

# **Workshop em Ciências da Terra e do Espaço**

**Livro de Atas 2018**

**no âmbito da Unidade Curricular de Seminário do  
*Programa Doutoral em Ciências da Terra e do Espaço*  
e  
*Mestrado em Ciências da Terra, da Atmosfera e do Espaço***

## **Universidade de Évora**

*Instituto de Investigação e Formação avançada e  
Departamento de Física*

*Editores:  
Bento Caldeira  
Maria João Costa*

Titulo: Workshop em Ciências da Terra e do Espaço - Livro de Actas 2018

Coordenadores: Bento Caldeira e Maria João Costa

Editores: Bento Caldeira e Maria João Costa

Janeiro de 2018

(c) Universidade de Évora

Rua Romão Ramalho, 59

7000-671 Évora Portugal

ISBN: 978-989-20-8414-5

## Índice

Prefácio	5
Agradecimentos	6
Programa	7
Ubsurface Investigation using Electroresistivity method at Eixo Rodoviário Norte of Brasília - Brazil <i>João Alberto Cruz Vieira</i>	9
Qualidade da água no reservatório de Alqueva através de medições in situ e deteção remota de satélite <i>Gonçalo Rodrigues, Miguel Potes, M<sup>a</sup> João Costa, Rui Salgado, Alexandra Penha, M<sup>a</sup> Novais</i>	19
Utilização de Resíduos da Indústria Extrativa de Mármore Ornamental na Olaria Tradicional <i>Tiago Alves, Rúben Lopes, Celso Gomes, Manuela Santos Francisco Rosado</i>	29
Aplicação do estudo de inclusões fluidas às mineralizações da Zona de Ossa-Morena. Os casos de Mociços, Ferrarias e Miguel Vacas. <i>Miguel Maia, S. Vicente, Pedro Nogueira</i>	47
Geoquímica de Elementos Maiores em Sedimentos de Barragens Dominicanas: Análise da sua Proveniência <i>Joana Araújo, Pedro Nogueira, Rita Fonseca, Catarina Pinho, Alexandre Araújo</i>	55
Interação de aerossóis com nuvens em eventos de poeira do Sahara sobre a Península Ibérica <i>Eduardo Cardoso</i>	67

Levantamento climatológico da precipitação em Ponta Delgada no ano 2017

*Vanda Costa*

79

Geomagnetismo: o campo magnético da Terra

*Pedro Teixeira*

85

## **Prefácio**

O presente livro foi produzido no âmbito da unidade curricular Seminário do programa de Doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço (DCTE) e do Mestrado em Ciências da Terra, da Atmosfera e do Espaço (MCTAE), que incluiu a organização da edição de 2018 do Workshop em Ciências da Terra e do Espaço da Universidade de Évora (WCTE2018). Neste volume estão reunidos os artigos de investigação produzidos pelos estudantes que frequentam a referida unidade curricular. O WCTE assume-se, desde a sua primeira edição em 2013, como um espaço de partilha de conhecimento e treino de comunicação em ciência. Nesse sentido, procura proporcionar aos estudantes que frequentam a Unidade de Seminário uma experiência efetiva não apenas na preparação e apresentação de comunicações orais e artigos de investigação, mas também na organização do próprio evento. Na edição do WCTE2018, que ocorreu no dia 10 de janeiro, foram submetidos e apresentados 9 trabalhos, que abrangem as várias temáticas que dos cursos MCTAE e DCTE.

Évora, 21 de maio de 2018

Bento Caldeira e Maria João Costa  
Docentes da unidade curricular Seminário

## Agradecimentos

Os docentes das Unidades de Seminário do programa Doutoral em Ciências da Terra e do Espaço e do mestrado em Ciências da Terra, da Atmosfera e do Espaço manifestam o seu reconhecimento aos autores dos trabalhos publicados. Um agradecimento especial ao Prof. Mourad Bezzegoud, diretor do Doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço, por todo o apoio incentivo e conselhos, sem os quais este livro dificilmente existiria. Um profundo agradecimento aos orientadores que acompanharam os estudantes, ação que em muito fortaleceu a qualidade científica dos trabalhos aqui apresentados. Sem pretendermos diminuir todos os contributos dados por vários colegas para este trabalho, pretendemos demonstrar a nossa gratidão à Eng<sup>a</sup> Cláudia Marques (IIFA/UE) e D. Ana Rita Ferreira pela permanente disponibilidade e pelo apoio na resolução dos problemas que surgiram para produzir o presente livro.

Agradecemos o contributo do Instituto de Investigação e Formação Avançada (IIFA) e da Escola de Ciências e Tecnologia (ECT) da Universidade de Évora.

