

Análogos geoquímicos portugueses de rochas e solos marcianos (S. Saturnino – Fronteira vs Cratera de Gusev e Meridiani Planum)

Portuguese geochemical analogues of martian rocks and soils (S. Saturnino – Fronteira vs Gusev Crater and Meridiani Planum)

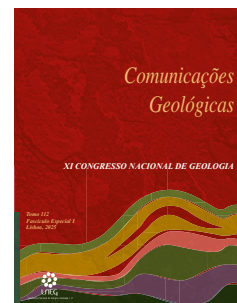
C. S. Almeida Rocha^{1*}, E. I. Alves²

DOI: <https://doi.org/10.34637/sbdq-v157>

Recebido em 10/10/2023 / Aceite em 08/05/2024

Publicado online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original
Original article

Resumo: Este trabalho resulta de estudos petrográficos e geoquímicos feitos sobre afloramentos de rochas filonianas básicas na região de S. Saturnino (Fronteira, Portalegre, Portugal) como análogos de rochas e solos marcianos das regiões da cratera Gusev e de Meridiani Planum analisados nas missões dos rovers Spirit (MER-A) e Opportunity (MER-B). Mostra-se que este é o primeiro local em Portugal Continental que pode ser reconhecido como análogo dos ambientes geológico, petrográfico e geoquímico marcianos.

Palavras-chave: Marte, análogos, S. Saturnino (Portugal), geoquímica, análise em componentes principais, classificação automática.

Abstract: This research results from the petrographic and geochemical study of the outcropping phylonic basic rocks in the S. Saturnino region (Fronteira, Portalegre, Portugal) as analogues of Mars (Gusev crater and Meridiani Planum), through geological missions carried out by rovers Spirit (MER-A) and Opportunity (MER-B). It is shown that this is the first portuguese recognized site analogous to the geological, petrographic, and geochemical environment observed on Mars.

Keywords: Mars, analogues, S. Saturnino (Portugal), geochemistry, principal component analysis, automatic classification.

¹ Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Centro de Recursos Naturais e Ambiente (CERENA), Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares (C2TN), Portugal.

² Universidade de Coimbra, Centro de Investigação da Terra e do Espaço (CITEUC), Departamento de Ciências da Terra, Rua Sílvio Lima, Univ. Coimbra - Polo II, 3030-790 Coimbra, Portugal

* Corresponding author / Autor correspondente: carla.s.rocha@tecnico.ulisboa.pt

1. Introdução

O programa Mars Exploration Rover A e B, da NASA, teve como objetivos explorar a geologia de Marte, procurar evidências e condições ambientais favoráveis à existência de água líquida no passado e avaliar os ambientes propícios à vida. Enviou para a Cratera de Gusev o robô Spirit (MER-A) e para Meridiani Planum o Opportunity (MER-B) (NASA, 2015). Em Portugal, na Zona Tectono-Estratigráfica de Ossa Morena, freguesia de S. Saturnino do município de Fronteira, existem rochas filonianas vulcânicas básicas cujas composições químicas são análogas às rochas marcianas, como se demonstrará.

2. Composições mineralógicas das rochas vulcânicas básicas de S. Saturnino

As rochas filonianas básicas de S. Saturnino correspondem a vulcanitos e metavulcanitos para cuja identificação mineralógica, para além das observações em lâminas delgadas e microsonda eletrónica, ainda foi possível recorrer à difração de raios-x da rocha total (Figura 1). Nos vulcanitos básicos ocorrem olivinas magnesianas (fosterite - crisolite), segundo a classificação de Deer *et al.* (1992), (Figura 2); plagioclases (labradorite), segundo a classificação de Deer *et al.* (1992), (Figura 3); piroxenas cálcicas (augite), segundo a classificação de Morimoto *et al.* (1988), (Figura 4) e clinopiroxenas cuja representação no diagrama discriminante (Ti+Cr) vs. Ca, segundo Leterrier *et al.* (1982) pertencem ao domínio dos basaltos não orogénicos (Figura 5). Os metavulcanitos básicos apresentam as piroxenas alteradas para anfíbulas cálcicas como hornblenda (ou actinolite), segundo a

