueda de vida, partiendo de sus similitudes con análogos terrestres.

### **3.2. Condiciones ambientales**

Los datos de las sondas y resultados de misiones de aterrizaje enviadas a Marte nos han facilitado un conocimiento detallado respecto a la climatología, composición e historia del planeta (Carr and Head III, 2010). Gracias a esto sabemos que Marte es en la actualidad un desierto en estado de aridez extrema y muy frío, con una temperatura media anual de aproximadamente -63°C, muy por debajo del punto de congelación del agua (Head and Weiss, 2014), aunque con amplias variaciones de temperatura, desde -128°C en la noche polar a 27°C en el mediodía más cálido del ecuador. Además, la presión superficial que oscila entre los 7 y 9 mbar, valores bastante más bajos que en la Tierra, y muy por debajo del punto triple del agua.

Existen evidencias que indican que en el pasado el clima de Marte pudo haber sido diferente del actual, y que este inicialmente era más favorecedor para el desarrollo de la vida (Aerts et al., 2014). Se cree que en el pasado presentaba un campo magnético similar al terrestre (Keating and Gonçalves, 2012) y el ambiente era cálido y húmedo, durante la Era Noéica hace 3.700 millones de años, cuando la superficie del planeta se veía afectada por la erosión fluvial formando valles (Balme and Gallagher, 2009). En ese momento la atmósfera debía ser más cálida y densa, con un contenido mayor de gases de efecto invernadero como SO<sub>2</sub> o CH<sub>4</sub> además de CO<sub>2</sub> que se expulsaba en las erupciones volcánicas (Carr and Head III, 2010) permitiendo que el agua permaneciera en estado líquido. Después de esto, durante la Era Hespérica, que terminó hace aproximadamente 3.300 millones de años, la actividad volcánica

continuó manteniendo una atmósfera rica en CO<sub>2</sub> (Pavlov, Blinov and Konstantinov, 2002), pero a excepción de algunas inundaciones puntuales, las actividades acuosas decayeron de manera importante (Carr and Head III, 2010). La causa del cambio de la climatología de Marte se supuso que fue por la oblicuidad del eje de rotación (Balme and Gallagher, 2009), se estima que antes era de 40° - 60° y actualmente oscila de 15° - 35° con una media de 24° (Carr and Head III, 2010). El campo magnético ya no era el mismo y la atmósfera se fue adelgazando y adquiriendo un carácter oxidante (Pavlov, Blinov and Konstantinov, 2002). Esta atmósfera presenta una doble capa de ozono detectada por el instrumento Espectrómetro Atmosférico Ultravioleta e Infrarrojo (SPICAMLight) (Bertaux et al., 2000; Forget et al., 2009) , una se encuentra entre 25 y 30 km de la superficie y otra entre 30 y 60 km (Mangold et al., 2016), aunque esta tenue atmósfera que pierde casi constantemente átomos calientes de O y C (Gröller et al., 2014), no tiene una relevante funcionalidad protectora y reguladora como se da por ejemplo en la Tierra (Luque et al., 2009), provocando un aumento importante de radiación UV que alcanza la superficie y que generó problemas en los compuestos orgánicos (Keating and Gonçalves, 2012), lo que supuso la degradación de las condiciones de habitabilidad en la superficie de Marte (Keating and Gonçalves, 2012; Aerts et al., 2014). También el ambiente marciano se ve sometido a la radiación cósmica que provoca que la superficie se encuentre esterilizada, aunque en los metros superiores del suelo marciano esta radiación no es peligrosa para la vida (Pavlov, Blinov and Konstantinov, 2002). Estas condiciones de Marte se corresponden con la Era Amazónica, desde hace 3.000 millones de años hasta la actualidad, donde el vulcanismo ha ido disminuyendo y es una época que se caracteriza por la presencia, acumulación y movimiento del hielo (Carr and Head III, 2010) ya que la superficie marciana se ha mantenido como un desierto frío en el que se desarrolló el permafrost durante miles de millones de años (Balme and Gallagher, 2009) y donde el hielo ha jugado un importante papel en el paisaje marciano (Carr and Head III, 2010).

