



**INSTITUTO LATINOAMERICANO DE  
CIENCIAS DE LA VIDA Y CIENCIAS DE LA  
NATURALEZA (ILACVN)**

**CIENCIAS BIOLÓGICAS – ECOLOGÍA Y  
BIODIVERSIDAD**

**UNA BREVE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE MARTE:  
CONTEXTO GEOLÓGICO Y LAS CONDICIONES DE HABITABILIDAD**

**HELLA ALICIA ORTIZ BACHEN**

Foz do Iguaçu  
2021



**INSTITUTO LATINOAMERICANO DE  
CIENCIAS DE LA VIDA Y CIENCIAS DE LA  
NATURALEZA (ILACVN)**

**CIENCIAS BIOLÓGICAS – ECOLOGÍA Y  
BIODIVERSIDAD**

**UNA BREVE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE MARTE:  
CONTEXTO GEOLÓGICO Y LAS CONDICIONES DE HABITABILIDAD**

**HELLA ALICIA ORTIZ BACHEN**

Trabajo de Conclusión de Carrera presentado al Instituto Latinoamericano de Ciencias de la Vida y de la Naturaleza de la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, como requisito parcial para la obtención de título de Licenciatura en Ciencias Biológicas – Ecología Y Biodiversidad.

Orientador: Prof. Dr. Cleto Kaveski Peres.  
Co-orientador: Dr. Bruno Nascimento Dias.

Foz do Iguaçu  
2021

HELLA ALICIA ORTIZ BACHEN

**UNA BREVE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE MARTE:  
CONTEXTO GEOLÓGICO Y LAS CONDICIONES DE HABITABILIDAD**

Trabajo de Conclusión de Carrera presentado al Instituto Latinoamericano de Ciencias de la Vida y de la Naturaleza de la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, como requisito parcial para la obtención de título de Licenciatura en Ciencias Biológicas – Ecología Y Biodiversidad.

Orientador: Prof. Dr. Cleto Kaveski Peres  
Co-orientador: Dr. Bruno Nascimento Dias

**BANCA EVALUADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Cleto Kaveski Peres  
UNILA

---

Co-Orientador: Dr. Bruno Nascimento Dias.  
Museu Nacional do Rio de Janeiro.

---

Dr. Jesús Martínez Frías  
Universidad Complutense de Madrid

---

M.Sc. Leticia Paola Alabi  
Universidad de Valencia

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_ de \_\_\_\_ de \_\_\_\_

## TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Hella Alicia Ortiz Bachen.

Curso: Ciências Biológicas - Ecologia e Biodiversidade

### Tipo de Documento

- |   |  |
|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> graduação | <input type="checkbox"/> artigo                                    |
| <input type="checkbox"/> especialização       | <input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso |
| <input type="checkbox"/> mestrado             | <input type="checkbox"/> monografia                                |
| <input type="checkbox"/> doutorado            | <input type="checkbox"/> dissertação                               |
|   | <input type="checkbox"/> tese                                      |
|   | <input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais               |
|   | <input type="checkbox"/> _____                                     |

Título do trabalho acadêmico: Una breve revision bibliográfica sobre Marte: Contexto geológico y las condiciones de habitabilidad.

Nome do Orientador: Prof. Dr. Cleto Kaveski Peres.

Nome do Co-orientador: Dr. Bruno Nascimento Dias.

Data da Defesa: 26 de março de 2022

### Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública Creative Commons **Licença 3.0 Unported**.

Foz do Iguaçu, 26 de março de 2022.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, por confiar en mí y ser mi sustento día a día, por alentar mi curiosidad y animarme a seguir mis sueños desde pequeña, gracias por todo, les amo!!.

Así mismo agradecer a la UNILA y a al Brasil, mi segundo hogar, por haberme abierto las puertas a esta gran aventura, por alimentar mi conocimiento y mis deseos por un mundo más justo para todos.

A mi orientador el profesor Cleto Kaveski por estos años de grandes enseñanzas y paciencia conmigo, a mi co-orientador el Doctor Bruno Nascimento Días, maestro y amigo, quien me permitió abordar unos de los temas que más me ha fascinado en la vida, la Astrobiología, muchas gracias a ambos por el aguante durante todo este tiempo.

Así mismo agradecer a los miembros de la banca evaluadora por su tiempo y su participación en la defensa.

A mi grupo de Bioarreatados, Antonella, André, Alvaro, Diego, Kathe y Paula, con quienes he compartido varios de los momentos más felices de mi vida, gracias por brindarme el privilegio de crecer con ustedes.

De la misma manera a mis grandes amigas y hermanas, Andrea, Ángeles, Alejandra, Shiu y Yeni, por llenar mi vida de momentos fabulosos e inolvidables, gracias por el cariño y los buenos recuerdos.

Gracias a todos aquellos que formaron parte de esta aventura, los llevare conmigo siempre.

ORTIZ BACHEN, HELLA ALICIA. **UNA BREVE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE MARTE: CONTEXTO GEOLÓGICO Y LAS CONDICIONES DE HABITABILIDAD.** 2021, 41 páginas. Trabajo de Conclusión de Carrera (Graduación em Ciencias Biológicas – Ecología y Biodiversidad) – Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, Foz do Iguacu, 2021.

## RESUMEN

Marte siempre ha sido un gran foco de interés para la astrobiología, estando envuelto en diversas opiniones respecto a su pasado y presente, siendo considerado por muchos como la próxima frontera a superar. Con base en esa perspectiva, este trabajo de conclusión de curso tiene como objetivo principal realizar una breve revisión bibliográfica sobre Marte y los estudios relacionados a sus condiciones de habitabilidad en algún momento de su historia. De esta forma, este estudio presentara contenidos relacionados al interés astrobiológico por Marte, su geología, los meteoritos marcianos, la historia del agua en un ambiente marciano, los carbonatos marcianos y por fin, las posibles trayectorias de habitabilidad que podría haberse dado en el planeta. La metodología del trabajo fue desarrollada partir de un análisis cuali-descriptivo encima de un estudio de revisión bibliográfica sobre Marte, en donde fueron utilizados artículos científicos de varios autores, entre los que destacan, Charles Cockell, Harry McSween y Bruno Nascimento-Dias, además de algunos libros publicados sobre el tema. Fue posible concluir que existen trayectorias que apuntan a condiciones favorables para la vida en Marte en su pasado, principalmente, por las fuertes evidencias sobre la existencia de agua en la superficie marciana durante el eón Neoico hasta el inicio del Hespérico, sin embargo, esto no revela evidencia suficiente para dar una respuesta concisa sobre un Marte habitado en algún momento de su historia. Así, a pesar de la gran cantidad de información existente en torno a este tema, aun no se pueden hacer afirmaciones respecto a la presencia de vida marciana en algún punto de su trayectoria, sin embargo, gracias a décadas de exploración espacial, la humanidad podría encontrarse cada día mas cerca de una respuesta.

**Palabras claves:** Marte; astrobiología; astrogeologia; vida en Marte; habitabilidad.

ORTIZ BACHEN, HELLA ALICIA. **UMA BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MARTE: CONTEXTO GEOLÓGICO E AS CONDIÇÕES DE HABITABILIDADE**. 2021, 41 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas – Ecologia e Biodiversidade) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

## RESUMO

Marte sempre foi um grande foco de interesse para a astrobiologia, estando envolvido em diversas opiniões sobre seu passado e presente, sendo considerado por muitos como a próxima fronteira a ser superada. Com base nessa perspectiva, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo principal realizar uma breve revisão bibliográfica sobre Marte e os estudos relacionados às suas condições de habitabilidade em algum momento da sua história. Assim, este trabalho apresentará conteúdos relacionados ao interesse astrobiológico por Marte, e a sua geologia, os meteoritos marcianos, a história da água no ambiente marciano, os carbonatos marcianos e por fim, as possíveis trajetórias de habitabilidade que poderiam ter ocorrido no planeta. A metodologia do trabalho foi desenvolvida a partir de uma análise quali-descritiva em cima de um estudo de revisão bibliográfica sobre Marte, em que foram utilizados artigos científicos, de vários autores, entre eles, Charles Cockell, Harry McSween e Bruno Nascimento-Dias, além de alguns livros publicados sobre Astrobiologia. Foi possível concluir que existem trajetórias que apontam condições favoráveis para ter existido vida no passado de Marte, principalmente, por conta das fortes evidências de ter existido água na superfície marciana durante o Eon Noeico até o início do Hespérico, mas isso não implica evidência suficiente para dar uma resposta concisa sobre um Marte habitado em algum momento da sua história. Assim, apesar da grande quantidade de informação existente sobre este assunto, ainda não pode-se fazer declarações a respeito da presença de vida marciana em algum momento de sua trajetória, porém, graças a décadas de exploração espacial, a humanidade poderia estar-se aproximando a uma resposta.