**10 de Janeiro de 2018, 9h00**  
**Colégio Luís Verney - Anfiteatro 1**  
**Programa WCTE 2018**

**09h00** Registo das Inscrições no WCTAE 2018

**09h30** Sessão de Abertura

**Módulo 1 - Moderação: *Miguel Maia***

**10h00** “Investigação da subsuperfície do Eixo Rodoviário Norte de Brasília utilizando eletrorresistividade” *João Vieira* (Universidade de Évora)

**10h20** “Qualidade da água no reservatório de Alqueva através de medições *in situ* e deteção remota de satélite” *Gonçalo Rodrigues* (Universidade de Évora)

**10h40** “Utilização de Resíduos da Indústria Extrativa de Mármore Ornamental na Olaria Tradicional” *Tiago Alves* (Universidade de Évora)

**11h00** “Coffee Break”

**Módulo 2 - Moderação: *Vanda Costa***

**11h30** “A aplicação do estudo de inclusões fluidas às mineralizações da Zona de Ossa-Morena. Os casos de Mociços, Ferrarias e Miguel Vacas.” *Miguel Maia* (Universidade de Évora)

**11h50** “Distribuição Geoquímica de Elementos Maiores em Sedimentos de Barragens Dominicanas: Análise da sua Proveniência” *Joana Araújo* (Laboratório AmbiTerra/Universidade de Évora)

**12h10** “Interação aerossóis-nuvens em eventos de poeira do Sahara” *Eduardo Cardoso* (Universidade de Évora)

**12h30** Almoço

**Módulo 3** - Moderação: *Joana Araújo*

**14h30 Orador Convidado:** “Lidar remote sensing” *Juan Luis Guerrero*

Rascado (Universidad de Granada, Espanha)

**15h00** “Levantamento climatológico da precipitação em Ponta Delgada no ano 2017” *Vanda Costa* (Universidade de Évora/IPMA Açores)

**15h20** “Geomagnetismo: o campo magnético da Terra” *Pedro Teixeira*  
(Universidade de Évora)

**15h40** “Armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> em aquíferos salinos – desafios do presente e perspectivas futuras” *João Reis* (Universidade de Évora)

**16h Sessão de Encerramento**

# UBSURFACE INVESTIGATION USING ELECTRORESISTIVITY METHOD AT EIXO RODOVIÁRIO NORTE OF BRASÍLIA – BRAZIL

JOÃO ALBERTO CRUZ VIEIRA

*Instituto de Investigação e Formação Avançada, Universidade de Évora, R. Romão Ramalho, n°59  
Évora, Portugal, [j.albertocv@hotmail.com](mailto:j.albertocv@hotmail.com)*

This is a brief study of subsurface of Eixo Rodoviário of Brasília for geotechnical applications. The motivation of this project is to provide information for underground subway line construction, which is claimed for many habitants of Brasília. The study performed electroresistivity method using Dipole-Dipole configuration, imaging 86,2 meters depth of 25 levels of investigation. Results pointed soil layer depth of 9 meters and resistivity of 176 to 1447 ohms.m, and Paranoa's slate resistivity of 1447 to 3500 ohms.m SPT tests in area were interpolated and corroborated soil thickness of 9 meters. Other study of geophysics applied to geotechnical purposes was compared to this work and evidenced that electroresistivity is completely adaptable.

## 1. Introduction

Brasília is a planned city in the central-west Brazil region. The capital of the country has more than three million habitants, considering whole metropolitan area and traffic of more than 1,6 million vehicles (DETRAND-DF, 2016; IBGE,2017). Social and structural studies point that central area needs a subway line at *Eixo Rodoviário Norte* (Alves, 2009).

Geophysics studies are largely used for studying ground geotechnical features. Electric methods are relatively cheaper and faster than sample wells, given that usage of geophysical data provides profile details instead of punctual information, besides the fact that it causes less damage to scenario than drilling (Loke, 2011). Hence, this project purpose a electroresistivity profile at *Eixo Rodoviário Norte*, aiming to determine soil-rock interface and detect underground structures.

Therefore, in this work, electrical resistivity profile and Standard Penetration Test (SPT) methods were used as cheap and shallow geotechniques for identification of rock and soil proprieties, instead of direct sounding and sampling. The choice of those techniques was made with a view to minimize limitations of each method and mutual corroboration.

Electrical resistivity method results in a spatial distribution of subsurface electrical properties, which induces to detection of anomalous resistivity distributions caused by difference of compaction and intrusion of fluids (Loke, 2011). The SPT technique indicates relations between density of materials of subsurface, having strong correlation with seismic survey's results, but sampling scheme is punctual, meaning less coverage (Alves, 2009).

## 2. Area Location

Brasília is situated in center of *Distrito Federal* (DF), which is bounded almost entirely by Goiás state and a little border with Minas Gerais state (Figure 1).

The *Plano Piloto* area is in the center portion of DF, and its area is formally compared to a shape of an airplane, containing a main body called *Eixo Monumental*, and two wings where *Eixo Rodoviário* road passes: *Asa Sul* (Portuguese translation of South Wing) and the *Asa Norte* (North Wing). The wings are subdivided in blocks (SqS for *Asa Sul* or SqN for *Asa Norte*) from 102 to 916. The investigation occurred at *Eixo Rodoviário Norte* at SqN 108 and SqN 109 blocks, at the *Plano Piloto* (Figure 2).