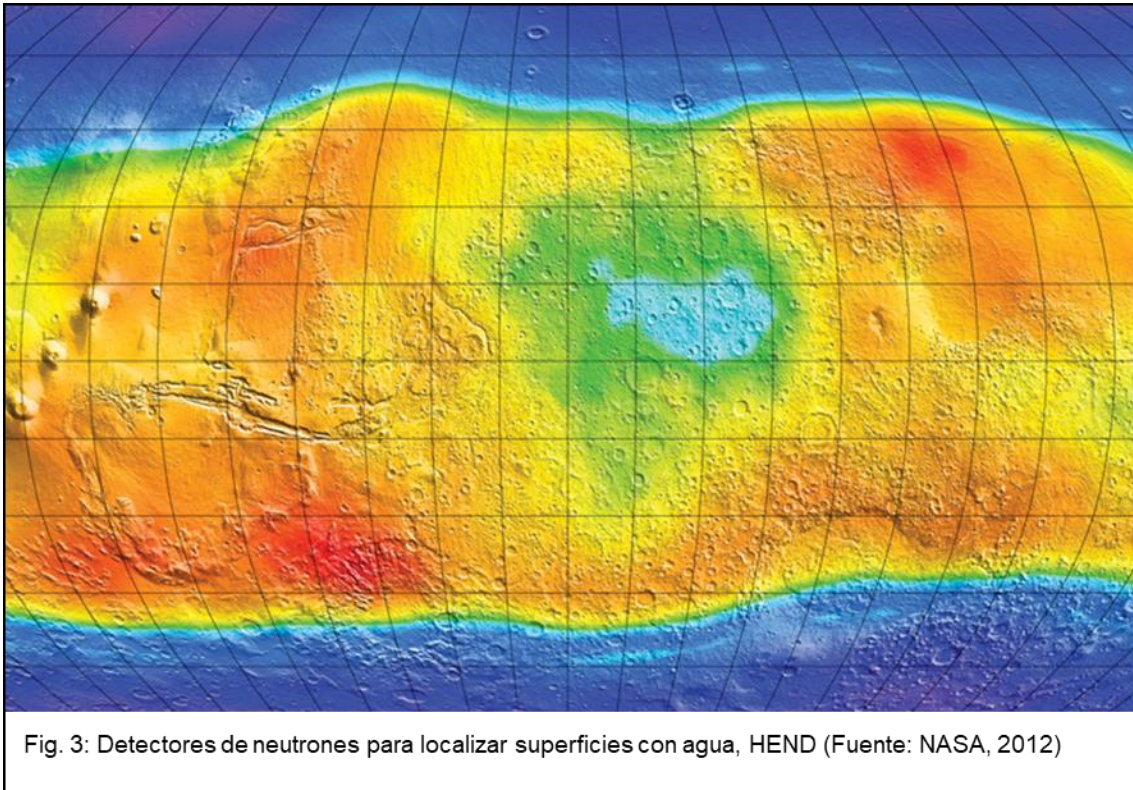
En base a todo lo descrito anteriormente, Marte se define como un entorno extremo para la existencia de vida en la superficie (Aerts et al., 2014), a pesar

de eso aún se estudia si las partes subsuperficiales proporcionan un posible hábitat.

### **3.2. Permafrost y sus características**

La presencia de permafrost en Marte es muy importante para el estudio de la vida en este planeta, frente al fracaso de búsqueda de vida en la superficie. Puede que las investigaciones microbiológicas en el subsuelo marciano sean más prometedoras (Abyzov et al., 2006), y es que Lozina-Lozinski (1971) y Cameron y Morelli (1974) fueron los primeros en sugerir que el permafrost terrestre podría ser un análogo de la superficie helada de Marte (Léveillé, 2010). Por ello, saber si hay permafrost en Marte y cuáles son sus características nos permite conocer la relación que hay con su clima y compararlo con el permafrost terrestre por si se podría dar la vida microbiana de la misma manera.

Numerosos estudios apuntan a la existencia de permafrost en Marte, que, aunque predominaría globalmente, sería más en aquellas regiones donde las temperaturas medias del suelo no superan los 0°C en ningún momento del año marciano. Esto se cumple en una amplia parte de la superficie del planeta debido a que la temperatura media anual del suelo es aproximadamente -69°C variando regionalmente de -39°C en el ecuador a -126°C en los polos (Bandfield and Feldman, 2008). Este permafrost se extiende varios km en profundidad en la corteza hasta donde el calor geotérmico eleva las temperaturas por encima del punto de congelación (Mellon et al., 2008). Para explicar su naturaleza en el subsuelo poco profundo, se analizó la emisión superficial de neutrones mediante el Detector de Neutrones de Alta Energía (HEND) en la sonda espacial *Mars Odyssey* (Mitrofanov et al., 2007). Este instrumento midió el contenido de hidrógeno en el suelo, ya sea en forma de agua o hidroxilo (Figura 3) (Mitrofanov et al., 2007).



Los resultados mostraron que el componente que predomina en el subsuelo poco profundo de Marte (hasta 1m) es el agua (Smith and McKay, 2005), entre un 50-70% de peso, ya sea en forma de hielo, agua físicamente unida en la superficie de granos de regolitos o agua químicamente unida en minerales hidratados (Mitrofanov et al., 2007). Además, resultó que las Tierras Altas del hemisferio sur tienen el permafrost rico en hielo más antiguo y mejor conservado de Marte en comparación con el hemisferio norte (Smith and McKay, 2005). La edad de estos depósitos helados data de un rango de 125 a 220 millones de años y puede contener registros del antiguo contenido de gas atmosférico y la microbiota, en el caso de que haya, como es común que ocurra en el hielo glaciar terrestre (Head and Weiss, 2014).

Se determinan por lo tanto 2 regiones de permafrost, una en las latitudes altas del hemisferio norte y otra en las del hemisferio sur que se diferencian entre ellas por sus altitudes, edades, relieve y geología (Mitrofanov et al., 2007). El análisis de datos de HEND muestra que en ambos polos marcianos existe un modelo simple de doble capa en las regiones de permafrost que se mantiene estable en parte debido a la baja insolación solar. Este modelo asume una capa superficial de material seco y espesor variable (de solo unos milímetros) que cubre la capa

portadora de hielo (de varios km de espesor), reduciendo así la tasa de sublimación de las moléculas de agua y/o atenuando la temperatura media superficial. En esta última capa, el hielo es poco profundo, de 2 a 6 cm por debajo de la superficie (Mellon et al., 2008) aunque generalmente en latitudes superiores a 60° el hielo es estable dentro de unas pocas decenas de centímetros de la superficie según las mediciones del espectrómetro de neutrones y rayos gamma (Carr and Head III, 2010). Aun así, se distinguen 2 tipos diferentes de permafrost en Marte (Mitrofanov et al., 2007). El primero se encuentra en el hemisferio N entre 40° y 90°N y en el hemisferio S entre 40° y 60°S. Se caracteriza por tener una capa superior de suelo que se encuentra en equilibrio con la atmósfera. El segundo tipo ocurre en el hemisferio S entre 60°S y 80°S. En este caso la capa no está en equilibrio con la atmósfera, probablemente por el continuo cambio del albedo superficial (Mitrofanov et al., 2007) y en estas latitudes las profundidades de hielo y permafrost son menos profundas (Bandfield and Feldman, 2008). A pesar de todo, la estabilidad del permafrost rico en hielo, sobre todo en zonas cercanas a los polos marcianos, es sensible a la oblicuidad (Emmett, Murphy and Kahre, 2020). Actualmente esta oscila entre 15° y 35 ° con una media de 24°, pero antiguamente se estima que era mayor, entre 40° y 60° (Carr and Head III, 2010).