**Palabras-clave:** Marte; astrobiologia; astrogeologia; vida em Marte; habitabilidade.

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<b>Figura 1</b> – Mapa topográfico de Marte .....	18
<b>Figura 2</b> – Redes de valles en el Noeico .....	28
<b>Figura 3</b> – Cráteres de impacto en el eón Noeico .....	29

## SUMARIO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	13
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	14
<b>4. DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN CUALITATIVA</b> .....	16
4.1. MARTE Y EL INTERES ASTROBIOLOGICO .....	16
4.2. LA GEOLOGIA DE MARTE .....	17
4.3. METEORITOS MARCIANOS .....	21
4.3.1. Shergotitas .....	21
4.3.2. Nakhlitas .....	23
4.3.3. Chassigny (Dunito).....	23
4.3.4. ALH84001 (Ortopiroxenita).....	24
4.3.5. Evidencias sobre su origen marciano.....	25
4.4. LA HISTORIA DEL AGUA EN MARTE .....	26
4.4.1. El origen del agua en Marte .....	26
4.4.2. El agua en el Marte temprano .....	28
4.5. LOS CARBONATOS MARCIANOS .....	30
4.6. TRAYECTORIA DE HABITABILIDAD MARCIANA .....	32
4.6.1. Sobre la Habitabilidad de Marte .....	32
4.6.2. Marte Inhabitable .....	32
4.6.3. Marte Habitable .....	33
<b>5. CONSIDERACIONES FINALES</b> .....	35
<b>6. REFERENCIAS</b> .....	37

## 1. INTRODUCCIÓN

Marte ha sido examinado durante años a través de telescopios, sondas y rovers, y aunque hemos aprendido mucho sobre las características geológicas y la historia de este planeta, las lagunas en nuestro conocimiento ciertamente superan lo que entendemos. Un factor importante para estudiarlo es su accesibilidad, ya que el envío de instrumentos y sondas se da con bastante facilidad en comparación con otros planetas (GARCÍA, 2017). En estos últimos periodos de exploración, se han obtenido más conocimientos a detalle sobre éste y su historia, según EHLMANN y EDWARDS (2014), esto se debe a las observaciones de la superficie con resoluciones espaciales y espectrales crecientes, proporcionadas por las capacidades mejoradas de los instrumentos orbitales, las exploraciones *in situ* y los análisis a pequeña escala realizadas por rovers y módulos de aterrizaje.

Otra forma en la que se ha obtenido información importante sobre Marte ha sido a través de meteoritos marcianos (NIMMO y TANAKA, 2005; MILTON y DECARLI, 1963). Estos son excelentes materiales para comprender el presente y el pasado del Planeta Rojo, ya que poseen características física y químicas de la evolución planetaria conservadas en sus estructuras.

Durante los últimos años, ha habido una cantidad increíble de actividades relacionadas con el estudio científico, la exploración y reconstrucción histórica del entorno marciano. La NASA, junto con socios internacionales, han iniciado varias misiones orbitales, así mismo, las misiones de rover (por ejemplo, Spirit, Opportunity, Curiosity y actualmente Perseverance) han explorado Marte desde 2004 hasta el presente, proporcionando información sobre la mineralogía y geología de la superficie del planeta (VILLAR -ARRIBI,2018).

A su vez, los datos recolectados de estas misiones generaron un intenso trabajo de cálculos teóricos y experimentos relacionados con los campos de estabilidad de las fases de cambio relevantes en Marte, que incluyen sulfatos, filosilicatos, rocas carbonatadas y otros minerales (PAPIKE et al., 2009). Algunas indicaciones geológicas

sugieren que, en el pasado, pudo haber una gran cantidad de agua líquida en el planeta rojo, similar a los lagos o mares (GOLDSPIEL y SQUYRES, 1991).

Este tipo de ambiente podría estar relacionado con algunos de los cráteres o depresiones que se observan hoy en la superficie de marciana (SCOTT *et al.*, 1995). En estos ambientes acuosos, es posible que haya una precipitación de compuestos de gran interés científico, como los carbonatos (SCHAEFER, 1990). Estos materiales podrían haber sido producidos y perdurados en algunas áreas del planeta, mezclándose con regolitos marcianos y otros componentes en el piso de la cuenca o debajo de la superficie marciana (CRADDOCK y MAXWELL, 1993).

Por lo tanto, la prueba de la existencia de estos minerales en los meteoritos marcianos puede ayudar en la investigación y comprensión de posibles depósitos de agua líquida sobre o debajo de la superficie marciana (SCHAEFER, 1990). Además, con esta información, es posible inferir el funcionamiento del ciclo hidrológico de Marte con el fin de caracterizar uno de los parámetros evolutivos del ambiente marciano (NIMMO y TANAKA, 2005).

Si bien hoy en día existe una fuerte inestabilidad del agua líquida en la superficie de Marte, la identificación de tales depósitos podría indicar que hubo condiciones geológicas y climáticas drásticamente diferentes en el pasado del planeta (SCHAEFER, 1990). En general, cada una de estas diferentes etapas evolutivas en el planeta Marte, está temporalmente relacionada con períodos históricos denominados Noeico (> 3,7 Ga), Hespérico (3,7-3,0 Ga) y Amazónico (<3,0 Ga) (COCKELL, 2020)

Los levantamientos en el área de reconstrucción paleo ambiental de Marte aún se encuentran poco explorados, con escasos trabajos que intentan desenvolver una investigación combinada entre las áreas teóricas, experimentales y observacionales. En este contexto, el presente estudio se justifica por la necesidad de abarcar ciertos aspectos que puedan exponer la estructura geológica, la composición ambiental marciana y los posibles procesos evolutivos que pudieron haber ocurrido a lo largo del tiempo en el Planeta Rojo, para así obtener información sobre la posible habitabilidad del mismo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Presentar algunos aspectos geológicos y paleo ambientales sobre la viabilidad de un entorno propicio para la vida en Marte, en algún momento de su historia.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar información y describir brevemente sobre la geología de Marte y sus eones;
- Recopilar información sobre los meteoritos marcianos (SNC) y presentar sus principales características;
- Realizar un estudio documental sobre la historia del agua en Marte;
- Desarrollar una revisión de la literatura sobre carbonatos marcianos;
- Presentar de forma cualitativa y descriptiva las posibles trayectorias de habitabilidad marciana.

### 3. METODOLOGÍA

Se trata de una investigación con un enfoque cuali-descriptivo (ASPERS y CORTE, 2019), la cual se centró en la comprensión y explicación de Marte y sus aspectos generales relacionados al campo de las ciencias planetarias y la astrobiología.

Para MINAYO (2010), la experiencia, significados, motivos y valores que constituyen la comprensión, a su vez, definen a la investigación cualitativa. Así en base a esto, es importante resaltar que el desarrollo metodológico se realizó de forma totalmente descriptiva, buscando presentar detalles sobre aspectos relacionados a las condiciones de habitabilidad del entorno marciano.

La investigación se dio primeramente a través de relevamiento documental y referencias bibliográficas que permitieron comprender temas relacionados con Marte y la astrobiología, libros de la Universidad de Cambridge como “The Geology of Mars” y “Planet Fomation: Theory, observations, and experiments” así como de la USP, “Astrobiologia: Uma Ciência Emergente” fueron consultados previamente a la redacción de este trabajo.

También la lectura de artículos científicos y de divulgación sobre astrobiología, astrogeología y meteorítica, fueron explorados; entre los autores se encuentran Jesús Martínez Frías, Carl Sagan, y Bruno Nascimento-Dias.

Así mismo, el levantamiento documental en revistas científicas, se dio principalmente evaluando artículos científicos de revistas digitales como la International Journal of Astrobiology de la Universidad de Cambridge (<https://www.cambridge.org/core/journal>) y la Revista ZOE (CAB) (<https://cab.inta-csic.es/>), utilizando filtros como “Recursos astrobiológicos”, “Divulgación”. Así mismo paginas como la de la NASA Astrobiology (<https://astrobiology.nasa.gov/>) y UK Astrobiology, de la Universidad de Edimburgo (<https://www.astrobiology.ac.uk/publications>) fueron consultadas.

En cuanto al levantamiento documental para la descripción de este trabajo, se utilizaron artículos científicos recopilados de la plataforma Scielo (Scientific Electronic Library Online), Google Scholar, y SCOPUS (perteneciente a Elsevier). Inicialmente se procuraron los artículos por palabras claves como palabras claves “Astrobiología”,

“Carbonatos Marcianos”, “Meteoritos Marcianos”, “Agua en Marte”. “Geología Marciana”, “Historia de Marte”, “Vida microbiana Marte”, de igual manera se procuraron estos términos en los idiomas inglés y portugués.

Los materiales se recopilaron en carpetas coincidiendo con estas temáticas. Entre los criterios de selección, se desconsideraron artículos publicados antes del siglo XXI, con excepción de algunos cuya pesquisa continuase siendo validada y citada por autores más contemporáneos; así mismo los estudios que abordaban descubrimientos muy recientes fueron en su mayoría desconsiderados, estos por ser muy exploratorios.

De igual manera fueron consultados libros de autores reconocidos como Charles Cockell y Harry Y. McSween. Es importante destacar que se utilizaron varias referencias a lo largo del proyecto, pero no es posible mencionarlas todas aquí en esta sección.

## **4. DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN CUALITATIVA**

### **4.1 MARTE Y EL INTERES ASTROBIOLOGICO**

Uno de los cuerpos celestes más estudiados en el campo de la astrobiología es Marte, llamado así en honor al dios romano de la guerra; este planeta ha sido el centro de atención para muchos desde las civilizaciones antiguas hasta nuestros días, no solo por el color característico y llamativo que presenta al observarlo en el cielo, producto del óxido de hierro en su superficie, sino también porque es el cuerpo planetario más parecido a la Tierra, por lo cual las posibilidades de que este albergue o haya albergado vida son cuestionamientos constantes de la astrobiología (COCKELL,2015).

Las ideas en torno a la habitabilidad del Planeta Rojo se popularizaron a partir de ciertos sucesos ocurridos en el siglo XIX, fue durante 1877 que el astrónomo Giovanni Schiaparelli mapeo diversas áreas de Marte, en sus observaciones se podían apreciar ciertos canales en la superficie marciana, lo que condujo a Percivall Lowell, un astrónomo aficionado, a argumentar erradamente que estos eran artificiales (NASA,2003). Las ideas de Lowell se propagaron de manera abrumadora, ganando adeptos en todo el mundo, y creando una nube de expectativas en torno a Marte y su supuesta habitabilidad (RODRIGUEZ, 2008).