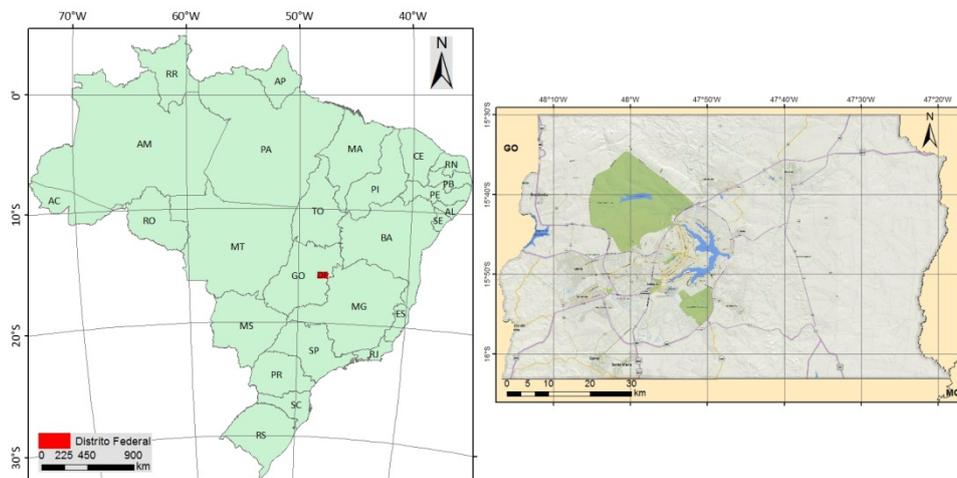


Figure 1. Geopolitical map of Brazil (left), showing the states, highlighting *Distrito Federal*, which is detailed in next map (right). Source: IBGE

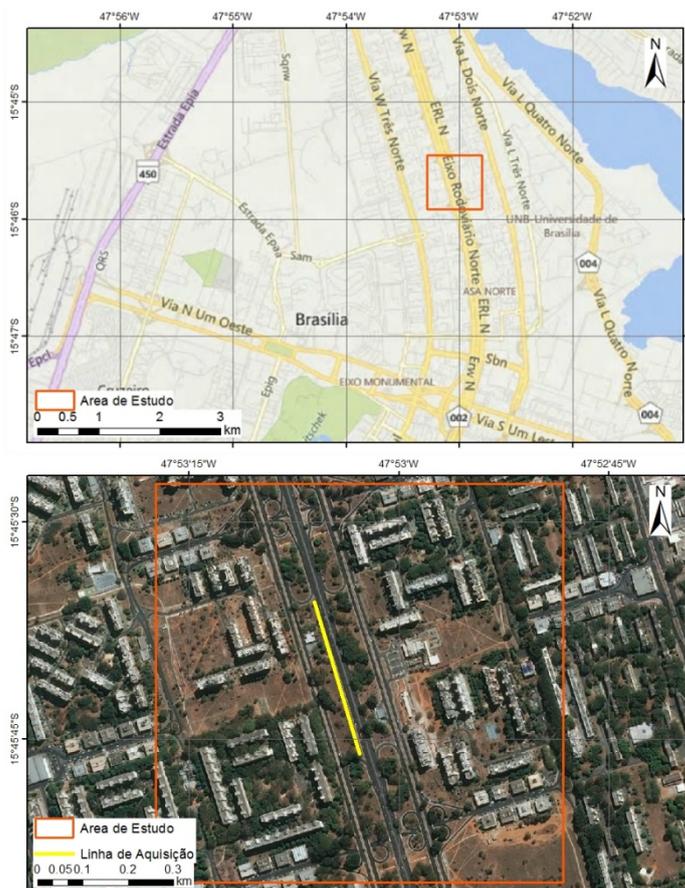


Figure 2. Map of *Asa Norte* (up) containing study area highlighted as red square and aerial photography (down) containing study area and acquisition line (yellow). Source: Microsoft Bing

### 3. Objectives

The objective of this study is to determine soil depth and image soil-rock interface, detection of underground structures (such as optical fiber or rain water gallery) and complementing data of ground data for geotechnical usage.

### 4. Soil of Brasília

The *Plano Piloto* bedrock is composed by clay slates and arenites highly metamorphized from Paranoá Group, in Brasília Fold Belt (Dardenne, 2000). Thin covers of red latosol are present in major part of DF, followed by yellowish-red latosol and cambisol (EMPRAPA,

1978). *Asa Norte* region is entirely covered by red latosol, which is iron oxide and hydroxide rich and has low levels of clay minerals (Marini *et al.*, 1981; Dardenne, 2000). According to Campos (2004), soil cover in *Asa Norte* has lumpy structure and fine clay to clay texture. The climate in Brasilia can be defined as Tropical Savannah Aw based on Köppen classification, where a strong seasonality is observed: high pluviosity in summer and drought in winter (Campos, 2004; Alencar, 2015).

## 5. Electroresistivity survey

Direct current (DC) survey was made using dipole-dipole array intending to reach highest depth compared to other arrays (Ward, 1990; Loki, 2011). The acquisition protocol was designed in SYSCAL PRO 72 (IRIS Instruments) for multielectrode cable, using routine for 55 electrodes, spaced 10 meters from each other. Using this configuration, 1075 values were obtained from 27 different levels of investigation.

After the acquisition, the data was downloaded and reduced using software SYSCAL PRO II (IRIS Instruments) by removing high contact resistivity (Rs-Check) and high standard deviation values. SYSCAL PRO II allows to visualize profiles of apparent resistivity ( $\rho_a$ ), electric potential ( $V_p$ ) and spontaneous potential ( $Sp$ ). Unexpected values from those proprieties in profile were removed to improve noise-signal ratio. Pre-processed data was exported to Res2Dinv program (GEOTOMO), where inversion process is made. The method used was least-square smoothness, three iterations of convergence set up for RMS reduction. All data was synchronized with GPS data for topography influence (although the terrain in SqN 108-109 is flat). The results are presented at Figure 3.