El contenido de hielo del permafrost es variable dependiendo de la historia hidrológica local, clima, temperatura del suelo y estructura geológica y en latitudes de ambos polos, entre 35° - 60°, se supone que existe hielo cerca de la superficie (Mangold et al., 2002). En general en el hemisferio norte las profundidades del hielo y del permafrost son mayores dentro de la latitud más baja y en latitudes más altas, todas las superficies se caracterizan por tener hielo poco profundo, incluyendo las dunas de arena polares (Bandfield and Feldman, 2008).

Marte se diferenció, en su edad temprana, en corteza, manto y núcleo, y durante la Era Noéica presentaba diversas redes de valles (Figura 4) y canales como resultado de la erosión fluvial (Clark et al., 2021; Balme and Gallagher, 2009), cuando el clima permitía la existencia de agua líquida en superficie.

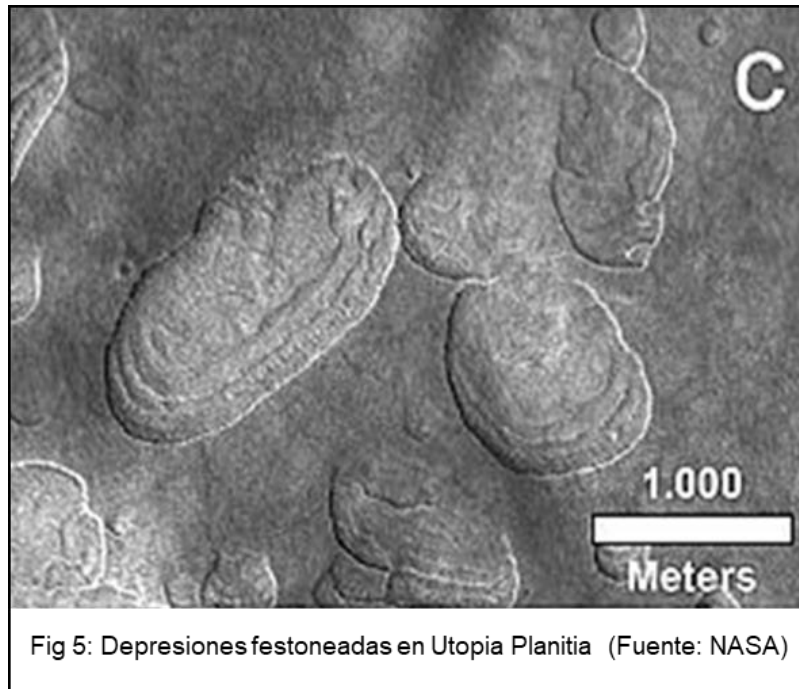


Luego, poco a poco, las temperaturas fueron bajando, lo que resultó el crecimiento de la criosfera, aunque aún se mantenían algunos ríos y lagos durante la Era Hespérica tardía (Kite et al., 2017). Y ya en la Era Amazónica, la superficie marciana se caracterizó por la presencia, acumulación y movimiento de hielo que jugó un importante papel en el paisaje marciano (Carr and Head III, 2010) suavizando la topografía de colinas y los bordes de cráteres (Mangold et al., 2002; Durham et al., 2009).

En el relieve marciano se pueden distinguir numerosas depresiones, denominadas depresiones festoneadas, posiblemente formadas por la sublimación del hielo bajo la influencia de la insolación (Ulrich et al., 2010). Cuando la radiación solar ocurre en periodos cortos de tiempo, supone la descongelación de parte del hielo subterráneo, que, donde hay laderas, puede discurrir en forma de coladas de barro, pequeños torrentes o avalanchas (Ulrich et al., 2010; Krasilnikov et al., 2020). Esto se da como resultado de cambios de temperatura relativamente recientes lo que genera inestabilidad del permafrost, aunque también pudo haber ocurrido por el cambio de oblicuidad (Soare et al., 2017). Se pueden encontrar evidencias de estos procesos en regiones muy



diversas del planeta como Utopía Planitia (Figura 5) y Malea Planum (Ulrich et al., 2010; Soare et al., 2017).



### 3.3. ¿Vida en Marte?

Marte presenta en su superficie varias condiciones fundamentales que resultan importantes para la existencia de vida: humedad, presión, atmósfera y radiación (De la Torre Noetzel, 2016), sin embargo, para que la vida sea posible es necesario, además de agua líquida, componentes orgánicos iniciales, elementos esenciales y acceso a fuentes de energía para su metabolismo (Clark et al., 2021). Estos requisitos son necesarios para la vida en la Tierra, por ello, la lógica conduce a buscar lo mismo en el planeta marciano por si se podría dar un caso similar (Aerts et al., 2014).

