

O ESTUDO DA MINERALOGIA NA EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA SUPERFÍCIE DE MARTE

THE STUDY OF MINERALOGY IN THE GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE SURFACE OF MARS

BRUNO LEONARDO NASCIMENTO-DIAS¹, FÁBIO BRAZ MACHADO²

1 Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Museu Nacional. Quinta da Boa Vista - São Cristóvão, Rio de Janeiro - RJ, 20940-040. E-mail: bruno.astrobio@gmail.com

2 Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Geologia. Av. Cel. Francisco H. dos Santos, s/n - Jardim das Américas, Curitiba - PR, 81270-460. E-mail: fabio.machado@ufpr.br

Resumo - O objetivo principal deste artigo é desenvolver uma revisão sobre a mineralogia e os aspectos gerais da evolução da superfície marciana. Esta é uma pesquisa exploratória que foi conduzida através de uma metodologia de levantamento documental utilizando artigos e livros, os quais possuíam conteúdos sobre a composição mineralógica de Marte e sua evolução geológica. Os resultados apontam para quantidades significativas de minerais de composição primária (olivina, clinopiroxênios, ortopiroxênios, plagioclásios e minerais de sílica, além de vidros) e a existência de minerais de alteração secundária (óxidos de ferro, sulfetos, minerais hidratados e carbonatos). É importante destacar que olhando às oportunidades futuras de missão, talvez ainda mais minerais possam ser encontrados em Marte. Assim, conclui-se que apesar dos avanços científicos e tecnológicos estejam aumentando, de forma a propiciar maiores entendimentos sobre a história evolutiva da geologia de Marte, ainda existem diversas lacunas entre o que se conhece e o desconhecido que precisam ser preenchidas por meio de pesquisas e missões, tais como a Perseverance, Mangalyaan e a Tianwen-1.

Palavras-chave: Geologia de Marte; Mineralogia Marciana; Solo marciano

Abstract - The main objective of this article is to develop a review on the mineralogy and general aspects of the evolution of the Martian surface. This is an exploratory research that was conducted through a documentary survey methodology using articles and books, which had contents about the mineralogical composition of Mars and its geological evolution. The results point to significant amounts of primary composition minerals (olivine, clinopyroxenes, orthopyroxenes, plagioclases and silica minerals, in addition to glasses) and the existence of secondary alteration minerals (iron oxides, sulfides, hydrated minerals and carbonates). It is important to note that looking at future mission opportunities, perhaps even more minerals could be found on Mars. Thus, it is concluded that despite scientific and technological advances increasing, in order to provide greater understanding of the evolutionary history of the geology of Mars, there are still several gaps between what is known and the unknown that need to be filled through research. and missions such as Perseverance, Mangalyaan and Tianwen-1.

Keywords: Geology of Mars; Martian mineralogy; martian soil

Citação: NASCIMENTO-DIAS, B. L., MACHADO, F. B. O estudo da mineralogia na evolução geológica da superfície de Marte. Boletim Paranaense de Geociências, v. 80, n.1, p. 70-87. 2022.

1. INTRODUÇÃO

Embora boa parte das informações do passado tenham se perdido devido ao intemperismo planetário, de acordo com Ehlmann e Edwards (2014), um registro da evolução de Marte mantém-se preservado nas rochas e sedimentos expostos em sua superfície. Dessa forma, este trabalho tem o intuito de fornecer uma perspectiva sintetizada sobre o que se conhece da mineralogia proveniente do ambiente marciano atualmente e sua evolução ao longo do tempo.

Nas duas últimas décadas houve um enorme avanço científico, que proporcionou o aumento no nível de detalhamento de informações acessíveis sobre o famoso planeta vermelho e sua história. Este processo se deve, fundamentalmente, a três fatores: (a) um esforço focado para adquirir uma composição de dados que possam complementar os dados fotográficos morfológicos fornecidos anteriormente pelas missões Mariner e Vikings (Head e Carr, 2010); (b) observações da superfície em resolução espacial e espectral cada vez mais alta, fornecidas pelas capacidades cada vez maiores dos instrumentos orbitais (Bibring et al., 2006); e (c) exploração in situ e medições em pequena escala por rovers e landers (Chevriera e Mathe, 2007).

Inúmeras missões, ao longo da história da humanidade, foram enviadas à Marte para desvendar os mistérios do planeta. Na

2. A SUPERFÍCIE MARCIANA

A busca por informações sobre a composição da superfície de Marte, em geral, pode ser obtida de duas formas distintas e complementares. A primeira conforme McSween e Treiman (2018), Nyquist et al. (2001) e Nascimento-Dias (2021), são os estudos petrológicos, mineralógicos, químicos e isotópicos desenvolvidos através de meteoritos marcianos, também conhecidos pela sigla SNC (Shergotitos, Nakhilites, Chassignitos).

Outra alternativa, segundo Ehlmann e Edwards (2014), é por meio de instrumentos

verdade, até hoje estão sendo enviadas diversas missões espaciais que retornam grandes quantidades de dados e estão transformando nossa compreensão de como é o ambiente marciano e como chegou ao seu estado atual.

De acordo com Sharaf et al. (2020), desde 2000, foram enviados só pelos EUA 9 missões para estudar o planeta Marte, sendo a mais recente a sonda Perseverance, além de missões provenientes da China (Tianwen-1) (Wan et al., 2020) e da Índia (Mangalyaan) (Kumar, 2014).

Todavia, embora esteja aumentando significativamente a quantidade de informações sobre a história evolutiva da geologia de Marte, ainda existem diversas lacunas entre o que se conhece e o desconhecido.

O campo da geociência, principalmente, no Brasil ainda necessita difundir mais conhecimentos desta temática para que mais estudantes possam se motivar a desenvolver estudos nesse campo tão rico e ainda pouco explorado no país.

Assim, este artigo de revisão espera contribuir com conteúdo relacionado ao tema de mineralogia do solo do ambiente marciano, propiciando a absorção de conteúdos que, por muitos, só seriam encontrados parte deles na literatura em inglês, sendo este fato uma barreira muitas vezes impeditiva para boa parte dos discentes brasileiros.

espectroscópicos infravermelhos que mapeiam a mineralogia na superfície e por intermédio de orbitadores, complementadas por medições químicas de rovers ou landers e seus equipamentos de cromatografia, espectroscopia Mössbauer, espectroscopia Raman e técnicas de raios X; como a Difração de Raios X e a Fluorescência de Raios X, além de muitas outras. Exemplos de missões que já orbitaram Marte são; Mariner 9, Viking Orbiters, Phobos 2, Mars Global Surveyor, Mars Odyssey, Mars Express. Em contrapartida, as que pousaram na superfície marciana são Viking Landers 1 e 2, Mars

Pathfinder e Mars Exploration Rovers MER, Spirit and Opportunity (Chevriera e Mathe, 2007).

Segundo Ehlmann e Edwards (2014), a superfície de Marte, majoritariamente em sua parte ígnea composta por rochas de afinidade basáltica incluindo material piroclástico (Tanaka et al. 2014), pode ser agrupada em alguns dois tipos de terrenos ígneos bastante distintos entre si.

O primeiro terreno, conforme Rogers e Christensen (2007), são as terras altas do sul, que majoritariamente são constituídas por rochas de afinidade basáltica ricas em plagioclásios e clinopiroxênios. O segundo terreno, menos acidentado que a parte sul e

quase sem crateras de acordo com Poulet et al. (2009), é formado por planícies do norte que exibem rochas basálticas com uma quantidade menor de abundância de piroxênio e uma taxa maior de minerais que possuem alto teor de sílica. Esse cenário anteriormente mencionado alinhado às condições distintas existentes em Marte, em que o sul marciano é uma região extremamente craterada, enquanto a região do norte possui uma estrutura plana e pouco acidentada, segundo Cockell (2020), compõem um panorama geológico conhecido como dicotomia crustal marciana (Fig. 1).

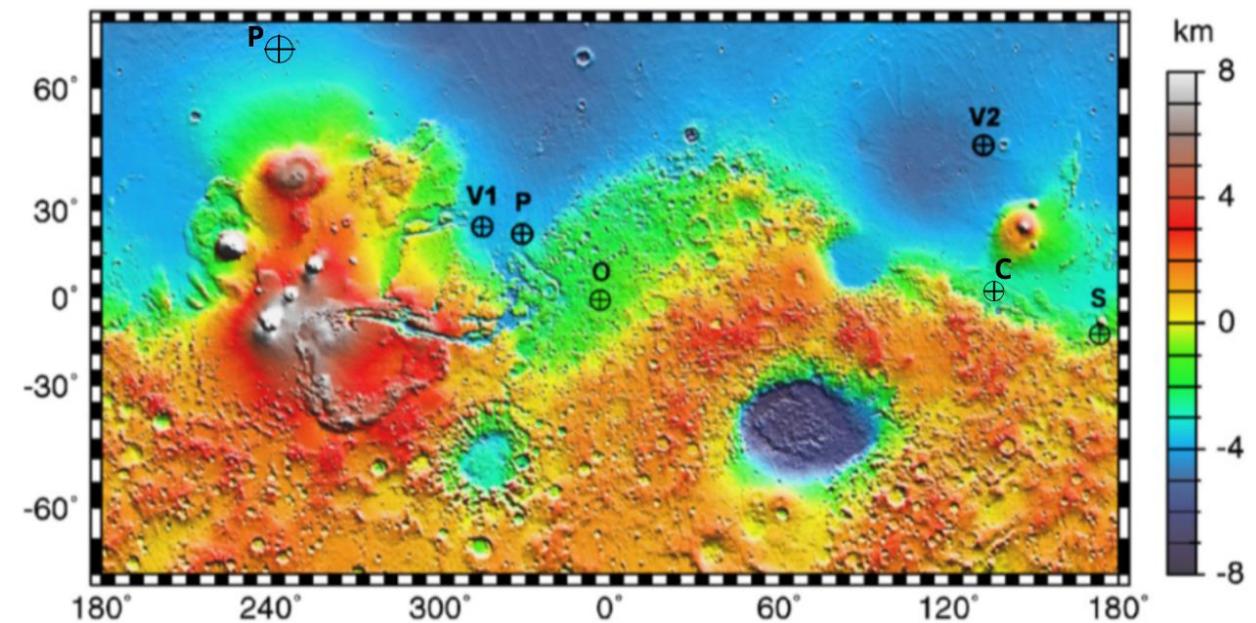


Figura 1. Imagem topográfica em cores falsas para distinguir altura das regiões de superfície marciana, gerada com MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) a bordo do Mars Global Surveyor. Legenda: Os símbolos na imagem representam os locais de pouso das missões P: Phoenix, V1: Viking 1, V2: Viking 2, P: Mars Pathfinder, O: MER Opportunity, S: MER Spirit, C: Curiosity. Cockell (2020).