Los mapas de ambos astrónomos dieron lugar a visiones confabuladas hacia el Planeta Rojo, siendo fuente de inspiración no solo para los amantes de la ciencia, sino también para los artistas a través de los años, especialmente escritores y cineastas quienes hacían volar su imaginación creando historias en torno a la posibilidad de vida inteligente marciana. (NASA, 2003)

Se podría decir que estas interpretaciones plantaron la semilla de la curiosidad por Marte en gran parte de la población humana, y eso constituyó un punto de partida importante para la exploración del mismo en los años siguientes, varias corrientes alrededor de esta idea nacieron durante esos primeros años, sin embargo, fueron decayendo al momento de profundizar en el territorio del planeta a través de los diversos experimentos llevados en campo y laboratorio (RODRIGUEZ,

2008). Los estudios entorno a este planeta rocoso intentan responder a preguntas formuladas hace siglos, mientras se obtiene una mayor información y precisión sobre la historia geológica de la Tierra, así fue y seguirá siendo una musa para la humanidad, siendo probablemente el primer planeta a ser colonizado por nuestra especie en los próximos años (NASA, 2003).

Es importante destacar que la habitabilidad está definida por la capacidad que posee un entorno en un momento dado de albergar por lo menos un organismo (COCKELL, 2015). Así mismo, una Zona Habitable en el universo, se define como la región alrededor de una estrella en donde un planeta puede mantener agua líquida en su superficie durante millones de años (POFFO, 2012). Esto indicaría que la presencia de agua líquida es uno de los puntos esenciales para la vida, sin embargo, esta no es suficiente, ya que otros factores deben ser cumplidos, como una temperatura óptima para mantener las estructuras biológicas, y la presencia de los elementos claves como los (CHOMPS) es decir carbono (C), el hidrógeno (H), el oxígeno (O), el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S) son fundamentales para un entorno habitable. (VILLAR-ARRIBI, 2018).

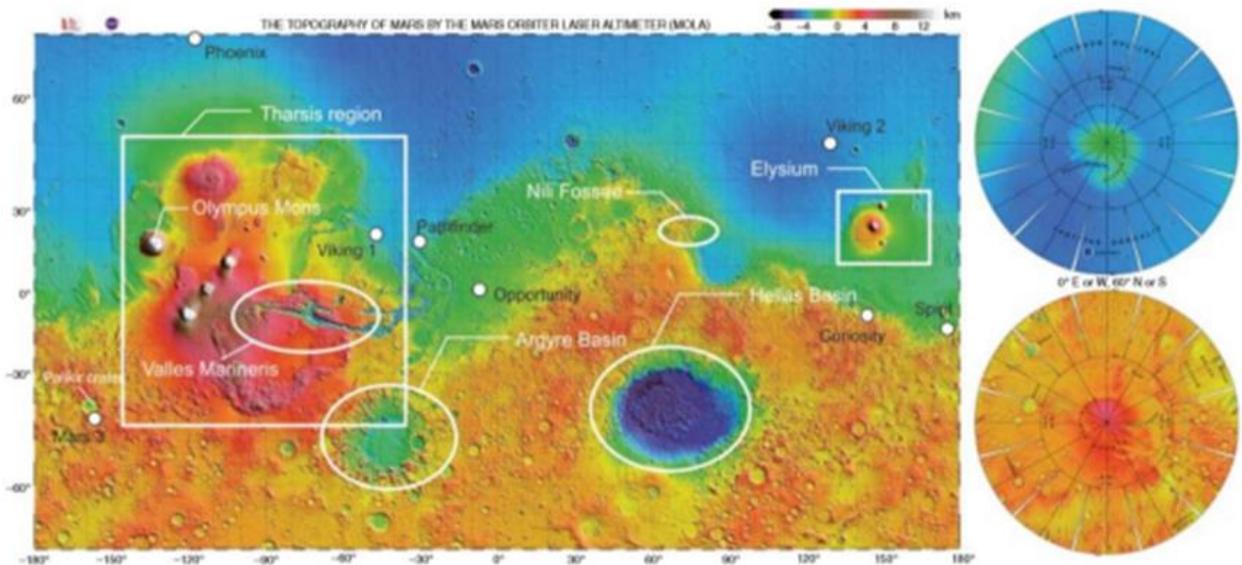
Para (GARCÍA, 2017), las imágenes y datos obtenidos a través de las diversas misiones espaciales enviadas a Marte, muestran un paisaje marciano compuesto por rocas, depósitos sedimentarios, glaciares y valles, lo que permite obtener una visión de un Planeta Rojo con un pasado que pudo haber presentado escenarios favorables para la vida, así la geología de Marte es un punto esencial para comprender la historia de nuestro planeta vecino.

## **4.2 LA GEOLOGIA DE MARTE**

Marte es un planeta con una dimensión menor a la Tierra, motivo por el cual recibe menos insolación y su superficie es más fría que la terrestre, su atmosfera está compuesta especialmente por dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno, en cantidades menores a la Tierra por lo que su presión atmosférica es muy baja en comparación (SPALLETTI,2016).

Marte posee una estructura interna similar al de su vecino, pues también cuenta con núcleo, manto y corteza, sin embargo, como su campo magnético es muy débil se asume que su núcleo se encuentra en estado sólido, y el mismo sería rico en hierro, níquel y azufre del 15 al 17% (VILLAR-ARRIBI,2018; SPALLETTI,2016). Así mismo el manto estaría compuesto por silicatos y un porcentaje elevado de olivina, lo que evidenciaría su pasado activo, con movimiento de tectónica (Mezger, 2013). La corteza marciana se encuentra en estado sólido, y está formada especialmente por hierro, aluminio, potasio, magnesio y calcio (VILLAR-ARRIBI,2018).

El Planeta Rojo cuenta con una dicotomía hemisférica muy pronunciada, es decir las diferencias entre la región sur y norte son muy visibles; en el hemisferio sur se puede observar una franja repleta de cráteres de impactos y fallas tectónicas muy perceptibles, mientras que en el norte, el terreno es menos caótico, más liso y homogéneo (COCKELL,2015), como se puede observar en la Figura 1.



**Figura 1.** Mapa Topográfico de Marte obtenido por la Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA). Las regiones con una coloración rojiza representan latitudes más elevadas, al contrario las regiones con una coloración azulada representan latitudes más bajas.

Fuente: (COCKELL, 2015)

Hasta el día de hoy no existen respuestas concisas respecto a esta característica planetaria, las hipótesis giran en torno a posibles impactos de magnitudes gigantescas que con el tiempo modelaron la estructura del planeta

hasta verla como es hoy día (COCKELL, 2015). Cada región presenta en su superficie arreglos muy peculiares; en el sur se encuentran las llanuras de las cuencas de Hellas y Argyres, productos de impactos antiquísimos en el planeta, mientras que en el norte se halla el bulbo de Tharsis con varios volcanes, entre ellos el Monte Olimpo, un volcán dos veces y medio la altura del Everest (COCKELL, 2015).

La escala de tiempo geológico de Marte consta de tres eones, el Noeico, el Hespérico y el Amazónico (SPALLETTI, 2016). Según COCKELL, (2015), el Pre Noeico es un periodo que va desde la formación del planeta hasta los 4,1 Ga., durante este tiempo los primeros filosilicatos comienzan a formarse y se dan alteraciones geoquímicas a escala planetaria, el final del mismo es marcado por el apareamiento de los primeros suelos arcillosos en ambientes ricos en agua.

El Noeico, abarca desde 4,1 G.a a 3,7 G.a, durante este tiempo se cree que pudieron haberse dado muchos procesos naturales, esto debido a la presencia de regiones que se encuentran más erosionadas que otras (CRADDOCK y HOWARD, 2002). Durante este eón el planeta presenta condiciones húmedas con un ph neutro, las mismas se manifiestan en procesos de erosión hídricas generales, originando redes de valles y procesos de meteorización (SPALLETTI, 2016; ALBI, 2021). Para autores como SQUYRES Y KASTING (1994) los filosilicatos que se encuentran difundidos en terrenos del eón Noeico podrían indicar que esos minerales se habrían formado en ambientes por debajo de la superficie del planeta, es decir bajo la posible presencia de acuíferos hidrotermales, así durante este tiempo la presencia de agua líquida, y la formación de arcillas fue predominante. También la actividad volcánica fue muy intensa en el Noeico, dando origen a los volcanes más grandes del planeta. De igual manera en ese tiempo surgieron los cráteres Hellas y Argyre (SPALLETTI, 2016).

Siguiente a esta era, se encuentra el Hespérico, un periodo que abarca desde los 3,7 G.a hasta los 3,0 Ga, en el cual los cambios en las condiciones ambientales llevarían a generar grandes mudanzas paleo ambientales en Marte, puesto que la tasa relacionada al nivel del agua en la superficie del planeta habría comenzado a disminuir (GHATAN *et al.*, 2005; CARR y HEAD, 2010). Según BANFIELD *et al.*, (2000), otra característica de este, es que el proceso de meteorización se

redujo, y esto podría indicar la transición de las condiciones de pH neutro para ácido en la superficie marciana (BIBRING *et. al*, 2005).