Para la búsqueda de estos componentes, considerados biomarcadores, se han empleado instrumentos sofisticados, y cada vez más avanzados (Sims et al., 2002), capaces de identificar moléculas orgánicas, microfósiles o datos isotópicos como indicios de actividad microbiana (Aerts et al., 2014; Sephton and Carter, 2015). Entre estos encontramos el Análisis de Muestras de Marte (SAM) equipado con un Espectrómetro de Masas Cuádruplo (QMS), un Cromatógrafo de Gases (GC) y un Espectrómetro Láser Sintonizable (TLS) con el objetivo de

detectar compuestos orgánicos. También incluyen el instrumento Química y Mineralogía (CheMin) y un Detector de Evaluación de Radiación (RAD). Además, el *Mars Organic Molecular Analyzer* (MOMA) es el instrumento de detección orgánica más potente, capaz de detectar moléculas en un rango de ppb-ppt. Otros incluyen un espectrómetro Raman para medir firmas biológicas (Aerts et al., 2014). A la luz de los resultados, las regiones más prometedoras para la búsqueda de evidencias de vida son en las latitudes cercanas a los casquetes polares del planeta donde el hielo del permafrost profundo ofrece una oportunidad para la vida latente (Pavlov, Blinov and Konstantinov, 2002).

La búsqueda actual astrobiológica en Marte se centra sobre todo en la detección de fósiles o componentes orgánicos con la ayuda de instrumentos optimizados para la detección de biomarcadores (Aerts et al., 2014) como prueba de vida pasada en Marte. Sin embargo, estudios más ambiciosos afirman que también sería interesante poder hacer un análisis bioquímico y genético directo de los organismos marcianos, en el caso de que los hubiera (Smith and McKay, 2005). Para ello habría que perforar en profundidad para alcanzar muestras no afectadas por las condiciones extremas de la superficie de Marte como puede ser la radiación UV o la desecación (Smith and McKay, 2005). Esto presenta, por un lado, una importante complejidad tecnológica y, por otro lado, muchos riesgos de contaminación, aunque ya se trabaja en prototipos para hacer esto realidad (Magnani et al., 2004; Finzi, Lavagna and Rocchitelli, 2004).

### **3.3.1. Experimentos de condiciones simuladas**

Al principio, en los estudios astrobiológicos se buscaban organismos terrestres adaptados a condiciones extremas como la falta de agua y nutrientes (Léveillé, 2010). Por ello, para estudiar la capacidad de supervivencia de organismos antárticos en estos ambientes, se ha observado el comportamiento de formas de vida extremófilas en condiciones similares a las marcianas a partir de los datos que conocemos. Ya que no disponemos de ambientes cuyas condiciones podamos manipular, estos experimentos se han llevado a cabo en cámaras climáticas que simulaban los parámetros climatológicos y la composición de la atmósfera de Marte (De la Torre Noetzel; 2016, de Vera, 2012; Sánchez et al.,

2012; de Vera et al., 2014). Esto se basa en que, si en el permafrost de la Tierra se han encontrado microorganismos viables, ¿por qué no habría de darse también en el permafrost marciano que es aún más antiguo?

En estos experimentos se emplearon líquenes, considerados como organismos poiquilohídricos, ya que presentan una alta capacidad de supervivencia en ambientes extremos, resisten a temperaturas extremas, la radiación intensa y la deshidratación, como se puede dar en los Valles Secos de la Antártida (De la Torre Noetzel, 2016). Los resultados fueron muy positivos. También la capacidad de estos organismos para pasar a un estado ametabólico como la anabiosis o criptobiosis, junto con su estructura interna, podría explicar la resistencia mencionada, así como sucede con ejemplares terrestres. (De la Torre Noetzel, 2016). Otros organismos, tanto eucariotas como procariotas, demostraron ser capaces de resistir a muy bajas temperaturas entrando en un estado de anabiosis muy larga. Entraron en una fase de “letargo” o “reposo” y cuando se descongelaban la mayoría mantenían su estructura y reactivaban su metabolismo (Abyzov et al., 2006). Se demostró también que algunas bacterias y arqueas son capaces de resistir a altas dosis de radiación y algunos procariotas podrían ser incluso capaces de utilizar peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), un compuesto que ha sido detectada en la superficie de Marte (de Vera, 2012).

Diversos autores aseguran que la vida en el hielo del permafrost es posible mientras haya nutrientes disponibles y gran parte de su energía la empleen para reparar el daño molecular y mantener su integridad. Morirían si la fuente de alimento es limitada o las fracturas resultan irreparables (Buford Price, 2010).

### **3.3.2. Microorganismos sintetizadores**

Las manchas oscuras en las dunas de Marte, que se encuentran en las latitudes entre 60°S y 90°S, se han sugerido que pueden ser colonias de microorganismos marcianos fotosintéticos. Según esta hipótesis, dichos microorganismos serían capaces de invernar bajo la capa de hielo y cuando la luz solar regresa a esas latitudes en primavera, penetraría en el hielo calentándolo levemente y permitiendo a los microorganismos fotosintetizar de nuevo (Buford Price, 2010).

Los científicos han conjeturado que se parecerían a bacterias del fondo del lago Bonney en los Valles Secos de la Antártida (Priscu et al., 1998).