Com base nas informações coletadas por intermédio dessas metodologias, foram constatadas características mineralógicas notáveis de Marte, também conhecido popularmente como planeta vermelho. Sua tonalidade laranja-avermelhada, distinta da superfície, se dá por conta da camada de regolito marciano que é composta majoritariamente de óxidos férricos e oxihidróxidos (Singer 1982).

De acordo com Chevriera e Mathe (2007), classicamente, o regolito de um planeta é definido como a camada superficial superior, composta de blocos rochosos erráticos não consolidados de vários tamanhos e de partículas de poeira provenientes de bombardeio meteorítico. Ainda conforme Chevriera e Mathe (2007), no caso de uma superfície planetária de Marte, o regolito não é apenas a camada superior de poeira que

cobre a superfície - incluindo verniz de rocha (resultado da presença de SiO₂ dissolvido de outros minerais segundo Perry & Sepnton, 2007) - mas também os horizontes subjacentes, desde rochas parcialmente alteradas, mas ainda dos chamados horizontes “saprolíticos”, até a rocha-mãe fresca. Portanto, a caracterização do regolito marciano envolve não apenas os materiais primários, mas também os minerais produzidos pelos vários processos que ocorrem na superfície (Farquhar et al., 2000; Fanale e Cannon, 1971).

A poeira avermelhada de grãos finos (<5 µm), conforme Ehlmann e Edwards (2014), é onipresente na superfície de Marte, e vale salientar que esta poeira obscurece grandes porções do planeta, trazendo inúmeros problemas de sondagens por sensoriamento remoto. Os primeiros dados espectroscópicos e de rovers mostraram grandes províncias vulcânicas compostas de basalto e uma superfície que foi hidratada (OH, H₂O), com possíveis traços de outros minerais de alteração (Banin et al. 1992, Soderblom 1992).

Nos últimos quinze anos, houve um grande aumento na quantidade de dados sobre Marte, em que muitos minerais foram descobertos, mapeados em associação com unidades geológicas específicas e usados para compreender os processos geológicos e a história evolutiva do ambiente marciano (Fig. 2). Assim, pontos cruciais entre as histórias de

Marte e da Terra tornaram-se mais claros segundo Ehlmann e Edwards (2014).

Já para Ehlmann e Edwards (2014), ao contrário da Terra, com sua dicotomia composicional impulsionada por placas tectônicas entre a crosta continental enriquecida com sílica e a crosta oceânica enriquecida com ferro e magnésio, a composição de Marte é mais homogênea e mais semelhante à crosta oceânica terrestre. Além disso, outro fato que chama bastante atenção é que a crosta primitiva foi datada, ainda conforme Ehlmann e Edwards (2014), como sendo do primeiro bilhão de anos da história de Marte (~50% da superfície) preserva um rico registro químico de múltiplos e diversos ambientes aquosos variando no espaço e no tempo ao longo da superfície.

Cabe ressaltar que, embora os meteoritos façam parte da contribuição sobre o entendimento da mineralogia presente em Marte, particularmente, neste trabalho será desenvolvida questões sobre o que se conhece sobre a mineralogia da superfície marciana, integrando os principais resultados de missões orbitais e que pousaram nas últimas 2 décadas. Dessa forma, as próximas seções seguirão com uma descrição da composição primária de Marte e, em seguida, serão abordados os ambientes de alteração secundária indicados pelo registro mineralógico.

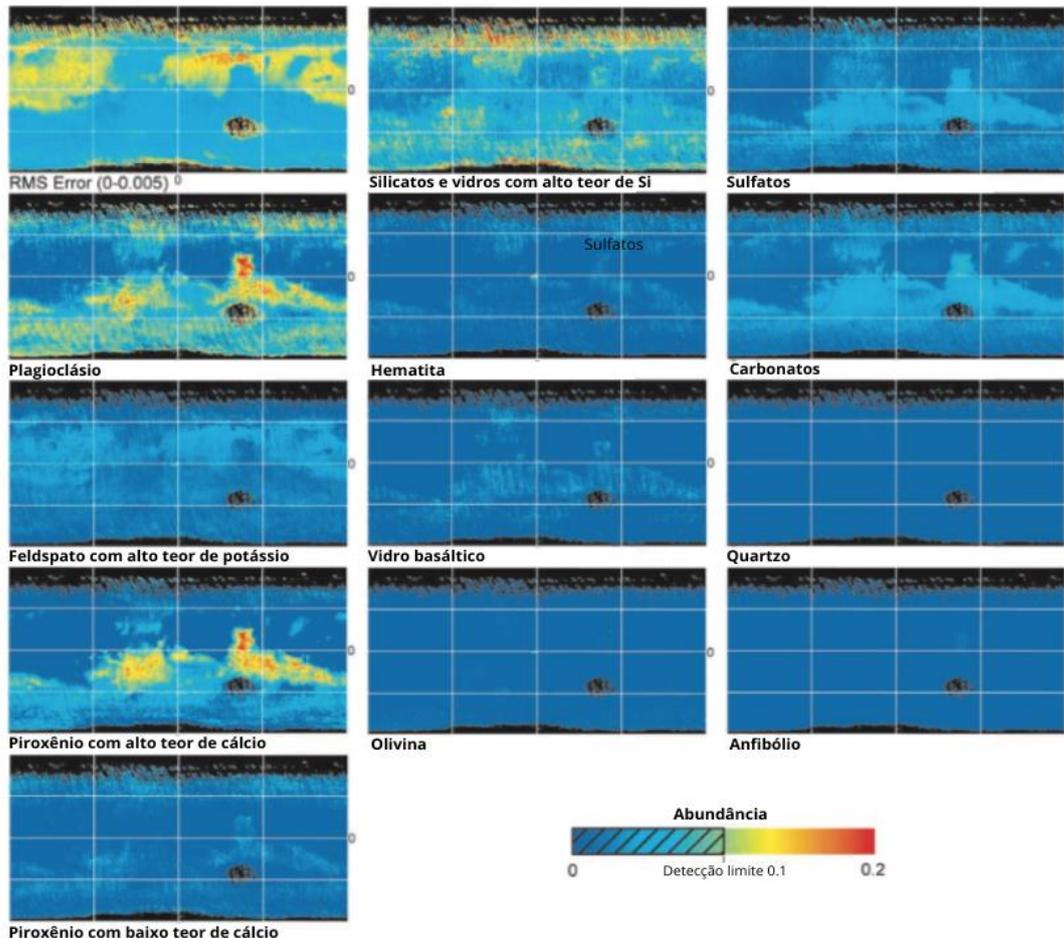


Figura 2. Mapas de concentração de minerais globais de um pixel por grau. Legenda: A escala varia de azul (concentração = 0) a vermelho (concentração $\geq 0,2$), exceto a imagem de erro RMS, que é de 0 a 0,005 em emissividade de azul a vermelho, respectivamente. As cores que estão abaixo do limite de detecção são tracejadas na barra de escala. Adaptada de Bandfield (2002).

2. COMPOSIÇÃO PRIMÁRIA DA CROSTA DE MARTE

Os silicatos são os minerais mais abundantes na superfície dos planetas telúricos (Teixeira et al. 2001). Em Marte, a paragênese de silicato primária é de composição basáltica a andesítica, conforme indicado por observações orbitais por Mars Global Surveyor MGS e Mars Odyssey (Hamilton et al., 2003; Wyatt e McSween, 2002; Wyatt e McSween, 2003), em caracterizações in situ realizadas pelas missões Vikings e Mars Pathfinder (Larsen et al., 2000; McSween et al., 1999), bem como estudos sobre os meteoritos SNC (McSween, 2002).

Com base nessas observações, constatou-se que a superfície marciana, em geral, possui quantidades significativas de olivina, clinopiroxênios, ortopiroxênios, feldspatos (cálcio-sódicos e potássicos) e minerais de

sílica, além de vidro vulcânico e zeólitas (Carr e Head, 2010; Bibring et al., 2006, Bandfield et al., 2004; Tanaka 1986). Os grupos de olivina, piroxênio e plagioclásio foram identificados e mapeados por diversos instrumentos como, Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer ou MGS-TES (Bandfield, 2002), por Mars Odyssey Thermal Emission Imaging System ou THEMIS (Christensen et al., 2001; Hamilton e Christensen, 2005) e também por Mars Express Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité OMEGA (Bibring et al., 2005)

2.1. Olivinas

As olivinas, conforme Koeppen & Hamilton (2008), foram mapeadas na superfície marciana e sua abundância varia, podendo chegar em algumas regiões a taxas de até

cerca de 40% (Fig. 3). De acordo com Ody et al. (2013), as composições do grupo de minerais que as compõem variam de ricas em Fe a Mg ($\sim\text{Fo}_{40} - \text{Fo}_{90}$). Na cratera Gusev, local de descida da sonda Spirit (Fig. 1), as rochas examinadas nas planícies basálticas

contêm 20-30% de olivina de composição intermediária em fenocristais (McSween et al. 2006) e o afloramento Comanche em Columbia Hills, local de pouso do rover Curiosity (Fig. 1), contém 40% de olivina (Morris et al., 2010).