El Hespérico también se caracteriza por la disminución en la formación de filosilicatos. (COCKELL, 2015). Como el agua comienza a disiparse y congelarse, la baja abundancia de esta se junta con el azufre y el planeta experimenta condiciones ácidas, se da la formación de sales de sulfato (BIBRING *et al.*, 2005; CARR y HEAD, 2010), todo esto acompañado de una intensa actividad volcánica (SPALLETTI, 2016; ALBI, 2021)

Dando continuidad a los eones, el Amazónico es el siguiente, siendo un periodo que abarca desde los 3,0 Ga. hasta los días presentes (ALBI, 2021). Durante el comienzo del Amazónico, el planeta experimentó un aumento en el congelamiento y evaporación del agua, se lo considera una era criosférica, con alta presencia de hielo en la que los depósitos glaciales y los flancos de volcanes son persistentes (SPALLETTI, 2016). Los sedimentos se concentran en los cráteres y cañones, mientras se da una disminución de la actividad volcánica, al Amazónico se lo conoce como el eón en el cual Marte pasa a ser un mundo árido y completamente desértico (COCKELL, 2015, ALBI, 2021).

En todos estos años los procesos geológicos en Marte fueron disminuyendo de manera progresiva, ocasionando el declino del vulcanismo y con eso también la tasa de reestructuración de la superficie marciana (GOLOMBEK *et al.*, 2006). Actualmente se sabe que procesos como el viento y hielo en Marte poseen conexión con la oblicuidad del planeta, que al mismo tiempo está relacionado con la inclinación axial que ocasiona las estaciones (COCKELL, 2015, ALBI, 2021).

Otra cuestión es la interacción de los vientos con el ambiente marciano, pues al no contar con un campo magnético suficiente y una gravedad tan débil, su atmósfera es barrida por el viento solar (QUINTERO, 2020). Según (SPALLETTI, 2016), la desecación de Marte durante este periodo se produjo a partir de constantes tormentas solares, lo que erosionó la atmósfera marciana llevando a la pérdida de agua. Así los procesos fotoquímicos y el viento solar han vuelto a Marte el planeta frío y desértico que es actualmente (CHASSEFIÈRE y LEBLANC, 2004).

Todo el conocimiento geológico del Planeta Rojo se debe a las diversas misiones realizadas a Marte desde hace más de 50 años, datos recopilados de sondas, y rovers fueron y siguen siendo procesados en nuestro planeta sin siquiera haber pisado la superficie del mismo. A pesar de la tecnología presente, mucha información no hubiese sido corroborada sin la presencia del material rocoso proveniente de Marte, es decir, de los meteoritos marcianos, según NASCIMENTO-DIAS, (2021) estos elementos servirían como registro de estos procesos geológicos e históricos del planeta vecino.

### **4.3 METEORITOS MARCIANOS**

De acuerdo a estándares estructurales y composición química, los meteoritos marcianos o SNC se dividen en cuatro grupos; las Shergotitas, las Nakhlitas, las Chassigny y las Ortopiroxenitas (NASCIMENTO-DIAS, 2021). La alta diversidad petrológica de estos grupos no descarta la posibilidad de pertenencia a un mismo cuerpo parental, puesto que evidencias apuntan a que en su mayoría partieron de un magma de este tipo, compartiendo así características isotópicas bioquímicas y radiológicas (MCSWEEN, 1994). Estos también comparten composiciones isotópicas de Carbono (C), Nitrogeno (N), Oxigenos (O) y gases nobles diferentes de otros meteoritos de distinta procedencia (NASCIMENTO-DIAS 2021). Representarían las huellas químicas dactilares de estos cuerpos, indicando así cantidades que durante procesos ígneos tienden a permanecer constantes y no fraccionarse (MCSWEEN, 1994). A continuación, una breve descripción de cada uno de estos meteoritos.

#### **4.3.1 Shergotitas**

Las Shergotitas son acumulaciones basálticas compuestas de piroxeno con pequeñas cantidades de plagioclasa, que muestran texturas ígneas. (PAPIKE et al., 2009). Dentro de este grupo se encuentran las Shergotitas Basálticas y las Shergotitas Fenolíticas (Iherzolíticas), las primeras cuentan con tres tipos de meteoritos, estos son las Shergotty, Zagami y EET79001 (MCSWEEN, 1994). Las Shergotty y las Zagami están formadas principalmente por clinopiroxenos

irregularmente orientados hacia un borde rico en hierro (FILIBERTO *et al.*, 2018; NASCIMENTO-DIAS, 2021). Ambos tipos de meteoritos son rocas de grano relativamente fino, con piroxenos presentando composiciones similares y siendo ricas en hierro, sin embargo cabe destacar que algunos autores coinciden en que ambas difieren especialmente en el grosor, motivo de la distinción de las mismas. (NASCIMENTO- DIAS, 2021)

Los meteoritos EET79001 poseen dos litologías basálticas llamadas de “A” y “B”, ambas son similares en mineralogía, también son parecidas a las demás Shergotitas Basálticas, sin embargo, difieren en el tamaño del grano, puesto que la granulación de la litología B es más gruesa que la litología A, así la gran diferencia entre estas unidades se debe a la presencia de xenocristales de olivino, ortopiroxeno y cromita en la litología A. (MCSWEEN, 1994; NASCIMENTO- DIAS, 2021)

Según MCSWEEN,(1994), las composiciones isotópicas de Sr, Nd, y Pd en los meteoritos Shergotty y Zagami son diferentes a las de EET79001 lo que lleva a deducir que estos se formaron a partir de diferentes magmas parentales. Ya las Shergotitas Fenolíticas (Iherzolíticas) cuentan con dos tipos de meteoritos, ALH77005 (MCSWEEN *et al.*, 1979A; IKEDA, 1994) y LEW88516 (HARVEY *et al.*, 1993). Ambos meteoritos se componen principalmente de olivinas de grano medio y cromitas ubicadas dentro de grandes cristales de ortopiroxenos con maselinita, clinopiroxenos y otros minerales llenando los espacios (NASCIMENTO-DIAS, 2021; MCSWEEN, 1994). Una característica resaltante en estas es su constitución magnesianas, pues las composiciones de minerales ferromagnesianos en estas rocas ultramáficas son superiores a las Shergotitas Basálticas (MCSWEEN, 1994).

La presencia de óxido de hierro hace referencia a un estado redox relativamente alto, como en las Shergotitas Basálticas, sin embargo, a diferencia de estas últimas, las Shergotitas Fenolíticas se formaron en un ambiente plutónico (subsuperficial) y existe la posibilidad de que sean verdaderas rocas acumuladas (MCSWEEN, 1994). También los isótopos radiogénicos de algunos de estos meteoritos son consistentes con la cristalización de estas rocas en el mismo magma, lo que indicaría que en términos de

tierras raras y composición isotópica son similares a la Shergotita Basáltica EET79001, pero diferente respecto a Shergotty y Zagami. (NASCIMENTO-DIAS, 2021).

#### **4.3.2 Nakhлитas**

Las Nakhлитas son acumulaciones de calcio ricos en clinopiroxeno y piroxenos con poca cantidad de olivino (PAPIKE et al., 2009). Son tres los tipos de Nakhлитas; la Nakhla , Lafayette y Gobernador Valadares, las pequeñas cantidades de olivino presentes son ricas en hierro, estas se encuentran dispuestas en una mesostasis microcristalina, la misma consiste en pigeonita, ferroaugita, plagioclasas, feldespatos alcalinos (NASCIMENTO-DIAS, 2021).

La historia de enfriamiento de este grupo de meteoritos marcianos es consistente con un modelo de crecimiento de cristalización que ha ocurrido aún en el subsuelo, a partir de un enfriamiento alrededor de 1 a 5 años aproximadamente (NASCIMENTO-DIAS) La cristalización de las Nakhлитas probablemente sucedió en el subsuelo, iniciando con granos de piroxeno y olivino, hasta la formación de una estructura acumulada, reaccionando con los otros minerales. (MCSWEEN, 1994). Las Nakhлитas parten de diferentes magmas parentales y poseen composiciones isotópicas iniciales de Sr y Nd diferentes a las de las Shergotitas. (NAKAMURA et al., 1982A).

#### **4.3.3 Chassigny (dunito)**

Las Chassigny son dunitas compuestas por más del 90% de olivino (PAPIKE et al., 2009). Los meteoritos de esta clase tienen olivino rico en hierro, en pequeñas cantidades de pigeonita, augita, feldespato, cromita e ilmenita, la textura y abundancia de los olivinos sugieren que este meteorito es un acumulado (MCSWEEN, 1994). La historia de cristalización de Chassigny es similar a la de las Nakhлитas, sin embargo, lo que las diferencia es que en las Chassigny los elementos de tierras raras son abundantes. (NASCIMENTO-DIAS, 2021). Así mismo la relación isotópica de Sr inicial para Chassigny es idéntica a la de las Nakhлитas ( NAKAMURA et al., 1982B).

Según VÁCI Y AGEE, (2020), las edades de eyección de la mayoría de las Nakhlitas y Chassigny se agrupan alrededor de 10 Ma, además, las Nakhlitas y las Chassigny comparten elementos traza similares, así como composiciones de fosfatos volátiles, estas líneas de evidencia y su textura petrológica similar sugieren que se formaron en flujos, umbrales y diques separados como parte del mismo complejo ígneo general, cuyo reservorio de fuente magmática es distinto al de las Shergotitas.