## **4. Discusión**

### **4.1. La vida en el permafrost de Marte**

Los primeros estudios *in situ* realizados con muestras de tierra marciana gracias a las sondas enviadas allí, no presentaban microorganismos ni sustancias biogénicas (Abyzov et al., 2006), pero eso no detiene la búsqueda. Ya hemos visto que existen formas de vida que permanecen en el permafrost de la Antártida, por lo tanto, ¿podría haber vida dentro del permafrost marciano de igual manera que en el terrestre? Diversos estudios apuntan a que en el pasado el clima de Marte era diferente y más favorecedor, lo que permitía también la presencia de agua líquida en superficie (Balme and Gallagher, 2009). En esas condiciones la vida podría haberse originado en Marte tan fácilmente como en la Tierra (Buford Price, 2010) y que, a pesar de los cambios, esta se haya refugiado en nichos protegidos de las condiciones actuales de aridez extrema y alta radiación UV (Aerts et al., 2014). Por tanto, si existe vida o restos de ella de cuando las condiciones de Marte eran más favorables, es posible que se conserven, a pesar de los cambios, en el permafrost, protegidas de las condiciones extremas que hay en superficie (Aerts et al., 2014). Este permafrost y su contenido en hielo tiene que ser lo suficientemente antiguo como para poder contener restos de una microbiota pasada (Head and Weiss, 2014). En ese supuesto caso de que en el pasado se hubiese desarrollado la vida, el antiguo permafrost de Marte sería un lugar donde potencialmente se podrían encontrar, si no vivos, al menos conservados (Smith and McKay, 2005), aunque tampoco es imposible que se mantuvieran vivos. Gracias a la capacidad de algunos microorganismos antárticos de permanecer expuestos a temperaturas por debajo de 0°C miles de años en un estado de inactividad como la anabiosis, podemos imaginar que en el permafrost profundo de Marte podría darse también el caso. Además, el permafrost de Marte se cree que se extiende varios km en profundidad hasta donde el calor geotérmico eleva las temperaturas por encima

del punto de congelación (Mellon et al., 2008). Esto vendría a sugerir que, si a gran profundidad el permafrost se descongela y este contenía hielo, el agua podría estar circulando por el interior del planeta dando la posibilidad de vida. En cambio, como no podemos acceder a tales profundidades, continuamos buscando en análogos terrestres que presenten las mayores similitudes con Marte (Flamini et al., 2009). No basta con explorar los ambientes análogos en general, sino que se busca aquellos que puedan dar los mejores resultados en base a su parecido con el planeta marciano. Por ejemplo, en los Valles Secos de la Antártida se hacen diversos estudios en diferentes partes, pero quizás, para la comparativa con Marte, las mejores zonas sean las altas, donde la temperatura nunca supera los 0°C y se consideran las más frías y secas (Goordial et al., 2016).

Se ha estudiado mucho en el pasado, la historia y evolución de Marte, así como las condiciones actuales para ver la posibilidad de encontrar vida. Los objetivos de las diferentes misiones se fueron diversificando, partían con un objetivo de búsqueda concreto y un sitio de aterrizaje propio, como por ejemplo Phoenix (Mellon et al., 2008; Houtkooper and Schulze-Makuch, 2009). Sin embargo, seguimos con la exploración, a partir de los datos que ya conocemos y las pruebas que realizamos en la Tierra, cada vez nos acercamos más al éxito, en caso de que ese éxito exista. Avanzamos mucho en conocimientos y tecnologías las futuras misiones partirán con objetivos más ambiciosos que los anteriores. Un ejemplo es ExoMars 2022 con el instrumento HABIT que, entre otras funciones que cumplirá, pretende evaluar si el agua líquida puede existir en Marte en forma de salmueras y durante cuánto tiempo (Martín-Torres et al., 2020).

## **4.2. Reflexión**

Muchos estudios tienden a considerar positivamente la probabilidad de encontrar vida o rastros de ella en Marte, por eso se han hecho en los últimos años tantos trabajos y misiones de exploración (Carr and Head III, 2010; Aerts et al., 2014). Sin embargo, no sabemos hasta qué punto puede ser esto verdad o es la ilusión del ser humano por encontrar vida más allá de nuestro planeta. Incluso

podríamos estar dando por hecho que la vida siempre se originaría de una manera similar a la terrestre (Sephton and Carter, 2015), ya que es lo que más conocemos de primera mano, pero no debemos descartar que podría haber otras formas totalmente diferentes e inimaginables para el entender humano.

Los instrumentos que se usan en las misiones a Marte y los avances tecnológicos cada vez son más avanzados y precisos (Sims et al., 2002; Aerts et al., 2014), y el hecho de que se hagan pruebas de campo en entornos análogos en la Tierra (Smith and McKay, 2005; Ramos et al., 2012), ofrece grandes posibilidades de éxito cuando se realicen las exploraciones marcianas reales. Además, la puesta en práctica de la perforación profunda, tomando todas las medidas de seguridad necesarias para impedir la contaminación de las muestras, daría lugar a nuevas oportunidades en el campo de la investigación astrobiológica (Smith and McKay, 2005). Aun así, se sigue cuestionando la posibilidad de traer muestras marcianas a la Tierra para la realización de más pruebas.

## **5. Conclusiones**

Partiendo de los conocimientos que hay sobre el permafrost marciano y el terrestre, además de las distintas formas de vida encontradas en este último podemos considerar las siguientes conclusiones:

1. Las condiciones ambientales en ambos entornos, el antártico y el marciano, es importante. Estos comparten características como la sequedad, las bajas temperaturas y la radiación UV, aunque en diferentes magnitudes ya que las condiciones en Marte son más duras. Tampoco debemos olvidar que Marte no presenta campo magnético y su atmósfera y una evolución geológica son muy diferentes a las terrestres.
2. Ambos tipos de permafrost presentarían una estructura similar, un modelo de doble capa donde la superficial es seca y más delgada de la subyacente cuyo espesor es mucho mayor y con un contenido variable de hielo.

3. Existen diferentes formas de vida en el permafrost terrestre con adaptaciones únicas que les permite resistir en ambientes tan extremos. Estas adaptaciones son sobre todo de tipo estructural y funcional, además de tener la posibilidad de entrar en un “periodo de letargo”, conocido como anabiosis, manteniéndose de esta manera durante mucho tiempo hasta poder volver a las condiciones anteriores.