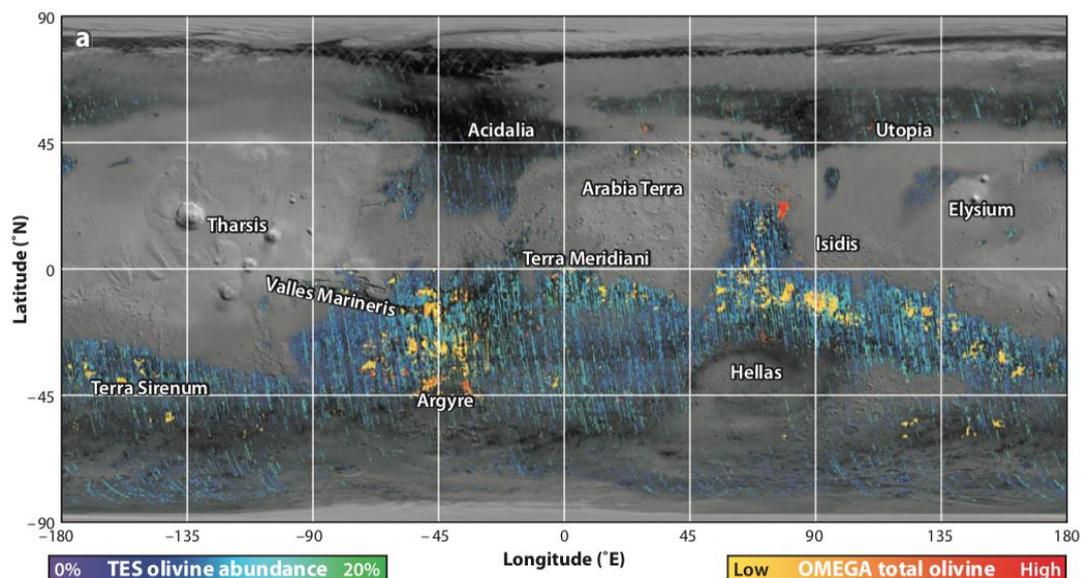


Figura 3. Distribuição global de olivina de TES (Koeppen & Hamilton 2008) e OMEGA (Ody et al. 2013). Legenda: Os tons de roxo à verde são a abundância total de olivina para todas as composições derivadas dos resultados de deconvolução obtidas por TES. Os tons de amarelo ao vermelho são índices espectrais de olivina, correlacionados com a força da banda de absorção de $1 \mu\text{m}$ e derivados de dados obtidos por OMEGA para locais onde a olivina foi detectada.

De acordo com Ehlmann e Edwards (2014), uma característica marcante na distribuição global de unidades ricas em olivina é o enriquecimento circunferencial em bacias de impacto antigas. A oeste da bacia de impacto de Isidis, dentro e ao redor de Nili Fossae, segundo Ehlmann e Edwards (2014), é uma região com rocha sólida enriquecida com olivina ($> 20\%$). Vale ressaltar que nesta região são encontradas esses materiais em rochas do eon Nochiano, ou seja, com idades entre 4.1 até 3.7 G.a., cobrindo a crosta mais velha (Hoefen et al. 2003; Hamilton & Christensen 2005;) e em graben tectônico (Mustard et al. 2007, Ehlmann et al., 2009). Unidades enriquecidas com olivina também já foram encontradas, segundo Tornabene et al. (2008), ao sul da bacia do Isidis, no Monte Libya.

Foi proposto que esses depósitos circunferenciais que configura pequenas bacias sedimentares ativas ou inativas, que

podem ser confundidos em sua origem com crateras de impacto usando técnicas de sensoriamento remoto, representam intrusões ígneas (Hoefen et al. 2003); cumulatos de fonte superior que assentaram do derretimento por impacto (Mustard et al. 2007, Ehlmann et al., 2009); ou conforme Hamilton & Christensen 2005, poderiam ser provenientes de fluido de lavas do tipo komatiíticas. Esses depósitos circunferenciais da bacia regional do Isidis são especialmente bem estudados, mas não são únicos. Materiais enriquecidos com olivina também são encontrados circunferencialmente a Argyre e Hellas (Koeppen e Hamilton 2008, Buczkowski et al. 2010, Ody et al. 2013). Essas rochas ricas em olivinas com alto teor de Mg em Marte ($\sim\text{Fo}_{90}$) podem indicar, segundo Koeppen e Hamilton (2008), o vazamento de material da crosta inferior ou do manto superior por esses grandes impactos iniciais de formação de bacia.

Em outro lugar, observável em Valles Marineris (Fig. 3), lavas contendo olivina são encontradas no fundo de crateras de impacto jovens e expostas nas paredes erodidas dos canais (Rogers et al. 2005, Edwards et al. 2009, Rogers et al. 2009, Rogers e Ferguson 2011). Essas olivinas são relativamente mais enriquecidas com Fe ($\sim Fo_{50} - Fo_{70}$) e consideradas provenientes de eons Nochiano (4,1 G.a - 3,7 G.a) e Hesperiano (entre 3,7 a 3,0 G.a.).

2.2. Piroxênios

Dois tipos de piroxênio foram confirmados espectralmente na crosta sul de Marte a partir do mapeamento feito por MGS-TES. Foi detectada a presença de piroxênio de baixo teor de cálcio (ortopiroxênio), principalmente, em terrenos que possuem alto valor de albedo - é a relação da energia refletida sobre a incidente, ou seja, a capacidade das superfícies refletirem a radiação incidente sobre elas -, tais como em Terra Meridiana (Fig. 3), sendo essas regiões vinculadas ao eon Nochiano (Bibring et al., 2006; Mustard et al., 2005). Vale destacar que a extensão espacial dos depósitos desses materiais podem atingir várias centenas de quilômetros quadrados.

Além disso, piroxênios de alto teor de cálcio (clinopiroxênio) também foram detectados na crosta sul de Marte em terrenos do eon Hesperiano, sendo estes em áreas de baixo albedo (Bibring et al., 2006). De acordo com Mustard et al. (2005), diversas regiões enriquecidas em clinopiroxênio estão relacionadas a rajadas de vento, sugerindo que o material da superfície é ou era móvel sendo depositado em dunas de areia gerando bimodalidade textural.

Para Bibring et al. (2005), os piroxênios de alto teor de cálcio são associados aos

Esta exposição pode representar lavas primitivas que fluíram na superfície marciana por > 1.000 km que, conforme Edwards et al. (2008), poderiam sinalizar o início do vulcanismo na província de Tharsis. Segundo Ehlmann e Edwards (2014), erupções pontuadas de fontes de manto minimamente fracionadas criaram grandes fluxos ricos em olivina durante o primeiro bilhão de anos da história de Marte em todo o planeta, mas devem ter sido raros ou ausentes em períodos posteriores.

aflorescimentos nas terras altas do sul. Vale salientar que alguns dos cânions dos Valles Marineris, segundo Ehlmann e Edwards (2014) e Do Nascimento-Dias et al. (2019), já foram identificadas camadas de material rico em piroxênio com esta assinatura basáltica, por exemplo, em Juventae Chasma e em Coprates Chasma. Em contrapartida, a crosta norte de Marte (o terreno tipo II identificado pelos dados MGS-TES) de acordo com Mustard et al. (2005), não apresenta nenhum sinal claro nos espectros que indiquem presença de qualquer membro de minerais do grupo de piroxênio.

Conforme Bibring et al., 2006, em geral, os dois tipos de piroxênios coexistem no ambiente da superfície marciana. Os dados oriundos do TES (Fig. 4) dessas zonas foram interpretados como resultantes da presença de basalto andesítico (Bandfield et al., 2000; Hamilton et al., 2001). Alternativamente, basaltos alterados enriquecidos em filossilicatos secundários (Wyatt e McSween, 2002; Wyatt et al., 2004) também poderiam explicar as observações, mesmo que pareça que os filossilicatos por si só não sejam suficientes para descrever os espectros do TES (Michalski et al., 2005).

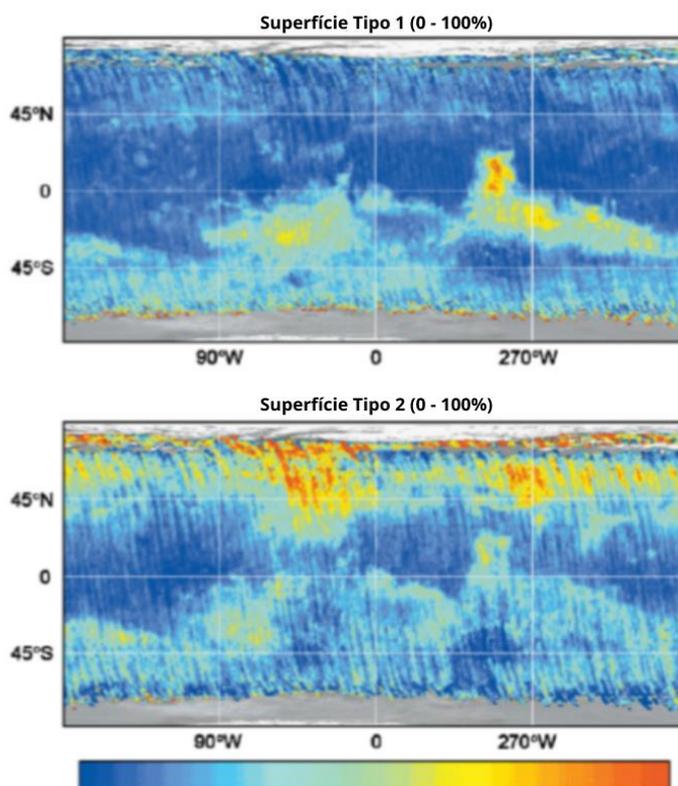


Figura 4. Concentrações de área global dos tipos de superfície (I e II). Legenda: Concentrações de área global dos tipos de superfície I e II. Os intervalos entre parênteses fornecem a unidade mais baixa (azul) à unidade mais alta (vermelho) na barra de escala.