#### **4.3.4 ALH84001 (Ortopiroxenita)**

Allen Hills 84001 es un acumulado de ortopiroxeno con una edad de 4,09 Ga, que ofrece una visión única del eón Noeico en Marte, durante el cual el agua líquida precipitó carbonato secundario (VÁCI Y AGEE, 2020). Clasificada como diogenita, el ALH84001 es una Ortopiroxenita cataclástica de grano grueso (MITTLEFEHLDT, 1994). Su composición mineralógica está formada por cromitas, plagioclasa, ortopiroxeno, apatito y pirita; así mismo análisis posteriores también identificaron olivinos y carbonatos en pequeñas cantidades (NASCIMENTO-DIAS).

Las composiciones minerales de estos meteoritos son similares a los de las Shergotitas Iherzolíticas o Nakhlitas, y el que esté presente olivino sugiere que existe un vínculo entre estos meteoritos, este podría ser un miembro único de las muestras de Marte (MITTLEFEHLDT 1994). Así también importante resaltar que aún existe controversia respecto a las edades encontradas en ciertos meteoritos, pues hasta el momento el ALH84001 es de los meteoritos marcianos con mayor antigüedad (VÁCI Y AGEE, 2020).

#### **4.3.5 Evidencias sobre su origen marciano**

La idea de que los meteoritos SNC sean rocas marcianas se basa en una serie de observaciones bien fundamentadas, en un comienzo esta se basó en sus edades

de cristalización tardía (1.3 Ga-180 Ma), así como en la dificultad de explicar la actividad ígnea de un cuerpo del tamaño de un asteroide (NASCIMENTO-DIAS, 2021).

A través de la medición isotópica del Ar que se encontraba atrapado en las inclusiones de vidrio fundido por choque en la Shergotita EET79001 fue de donde se obtuvo la evidencia categórica sobre la relación de estos meteoritos con el Planeta Rojo (BOGARD y JOHNSON, 1983). De igual manera trabajos posteriores demostraron que una variedad de componentes atrapados en esos meteoritos poseía abundancias moleculares y composiciones isotópicas que coincidían con gases presentes en la atmósfera marciana (NASCIMENTO-DIAS, 2021). Asimismo, experimentos de choque revelaron que esta implantación de gases puede suceder sin la necesidad de fusión, y un fraccionamiento elemental e isotópico de estos cuerpos (MCSWEEN, 1994).

También autores como GRIMM (1982) proponen otros argumentos a favor de este origen planetario sugiriendo que para que esto suceda se requiere de un campo de gravedad correspondiente por lo menos a un cuerpo de tamaño lunar. Aunque actualmente se reconocen otras fuentes térmicas que pueden explicar la cristalización tardía, el origen a partir de un planeta grande no se encuentra descartado, así basado en la coincidencia elemental e isotópica entre los gases atrapados y la atmósfera marciana el vínculo con el Planeta Rojo sigue siendo viable (MCSWEEN, 1994).

También observaciones en los cráteres marcianos revelaron que los flujos de lava en los volcanes Monte Olimpo y Tharsis tienen entre 1.100 y 1.600 millones de años, esto podría considerarse como un indicativo de que los SNC reconocidos provienen de estas regiones, así mismo comparaciones de estos análisis con mapas fotogeológicos de volcanes han demostrado que esas son las únicas regiones lo suficientemente jóvenes para haber dado lugar a estas rocas marcianas. (NASCIMENTO-DIAS, 2021). Según MCSWEEN, (1994), estas serían pruebas más que convincentes sobre el origen marciano de estas rocas. De esta forma, los meteoritos marcianos pueden brindar información sobre los sucesos que ocurrieron durante la formación y evolución del Planeta Rojo, así como estructurar las propiedades geológicas y atmosféricas de Marte a lo largo de su historia (PAPIKE et al., 2009).

#### 4.4 LA HISTORIA DEL AGUA EN MARTE

Las observaciones que realizaron las sondas Mariner 9 y Viking en la superficie del planeta rojo, llevaron a descifrar un Marte en cuyos inicios presentaba un ambiente húmedo y cálido y que con el tiempo pasó a ser el planeta frío y seco que es hoy. (BARLOW,2014). Datos recopilados de diversas misiones revelan que la mayor cantidad de agua en el planeta reside en el subsuelo, principalmente en forma de hielo, sin embargo, la presencia de la misma se da tanto en la atmósfera como en las casquetes polares. (BARLOW,2014).

Actualmente se cree que son dos los mecanismos responsables por la incorporación del H<sub>2</sub>O a la corteza y al interior del Planeta Rojo, uno de ellos se dio a través de grandes planetesimales ricos en volátiles que se acumularon en Marte durante la de acreción, y el otro a través del impacto de cometas y asteroides más pequeños (LUNINE *et al.*, 2003). Según BARLOW, (2014) la primera idea sería inviable si se toma en cuenta el pequeño tamaño del planeta, por lo que la hipótesis sobre la obtención de este recurso a través de impactos de cometas y asteroides pequeños a lo largo de la historia, sería la más viable.

##### 4.4.1 El origen del agua en Marte

La migración de los planetas gigantes 0,7 Ga después de la formación del Sistema Solar, es la responsable de la entrega de H<sub>2</sub>O al interior del mismo, ya que este suceso alteró a los objetos ricos en volátiles que se encuentran en el cinturón de asteroides, así Marte, al encontrarse más cerca de este, pudo haber adquirido cantidades mayores de H<sub>2</sub>O en comparación con otros cuerpos a mayores distancias; esto hace sentido al visualizar la similitud del deuterio (D) e hidrógeno (H) en condritas carbonáceas y la Tierra (BARLOW,2014).

El deuterio es el isotopo del hidrogeno con un neutrón, y la heterogeneidad de este y del H en todo el Sistema Solar sugiere que el agua proviene de las interacciones de la nebulosa solar con hielo interestelar enriquecido con deuterio, los análisis de D/H en meteoritos marcianos indican que el Planeta Rojo presenta un enriquecimiento mayor de

deuterio en comparación a la Tierra, esto se debería a la mezcla entre agua magmática y un componente atmosférico rico en tal material. (BARLOW,2014; LESHIN, 2000; LUNINE *et al.*, 2003)

La suma de las cantidades de agua desgasificadas y no desgasificadas en Marte , prevé que la cantidad de agua contenida en el planeta es equivalente a un océano global de 1000 m de profundidad, esto significaría que las colisiones de asteroides pudieron haber sido el principal medio de acceso de H<sub>2</sub>O, pues la cantidad de agua entregada por las colisiones de asteroides así como las características fluviales y glaciales de Marte podrían producir un océanos global de 600 y 2700 m de profundidad. (BARLOW,2014; LUNINE *et al.*, 2003).

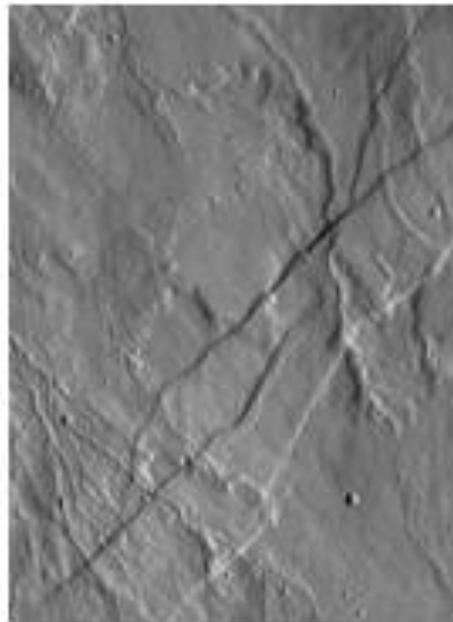
No existe evidencia de que existan grandes cantidades de agua líquida en Marte, sin embargo, la detección de canales y barrancos señalan las posibilidades de la presencia de algún fluido en su historia reciente, el agua al ser una sustancia común en el sistema solar es una de las candidatas, a pesar de que también se han propuesto otros volátiles como explicación (NAZARI-SHARABIAN,2020).

HOFFMAN, (2000) propone que estos canales pudieron haber sido originados a partir de flujos de densidad del CO<sub>2</sub> en vez de agua líquida, así el CO<sub>2</sub> superficial existiría como depósitos de clatrato, los deslizamientos de tierra y calentamiento del regolito compuesto de CO<sub>2</sub> liberan el gas y de esta manera se generaría un flujo de densidad que podría erosionar los canales de salida. Otra propuesta es la de MAX y CLIFFORD, (2001), quienes sugirieron que estos canales se habían producido a través de la disociación de clatratos de metano subterráneo, sin embargo, la evidencia demuestra que las cantidades de este gas en el regolito marciano no son suficientes para soportar esta actividad.

Los estudios de STEWART y NIMMO, (2002) apuntan a que el CO<sub>2</sub> difícilmente sería el responsable por la formación de estos canales, puesto que la naturaleza del compuesto y las condiciones atmosféricas no permitirían que tales depósitos de CO<sub>2</sub> persistan hasta estos días, sugiriendo así que estos barrancos y canales fueron formados a partir del transporte de agua.