## 6. SPT sounding

The Standard Penetration Test (SPT) data was collected by *Faculdade de Tecnologia* from *University of Brasilia* (FT-UnB). The test consists in ground drilling using standards sampling tubes and counting how many blows from a slide hammer of 63,5 kg falling through defined heights are needed to penetrate each 150 mm up to a depth of 450 mm (Kulhawy and Mayne, 1990).

Nowadays, the SPT sounding is one of the most used, cheapest and accepted soil methods for soil investigation worldwide. SPT is a dynamic penetration assay which execution is ease and fast, data processing is simple and results are reliable considering correlations with soil compaction, friction, reactions to impacts and energy absorption (Alves, 2009). All those parameters deduce petrophysics proprieties of soil and rock layers below STP sites.

## 7. Results

Three profiles of resistivity were given as results from the Res2Dinv inversion. Upper profile is measured apparent resistivity pseudosection, middle profile is apparent resistivity pseudosection calculated on the basis of the model and lower profile is the model of resistivity

section obtained by the inversion. The prefix “pseudo” exists due to the fact the measurements aren't made all at the same time. The difference between measured and calculated pseudosections is obtained by RMS error. In profiles shown at Figure 3, RMS error was 8,0%, which means the model is well adjusted (Loki, 2011; GEOTOMO).

Bearing in mind that survey campaign happened during rainy season, making the soil was slightly wet, the values considered for this layer varied from 176 to 1447  $\Omega$ .m, and its depth is 12 meters, while slate layer varied from 1447 to 3500  $\Omega$ .m. Near the profile line, a gas station is situated around position 160 meters, and its underground tanks are marked as a conductive zone around 86,9  $\Omega$ .m. A low resistivity zone is found at south portion of the profile line, buried at 43 meters deep and its origin is unknown.

To confirm the proposed inversion model, Standard Penetration Test data obtained at the area by *Faculdade de Tecnologia* of University of Brasília was gathered. Interpolated data by least-square method in Oasis Montaj 7.0.1 (Geosoft) is presented at Figure 4.

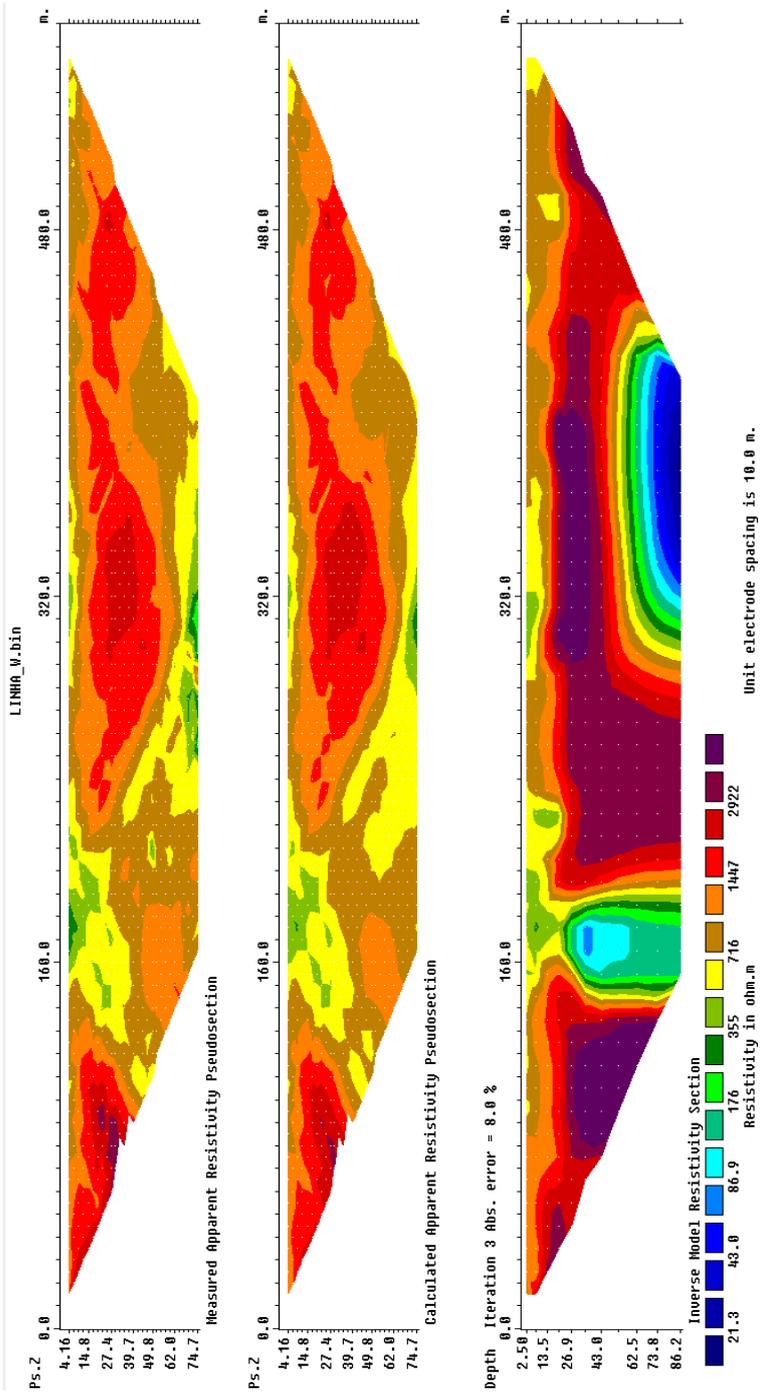


Figure 3. Map of *Asa Norte* (up) containing study area highlighted as red square and aerial photography (down) containing study area and acquisition line (yellow).