Por fim, como forma tentar explicar a coexistência entre 2 tipos de piroxênios também são expostas ideias de presença de quartzo na região. No entanto, segundo McLennan (2003), estas hipóteses foram indeferidas após serem feitas análises de modelagem geoquímica e na mobilidade dos elementos durante o intemperismo da olivina primária e destes piroxênios. Nesses modelos de composição mineralógica, de acordo Knoll et al. (2005), são mostrados que os afloramentos de Meridiani Planum (Fig. 5) devem conter cerca de 20% em peso de sílica amorfa, sendo um cenário pouco plausível para Marte.

As zeólitas também são mencionadas como possíveis reservatórios de água que poderiam produzir na superfície de Marte reações para gerar essa presença de diferentes minerais de piroxênios (Bish et al., 2003; Fialips et al., 2005; Tokano e Bish, 2005). No entanto, nenhuma observação confirmou sua presença na superfície de Marte (Ehlmann e Edwards, 2014).

2.3. Plagioclásios e feldspatos potássicos

Os feldspatos foram separados em duas categorias: feldspato com alto teor de potássio e os plagioclásios. Até o presente momento, segundo Mustard et al. (2005), nenhum feldspato com alto teor de potássio está presente no limite de detecção espectralmente MGS-TES e tão pouco acima dele. Em contrapartida, ainda conforme Mustard et al. (2005), o plagioclásio está presente em concentrações bastante substanciais em regiões de baixo albedo. As regiões que possuem altitudes elevadas e baixo albedo têm concentrações entre 0,05 e 0,15 de plagioclásio. Em regiões equatoriais de baixo albedo foram detectadas concentrações de 0,10–0,20 de plagioclásio, principalmente, na região Syrtis Major (Fig. 6). Por fim, é importante ressaltar que onde há concentrações significativas de plagioclásios, as composições médias são intermediárias à cálcicas.

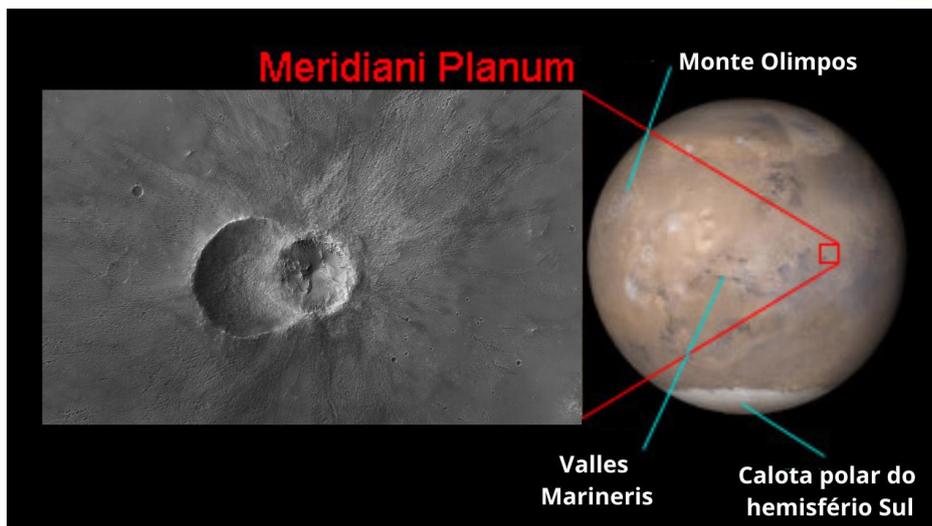


Figura 5. Composição de imagens apresentando a região da Meridiani Planum em Marte.

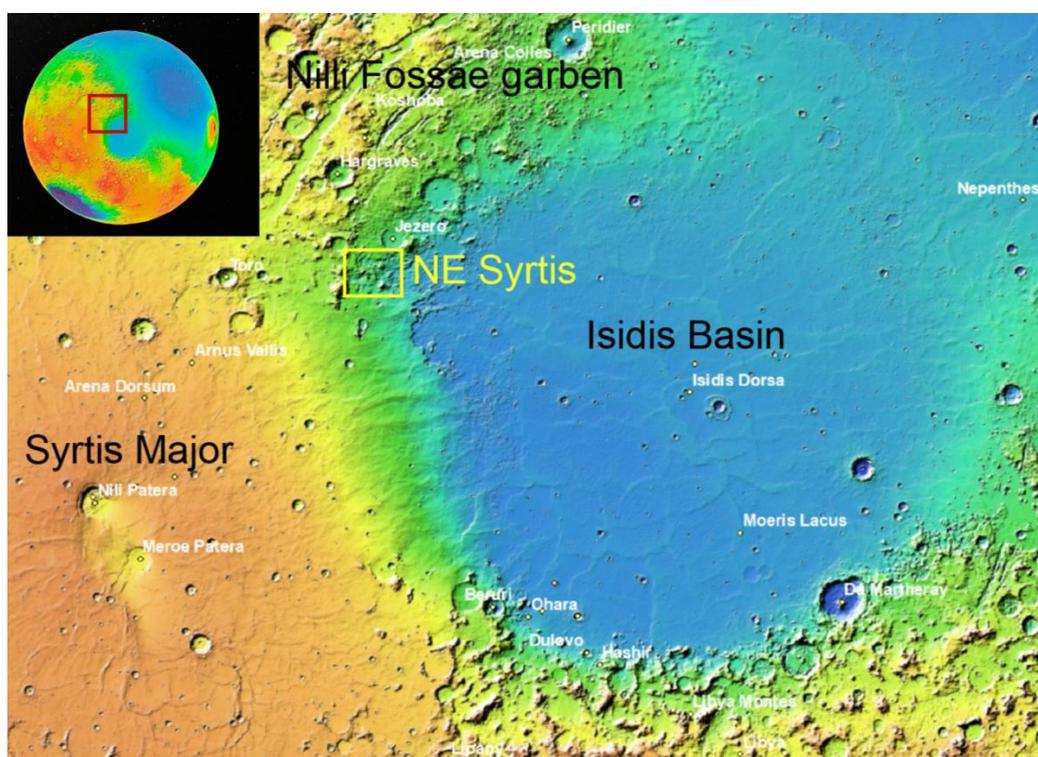


Figura 6. Composição representativas da região de Syrtis Major em Marte.

3. AMBIENTES MARCIANOS DE ALTERAÇÃO SECUNDÁRIA

Sobrepostos à composição primária de Marte, segundo Ehlmann e Edwards, (2014), estão os efeitos dos processos secundários: intemperismo físico (responsável pela erosão da superfície marciana e também por causar oxidação anidra) e o intemperismo químico (responsável por gerar alteração da composição estrutural dos minerais, em geral, por interação com água líquida) (Fig. 7). Ainda de acordo com Ehlmann e Edwards (2014), em particular, a diversidade de minerais secundários descobertos na última década,

aponta para tipos específicos de ambientes de alteração que geram grande interesse para áreas como Astrobiologia e Geociências.

De acordo com Chevriera e Mathe (2007), os filossilicatos que normalmente resultam da alteração dos silicatos primários na presença de água, estão presentes em Marte. Presume-se que os minerais de argila, serpentina e talco estejam em Marte desde as primeiras análises químicas inorgânicas feitas durante a missão Vikings (Toulmin et al., 1977). Além disso, por intermédio das últimas missões

Opportunity, Spirit e Curiosity foram detectadas uma gama de novos minerais na superfície de Marte, tais como óxidos de

ferro, sulfetos, minerais hidratados e carbonatos.