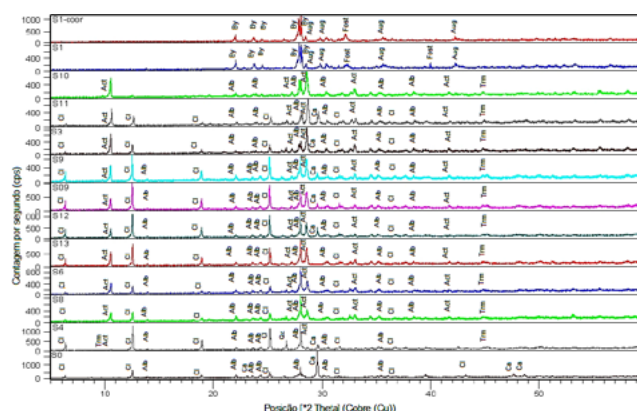


Figura 1. Identificação mineralógica dos principais picos dos difractogramas gerais de difração de raio-x das treze amostras em análise ordenadas comparativamente aos principais picos. As amostras S1-coor e S1 são basaltos e as restantes metabasaltos. Legenda: Act- Actinolite; Alb- Albite; Aug- Augite; By- Bitounite; Ca- Calcite; Cl- Clinocloro; Fost- Fosterite e Trm-Tremolite.

Figure 1. Mineralogical identification of the main peaks of the general x-ray diffraction diffractograms of the thirteen samples under analysis ordered in comparison to the main peaks. Samples S1-coor and S1 are basalts and the remaining metabasalts. Caption: Act-Actinolite; Alb-Albite; Aug-Augite; By-Bitounite; Ca- Calcite; Cl-Clinocllore; Fost-Fosterite; and Trm-Tremolite.

classificação de Leake (1977), (Figura 6); plagioclases albitizadas, segundo a classificação de Deer *et al.* (1992), (Figura 7); em alguns casos observa-se a presença de epidoto nesta paragénesis, indicador de metamorfismo de baixo grau, da fácies dos xistos verdes.

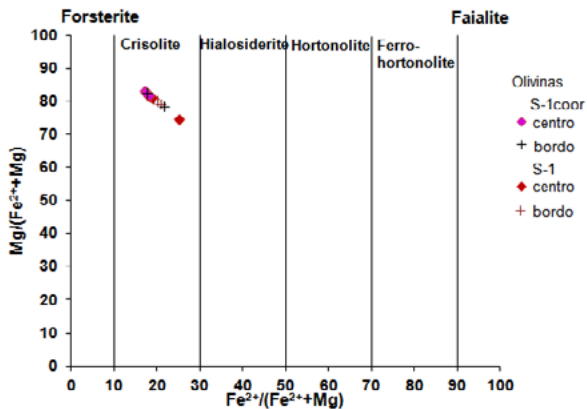


Figura 2. Classificação dos minerais de olivinas de S. Saturnino no diagrama binário das series forsterite-fayalite, segundo Deer *et al.* (1992).

Figure 2. Classification of olivine minerals from S. Saturnino in the binary diagram of the forsterite-fayalite series, according to Deer *et al.* (1992).

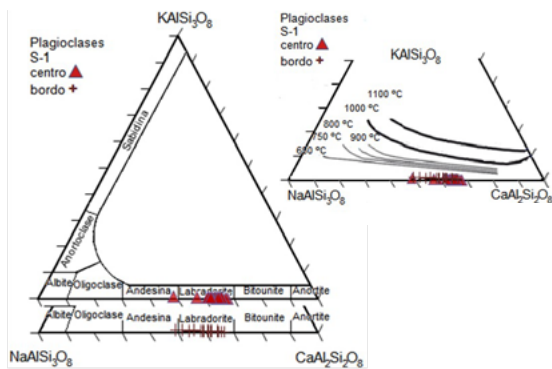


Figura 3. Projeção das plagioclases de S. Saturnino no diagrama triangular Ab-An-Or, segundo Deer *et al.* (1992).

Figure 3. Projection of the plagioclases of S. Saturnino in the triangular Ab-An-Or diagram, according to Deer *et al.* (1992).