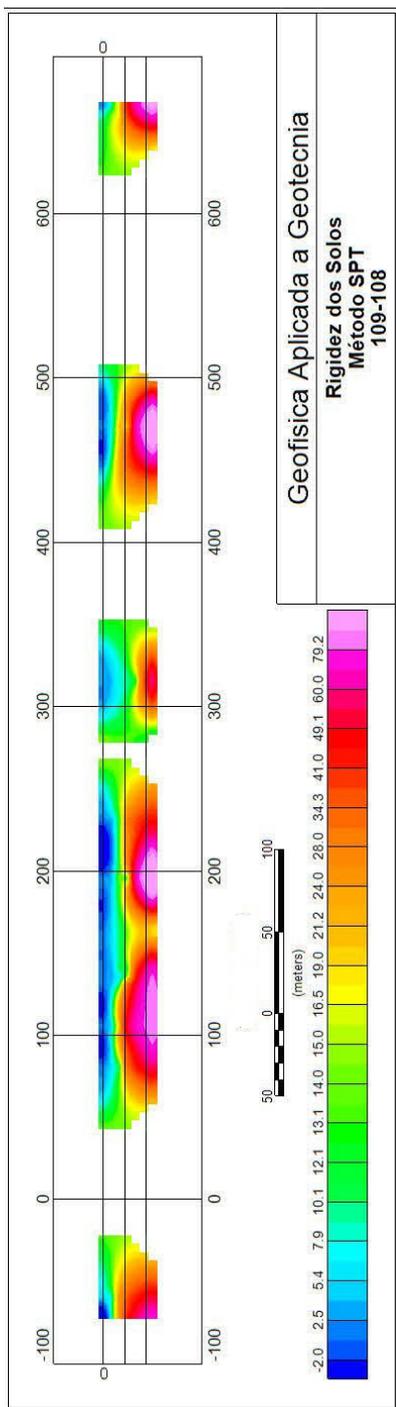


Figure 4. Interpolation results from SPT soundings through *Eixo Rodoviário Norte* at the same position of resistivity survey. Soundings weren't made near the gas station due to security reasons.

Comparing resistivity method to SPT information, similarities point that soil depth values average is 12 meters, but due to bound effects, map falsely show rocks outcrops around sounding sites. Beyond that, low resistivity anomaly situated south wasn't sampled by SPT.

## 8. Discussion

Other studies and data were analyzed to corroborate this study. Seimetz (2012) did electroresistivity and seismic surveys through whole *Eixo Rodoviário Norte* extension, including the same location of SqN 108 to SqN 109. The author also applied dipole-dipole array and electrodes spaced by 10 meters, but the survey was executed during dry season, when resistivity values expected are higher than rainy season due to less water flowing through soil pores.

Seimetz (2012) defined three resistivity classes: the superficial layer (soil) presented values between 283 and 1379  $\Omega$ .m and depth from 3 to 22 meters. Next layer presented resistivity from 1379 to 5118  $\Omega$ .m and depth couldn't be sampled by survey, but it can be inferred that its more than 23 meters. The third layer is coincident to the anomaly observed at this study, and presented resistivity values from 100 to 286  $\Omega$ .m.

Still according to Seimetz (2012), seismic refraction data modeled soil-rock interface. The superficial layer presents acoustic waves average speed of 346 m/s, and depth varies from 12 to 15 meters, while lower block's speed is 1881 m/s. This depth information differs from obtained in electroresistivity studies. It's important to observe that geophones' spacing used in Seimetz (2012) was 10 meters, which may not be adapted sample depth of 9 meters obtained in electroresistivity studies.

## 9. Conclusion

This work had successfully determined soil thickness of 9 meters in *Eixo Rodoviário Norte* at SqN 108-109 area, characterizing interface of red latosol-slate from Paranoá Group of 176 to 1447  $\Omega$ .m (soil) and 1447 to 3500  $\Omega$ .m (slate). This data was corroborated by SPT results and other electroresistivity studies at the same location, but seismic survey didn't present good correlation, probably due to geophone's spacing.

Next scientific steps for installation of a subway line in *Asa Norte* passes through employing other geophysical methods, expansion of soil database of Goiás state and Distrito Federal (that would help further engineering projects), three-dimensional imaging of soil in *Asa Norte* using electroresistivity and direct sounding to corroborate all geophysical and geotechnical data.

The anomaly of low resistivity values presented at inversion section is important for perforation process, once it remains unknown and in a considerable depth.