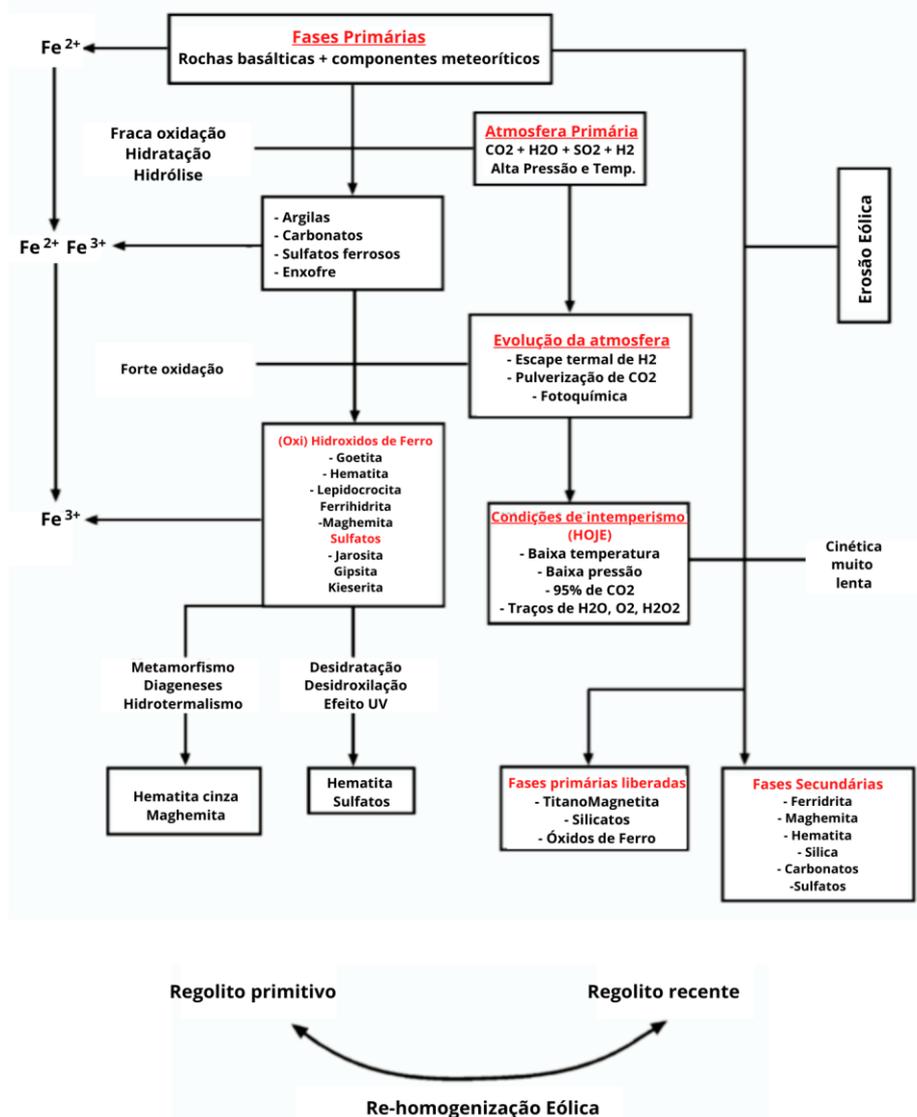


Figura 7. Um possível esquema de síntese das várias vias mineralógicas dependendo das condições de superfície (atmosfera primária vs. atual) e processos descritos. Apenas as fases principais, descritas na literatura, estão representadas.

3.1. Óxidos de Ferro

Esse grupo de minerais chama bastante atenção, pois estiveram entre as primeiras propostas de constituintes da superfície de Marte, sendo atrelado a eles a tonalidade de coloração vermelha do planeta (Schwertmann, 1985; Tardy e Nahon, 1985). De fato, o regolito marciano contém cerca de 20% em peso de Fe^{3+} , principalmente, sob a forma de óxidos de ferro (Bell III et al., 2000; Foley et al., 2003; Rieder et al., 1997). Os

vários orbitadores marcianos que realizaram medições espectroscópicas no infravermelho, no visível e no UV próximo também forneceram evidências de vários hidróxidos de ferro na superfície de Marte (Bell III et al., 1990; Morris et al., 2000). Dentre os minerais pertencentes ao grupo de óxido de ferro destacam-se: hematita, magnetita e a maghemita. Além disso, existem os minerais hidróxidos de ferro tais como: goethita, lepidocrocita, ferrihidrita e a feroxyhyta, mas

todos estão serão abordados na seção de minerais hidratados.

Hematita

A hematita é considerado, segundo Chevriera e Mathe (2007), como o principal óxido de ferro a ser responsável pela cor da superfície de Marte (mesmo que vários outros hidróxidos de ferro (oxi) também possam dar a Marte sua cor "vermelha". No entanto, este mineral chama atenção por conta de outra característica, tais como sua ocorrência por processos hidrotérmicos (Catling e Moore, 2003; Wade et al., 1999), por palagonitização (alteração aquosa a baixa temperatura) de cinzas vulcânicas ou vidro (Bishop et al., 1998; Morris et al., 1993) e por meteorização meteórica em ambientes tropicais lateríticos (Nahon, 1991; Schwertmann, 1985; Tardy e Nahon, 1985) além de ser encontrado em ambientes polares (Bender Koch et al., 1995). Cabe ressaltar que a hematita, segundo Gooding (1978), é o único óxido de ferro termodinamicamente estável nas atuais condições marcianas e constitui o produto final de muitas transformações químicas e térmicas de outros óxidos e hidróxidos (Barron e Torrent, 2002; Morris et al., 1998). Portanto, de acordo com Chevriera e Mathe (2007), é provável que a hematita esteja presente em Marte com variações cristalográficas, dependendo de sua origem.

Dentre as diversas formas cristal químicas da hematita, uma em especial "apelidado de blueberries" (Fig. 8) foi observada recentemente pela missão MER Opportunity em Meridiani Planum, posteriormente, sendo identificadas por Mossbauer (Christensen et al., 2004b).

Este tipo de hematita, segundo Ehlmann e Edwards (2014), estaria associada a formações sedimentares do tipo evaporítico em Meridiani Planum. A interpretação desses depósitos de hematita levanta várias hipóteses, tais como:

- A. Precipitações em ambientes sedimentares de águas ricas em ferro (Baldrige e Calvin, 2004; Christensen et al., 2001);
- B. Solventes orgânicos (Tang et al., 2006);
- C. Alteração acompanhada por dissolução / reprecipitação (Catling, 2004; Hynek et al., 2002), eventualmente favorecida por hidrotermalismo (Catling e Moore, 2003) ou diagênese (Ormo et al., 2004);
- D. Alteração deuterítica de lava no final de sua cristalização (Christensen et al., 2000; Minitti et al., 2004);
- E. Sepultamento induzindo uma transformação térmica de precursores pré-existentes (Glotch et al., 2003).



Figura 8. Imagem de hematita em Marte obtida através da Pancam. Legenda: As hematitas estão espalhadas pela figura na forma de seixo. Chevriera e Mathe (2007).

3.2. Magnetita

A magnetita Fe_3O_4 , segundo Mathé et al. (1999) e Chevriera e Mathe (2007), faz parte dos óxido de ferro pertencentes ao grupo espinélio, em que sua fórmula estrutural é composta por M_3O_4 de forma que M é um metal (Fe, Ti, Al, Cr ou Mg). A titanomagnetita é, geralmente, o principal transportador de magnetização natural em rochas primárias, tal como na Terra, Mathé et al., (1999), menciona que o mesmo deve ocorrer em Marte. Juntamente com a hematita, Hargraves et al., (1977) e Madsen et al. (2003), sugerem que este mineral seja a principal fase magnética do regolito marciano. Assim, resultados recentes parecem favorecer a presença de magnetita mais ou menos oxidada em titanomagnetita em solos marcianos de forma semelhante às rochas e solos da Terra (Chevrier et al., 2006).

3.2. Maghemita

Antigamente, achava-se que esta seria a segunda fase magnética presente no regolito marciano (Hargraves et al., 1979, 1977), porém sabe-se que a maghemita é, na verdade, o principal constituinte magnético juntamente com a hematita (Hviid et al.,

1997; Madsen et al., 1999, Barrn e Torrent, 2002). Ao contrário dos titanomagnetitos, a maghemita não contém titânio e, portanto, é sempre fortemente magnética (Chevriera e Mathe, 2007). Além disso, os dados espectroscópicos sugerem a presença de maghemita no regolito (Bell III et al., 2000; Morris et al., 2000), e em vernizes de rocha no local de pouso da Pathfinder (McSween et al., 1999).

Maghemite é uma fase metaestável em vários modelos de intemperismo. Consequentemente, sua presença resulta de suas baixas taxas de transformação, e é provavelmente devido ao intemperismo no clima atual frio e seco de Marte (Chevrier et al., 2006). Segundo Oyama et al. (1978) e Sherman et al. (1981), as propriedades oxidantes e catalíticas da maghemita podem ser importantes à área de Astrobiologia, pois poderiam explicar alguns dos resultados oriundos dos experimentos biológicos realizados na missão Vikings.

3.3. Sulfatos e Sulfetos

O enxofre é um elemento chave na compreensão da evolução da superfície de Marte, segundo Cockell (2020), devido ao enriquecimento geral da superfície em

comparação com a Terra. Ainda de acordo com Cockell (2020), altas concentrações de enxofre foram frequentemente detectadas por diversas missões. No solo marciano de Utopia Planitia (47.64° N, 134.29° E), por meio da missão Vikings chegou-se a detectar até 10% em peso de SO₃ (Clark et al., 1976; Toulmin III et al., 1976), através da missão Pathfinder até 8% em peso SO₃ (Bell III et al., 2000; Economou, 2001; Foley et al., 2003; Rieder et al., 1997) e, finalmente, por MER Spirit and Opportunity (Gellert et al., 2004, 2006; Rieder et al., 2004; Wang et al., 2006) também foi possível identificar esse composto em diversas regiões.

Em geral, as altas concentrações de enxofre devem-se à presença de sulfatos resultantes da alteração do leito basáltico (Chevriera e Mathe, 2007).

Além disso, estes materiais também foram identificados em afloramentos sedimentares de Meridiani Planum pela mini-TES a bordo do MER Opportunity, que detectou concentrações de até 25% em peso SO₃ (Rieder et al., 2004; Squyres et al., 2004).

Vários sulfatos foram então identificados, incluindo gipsita (Langevin et al., 2005), kieserita (MgSO₄.H₂O) e sulfatos polihidratados (Gendrin et al., 2005). Os terrenos em camadas contendo os sulfatos representam depósitos importantes, com dezenas de km de largura e espessura de alguns km (Bibring et al., 2005; Gendrin et al., 2005).

Importante destacar que sulfatos hidratados são encontrados associados com a hematita em regiões de Valles Marineris (Bibring et al., 2007, Roach et al., 2010). Além disso, também foi detectada a presença de jarosita em Meridiani (Klingelhöfer et al., 2004, Tosca et al., 2005) e alunita nas bacias do Terra Sirenum (Swayze et al. 2008, Wray et al. 2011); que segundo e Lichtenberg et al. (2010), indicaria que as águas nessa região eram ácidas (pH <4) em alguns locais.