#### 4.4.2 El agua en el Marte temprano

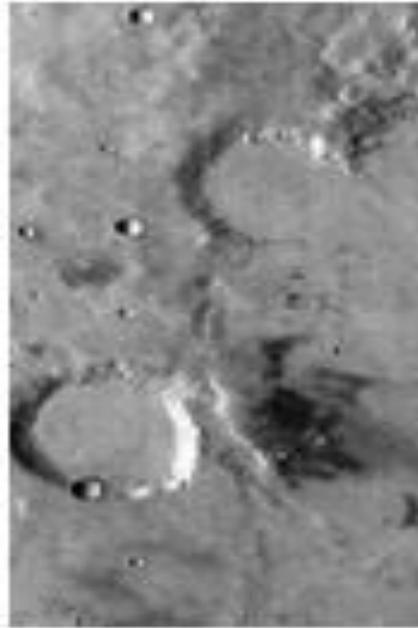
Las redes de valles se encuentran especialmente en terrenos antiguos del eón Noeico (BARLOW,2014), como se aprecia en la Figura 2. Según NAZARI-SHARABIAN, (2020), el análisis geomórfico sugiere que estas redes de valles son productos de la lluvia y el agua subterránea en conjunto. Las redes de valles y los canales de salida en Marte fueron detectados a través de misiones espaciales como Mariner 9 y Viking, las evidencias sugieren que la lluvia y el agua subterránea fueron los mecanismos que dieron forma a estas extensiones durante el Noeico (BARLOW,2014)



**Figura 2.** Las redes de valles se concentran principalmente en las antiguas superficies del Noeico, estos valles también se encuentran en los flancos de volcanes más jóvenes. Imagen de THEMIS V11912007, NASA, JPL, ASU. Fuente: Barlow, 2014.

Asimismo estas misiones revelaron la presencia de cráteres de impacto antiguos cuyo estado mostraba una mayor erosión en comparación a los cráteres más jóvenes, se puede apreciar esto en la Figura 3, tales perfiles topográficos sugieren erosión por agua líquida, es decir intensas lluvias en los inicios de la historia marciana. (BARLOW,2014). PEPIN, (1991) menciona que el agua proveniente de los asteroides se incorporó a la

litosfera de Marte y más tarde se liberó por procesos volcánicos e impactos a través de la desgasificación.



**Figura 3.** Los cráteres de impacto eón Noeico sugieren que las tasas de erosión fueron más altas al principio de la historia marciana. En la imagen se pueden apreciar que los bordes elevados de los cráteres degradados se han eliminado. Imagen de THEMIS I08951002, NASA, JPL, ASU. Fuente: Barlow, 2014.

La detección de minerales hidratados proporcionaría validez a los argumentos geológicos e isotópicos sobre el agua a principios de la historia de Marte, los filosilicatos formados a través de la interacción con el agua superficial demuestran que durante el Noeico el agua líquida era muy abundante sobre la superficie, siendo también un periodo de transición a nivel mineralógico (BIBRING *et al.*, 2006).

Eventos como el bombardeo intenso tardío y la erosión de la atmósfera por el viento solar fueron los mayores responsables del desvanecimiento de un 99% de los gases atmosféricos en el planeta, afectando así las condiciones climáticas a nivel planetario (JAKOSKY y PHILLIPS, 2001). A medida que las condiciones climáticas fueron enfriándose, y la atmósfera de Marte se fue debilitando, el agua superficial líquida fue haciéndose menos presente, así según BIBRING *et al.*, (2006),

“la historia marciana reciente se caracteriza por condiciones anhidras, excepto en las regiones locales”.

#### 4.5 CARBONATOS MARCIANOS

El estudio de los carbonatos es interesante para conocer el registro paleoclimático y los eventos biogeoquímicos en la Tierra, así mismo este podría ser útil para revelar información sobre Marte, ya que a través de estos minerales se puede inferir sobre las condiciones ambientales del Planeta Rojo en el pasado, sus composiciones isotópicas, la presión parcial del dióxido de carbono ( $p\text{CO}_2$ ), el pH y las composiciones de los fluidos, de la misma forma que el  $\text{CO}_2$  fijado en la superficie daría pistas sobre la mudanza de Marte de un planeta cálido y húmedo a uno seco y frío como lo es en la actualidad (BRIDGES, 2019).

Según EHLMANN y EDWARDS (2014), los carbonatos son un registro de diferentes tipos de actividad de fluidos en espacios de habitabilidad potencial, es decir la presencia de estos minerales se esperaría en entornos en donde hay una interacción de agua rica en  $\text{CO}_2$  con las rocas, siendo resultado de actividades diversas como meteorización, flujo del agua subterránea, impactos y actividad ígnea. Por lo mismo es importante recalcar que hasta hoy día la presencia de carbonatos se ha identificado en los meteoritos marcianos Nakhla y ALH 84001 (HICKS *et al.*, 2014)

Estos se habrían formado en un ambiente marciano con presencia de agua, minerales de silicato Fe - Mg, una atmósfera rica en  $\text{CO}_2$  y un estado de meteorización, a diferencia de los carbonatos terrestres localizados en depósitos específicos, los carbonatos marcianos han precipitado en diversos entornos fluidos alrededor de Marte, la excepción es la región de Syrtis-Terra Tyrrhena, donde carbonatos de varios metros se encuentran delimitados en cráteres (BRIDGES, 2019).

La falta de grandes depósitos de carbonatos marcianos sigue siendo una incógnita para los investigadores, según (KASTING, 1997) la respuesta podría ser la atmósfera de Marte en sus inicios, este propone que la atmósfera marciana tendría de base al metano

o al amoníaco y no al CO<sub>2</sub> como se contempla normalmente; la evidencia también sugiere que esta disminución de los depósitos de carbonato estaría relacionada a la reacción subterránea entre la roca y el agua, apartada del CO<sub>2</sub> atmosférico. (EHLMANN *et al.*, 2009) sugieren que el ambiente pudo haber sido demasiado ácido para dar origen a depósitos muy extensos, siendo afectados principalmente por la meteorización ácida durante el Hespérico.

No se conoce con exactitud cuáles fueron los procesos que llevaron a la cristalización de estos minerales, sin embargo, las posibles causas son la meteorización, la evaporación del fluido, la actividad hidrotermal y depósitos sedimentarios, así también por analogía con las Nakhlitas lo más probable es que los mismos se hayan formado en espacios con presencia de olivino, lo que implique que cuenten con alteraciones de este mineral. (BRIDGES, 2019; EHLMANN *et al.*, 2008).

Según BRIDGES, (2019), la cantidad de carbonatos en la superficie de Marte y en los meteoritos son consistentes con los modelos de una atmósfera densa en el Marte antiguo, lo que su vez podría validar que los carbonatos marcianos pueden corroborar el paso de una atmósfera espesa en CO<sub>2</sub>, un gas de efecto invernadero, a una muy delgada.

Para QUINTERO, (2020), la ausencia de una dinámica de tectónica de placas en el planeta, implicaría la falta del ciclo carbonato-silicio, por lo que todo el oxígeno y dióxido de carbono se combinarían con el silicio de las rocas, y al no existir emisiones volcánicas el CO<sub>2</sub> no sería liberado por la litosfera, lo que haría que el planeta se enfriara rápidamente.

## **4.6 TRAYECTORIA DE HABITABILIDAD MARCIANA**

### **4.6.1 Sobre la Habitabilidad de Marte**

Las misiones espaciales que han explorado Marte, han brindado información sobre las características del mismo, permitiendo así crear escenarios en torno a las posibilidades de habitabilidad. Es bien sabido que los escenarios presentes en el Marte primitivo eran similares a los de la Tierra en sus inicios, a medida que el agua se condensaba el ambiente en Marte se iba enfriando, lo que hacía que este fuese exhibiendo rasgos que podrían configurar las condiciones de habitabilidad, de esta manera se podría decir que el planeta se encuentra definido por trayectorias que representan condiciones de inhabitabilidad y posibles condiciones de habitabilidad. (COCKELL, 2020; VILLAR-ARRIBI,2018)

### **4.6.2 Marte Inhabitado**

Existen dos trayectorias que Marte podría haber tomado en todo este periodo de tiempo respecto a la inviabilidad de existencia de vida marciana en su superficie, la primera está relacionada con la completa imposibilidad de que este haya presentado todos los requisitos posibles para la existencia de vida, o por lo menos no todos al mismo tiempo, esto teniendo en cuenta las condiciones que son necesarias para la sobrevivencia de microorganismos terrestres (escalas micrón a submicron), así el planeta jamás presentaría espacios concentrados, con presencia de elementos y condiciones para que esto ocurra (COCKELL, 2020).

Así mismo según (VILLAR-ARRIBI,2018), varios estudios han explorado la posibilidad de la presencia de vida marciana durante el eón Noeico y Hespérico, sin embargo, los factores ambientales que reinaban durante el Noeico tardío y el Hespérico temprano como como la disminución de agua líquida, la acidez, o los cambios en la composición atmosférica, apuntan a que esta podría haber desaparecido o migrado al subsuelo.

A pesar de haberse encontrado nitrógeno fijado en meteoritos marcianos y en la superficie de Marte, si se hubiese dado la presencia de microorganismos pese a los

espacios desfavorables, y estos no se hubiesen reproducido a escala global, lo más probable es que el nitrógeno seguiría siendo limitante para la vida, sin embargo los estudios realizados por el rover Curiosity sugieren que el Planeta Rojo no presenta condiciones inhabitables a escala global, lo que podría llevar a vislumbrar una segunda trayectoria (COCKELL, 2020).

Esta sugiere que Marte es un planeta inhabitado, pero con presencia de ciertos espacios con condiciones de habitabilidad, pero no sugiere que en estos espacios exista o haya existido vida, insinúa que la circulación del agua antigua en Marte habría formado estos ambientes, en donde las condiciones son favorables, dando lugar a la presencia de nutrientes y gases que aportan elementos vitales (CHNOPS) (COCKELL, 2015).

Sin embargo, apunta a que durante el Hespérico estos espacios se fueron reduciendo, ocupando lugares concretos y confinados en el planeta, en ambientes subterráneos y próximos a la superficie, donde el agua se encontraba apenas temporalmente disponible, aquí podría mencionarse al agua obtenida a partir del permafrost derretido, o a las capas de agua dentro de los granos de suelo (COCKELL, 2015; TUFF et. al, 2013). Así esta trayectoria considera una historia bifásica para Marte, donde este fue habitable en algún punto de su historia, pero en la actualidad ya no lo es. (COCKELL, 2015 ; VILLAR-ARRIBI,2018).