## 10. References

1. Alencar, J. M. S. Análise de Arranjos Eletródicos e de Janelas de Polarização Induzida na Identificação de Contaminantes do Aterro do Jockey Club de Brasília – DF. Trabalho Final de Graduação. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. Brasil. 65p. (2015)
2. Alves, P. C. Cartografia Geotécnica Para Obras Subterrâneas: Condições de Construções de Garagens Subterrâneas e Metrô no Plano Piloto de Brasília. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. 185p. (2009)
3. Campos, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases Para a Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos. *Revista Brasileira de Geologia*, 34(1):41-48. (2004)
4. Companhia de Planejamento do Distrito Federal - CODEPLAN, Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios – PDAD 2015/2016. Governo do Distrito Federal, Brasil, disponível em: <http://www.codeplan.df.gov.br/component/content/article/261-pesquisas-socioeconomicas/319-pdad-2015.html> (2016)
5. Dardenne, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Anais do..., Recife, v.2, p.597-610. (1978)
6. Departamento de Trânsito do Distrito Federal – DETRAN/DF – Desenvolvimento e Gerenciamento de Dados Estatísticos, disponível em: <http://www.detran.df.gov.br/o-detran/estatisticas-do-transito.html> (2017)
7. Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Levantamento de Reconhecimento dos solos do Distrito Federal. *Boletim Técnico*, EMBRAPA/SNLCS, Rio de Janeiro, 455p. (1978).
8. Geosoft. Oasis Montaj. Technical Notes, disponível em [www.geosoft.com](http://www.geosoft.com). (2003)
9. GEOTOMO RES2DINV Version 3.59. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. User's Manual, 149p. (2010)
10. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Censo demográfico 2000, disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/censo/>
11. Iris Instruments. Syscal Pro Standard and Switch (48 – 72 or 96) Version: 10 channels Resistivity-meter for Resistivity and IP measurements. User's manual. Terraplus USA Inc., 625 Valley Rd., Littleton, CO 80124. 66p. (2003)
12. Kulhawy, F. H. and Mayne, P. W., Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. Ithaca, New York: Electric Power Research Institute. pp. 2–17 to 2–26. EL-6800 (1990).
13. Loke, M. H. Electrical resistivity surveys and data interpretation. *In Encyclopedia of Solid Earth Geophysics* (pp. 276-283). Springer Netherlands. (2011)
14. Marini, O. J., Fuck, R. A., Danni, J. C., Dardenne, M. A. A evolução geotectônica da Faixa Brasília e do seu embasamento. *SBG, Simp. sobre o Cráton do São Francisco e Suas Faixas Marginais*, 1, 100-113. (1981)
15. Microsoft Bing Maps Database, disponível em <http://www.bing.com/maps>. (2017)
16. Seimetz, E. X., Estudos Geofísicos ao Longo do Futuro Trecho Norte do Metro de Brasília. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. Brasil. 116p. (2012)
17. Ward, O S. H. Resistivity and Induced Polarization Methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume 1: Review and Tutorial*. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, p.147-189. (1990)



# QUALIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO DE ALQUEVA ATRAVÉS DE MEDIÇÕES *IN SITU* E DETEÇÃO REMOTA DE SATÉLITE

GONÇALO RODRIGUES

*Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59. 7000-671  
Évora, Portugal, grodrigues@uevora.pt*

MIGUEL POTES

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, mpotes@uevora.pt*

MARIA JOÃO COSTA

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, mjcosta@uevora.pt*

RUI SALGADO

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, rsal@uevora.pt*

ALEXANDRA PENHA

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, mapenha@uevora.pt*

MARIA NOVAIS

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, hnovais@uevora.pt*

Monthly in situ measurements obtained in Alqueva reservoir, ongoing since February 2016, of the following parameters were used: Secchi depth and spectral attenuation coefficient. In order to achieve reliable remote detection methods for continuous monitoring and good spatial coverage of physical parameters affecting the water quality of reservoirs such as Alqueva, data obtained from sensors on board satellites such as Sentinel-2 (MSI) were used. To obtain estimates of water quality parameters in Alqueva reservoir, regression analyses were performed between in situ observations and various combinations of spectral reflectances measured by the MSI with atmospheric correction. The water quality parameters were mapped in the Alqueva reservoir in order to have total coverage.

## 1 Introdução

A região do Alentejo, localizada a sul de Portugal, é a maior região de Portugal representando uma área de aproximadamente um terço da área do país.

A albufeira de Alqueva situada na região do Alentejo é uma barragem situada no rio Guadiana, sendo um dos maiores lagos artificiais da Europa quanto à área superficial (250 km<sup>2</sup>). Este reservatório é crucial no armazenamento de água para utilização nos períodos de

seca, para fins industriais, domésticos e agricultura. A qualidade da água é fundamental nestes fins, sendo atualmente monitorizada através de amostras recolhidas e analisadas em laboratório. No entanto esta monitorização apresenta limitações espaciais e temporais que impedem uma monitorização completa dos parâmetros de qualidade da água.

Com o rápido desenvolvimento da tecnologia de deteção remota nos últimos anos, o mapeamento dos parâmetros de qualidade da água nos lagos interiores e deteção de variações nos parâmetros de qualidade da água, tem sido cada vez mais realizada com recurso a imagens de satélite [1,2].