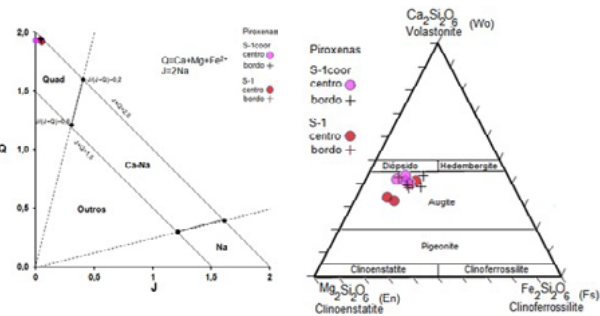


Figura 4. Projeção das clinopiroxenas de S. Saturnino, segundo a classificação de Morimoto *et al.* (1988).

Figure 4. Projection of clinopyroxenes from S. Saturnino, according to the classification of Morimoto *et al.* (1988).

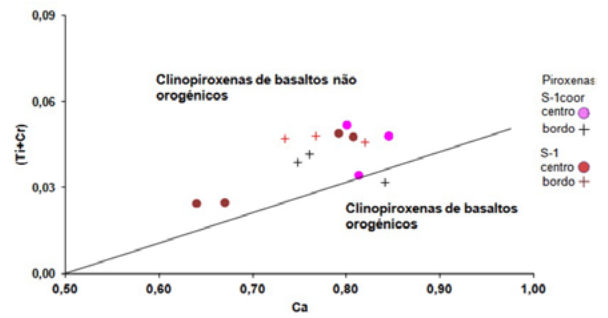


Figura 5. Projeção das clinopiroxenas de S. Saturnino, no diagrama discriminante (Ti+Cr) vs. Ca, segundo Leterrier *et al.* (1982).

Figure 5. Projection of clinopyroxenes from S. Saturnino, in the discriminant diagram (Ti+Cr) vs. Ca, according to Leterrier *et al.* (1982).

3. Classificação das rochas pelas químicas totais

As rochas da superfície de Marte da Cratera de Gusev (MER-A) e Meridiani Planum (MER-B), assim como as rochas de S. Saturnino, no que respeita à química total, classificam-se como basaltos toleíticos segundo Irvine e Baragar (1971) (Figura 8 e Figura 9), de ambiente Ocean Floor Tholeiites (OFT) segundo Ishizuka (1981) (Figura 10).

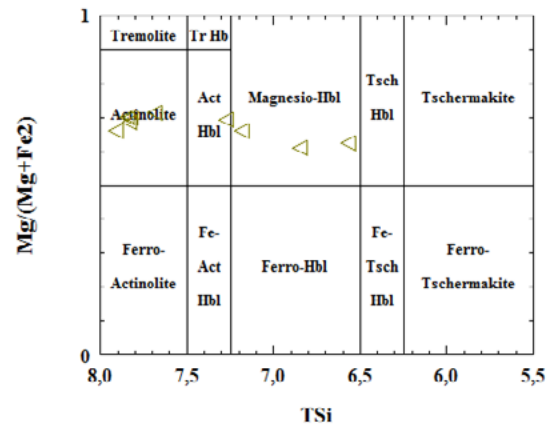


Figura 6. Classificação das anfíbolas cálcicas, segundo Leake, (1977).

Figure 6. Classification of calcic amphiboles, according to Leake, (1977).

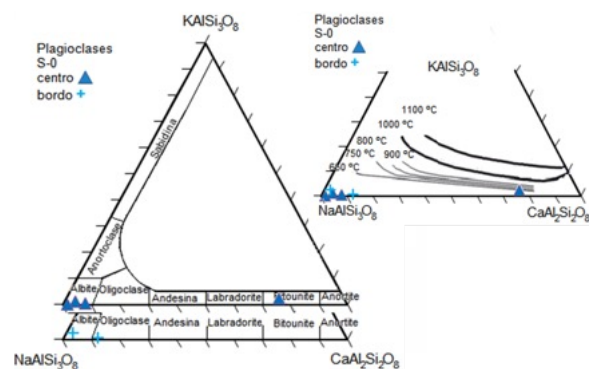


Figura 7. Projeção das plagioclases de S. Saturnino no diagrama triangular Ab-An-Or, segundo Deer *et al.* (1992).

Figure 7. Projection of the plagioclases of S. Saturnino in the triangular Ab-An-Or diagram, according to Deer *et al.* (1992).