#### **4.6.3 Marte Habitado**

El segundo escenario está relacionado a las posibilidades de que Marte contenga o haya contenido vida en su terreno, sea esta de manera endógena o exógena; la primera trayectoria haría referencia a la vida que surge a partir de química prebiótica debido a las condiciones del propio planeta, es decir una vida netamente marciana, y la segunda se trataría de una vida proveniente de otro cuerpo celeste, como podría ser la Tierra, es decir haciendo alusión a la hipótesis de panspermia (COCKELL, 2020, VILLAR-ARRIBI,2018). Este segundo punto estaría sustentado a través de contaminación cruzada pudiendo haberse desencadenado durante el periodo de bombardeo tardío, así

la tercera trayectoria haría alusión a un Marte que pudo estar habitado y puede seguir así en la actualidad (COCKELL, 2020)

Dentro de este escenario se postula la existencia de vida en el Planeta Rojo a inicios de su formación, encontrándose restringida a ciertos espacios que presentan todas las condiciones de habitabilidad, esto habría sucedido a causa del deterioro del ambiente marciano, lo que llevó a un cambio en la configuración del planeta, haciendo que las superficies se sequen y los pocos espacios habitados se aíslen impidiendo la conectividad y el flujo del agua, lo que podría ocasionar la desaparición total de cualquier ser vivo (COCKELL, 2015).

Aunque este escenario sea plausible, no excluye las posibilidades de un Marte que cuenta con entornos habitados; la presencia de metano en el planeta podría ser un indicio de este. Según (GARCÍA, 2017) el metano detectado en Marte desde el 2012 por el rover Curiosity, podría ser de origen biológico o geológico, sin embargo, los investigadores creen que proviene de una fuente reciente, ya que la radiación destruye este material fácilmente; sin embargo, no se descarta la idea de que este provenga de un Marte antiguo y siga conservado en clatratos.

Existen otras trayectorias que podrían ser exploradas como la de un Marte habitado en el cual la vida se extingue y resurge, o la que se relaciona a la vida exógena como aquella que se transfiere desde la Tierra u otro cuerpo (COCKELL, 2020); sin embargo, en este trabajo solo se trataron aquellas que están basadas en información más difundida por la comunidad científica.

## 5. CONSIDERACIONES FINALES

Marte ha sido el foco de atención de la comunidad astrobiológica desde hace años, no solo por su cercanía con la Tierra, que posibilita estudiarlo a profundidad en comparación con otros planetas de nuestro Sistema Solar, sino también porque la evidencia apunta a que este presentó condiciones muy diferentes a las actuales a lo largo de su historia, trayendo cuestionamientos sobre su similitud con la Tierra y las posibilidades de que este albergue vida o no.

El estudio sobre la geología del planeta a partir de datos recopilados de sondas y rovers en su superficie, así como el de minerales y meteoritos, han permitido obtener una visión más amplia de la evolución del planeta a través de sus eones Noeico, Hespérico y Amazónico.

En la actualidad Marte es un planeta muy frío como para albergar grandes cantidades de agua líquida en su superficie, un elemento importante para la vida como la conocemos, así esta se encuentra mayoritariamente en forma de hielo, en los polos y el permafrost, como también formando parte de la estructura de minerales. De igual manera las rocas marcianas mencionadas contienen minerales que debieron formarse en presencia de agua.

Sin embargo, a partir de las exploraciones sabemos que Marte presentó un clima bastante cálido durante el Noeico e inicios del Hespérico, en donde la presencia de filosilicatos indicaría que los mismos se habían formado en fuentes hidrotermales, haciendo sentido con la actividad volcánica predominante en ese periodo, a su vez relacionado a la presencia de tectónica de placas.

Así mismo la presencia de carbonatos detectados en los meteoritos y la superficie de Marte indicaría que estos puntos son válidos y la existencia de agua líquida en el pasado fue indispensable. Estos minerales también explicarían la presencia de cantidades significativas de CO<sub>2</sub> en el planeta, pues la decreciente actividad volcánica durante el Amazónico no permitiría que, a lo largo de los años, este gas se reponga totalmente en la atmósfera, concentrándose así en los carbonatos. Lo que, a su vez, con

la interacción del viento solar, revelarían parte del por qué Marte perdió significativamente su atmósfera pasando de un mundo húmedo y cálido a uno frío y hostil.

En este trabajo se presentaron en forma de trayectorias algunas propuestas que exploraban la habitabilidad de Marte. En las dos primeras trayectorias se hace alusión a la imposibilidad de vida marciana en la superficie. La primera trata la falta de condiciones y componentes necesarios para la vida, mientras que la segunda considera la presencia abundante de este tipo de espacios, con la diferencia que nunca fueron ocupados, o si lo fueron, estos seres se extinguieron por las condiciones severas y la falta de conectividad entre estos. Así ambas trayectorias consideran un Marte mayormente inhabitado, pero con condiciones habitables en algún punto de su historia.

Ya un segundo escenario explora la visión de un Marte habitado en algún momento, aquí la primera trayectoria indica que la vida marciana surge a partir de química prebiótica y consigue reproducirse en los espacios que cuentan con todas las condiciones, sin embargo, con el tiempo ésta desaparece. La segunda trayectoria explora un Marte cuya vida puede ser exógena, sin embargo, este punto no fue abordado con mayor profundidad pues aún no hay suficientes datos que sustenten esta trayectoria.

A partir de las informaciones recopiladas en este trabajo, se puede concluir que Marte pudo haber presentado entornos favorables para la vida en algún punto de su historia, esto considerando la abundancia de agua líquida, la presencia de actividad volcánica y la de carbonatos. De igual manera no se puede afirmar que el planeta cuente o haya contado con alguna forma de vida conocida, sin embargo, a pesar de estas visiones, las mismas no son descartadas por completo, puesto que las investigaciones en torno a la habitabilidad marciana evidencian trayectorias que hasta hoy día no han sido exploradas completamente.

Marte al ser el planeta hermano de la Tierra, con una historia bastante similar, continúa atrayendo la atención de la humanidad, siendo vista como la siguiente frontera a superar; de esta manera la astrobiología formará parte de ese recorrido, en la continua búsqueda por responder la incógnita sobre el origen de la vida y su paso por las estrellas.

## REFERENCIAS

- ASPERS, P.; CORTE, U. What is qualitative in qualitative research. **Qualitative sociology.**, v. 42, n. 2, p. 139 - 160, 2019.
- ALBI, T. A. Marte: una ventana al pasado. **Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid**, n. 1, p. 369 - 398, 2021.
- BANFIELD, D. *et al.* Thermal tides and stationary waves on Mars as revealed by Mars Global Surveyor thermal emission spectrometer. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 105, n. E4, p. 9521-9537, 2000.
- BARLOW, N. History of water on Mars, In: **Mars: An introduction to its interior, surface and atmosphere**. Cambridge Planetary Science, n. 8. 2014. p. 189-202.
- BIBRING, J.P. *et al.* Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations. **Science**, v. 307, n. 5715, p. 1576-1581, 2005.
- BIBRING, JP *et al.* Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. **Science**, v. 312, n. 5772, p. 400-404, 2006.
- BRIDGES, J. C.; HICKS, Leon J.; TREIMAN, Allan H. Carbonates on mars. In: **Volatiles in the Martian crust**. Elsevier, 2019. p. 89-118.
- BOGARD, D. Do; JOHNSON, P. Martian gases in an Antarctic meteorite?. **Science**, v. 221, n. 4611, p. 651-654, 1983.
- CARR, M H.; HEAD III, J. W. Geologic history of Mars. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 294, n. 3-4, p. 185-203, 2010.
- CRADDOCK, R. A.; MAXWELL, T. A. The early Martian environment: clues from the cratered highlands and the precambrian Earth. In: **Early Mars: How Warm and How Wet?**, v. 265, 1993. p 744-749.
- CRADDOCK, R. A.; HOWARD, A. D. The case for rainfall on a warm, wet early Mars. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 107, n. E11, p. 21-1-21-36, 2002.
- CHASSEFIÈRE, E.; LEBLANC, F. Mars atmospheric escape and evolution; interaction with the solar wind. **Planetary and Space Science**, v. 52, n. 11, p. 1039-1058, 2004.