4. La realización de experimentos con varias de las especies más resistentes del permafrost antártico bajo condiciones de Marte simuladas en cámaras climáticas, ha supuesto un gran interés en este campo. Sin embargo, la durabilidad de estos ejemplares a corto plazo no verifica la posibilidad de que pueda haber vida en Marte.

5. Las evidencias sobre un ambiente pasado en Marte más habitable y la posibilidad de que los microorganismos se pudieran haber resguardado en el permafrost profundo como ocurre en la Tierra, sugieren un caso similar en el permafrost marciano.

6. Es necesario seguir investigando en la ciencia astrobiológica y exoplanetaria para conocer más sobre los procesos de evolución y desarrollo de una posible forma de vida extraterrestre. Esto supone a su vez, avances en la tecnología y diseños de misiones cada vez más sofisticadas y completas.

## Referencias

- Abyzov, S.S., Duxbury, N.S., Bobin, N.E., Fukuchi, M., Hoover, R.B., Kanda, H., Mitskevich, I.N., Mulyukin, A.L., Naganuma, T., Poglazova, M.N. and Ivanov, M.V. (2006). Super-long anabiosis of ancient microorganisms in ice and terrestrial models for development of methods to search for life on Mars, Europa and other planetary bodies. *Advances in Space Research*, 38(6), 191–1197.
- Achberger, A.M., Michaud, A.B., ... Tranter, M., 2017. Microbiology of subglacial environments, in: *Psychrophiles: From Biodiversity to Biotechnology: Second Edition*. Springer International Publishing, pp. 83–110.
- Aerts, J., Röling, W., Elsaesser, A. and Ehrenfreund, P. (2014). Biota and Biomolecules in Extreme Environments on Earth: Implications for Life Detection on Mars. *Life*, 4(4), 535–565.
- Baker, V.R., Strom, R.G., Gulick, V.C., Kargel, J.S., Komatsu, G. and Kale, V.S. (1991). Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. *Nature*, 352(6336), 589–594.
- Balme, M.R. and Gallagher, C. (2009). An equatorial periglacial landscape on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 285(1-2), 1–15.
- Bandfield, J.L. and Feldman, W.C. (2008). Martian high latitude permafrost depth and surface cover thermal inertia distributions. *Journal of Geophysical Research*, 113(E8).
- Berlemont, R., Pipers, D., Delsaute, M., Angiono, F., Feller, G., Galleni, M. y Power, P. (2011). Exploring the Antarctic soil metagenome as a source of novel cold-adapted enzymes and genetic mobile elements. *Revista Argentina de Microbiología*, 43(0325-7541), 1–10.
- Bernstein, L., Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre Cambio Climático, Organización Meteorológica Mundial (Ginebra, Suiza, Programa De Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente and Al, E. (2008). Cambio climático 2007: informe de síntesis. Ginebra: Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre Cambio Climático.
- Bertaux, J.-L., Fonteyn, D., Korablev, O., Chassefière, E., Dimarellis, E., Dubois, J.P., Hauchecorne, A., Cabane, M., Rannou, P., Levasseur-Regourd, A.C., Cernogora, G., Quemerais, E., Hermans, C., Kockarts, G., Lippens, C.,



- Maziere, M.De., Moreau, D., Muller, C., Neefs, B. and Simon, P.C. (2000). The study of the martian atmosphere from top to bottom with SPICAM light on mars express. *Planetary and Space Science*, 48(12-14), 1303–1320.
- Buford Price, P. (2010). Microbial life in martian ice: A biotic origin of methane on Mars? *Planetary and Space Science*, 58(10), 1199–1206.
- Camacho A., Fernández Valiente E. (2005). Un mundo dominado por los microorganismos. *Ecología microbiana de los lagos antárticos*. (2005). *Ecosistemas*, 14(2), 64–76.
- Campbell, S., Affleck, R.T. and Sinclair, S. (2018). Ground-penetrating radar studies of permafrost, periglacial, and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica. *Cold Regions Science and Technology*, 148, pp.38–49.
- Carr, M.H. and Head III J. W. (2010). Geologic history of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 185–203.
- Cary, S.C., McDonald, I.R., Barrett, J.E. and Cowan, D.A. (2010). On the rocks: the microbiology of Antarctic Dry Valley soils. *Nature Reviews Microbiology*, 8(2), 129–138.
- Clark, B.C., Kolb, V.M., Steele, A., House, C.H., Lanza, N.L., Gasda, P.J., VanBommel, S.J., Newsom, H.E. and Martínez-Frías, J. (2021). Origin of Life on Mars: Suitability and Opportunities. *Life*, 11(6), 539.
- de la Torre Noetzel, R. (2016). Supervivencia de líquenes en Marte. *Física de la Tierra*, 28(0).
- de la Torre Noetzel, R., Miller, A.Z., de la Rosa, J.M., Pacelli, C., Onofri, S., García Sancho, L., Cubero, B., Lorek, A., Wolter, D. and de Vera, J.P. (2018). Cellular Responses of the Lichen *Circinaria gyrosa* in Mars-Like Conditions. *Frontiers in Microbiology*, 9.
- de Vera, J.-P. (2012). Lichens as survivors in space and on Mars. *Fungal Ecology*, 5(4), 472–479.
- de Vera, J.-P., Schulze-Makuch, D., Khan, A., Lorek, A., Koncz, A., Möhlmann, D. and Spohn, T. (2014). Adaptation of an Antarctic lichen to Martian niche conditions can occur within 34 days. *Planetary and Space Science*, 98, 182–190.
- Dobinski, W. (2011). Permafrost. *Earth-Science Reviews*, 108(3-4), pp.158–169.
- Dobiński, W. (2020). Permafrost active layer. *Earth-Science Reviews*, 208, 103301.