4. Distribuição da % dos elementos maiores

No gráfico da figura 11 representam-se a distribuição média, máxima e mínima. Rochas de S. Saturnino (45,65) <SiO₂> solos MER-A (50,0971); rochas MER-A (8,7535) <Al₂O₃> rochas de S. Saturnino (14,01); rochas de S. Saturnino (14,60) <Fe₂O₃> solos MER-B (24,8848); solos MER-B (7,6144) <MgO> rochas MER-B (10,5273); rochas MER-B (6,0616) <CaO> rochas de S. Saturnino (10,97); solos MER-B (2,3376) <Na₂O> rochas de S. Saturnino (3,24); rochas de S.

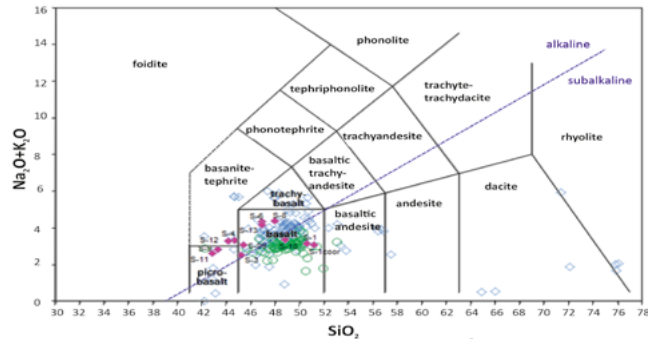


Figura 8. Distribuição dos vulcanitos e metavulcanitos básicos das amostras de S. Saturnino e de Marte, no diagrama TAS (Total Alkalies - Silica) (Le Bas *et al.*, 1986), com a sobreposição da subdivisão das séries alcalinas e subalcalinas (Irvine e Baragar (1971), in Rollinson, 1996).

Figure 8. Distribution of the basic volcanites and metavolcanites of the samples from S. Saturnino and Mars, in the TAS (Total Alkalies - Silica) diagram (Le Bas *et al.*, 1986), with the overlapping of the subdivision of the alkaline and subalkaline series (Irvine e Baragar (1971), in Rollinson, 1996).

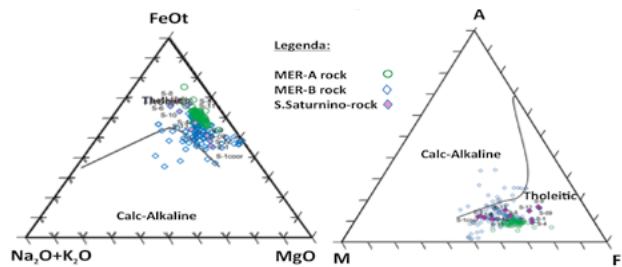


Figura 9. Projeção das amostras dos vulcanitos e metavulcanitos básicos de S. Saturnino e das rochas da superfície de Marte MER-A e MER-B no Diagrama AFM. A linha de separação das séries toleíticas e calco-alcalinas foi definida por Irvine e Baragar (1971).

Figure 9. Projection of samples of basic volcanites and metavolcanites from S. Saturnino and surface rocks of Mars MER-A and MER-B onto the AFM Diagram. The separation line of the tholeiitic and calc-alkaline series was defined by Irvine & Baragar (1971).

Saturnino (0,24) <K₂O> rochas MER-A (0,6802); solo MER-A (0,948) <TiO₂> rochas de S. Saturnino (2,80); rochas de S. Saturnino (0,52) <P₂O₅> rochas MER-B (1,4775); rochas de S. Saturnino (0,26) <MnO> rochas MER-A (0,3855); rochas de S. Saturnino (0,02) <Cr₂O₃> solos MER-A (0,3863).

Na distribuição da % de SiO₂, observa-se uma distribuição assimétrica positiva, enviesada à direita; em que a mediana 49,04 < média 49,40, com valores mínimo 32,22 e máximo 91,64. Apresenta valores anómalos abaixo do 1º quartil, 47,71 e acima do 3º quartil, 49,96. Na distribuição da % de Al₂O₃, observa-se uma distribuição simétrica; em que a média 10,00 apresenta valores aproximados da mediana 10,06 com valores mínimo 1,68 e máximo 19,20. Apresenta valores anómalos abaixo do 1º quartil, 8,53, e acima do 3º quartil, 11,04.