- COCKELL, C. S. Astrobiology of Mars. In: **Astrobiology: Understanding Life in the Universe**. 1<sup>a</sup> edición. Chichester, UK. 2015. Wiley-Blackwell. p. 107-338.
- COCKELL, Charles S. Astrobiology of Mars. In: **Astrobiology: Understanding Life in the Universe**. 2<sup>a</sup> edición. Gasglow, UK. 2020. John Wiley & Sons. p. 427 – 442.
- EHLMANN, B. L.; EDWARDS, C. S. Mineralogy of the Martian surface. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 42, p. 291-315, 2014.
- EHLMANN, B. L. *et al.* Identification of hydrated silicate minerals on Mars using MRO-CRISM: Geologic context near Nili Fossae and implications for aqueous alteration. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 114, n. E2, 2009.
- EHLMANN, B. L. *et al.* Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars. **Science**, v. 322, n. 5909, p. 1828-1832, 2008.
- FILIBERTO, J.; GROSS, J., UDRY, A.; TRELA, J.; WITTMANN, A.; CANNON, K. M.; FERRÉ, E.C . Shergottite Northwest Africa 6963: A Pyroxene-Cumulate Martian Gabbro. **Journal of Geophysical Research**. v. 123, n. 7, p. 1823-1841, 2018.
- GARCÍA, V. P. Marte: objetivo astrobiológico. **Revista de Astrobiología**, Centro de Astrobiología (INTA-CSIC), n. 4, p. 36-44. 2017.
- GHATAN, G. J.; HEAD, J. W.; WILSON, Lionel. Mangala Valles, Mars: assessment of early stages of flooding and downstream flood evolution. **Earth, Moon, and Planets**, v. 96, n. 1, p. 1-57, 2005.
- GRIMM, R. E.; MCSWEEN JR, H. Y. Numerical simulation of crystal fractionation in shergottite meteorites. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. S01, p. A385-A392, 1982.
- GOLDSPIEL, J.M., SQUYRES, S.W. Ancient aqueous sedimentation on Mars. *Icarus* n 89, p. 392-410, 1991.
- GOLOMBEK, M. P. *et al.* Erosion rates at the Mars Exploration Rover landing sites and long-term climate change on Mars. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. E12, 2006.
- HARVEY, R. P. *et al.* Petrography, mineral chemistry, and petrogenesis of Antarctic shergottite LEW88516. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 57, n. 19, p. 4769-4783, 1993.

- HICKS, L. J.; BRIDGES, J. C.; GURMAN, S. J. Ferric saponite and serpentine in the nakhlite martian meteorites. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 136, p. 194-210, 2014.
- HOFFMAN, N. White Mars: A new model for Mars' surface and atmosphere based on CO<sub>2</sub>. **Icarus**, v. 146, n. 2, p. 326-342, 2000.
- IKEDA, Y. Petrography and petrology of the ALH-77005 shergottite. **Antarctic Meteorite Research**, v. 7, p. 9, 1994.
- JAKOSKY, B. M.; PHILLIPS, R. J. Mars' volatile and climate history. **Nature**, v. 412, n. 237-244, 2001.
- KASTING, J. F. Warming early earth and Mars. **Science**, v. 276, n. 5316, p. 1213-1213, 1997.
- LESHIN, L. A. Insights into martian water reservoirs from analyses of martian meteorite QUE94201. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 14, p. 2017-2020, 2000.
- LIDEFER. Teoría de la Acreción. 2003. Disponible en: <  
<https://www.lifeder.com/teoria-acrecion-planetaria/>>. Accedido en: 04/11/ 2021.
- LUNINE, J. I. *et al.* The origin of water on Mars. **Icarus**, v. 165, n. 1, p. 1-8, 2003.
- FRÍAS, J. M. Fundamentos conceptuales y didácticos: El origen de la Tierra. **Enseñanza de las Ciencias de la Tierra**, v. 21, n. 2, p. 139-145, 2013.
- MAX, M. D.; CLIFFORD, S. M. Initiation of Martian outflow channels: Related to the dissociation of gas hydrate?. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 9, p. 1787-1790, 2001.
- MCSWEEN JR, H. Y. What we have learned about Mars from SNC meteorites. **Meteoritics**, v. 29, n. 6, p. 757-779, 1994.
- MCSWEEN JR, H. Y.; TAYLOR, L. A.; STOLPER, E. M. Allan Hills 77005: A new meteorite type found in Antarctica. **Science**, v. 204, n. 4398, p. 1201-1203, 1979a.
- MITTFELDEHLDT, D. W. ALH84001, a cumulate orthopyroxenite member of the Martian meteorite clan. **Meteoritics**, v. 29, n. 2, p. 214-221, 1994.

- MILTON, D.J. & DECARLI, P.S. Makelynite: formation by explosive shock. **Science** 140, p. 670 -671, 1963.
- MINAYO, M. Los conceptos estructurantes de la investigación cualitativa. **Salud colectiva**, v. 6, p. 251-261, 2010
- MALDONADO, Y. **Geologiaweb**. Disponible en:<<https://geologiaweb.com/>>. Accedido en: 04/11/ 2021.
- NASA. **The «Canali» and the First Martians**. 2003. Disponible en:<[https://www.nasa.gov/audience/forstudents/postsecondary/features/F\\_Canali\\_and\\_First\\_Martians.html](https://www.nasa.gov/audience/forstudents/postsecondary/features/F_Canali_and_First_Martians.html)>. Accedido en: 23/10/ 2021.
- NAKAMURA, N. *et al.* Origin and evolution of the Nakhla meteorite inferred from the Sm-Nd and U-Pb systematics and REE, Ba, Sr, Rb and K abundances. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 46, n. 9, p. 1555-1573, 1982a.
- NAKAMURA, N.; KOMI, H.; KAGAMI, H. Rb-Sr isotopic and REE abundances in the Chassigny meteorite. **Meteoritics**, v. 17, p. 257, 1982b.
- NAZARI-SHARABIAN, M., *et al.* Water on Mars—a literature review. **Galaxies**, v. 8, n 2, p. 40. 2020.
- NIMMO, F.; TANAKA, K. Early crustal evolution of Mars. **Annu. Rev. Earth Planet. Sci.**, v. 33, p. 133-161, 2005.
- NASCIMENTO-DIAS, Bruno Leonardo. Meteoritos marcianos realmente vieram de Marte?. **Geosciences**, v. 40, n. 03, p. 771-780, 2021.
- PAPIKE *et al.* Silicate mineralogy of martian meteorites, **Geochimica et Cosmochimica Acta**, n 73, p. 7443-7485, 2009.
- PEPIN, R. O. On the origin and early evolution of terrestrial planet atmospheres and meteoritic volatiles. **Icarus**, v. 92, n. 1, p. 2-79, 1991.
- POFFO, D. A. Determinación de la Zona de Habitabilidad. Características estelares y planetarias. p 1-81. 2012.
- QUINTERO, D. La terraformacion de otros mundos: una breve exposición con especial énfasis en los aspectos climáticos. **Delegación Territorial de AEMET**. p. 289-299, 2020.

- SAGAN, C. **Cosmos**. Barcelona, España. 1982. Planeta. p. 384
- SCHAEFER, M.W. Geochemical evolution of the northern plains of Mars: early hydrosphere, carbonate development, and present morphology. **Journal of Geophysical Research**. v. 14, n 95, p, 291-14,300, 1990.
- STEWART, S. T.; NIMMO, F.. Surface runoff features on Mars: Testing the carbon dioxide formation hypothesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. E9, p. 7-1-7-12, 2002.
- SCOTT, D. H ; DOHM, J, M.; RICE JR, J. W. Map of Mars showing channels and possible paleolake basins. **US Geological Survey Report**, p. 2461, 1995.
- SQUYRES, S. W.; KASTING, J.F. Early Mars: How warm and how wet?. **Science**, v. 265, n. 5173, p. 744-749, 1994.
- SPALLETTI, L.A. Geología de Marte, nuestro inquietante vecino. **Museo**. n.28. p. 69-80, 2016.
- TUFF, J.; WADE, J.; WOOD, B. J. Volcanism on Mars controlled by early oxidation of the upper mantle. **Nature**. v. 498, n. 7454, p. 342-345, 2013.
- VILLAR-ARRIBI, C. Perspectivas actuales en Astrobiología: una revisión bibliográfica acerca de la detección y caracterización de bioseñales explanetarias. El papel de Marte. 2018.
- VÁCI, Z.; AGEE, C. Constraints on martian chronology from meteorites. **Geosciences**, v. 10, n. 11, p. 455, 2020.

## GLOSARIO

**Astrobiología:** Es una rama de las ciencias biológicas y la astronomía, que estudia el origen, evolución y distribución de vida en el universo.

**Astrogeología:** Es el estudio a distintas escalas de planetas, satélites, cometas, asteroides y partículas de distintas dimensiones y génesis.

**Allan Hills 84001:** Es un fragmento de un meteorito marciano que fue encontrado en Allan Hills en la Antártida en el año 1984.

**Apatito:** Mineral que pertenece al grupo de los fosfatos.

**Augita:** Mineral que pertenece al grupo de los piroxenos, componente principal en rocas ígneas.

**Acreción planetaria:** Es la formación de cuerpos celestes mediante la condensación de pequeñas partículas de polvo, atraídas por la fuerza de gravedad.

**Basalto:** Roca ígnea que se halla en los volcanes, de color negro oscuro, de composición química máfica o básica.

**Cromita:** Es un mineral perteneciente al grupo de los óxidos y su fórmula es  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ .

**Clinopiroxenos:** Son piroxenos de sistema cristalino monoclinico, son cálcicos o sódicos.

**Feldespato:** Grupo de minerales que forman rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

**Filosilicatos:** Subclase de los silicatos.

**Habitabilidad:** Espacio que presenta las condiciones necesarias para poder ser habitado.

**Ilmenita:** Mineral de titanio, con fórmula  $\text{TiO}_3\text{Fe}$ , producto de la segregación magmática.

**Olivino:** Minerales formadores de roca, pertenecen a los silicatos, son el principal componente del manto superior de la Tierra.

**Ortopiroxeno:** Es un mineral máfico del grupo de piroxenos cristalizados.

**Piroxeno:** Grupo de minerales más significativos y abundantes de silicatos ferromagnesianos, que se forman en rocas ígneas y metamórficas a partir de condiciones de alta presión y temperatura.

**Plagioclasas:** Es un mineral del grupo de los silicatos.

**Pigeonita:** Es un mineral perteneciente al grupo de los piroxenos, corresponde a los inosilicatos.

**Pirita:** Es un mineral del grupo de los sulfuros, se forma en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.