A obtenção de estimativas da qualidade da água diretamente da imagem de satélite também pode permitir a identificação rápida de *blooms* de algas, bem como das variações temporais e/ou espaciais dos parâmetros de qualidade da água. A monitorização da qualidade da água com recurso à deteção remota envolve normalmente a determinação de uma relação entre refletâncias em certas bandas de comprimento de onda (ou combinações de bandas) e os parâmetros da água recolhidos e medidos no local ou em laboratório, tais como concentrações de clorofila, cianobactérias, turbidez, matéria orgânica dissolvida ou profundidade do disco de Secchi [3,4,5].

Potes *et al.* ([6]) desenvolveu um método para estimar concentrações de clorofila *a* e cianobactérias sobre o Alqueva, combinando refletâncias à superfície no Alqueva com recurso ao satélite MERIS e análises de laboratório. Para além destes dois parâmetros, o mesmo autor utilizou imagens de satélite MERIS de forma a obter estimativas de turbidez na albufeira, permitindo avaliar variações espaciais e temporais deste parâmetro no reservatório de Alqueva [7].

A radiação, ao penetrar na coluna de água, é atenuada por substâncias presentes no meio que se podem encontrar sob a forma de partículas em suspensão (células de fitoplâncton, detritos minerais e partículas sedimentares) e matéria orgânica dissolvida, influenciando desse modo, a transparência da água e variando a profundidade máxima que a radiação consegue penetrar na coluna de água, denominado de camada fótica.

A obtenção da profundidade da camada fótica pode ser realizada através da relação empírica que existe entre si e a profundidade medida a partir do disco de Secchi. O disco é um material oceanográfico tradicionalmente branco e com 30 cm de diâmetro que é largado na coluna de água para medir a profundidade na qual este deixa de ser visível. Esta medida obtida denomina-se de profundidade de Secchi. O coeficiente de atenuação espectral mede a atenuação da luz solar ao penetrar na água devido à absorção e difusão das partículas nele contidas. Na exploração de métodos de deteção remota fiáveis para a monitorização, em contínuo e com uma boa cobertura espacial, de parâmetros físicos e biológicos que afetam a qualidade da água de albufeiras como a de Alqueva, os dados obtidos através das missões Sentinel-2 (MSI) serão uma grande mais-valia.

Para além da alta resolução espacial, com 4 bandas de 10 m, 6 bandas de 20 m e 3 bandas de 60 m, apresenta alta revisitação, com cobertura global sistemática na região da albufeira de Alqueva de 2 a 3 dias com os 2 satélites do Sentinel-2 em operação. Assim, os parâmetros relacionados com a qualidade da água medidos em locais pré-definidos no Alqueva,

combinados com dados de satélite, tem como objetivo permitir a monitorização da superfície da água e a detecção de eventos, tais como, o aparecimento e desenvolvimento de *blooms* de algas, e ainda, a criação de alertas.

## 2 Observações e metodologia

### 2.1 Medições *in situ* de disco de Secchi e Coeficiente de atenuação espectral

Desde fevereiro de 2016 têm sido efetuadas medições no reservatório de Alqueva do coeficiente de atenuação e profundidade de Secchi. Procurou-se efetuar medições que permitam monitorizar a qualidade da água, e as suas variações temporais e espaciais, tendo-se procedido à medição aproximadamente a cada 30 dias, e em vários pontos no reservatório de Alqueva. Na figura 1 apresenta-se o mapa da localização dos pontos de medição. Alamos\_Plat, Mourão\_Plat e Montante\_Plat representam medições efetuadas em plataformas instaladas na albufeira, que permitem medir parâmetros de qualidade da água em locais com maior profundidade e longe das margens. Os restantes pontos representam pontos de medição em ancoradouros, localizados nas margens da albufeira.

Foram ainda efetuadas medições de barco, nomeadamente entre o ancoradouro de Montante (MontanteA) e a plataforma de Montante (Montante\_Plat).

A profundidade de Secchi mede a transparência da água e durante as medições obtiveram-se extremos de 0.4 m e 5 m de profundidade de Secchi. O coeficiente de atenuação espectral mede a dispersão da radiação pelas partículas presentes na água, obtendo-se valores compreendidos entre  $0.4 \text{ m}^{-1}$  e  $2.0 \text{ m}^{-1}$ . Os valores extremos de baixa transparência da água e alta atenuação da radiação solar na coluna de água, foram medidos no ancoradouro de Monsaraz no dia 19 de setembro de 2017, coincidindo com um evento de *bloom* de algas.

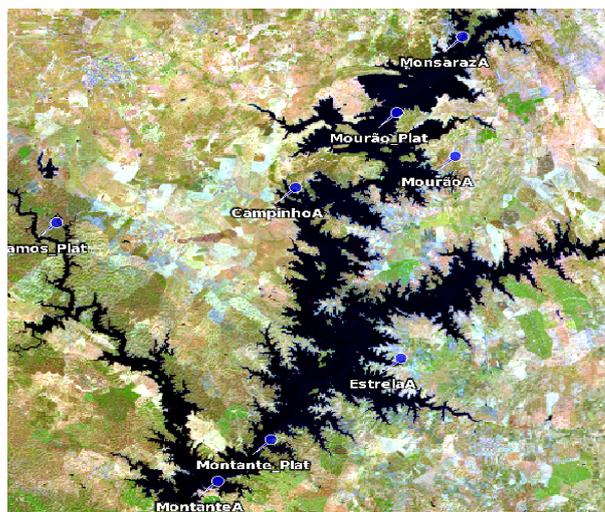


Figura 1. Localização dos pontos de medição no reservatório de Alqueva.