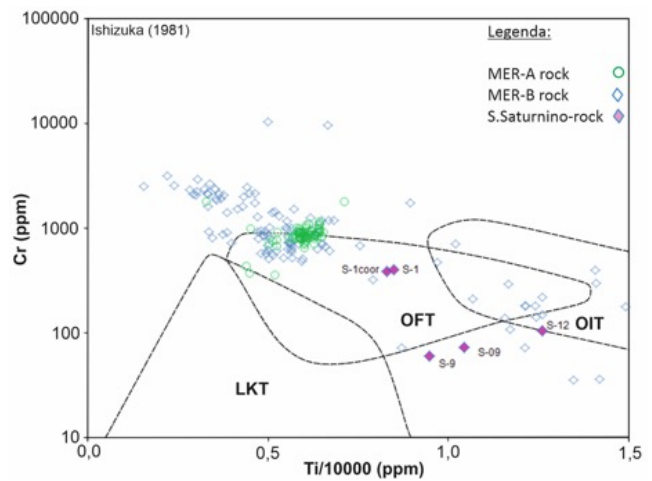


Figura 10. Distribuição das rochas básicas de S. Saturnino e de Marte MER-A e MER-B no diagrama segundo Ishizuka (1981). Legenda: LKT - low-K tholeiites, OIT - Oceanic Island Tholeiite, OFT - Ocean Floor Tholeiites.

Figure 10. Distribution of the basic rocks of S. Saturnino and Mars MER-A and MER-B in the diagram according to Ishizuka (1981). Caption: LKT - low-K tholeiites, OIT - Oceanic Island Tholeiites, OFT - Ocean Floor Tholeiites.

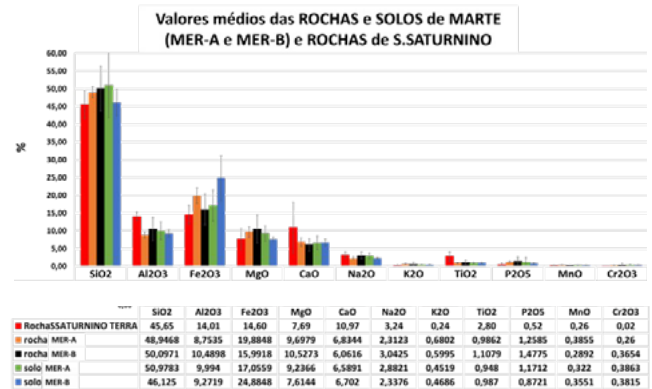


Figura 11. Distribuição gráfica dos valores médios, máximos e mínimos dos elementos maiores em %, das rochas básicas de S. Saturnino e das rochas e solos da superfície de Marte MER-A e MER-B.

Figure 11. Graphical distribution of the average, maximum and minimum values of the major elements in %, of the basic rocks of S. Saturnino and of the rocks and soils of the surface of Mars MER-A and MER-B.

Na distribuição da % de Fe₂O₃, observa-se uma distribuição simétrica em que a média, 17,99, apresenta valores aproximados da mediana, 18,11 com valores mínimo 1,42 e máximo 35,81. Apresenta valores anómalos abaixo do 1º quartil, 16,19, e acima do 3º quartil, 19,95.

Na distribuição da % de MgO, observa-se uma distribuição assimétrica positiva, enviesada à direita, em que a mediana 9,33 < média 9,63, com valores mínimo 2,33 e máximo 25,65. Apresenta valores anómalos abaixo do 1º quartil, 8,42, e acima do 3º quartil, 10,30.

Na distribuição da % de CaO, observa-se uma distribuição assimétrica positiva, enviesada à direita, em que a mediana 6,65 < média 6,66, com valores mínimo 0,72 e máximo 32,94. Apresenta valores anómalos abaixo do 1º quartil, 6,03, e acima do 3º quartil, 7,20.

Na distribuição da % do Na₂O, observa-se uma distribuição simétrica em que a média, 2,76, apresenta valores aproximados da mediana, 2,69, com valores mínimo 0,00 e máximo 5,18. Apresenta valores anómalos abaixo do 1º quartil, 2,29, e acima do 3º quartil, 5,18.