Assim, existem várias hipóteses para a formação desses depósitos: desde a deposição evaporítica em corpos d'água (Gendrin et al., 2005), seguindo o esquema

desenvolvido para evaporitos marcianos (Catling, 1999) até intemperismo in situ de depósitos de sulfetos ou materiais basálticos - "tipo cinzas" - na presença de águas enriquecidas em ácido sulfúrico (Bibring et al., 2005), seguindo a hipótese de Burns (1993).

3.4. Minerais hidratados - hidróxidos de ferro

Uma descoberta significativa da última década, segundo Poulet et al. (2005), foi a detecção de ocorrência globalmente generalizada de minerais hidratados em Marte. Ainda segundo Poulet et al. (2005), isto pode ser indícios de condições climáticas específicas durante o eon Noachiano, em que ao que parece, teria água líquida mais abundante do que o necessário para a formação de sulfatos nas condições, previstas anteriormente, em estudos relacionados ao materiais provenientes do eon Hesperiano.

Os minerais hidratados foram originalmente detectados em alguns grandes afloramentos nas terras altas do sul (Bibring et al., 2005, Poulet et al., 2005), e os dados orbitais de alta resolução subsequentes mostraram exposições adicionais que são pequenas, mas quando concatenadas são numerosas - algo na casa dos milhares - e encontra-se formidavelmente em regiões do eon Nochiano (Mustard et al., 2008, Murchie et al., 2009).

3.5. Ferrihydrite

A ferridrita (5Fe₂O₃.9H₂O) é um ferro "quase amorfo" (oxi) hidróxido que, segundo Schwertmann, (1985), seria o precursor usual das fases cristalinas de diversos outros minerais, principalmente hematita (Schwertmann e Murad, 1983) e a goetita (Torrent et al., 1982), dependendo da atividade da água, pH e temperatura. Alternativamente, a alteração nas condições anteriores podem, conforme Bishop et al. (2000), favorecer a conversão rápida de ferrihidrita em fases cristalinas, como hematita e / ou goethita. Este mineral foi detectado pelas missões Vikings (Evans e Adams, 1980) e Pathfinder (McSween et al., 1999).

3.6. Goethita

A goethita (α -FeOOH), depois da hematita, foi o segundo mineral identificado na superfície de Marte por suas propriedades espectroscópicas (Morris et al., 2000). A hematita e a goethita também foram identificadas nos meteoritos marcianos, mostrando traços de alteração pré-terrestre (Bridges et al., 2001). Embora possa parecer improvável a formação de goethita em ambiente marciano, segundo Burns (1988) e Chevrier et al. (2004), seu processo de formação é capaz de ser gerado em uma atmosfera primitiva de Marte rica em H₂O e CO₂. Assim, uma cinética de transformação muito lenta poderia explicar a presença de goethita, de modo este seria uma fase metaestável de longa escala (Burns e Fisher, 1993).

3.7. Lepidocrocita

Lepidocrocita (γ -FeO) foi proposto com base em alguns espectros TES adquiridos pela Mars Pathfinder (Morris et al., 2000). Embora relativamente frequente na Terra, a formação de lepidocrocita requer a oxidação de Fe²⁺ em solução e, conseqüentemente, um ambiente relativamente redutor, bem como um pH próximo da neutralidade (Banin et al., 1993; Burns, 1993; Schwertmann, 1985). A formação de lepidocrocita e goethita é favorecida pela alteração aquosa em rochas basálticas (Posey-Dowty et al., 1986), enquanto rochas mais ácidas favorecem hematita e goethita. Portanto, a lepidocrocita e a hematita são altamente incompatíveis nos sistemas de solo marciano (Schwertmann, 1985).

Alguns estudos consideram a lepidocrocita um provável precursor para a formação de maghemita e hematita (Banin et al., 1993; Burns, 1993; Morris et al., 1998; Posey-Dowty et al., 1986). Conseqüentemente, embora sua presença no regolito marciano permaneça incerta, a lepidocrocita pode aparecer como uma fase secundária associada a outros hidróxidos de ferro (oxi).

3.8. Feroxyhyta

Feroxyhyta δ -Fe₃O(OH) é provavelmente o mais "exótico" ferro (oxi) - hidróxido proposto para Marte. Este mineral é de fato extremamente raro na superfície da Terra, pois conforme Chevrier e Mathe (2007), é necessário ter ambientes com condições extremas para darem origem a este tipo de material. A presença de feroxyhyta em Marte foi sugerida, segundo Burns (1980), com base em sua cor vermelha que é muito semelhante à da superfície marciana, além de suas propriedades espectroscópicas de acordo com Sherman et al. (1981).

Todavia, um ponto que se destaca nos aspectos gerais da feroxyhyta, segundo Sherman et al. (1981), são as propriedades oxidantes e catalíticas que este material possui e que de acordo com Burns (1980), poderiam explicar os resultados dos experimentos biológicos da missão Vikings e, em particular, a oxidação dos nutrientes marcados com ¹⁴C em CO₂. No entanto, é importante destacar que existem argumentos contra a presença de feroxyhyta em Marte. Segundo Oyama et al. (1978) e Yen et al. (2000), o ambiente marciano é inconsistente com a formação de feroxyhyta fortemente magnética.

3.9. Carbonatos

Os carbonatos são fases muito importantes para desenvolver modelos de evolução da superfície de Marte, pois de acordo com Cockell (2020), representam as principais testemunhas da interação primitiva entre a atmosfera, a hidrosfera e a litosfera. Essa hipótese se fundamenta na intensa atividade vulcânica, observada em Marte através de Tharsis, e que certamente envolveu - e liberou - grandes quantidades de dióxido de carbono entre outros gases na atmosfera (Phillips et al., 2001). Essa densa cobertura turva teria induzido um intenso efeito estufa que, segundo Forget e Pierrehumbert (1997), permitiria que água líquida pudesse existir na superfície por longos períodos entre os eons Nochiano e Hesperiano.

Portanto, seria lógico, de acordo com Chevrier e Mathe (2007), esperar teores de carbonato relativamente altos na superfície marciana. No entanto, os carbonatos

constituem apenas um traço na superfície hoje (Fig. 7). O MER Spirit parece ter detectado traços de carbonatos no regolito da Cratera Gusev (Christensen et al., 2004).

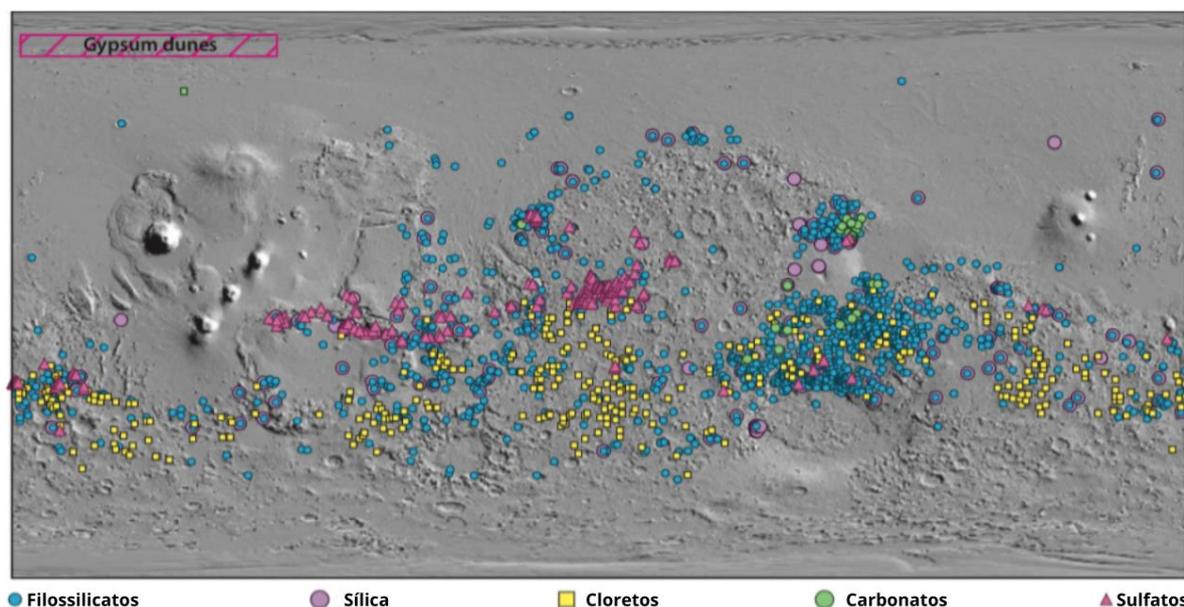


Figura 7. Distribuição global das principais classes de minerais aquosos em Marte. Adaptada de Ehlmann et al. 2011

Segundo Ehlmann et al. (2008), também foram detectados Carbonatos de Mg/Fe associados às grandes unidades enriquecidas com olivina a oeste da bacia do Isidis em regiões do eon Nochiano, tal como em algumas crateras de impacto, de acordo com Niles et al. (2013), espalhadas ao longo das terras altas do sul. O MER Spirit também identificou carbonatos de Mg / Fe / Ca, segundo Morris et al. (2010), em afloramento de Columbia Hills Comanche, associados a rochas contendo olivina e sílica.

Dessa forma, segundo Ehlmann e Edwards (2014), a concatenação entre esses dados indicam alteração aquosa neutra a alcalina nesses locais, em que a dissolução da olivina, ao que tudo indica, teria promovido a formação de carbonatos particularmente ricos em Mg / Fe. Os carbonatos de Mg também foram relatados em poeira marciana (Bandfield et al., 2003) e carbonatos de Ca na região em que a Phoenix pousou (Boynton et al., 2009).

À luz da ampla alteração aquosa próxima à superfície no passado e da composição rica em CO₂ da atmosfera de Marte, pode-se

esperar, segundo Ehlmann e Edwards (2014), que os depósitos de carbonato dominem o registro.