- Durham, W.B., Pathare, A.V., Stern, L.A. and Lenferink, H.J. (2009). Mobility of icy sand packs, with application to Martian permafrost. *Geophysical Research Letters*, 36(23).
- Edwards, H.G.M., Moody, C.D., Jorge Villar, S.E. and Wynn-Williams, D.D. (2005). Raman spectroscopic detection of key biomarkers of cyanobacteria and lichen symbiosis in extreme Antarctic habitats: Evaluation for Mars Lander missions. *Icarus*, 174(2), 560–571.
- Emmett, J.A., Murphy, J.R. and Kahre, M.A. (2020). Obliquity dependence of the formation of the martian polar layered deposits. *Planetary and Space Science*, 193, 105047.
- Finzi, A.E., Lavagna, M. and Rocchitelli, G. (2004). A drill-soil system modelization for future Mars exploration. *Planetary and Space Science*, 52(1-3), 83–89.
- Flamini, E., Ori, G.G., di Pippo, S. and Osinsky, G. (2009). Exploring Mars and its terrestrial analogues. *Planetary and Space Science*, 57(5-6), 509.
- Forget, F., Montmessin, F., Bertaux, J.-L., González-Galindo, F., Lebonnois, S., Quémerais, E., Reberac, A., Dimarellis, E. and López-Valverde, M.A. (2009). Density and temperatures of the upper Martian atmosphere measured by stellar occultations with Mars Express SPICAM. *Journal of Geophysical Research*, 114(E1).
- Frias, A., Manresa, A., de Oliveira, E., López-Iglesias, C. and Mercade, E. (2010). Membrane Vesicles: A Common Feature in the Extracellular Matter of Cold-Adapted Antarctic Bacteria. *Microbial Ecology*, 59(3), 476–486.
- Glassmeier, K.-H., Musmann, G., Vocks, C. and Menvielle, M. (2000). Mars — a planet in magnetic transition? *Planetary and Space Science*, 48(12-14), 1153–1159.
- Gomes, E.C.Q., Godinho, V.M., Silva, D.A.S., de Paula, M.T.R., Vitoreli, G.A., Zani, C.L., Alves, T.M.A., Junior, P.A.S., Murta, S.M.F., Barbosa, E.C., Oliveira, J.G., Oliveira, F.S., Carvalho, C.R., Ferreira, M.C., Rosa, C.A. and Rosa, L.H. (2018). Cultivable fungi present in Antarctic soils: taxonomy, phylogeny, diversity, and bioprospecting of antiparasitic and herbicidal metabolites. *Extremophiles*, 22(3), 381–393.
- Goordial, J., Davila, A., Lacelle, D., Pollard, W., Marinova, M.M., Greer, C.W., DiRuggiero, J., McKay, C.P. and Whyte, L.G. (2016). Nearing the cold-arid

- limits of microbial life in permafrost of an upper dry valley, Antarctica. *The ISME Journal*, 10(7), 1613–1624.
- Gröller, H., Lichtenegger, H., Lammer, H. and Shematovich, V.I. (2014). Hot oxygen and carbon escape from the martian atmosphere. *Planetary and Space Science*, 98, 93–105.
- Guglielmin, M. and Vieira, G. (2014). Permafrost and periglacial research in Antarctica: New results and perspectives. *Geomorphology*, 225, 1–3.
- Head, J.W. and Weiss, D.K. (2014). Preservation of ancient ice at Pavonis and Arsia Mons: Tropical mountain glacier deposits on Mars. *Planetary and Space Science*, 103, 331–338.
- Heldmann, J.L., Pollard, W., McKay, C.P., Marinova, M.M., Davila, A., Williams, K.E., Lacelle, D. and Andersen, D.T. (2013). The high elevation Dry Valleys in Antarctica as analog sites for subsurface ice on Mars. *Planetary and Space Science*, 85, 53–58.
- Houtkooper, J.M. and Schulze-Makuch, D. (2009). Possibilities for the detection of hydrogen peroxide–water-based life on Mars by the Phoenix Lander. *Planetary and Space Science*, 57(4), 449–453.
- International Permafrost Association. (2021). RCOP21 / 19th ICCRE Permafrost Conference. [online] Available at: <https://ipa.arcticportal.org/>.
- Keating, A. and Gonçalves, P. (2012). The impact of Mars geological evolution in high energy ionizing radiation environment through time. *Planetary and Space Science*, 72(1), 70–77.
- Kite, E.S., Sneed, J., Mayer, D.P. and Wilson, S.A. (2017). Persistent or repeated surface habitability on Mars during the late Hesperian - Amazonian. *Geophysical Research Letters*, 44(9), 3991–3999.
- Krasilnikov, S.S., Kuzmin, R.O., Bühler, Y. and Zabalueva, E.V. (2020). Formation of long-distance water ice avalanches on Mars. *Planetary and Space Science*, 186, 104917.
- Léveillé, R. (2010). A half-century of terrestrial analog studies: From craters on the Moon to searching for life on Mars. *Planetary and Space Science*, 58(4), 631–638.
- Liu, L., Sletten, R.S., Hallet, B. and Waddington, E.D. (2018). Thermal Regime and Properties of Soils and Ice-Rich Permafrost in Beacon Valley,

- Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(8), 1797–1810.
- Lopez-Ramirez, M.R., Sancho, L.G., de Vera, J.P., Baqué, M., Böttger, U., Rabbow, E., Martínez-Frías, J. and de la Torre Noetzel, R. (2021). Detection of new biohints on lichens with Raman spectroscopy after space- and Mars like conditions exposure: Mission Ground Reference (MGR) samples. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 261, 120046.
- Luque B., Ballesteros F., Márquez A., Gonzalez M., Agea A. y Lara L. (2009). *Astrobiología: un puente entre el big bang y la vida*. Madrid: Akal. 261-283, 289-293.
- Magnani, P.G., Re, E., Ylikorpi, T., Cherubini, G. and Olivieri, A. (2004). Deep drill (DeeDri) for Mars application. *Planetary and Space Science*, 52(1-3), 79–82.
- Mangold, N., Allemand, P., Duval, P., Geraud, Y. and Thomas, P. (2002). Experimental and theoretical deformation of ice–rock mixtures: Implications on rheology and ice content of Martian permafrost. *Planetary and Space Science*, 50(4), 385–401.
- Mangold, N., Baratoux, D., Witasse, O., Encrenaz, T. and Sotin, C. (2016). Mars: a small terrestrial planet. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 24(1).
- Martín-Torres, J., Zorzano, M.-P., Soria-Salinas, Á., Nazarious, M.I., Konatham, S., Mathanlal, T., Ramachandran, A.V., Ramírez-Luque, J.-A. and Mantas-Nakhai, R. (2020). The HABIT (HabitAbility: Brine Irradiation and Temperature) environmental instrument for the ExoMars 2022 Surface Platform. *Planetary and Space Science*, 190, p.104968.
- Mellon, M.T., Boynton, W.V., Feldman, W.C., Arvidson, R.E., Titus, T.N., Bandfield, J.L., Putzig, N.E. and Sizemore, H.G. (2008). A prelanding assessment of the ice table depth and ground ice characteristics in Martian permafrost at the Phoenix landing site. *Journal of Geophysical Research*, 113, 1-14
- Mitrofanov, I.G., Zuber, M.T., Litvak, M.L., Demidov, N.E., Sanin, A.B., Boynton, W.V., Gilichinsky, D.A., Hamara, D., Kozyrev, A.S., Saunders, R.D., Smith, D.E. and Tretyakov, V.I. (2007). Water ice permafrost on Mars: Layering

- structure and subsurface distribution according to HEND/Odyssey and MOLA/MGS data. *Geophysical Research Letters*, 34(18), 1-5.
- Onofri, S., Selbmann, L., Zucconi, L. and Pagano, S. (2004). Antarctic microfungi as models for exobiology. *Planetary and Space Science*, 52(1-3), 229–237.
- Pavlov, A.K., Blinov, A.V. and Konstantinov, A.N. (2002). Sterilization of Martian surface by cosmic radiation. *Planetary and Space Science*, 50(7-8), 669–673.
- Priscu, J.C., Fritsen, C.H., Adams, E.E., Giovannoni, S.J., Paerl, H.w., McKay, C.P., Doran, P.T., Gordon, D.A., Lanoil, B.D. and Pinckney, J.L. (1998). Perennial Antarctic Lake Ice: An Oasis for Life in a Polar Desert. *Science*, 280(5372), 2095–2098.
- Ramos, M., de Pablo, M.A., Sebastian, E., Armiens, C. and Gómez-Elvira, J. (2012). Temperature gradient distribution in permafrost active layer, using a prototype of the ground temperature sensor (REMS-MSL) on deception island (Antarctica). *Cold Regions Science and Technology*, 72, 23–32.
- Sánchez, F.J., Mateo-Martí, E., Raggio, J., Meeßen, J., Martínez-Frías, J., Sancho, L.Ga., Ott, S. and de la Torre, R. (2012). The resistance of the lichen *Circinaria gyrosa* (nom. provis.) towards simulated Mars conditions— a model test for the survival capacity of an eukaryotic extremophile. *Planetary and Space Science*, 72(1), 102–110.
- Sancho, L.G., Pintado, A., Navarro, F., Ramos, M., De Pablo, M.A., Blanquer, J.M., Raggio, J., Valladares, F. and Green, T.G.A. (2017). Recent Warming and Cooling in the Antarctic Peninsula Region has Rapid and Large Effects on Lichen Vegetation. *Scientific Reports*, 7(1).
- Sephton M. A., Carter J. N. (2015). The chances of detecting life on Mars. *Planetary and Space Science* 112, 15–22.
- Sims, M.R., Pullan, D., Pillinger, C.T. and Wright, I.P. (2002). An evaluation of in situ analysis and sample return in the exploration of Mars. *Planetary and Space Science*, 50(7-8), 657–668.
- Smith, H.D. and McKay, C.P. (2005). Drilling in ancient permafrost on Mars for evidence of a second genesis of life. *Planetary and Space Science*, 53(12), 1302–1308.

- Soare, R.J., Conway, S.J., Gallagher, C. and Dohm, J.M. (2017). Ice-rich (periglacial) vs icy (glacial) depressions in the Argyre region, Mars: a proposed cold-climate dichotomy of landforms. *Icarus*, 282, 70–83.
- Ulrich, M., Morgenstern, A., Günther, F., Reiss, D., Bauch, K.E., Hauber, E., Rössler, S. and Schirrneister, L. (2010). Thermokarst in Siberian ice-rich permafrost: Comparison to asymmetric scalloped depressions on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 115(E10).
- Zawar-Reza, P. and Katurji, M. (2014). Antarctic climate and soils. *Antarctic Terrestrial Microbiology*, 279–292.