1

Grupo 2

DESCRICAÇÃO SUMÁRIA DAS VARIÁVEIS

VARIÁVEL	MEDIA	DESVIO PADRAO	MINIMO	MAXIMO
SiO2	49.937	8.1941	32.225	91.636
Al2O	8.411	2.2770	1.681	18.344
Fe2O	19.801	5.5895	1.418	35.809
MgO	10.082	3.7104	2.329	25.645
CaO	6.084	1.8197	0.719	12.169
Na2O	2.226	0.6781	0.000	4.393
K2O	0.650	0.4687	0.000	3.174
TiO2	0.937	0.2138	0.259	1.783
P2O5	1.148	0.8461	0.162	8.293
MnO	0.348	0.1007	0.030	0.542
Cr2O	0.376	0.3398	0.059	3.817

MATRIZ DE CORRELAÇÃO

	SiO2	Al2O	Fe2O	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO	Cr2O
SiO2	1.000										
Al2O	-0.353	1.000									
Fe2O	-0.811	-0.010	1.000								
MgO	-0.346	-0.347	0.125	1.000							
CaO	-0.535	0.589	0.264	-0.251	1.000						
Na2O	-0.377	0.620	0.160	-0.268	0.438	1.000					
K2O	-0.062	0.294	-0.126	-0.033	-0.024	0.247	1.000				
TiO2	0.172	0.369	-0.225	-0.609	0.322	0.247	0.359	1.000			
P2O5	-0.337	0.153	0.188	-0.114	0.408	0.169	0.052	0.224	1.000		
MnO	-0.678	0.252	0.411	0.287	0.632	0.400	-0.097	0.046	0.214	1.000	
Cr2O	0.001	0.309	-0.200	0.193	-0.234	-0.154	-0.102	-0.169	-0.029	-0.139	1.000

Figura 14. Distribuição sumária das variáveis e respetiva matriz de correlação, com recurso à Análise Multivariada de Dados Regionalizados, do grupo 2.

Figure 14. Summary distribution of the variables and respective correlation matrix, using Multivariate Analysis of Regionalized Data, for group 2.

A Análise Multivariada de Dados Regionalizados permitiu efetuar o estudo do comportamento, correspondências e correlações dos elementos químicos das rochas terrestres com rochas e solos da superfície de Marte, corroborando os dados e estudos efetuados ao nível petrográfico das rochas de S. Saturnino, sendo uma mais-valia.

5. Conclusões

Ao nível geoquímico, as rochas de S. Saturnino da Zona Tectono-Estratigráfica de Ossa Morena, são idênticas às rochas que ocorrem em Marte, com o acréscimo da informação de que se trata de rochas

básicas toleíticas com características dos fundos oceânicos, com baixo grau de metamorfismo correspondente ao domínio dos xistos verdes, o que resultou, aqui, de metamorfismo regional. Fica o contributo da informação em que as rochas de Marte de Meridiani Planum (MER-B) observadas pela missão *Opportunity* exibem as mesmas características químicas composicionais que são também compatíveis com rochas vulcânicas básicas com baixo grau de metamorfismo.

Agradecimentos

Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através da Bolsa Individual de Investigação de Doutoramento (FCT SFRH/BD/105622/2015) e Bolsa SantanderTotta/UC 2013 (Bolsa Internacional). O CERENA/IST agradece à FCT pelo projecto FCTUID/ECI/04028/2019 e o C2TN/IST agradece à FCT pelo projecto UID/MULTI/04349/2013.

Referências

- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J., 1992. *An Introduction to the Rock Forming Minerals*, 2nd ed., Longman, London.
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, **8**:523-548.
- Ishizuka, H., 1981. Geochemistry of the Horokanai ophiolite in the Kamuikotan tectonic belt, Hokkaido, *Japan. Jour. Geol. Soc. Japan* **87**:17-34.
- Leake, B. E., 1977. On aluminous and edenitic hornblendes. *Mineralogical Magazine*, **38**:389-405.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, **27** (3):745-750.
- Leterrier, J., Maury, R., Thonon, P., Girard, D., Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **59**:139-154.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K., Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, **73**:1123-1133.
- NASA, 2015. Mars Trek. <https://trek.nasa.gov/mars/> [acedida em 2023.04.05]
- Robinson, P., Zhou, M., Hu, X., Reynolds, P., Wenji, B., Yang, J., 1999. Geochemical constraints on the origin of the Hegenshan ophiolite, inner Mongolia, China. *Journ. Asian Earth Sci.*, **17**:423-442.