No entanto, a presença de rochas carbonáticas parece ser geograficamente restrita a uma região de Marte.

Dentre as várias hipóteses para explicar a falta de carbonatos abundantes em Marte, de acordo com Bullock e Moore (2007), a principal alternativa considerada como hipótese para explicar esse cenário de escassez de carbonatos na superfície marciana seria a interação com águas ácidas, as quais teriam inibido a formação ou preservação de carbonatos em Marte.

Vale salientar ainda, que em casos de haver processos de sequência evaporítica, os carbonatos são as primeiras fases a precipitar devido à sua baixa solubilidade. Dessa maneira, outra alternativa, segundo Catling (1999), é de que os carbonatos poderiam, talvez, ser ocultados por outros sais mais solúveis que cristalizam acima, como sulfatos ou halogenetos.

Alternativamente, uma atmosfera primária rica em CO₂ e H₂O poderia, segundo Ehlmann

e Edwards (2014), gerar a formação de carbonato de forma semelhante ao que ocorre na Terra. Também existe a possibilidade, segundo Fairen et al. (2004), que a formação de soluções muito ácidas devido ao SO₂ vulcânico poderia ter impedido a sua cristalização ou conforme Moore

(2004), compostos de sulfuretos durante processos geológicos se dissolverem em carbonatos pré-existentes. Por fim, a lixiviação ácida pode ter arrastado os carbonatos para as profundezas do regolito, liberando-os apenas em regiões de permafrost.

4. REFERÊNCIAS

- BALDRIDGE, Alice M. & CALVIN, Wendy M. Hydration state of the Martian coarse-grained hematite exposures: Implications for their origin and evolution. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 109, n. E4, 2004.
- BANDFIELD, J.L. et al. A global view of martian surface compositions from MGS-TES. *Science*, v. 287, p. 1626–1630, 2000.
- BANIN, A. et al. Surface chemistry and mineralogy. *Mars*, p. 594-625, 2000.
- BARRN, V., & TORRENT, J. Evidence for a simple pathway to maghemite in Earth and Mars soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 66(15), p. 2801-2806, 2002.
- KOCH, C. B. Iron-containing products of basalt in a cold-dry climate. *Chemical Geology*, v. 122, p. 109–119, 1995.
- BELL III, J.F. et al. Mineralogic and compositional properties of Martian soil and dust: results from Mars Pathfinder. *J. Geophysical Research*, v. 105 (E1), p. 1721–1755, 2000.
- BELL III, J.F. et al. 1990. Observational evidence of crystalline iron oxides on Mars. *J. Geophysical Research*, v. 95 (B9), p. 14447–14461, 1990.
- BERMAN, D.C. & HARTMANN, W.K. Recent fluvial, volcanic, and tectonic activity on the Cerberus Plains of Mars. *Icarus*, v. 159, p. 1–17, 2002. doi:10.1006/icar.2002.692
- BIBRING, J. P. et al. Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations. *Science*, v. 307(5715), p. 1576-1581, 2005.
- BIBRING, J.-P. et al. Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. *Science*, v. 312, p. 400–404, 2006.
- BISH, D. L. et al. Stability of hydrous minerals on the martian surface. *Icarus*, v. 164(1), p. 96-103, 2003.
- BISHOP, J.L. et al. Alteration processes in volcanic soils and identification of exobiologically important weathering products on Mars using remote sensing. *J. Geophysical Research*, v. 103 (E13), p. 31457–31476, 1998.
- BRIDGES, J.C. et al. Alteration assemblages in Martian meteorites: implications for near-surface processes. *Space Science Reviews*, v. 96, p. 365–392, 2001.
- BOYNTON W. V. et al. Evidence for calcium carbonate at the Mars Phoenix landing site. *Science*, v. 325, p. 61–64, 2009.
- BUCZKOWSKI, D. L. et al. (2010). Investigation of an Argyre basin ring structure using Mars reconnaissance orbiter/compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 115(E12), 2010.
- BULLOCK M. A. & MOORE J. M. Atmospheric conditions on early Mars and the missing layered carbonates. *Geophysical Research Letters*, v. 34:L19201, 2007.
- BURNS, R.G. Rates and mechanisms of chemical weathering of ferromagnesian silicate minerals on Mars. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, p. 4555–4574, 1993.
- BURNS, R.G. Sulfide mineralization: its role in chemical weathering of Mars (abstract). *Lunar and Planetary Institute, Workshop on Mars Sample Return Science*, 1988, p. 48–50.
- BURNS, R.G. Does feroxyhyte occur on the surface of Mars? *Nature*, v. 285, p. 647, 1980
- BURNS, R.G. & FISHER, D.S. Rates of oxidative weathering on the surface of Mars. *J. Geophys. Res.*, v. 98 (E2), p. 3365–3372, 1993.
- CARR, M. H., & HEAD III, J. W. Geologic history of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 294(3-4), p. 185-203, 2010.
- CATLING, D.C. On Earth, as it is on Mars? *Nature*, v. 429 (6993), p. 707–708, 2004.
- CATLING, D.C. & MOORE, J.M. The nature of coarse-grained crystalline hematite and its implications for the early environment of Mars. *Icarus*, v. 165, p. 277–300, 2003.
- CATLING, D.C. A chemical model for evaporites on early Mars: possible sedimentary tracers of the early climate and implications for exploration. *J. Geophys. Res.*, v. 104 (E7), p. 16453–16469, 1999.
- CHEVRIER, V. & MATHÉ, P. E. Mineralogy and evolution of the surface of Mars: a review. *Planetary and Space Science*, v. 55(3), p. 289-314, 2007.
- CLARK, B.C. et al. Inorganic analyses of Martian surface samples at the Viking landing sites. *Science*, v. 194 (4271), p. 1283–1288, 1976.
- COCKELL, C. S. *Astrobiology: understanding life in the universe*. John Wiley & Sons, 2020.
- CHRISTENSEN, P.R. et al. Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer experiment: investigation description and surface science results. *J. Geophys. Res.*, v. 106, p. 23823–23871, 2001.
- DO NASCIMENTO-DIAS, B. L. et al. Analysing the astrobiological aspects through the comparison of pyroxenes detected in meteorites and Martian environments. *International Journal of Astrobiology*, v. 18(6), p. 547-551, 2019.
- EDWARDS, C. S. et al. Global distribution of bedrock exposures on Mars using THEMIS high-resolution thermal inertia. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 114(E11), 2009.
- 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(E2), 2009.
- EHLMANN B. L. et al. Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars. *Science*, v. 322, p. 1828–1832, 2008.
- EVANS, D.L. & ADAMS, J.B. Amorphous gels as possible analogs to Martian weathering products. *Proc. Lunar Planet. Science*, v. 11, p. 757–763, 1980.
- FAIREN, A.G. et al. Inhibition of carbonate synthesis in acidic oceans on Early Mars. *Nature*, v. 431, p. 423–426, 2004
- FANALE, F. P., & CANNON, W. A. Adsorption on the Martian regolith. *Nature*, v. 230(5295), p. 502-504, 1971.
- FARQUHAR, J. et al. Evidence of atmospheric sulphur in the martian regolith from sulphur isotopes in meteorites. *Nature*, v. 404(6773), p. 50-52, 2000

- FIALIPS, C. I. et al. Hydration state of zeolites, clays, and hydrated salts under present-day martian surface conditions: Can hydrous minerals account for Mars Odyssey observations of near-equatorial water-equivalent hydrogen?. *Icarus*, v. 178(1), p. 74-83, 2005.
- FOLEY, C.N. et al. Final chemical results from the Mars Pathfinder alpha proton X-ray spectrometer. *J. Geophys. Res.*, v. 108 (E12), p. 8096, 2003.
- FORGET, F. & PIERREHUMBERT, R.T. Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation. *Science*, v. 278, p. 1273-1276, 1997.
- GENDRIN, A. et al. Sulfates in martian layered terrains: the OMEGA/Mars express view. *Science*, v. 307, p. 1587-1591, 2005.
- GELLERT, R. et al. Chemistry of rocks and soils in gusev crater from the alpha particle X-ray spectrometer. *Science*, v. 305 (5685), p. 829-832, 2004.
- GLOTCH, T.D. et al. Characterization of the effects of precursor mineralogy on hematite spectra: application to Martian hematite mineralization (abstract). *Lunar Planet. Sci.* v. XXXIV, 2003.
- GOODING, J.L. Chemical weathering on Mars. Thermodynamic stabilities of primary minerals (and their alteration products) from mafic igneous rocks. *Icarus*, v. 33, p. 483-513, 1978.
- HAMILTON, V. E. & CHRISTENSEN, P. R. Evidence for extensive, olivine-rich bedrock on Mars. *Geology*, v. 33, n. 6, p. 433-436, 2005.
- HARGRAVES, R.B. et al. The viking magnetic properties experiment: primary mission results. *J. Geophys. Res.*, v. 82 (28), p. 4547-4558, 2007.
- HARGRAVES, R.B. et al. Viking magnetic properties experiment: extended mission results. *J. Geophys. Res.*, v. 84 (B14), p. 8379-8384, 1979.
- HOEFEN, T. M. et al. Discovery of olivine in the Nili Fossae region of Mars. *Science*, v. 302(5645), p. 627-630, 2003.
- HYNEK, B.M. et al.. Geologic setting and origin of Terra Meridiani hematite deposit on Mars. *J. Geophys. Res.* 107 (E10), p. 5088, 2002.
- HVIID, S.F. et al. Magnetic properties experiments on the Mars Pathfinder Lander: preliminary results. *Science*, v. 278, p. 1768-1770, 1997.
- KOEPPE, W. C. & HAMILTON, V. E. Global distribution, composition, and abundance of olivine on the surface of Mars from thermal infrared data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 113, n. E5, 2008.
- KLINGELHOFER G. et al. Jarosite and hematite at Meridiani Planum from the Mossbauer spectrometer on the Opportunity rover. *Science*, v. 306, p. 1740-1745, 2004.
- KNOLL, A. H. et al. An astrobiological perspective on Meridiani Planum. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 240(1), p. 179-189, 2005.
- KUMAR, S. Indian Mars craft prepares for orbit. *Nature News*, v. 513(7518), p. 291, 2004.
- LANGEVIN, Y. et al. Sulfates in the North Polar region of Mars detected by OMEGA/Mars express. *Science*, v. 307, p. 1584-1586, 2005.
- LARSEN, J. & DAHL-JENSEN, D. Interior temperatures of the northern polar cap on Mars. *Icarus*, v. 144, n. 2, p. 456-462, 2000.
- MADSEN, M.B. et al. Magnetic properties experiments on the Mars exploration rover mission. *J. Geophys. Res.*, v. 108 (E12), p. 8069, 2003.
- MATHÉ, P.-E. et al. Volumetric changes in weathered profiles: iso-element mass balance method questioned by magnetic fabric. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 167, p. 255-267, 1999.
- MCLENNAN, S. M. Sedimentary silica on Mars. *Geology*, v. 31, n. 4, p. 315-318, 2003.
- MCSWEEN JR, H. Y. et al. Chemical, multispectral, and textural constraints on the composition and origin of rocks at the Mars Pathfinder landing site. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 104(E4), p. 8679-8715, 1999.
- MCSWEEN JR, H. Y. The rocks of Mars, from far and near. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 37, n. 1, p. 7-25, 2002.
- MCSWEEN, H. Y. et al. Characterization and petrologic interpretation of olivine-rich basalts at Gusev Crater, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 111(E2), 2006.
- MCSWEEN JR, H. Y. & TREIMAN, A. H.. Martian meteorites. *Planetary materials*, p. 953-1006, 2018.
- MICHALSKI, J. R. et al. Mineralogical constraints on the high-silica Martian surface component observed by TES. *Icarus*, v. 174(1), p. 161-177, 2005.
- MINITTI, M.E. et al. A new hematite formation mechanism for Mars (abstract). *Lunar Planet. Sci.* v. 1, p.199, 2004.
- MORRIS, R. V. et al.. Identification of carbonate-rich outcrops on Mars by the Spirit rover. *Science*, v. 329(5990), p. 421-424, 2010.
- MURCHIE S. L. et al. A synthesis of martian aqueous mineralogy after 1 Mars year of observations from the Mars Reconnaissance Orbiter. *J. Geophys. Res.* v. 114, 2009.
- MUSTARD J. F. et al. Composition, morphology, and stratigraphy of Noachian crust around the Isidis basin. *J. Geophys. Res.* v. 114, 2009.
- MUSTARD, J. F. et al. Mineralogy of the Nili Fossae region with OMEGA/Mars Express data: 1. Ancient impact melt in the Isidis Basin and implications for the transition from the Noachian to Hesperian. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 112(E8), 2007.
- MUSTARD, J. F. et al. Olivine and pyroxene diversity in the crust of Mars. *Science*, v. 307(5715), p. 1594-1597, 2005.
- NAHON, D.B. Self-organization in chemical lateritic weathering. *Geoderma*, v. 51, p. 5-13, 1991.
- NASCIMENTO-DIAS, B. L. Meteoritos marcianos realmente vieram de marte?. *Geosciences = Geociências*, v. 40, n. 03, p. 771-780, 2021.
- NYQUIST, L. E. et al. Ages and geologic histories of Martian meteorites. *Chronology and evolution of Mars*, 105-164, 2001.
- ODY, A. et al. Global investigation of olivine on Mars: Insights into crust and mantle compositions. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 118(2), p. 234-262, 2013.
- ORMO, J. et al. Geological features indicative of processes related to the hematite formation in Meridiani Planum and Aram Chaos, Mars: a comparison with diagenetic hematite deposits in southern Utah, USA. *Icarus*, v. 171, p. 295-316, 2004.
- OYAMA, V.I. et al. The chemical activities of the viking biology experiments and the arguments for the presence of superoxides, peroxides, gamma-Fe2O3 and carbon suboxide polymer in the Martian soil. *Life Sci. Space Res.* v. 16, p. 3-8, 1978.
- PHILLIPS, R.J. et al. Ancient geodynamic and global-scale hydrology on Mars. *Science*, v. 291, p. 2587-2591, 2001.
- POSEY-DOWTY, J. et al. Iron oxide and hydroxide precipitation from ferrous solutions and its relevance to Martian surface mineralogy. *Icarus*, v. 66, p. 105-116, 1986.

- POULET, F. et al. Quantitative compositional analysis of Martian mafic regions using the MEx/OMEGA reflectance data: 2. Petrological implications. *Icarus*, v. 201(1), p. 84-101, 2009.
- RIEDER, R. et al. The chemical composition of Martian soil and rocks returned by the mobile alpha proton X-ray spectrometer: preliminary results from the X-ray mode. *science*, v. 278, p. 1771-1774, 1997.
- ROACH L. H. et al. Diagenetic hematite and sulfate assemblages in Valles Marineris. *Icarus*, v. 207, p. 659-674, 2010.
- ROGERS, A. D. et al. Regional-scale stratigraphy of surface units in Tyrrhena and Iapygia Terrae, Mars: Insights into highland crustal evolution and alteration history. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 116, n. E8, 2011.
- ROGERS, A. D., & CHRISTENSEN, P. R. Surface mineralogy of Martian low-albedo regions from MGS-TES data: Implications for upper crustal evolution and surface alteration. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 112(E1), 2007.
- ROGERS, A. D. et al. Compositional heterogeneity of the ancient Martian crust: Analysis of Ares Vallis bedrock with THEMIS and TES data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 110, n. E5, 2005.
- SCHWERTMANN, U. The effect of pedogenic environments on iron oxides. *Adv Soil Sci*, v. 1, p. 171-200, 1985.
- SCHWERTMANN, U. & MURAD, E. Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite. *Clays Clay Miner* v. 31 (4), p. 277-284, 1983,
- SHARAF, O. et al. Sending hope to Mars. *Nature Astronomy*, v. 4(7), p. 722-722., 2020.
- SHERMAN, D.M. et al. Assessment of ferric iron oxide minerals likely to occur on Mars. *Lunar Planet. Sci.* v. XII, p. 970-972, 1981.
- SINGER, R. B. Spectral evidence for the mineralogy of high-albedo soils and dust on Mars. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 87(B12), p. 10159-10168, 1982.
- SODERBLOM, L. A. The composition and mineralogy of the Martian surface from spectroscopic observations: 0.3 μm to 50 μm . *Mars*, p. 557-593, 1992.
- SQUYRES, S.W. et al. In situ evidence for an ancient aqueous environment at Meridiani Planum, Mars. *Science*, v. 306, p. 1709-1714, 2004.
- SWAYZE G. et al. Discovery of the acid-sulfate mineral alunite in Terra Sirenum, Mars, using MRO CRISM: possible evidence for acid-saline lacustrine deposits? *Eos Trans. AGU 89*, Fall Meet. Suppl., 2008, Abstr. P44A-04.
- TANAKA, K. L. The stratigraphy of Mars. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 91(B13), p. E139-E158, 1986.
- TANG, Y. et al. Early Mars may have had a methanol ocean. *Icarus*, v. 180, n. 1, p. 88-92, 2006.
- TARDY, Y. & NAHON, D. Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite and Fe³⁺ kaolinites in bauxites and ferricretes. *Amer. J. Sci.* v. 285, p. 865-903, 1985.
- TEIXEIRA, W. et al. Decifrando a terra. *Oficina Textos*, 2001.
- TOKANO, T. & BISH, D. L. Hydration state and abundance of zeolites on Mars and the water cycle. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 110, n. E12, 2005.
- TORNABENE, L. L. et al. Surface and crater-exposed lithologic units of the Isidis Basin as mapped by coanalysis of THEMIS and TES derived data products. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 113(E10), 2008.
- TORRENT, J. et al. Influence of relative humidity on the crystallization of Fe(III) oxides from ferrihydrite. *Clays Clay Miner*, v. 30 (5), p. 337-340, 1982.
- TOSCA, N.J. et al. Geochemical modeling of evaporation processes on Mars: insight from the sedimentary record at Meridiani Planum. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 240, p. 122-48, 2005.
- TOULMIN III, P. et al. Geochemical and mineralogical interpretation of the Viking inorganic chemical results. *Journal of Geophysical Research*, v. 82(28), p. 4625-4634, 1977.
- WADE, M.L. et al. A Mossbauer investigation of iron-rich terrestrial hydro-thermal vent system: lessons for Mars exploration. *J. Geophys. Res.*, v. 104 (E4), p. 8489-8507, 1999.
- WAN, W. X. et al. China's first mission to Mars. *Nature Astronomy*, v. 4(7), p. 721-721, 2020.
- WANG, A. et al. Sulfate deposition in subsurface regolith in Gusev crater, Mars. *J. Geophys. Res.* 111 (E02S17), 2006.
- WRAY J.J. et al. Columbus crater and other possible groundwater-fed paleolakes of Terra Sirenum, Mars. *J. Geophys. Res.*, v. 116, p. E010, 2011.
- WYATT, M. B. & MCSWEEN, H. Y. Spectral evidence for weathered basalt as an alternative to andesite in the northern lowlands of Mars. *Nature*, v. 417, n. 6886, p. 263-266, 2002.
- WYATT, M. B. & MCSWEEN, H. Y. Volcanism or aqueous alteration on Mars?. *Nature*, v. 421, n. 6924, p. 712-713, 2003.

Submetido em 13/01/2022

Aceito em 23/03/2022