## 2.2 *Sentinel 2 – MSI*

O Instrumento MSI (MultiSpectral Instrument) a bordo do Sentinel-2 apresenta 13 bandas espectrais (visível, infravermelho próximo e infravermelho curto) com elevada resolução espacial, tendo 4 bandas com resolução de 10 m, seis bandas de 20 m e três bandas de 10m [8]. Este apresenta ainda boa resolução temporal com 2 - 3 dias de revisitação na área onde a albufeira de Alqueva se insere. Utilizou-se o algoritmo Sen2Cor desenvolvido pela ESA (European Space Agency) para converter as imagens do topo da atmosfera em refletâncias à superfície, com correção de cirrus no canal 1375 nm, vapor de água baseado nas bandas B8A e B9 (865 nm, 945 nm) e aerossóis [9].

O instrumento MSI do Sentinel 2 devido à sua elevada resolução espacial e temporal, permite a deteção de *blooms* de algas, sendo o índice *Maximum Chlorophyll Index* (MCI) um dos índices mais utilizados para esse efeito. Este índice é um indicador da quantidade de clorofila presente na água e tem sido explorado como uma ferramenta muito útil na identificação e monitorização de *blooms* de algas nos lagos interiores. No Sentinel-2 este índice é calculado com base nas bandas dos 665, 705 e 740 nm (banda 4, 5 e 6, respetivamente).

## 2.3 *Metodologia*

Os parâmetros considerados para a caracterização da qualidade da água foram o coeficiente de extinção e profundidade de Secchi. De forma a ter a iluminação adequada a estas medições, procurou-se limitar as medições diárias ao período entre as 10:00 h e as 16:00 h UTC. Vários estudos referem entre 3 a 8 dias como o tempo máximo utilizado entre medições no local e imagens de satélite para uma correta comparação, com condições meteorológicas estáveis e sem desenvolvimento de *blooms* de algas. [10,11]. No presente estudo, apenas foram selecionadas as imagens de satélite com diferença máxima de 1 dia em relação às medições *in situ* e em condições de céu limpo. Para obter os valores da refletância à superfície (nível L2A), o módulo de correção atmosférica Sen2Cor foi aplicado ao produto do nível L1C associado.

Relativamente à imagem MSI, selecionaram-se os 4 pixéis água mais próximos ao local de medição, sem influência dos pixéis adjacentes de terra, calculando-se o valor médio das refletâncias dos quatro pixéis selecionados. Finalmente, utilizaram-se de forma empírica algoritmos para estimar o coeficiente de extinção e profundidade de Secchi, relacionando as refletâncias à superfície obtidas das imagens de satélite com as medições no local.

Procedeu-se ainda à espacialização dos parâmetros de qualidade da água no reservatório de Alqueva de forma a ter cobertura total e não apenas pontual.

Para isso, utilizou-se as equações encontradas que melhor relacionam as bandas do MSI e medições *in situ*, calculando-se assim, as estimativas dos parâmetros de qualidade da água pixel a pixel. Na elaboração/análise de mapas e processamento estatístico recorreu-se à ferramenta SNAP disponibilizada pela ESA e à linguagem de programação Python. [12]

### 3 Resultados e discussão

#### 3.1 Algoritmos empíricos relacionando medições *in situ* e Sentinel-2

Relacionaram-se as refletâncias à superfície obtidas através do Sentinel-2 com medições de profundidade de Secchi e coeficiente de atenuação espectral, procurando empiricamente as melhores relações, tendo como fator de seleção o maior coeficiente de correlação. Na figura 2 e figura 3 mostram-se as relações e os algoritmos que melhor relacionam as refletâncias à superfície obtidas de satélite com medições no local. Para ambos os parâmetros, as relações com as bandas no visível apresentaram melhores resultados do que comparando com as bandas associadas a elevados comprimentos de onda.

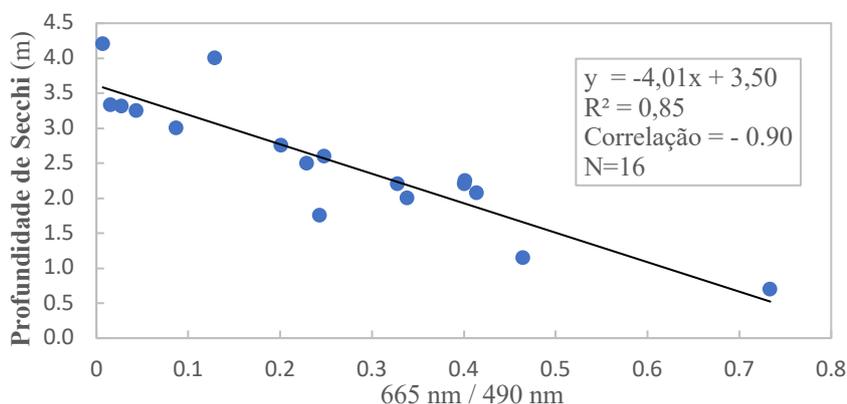


Figura 2. Relação entre a profundidade de Secchi (m) e a razão entre a banda 4 (665 nm) e a banda 2 (490 nm) do Sentinel-2.

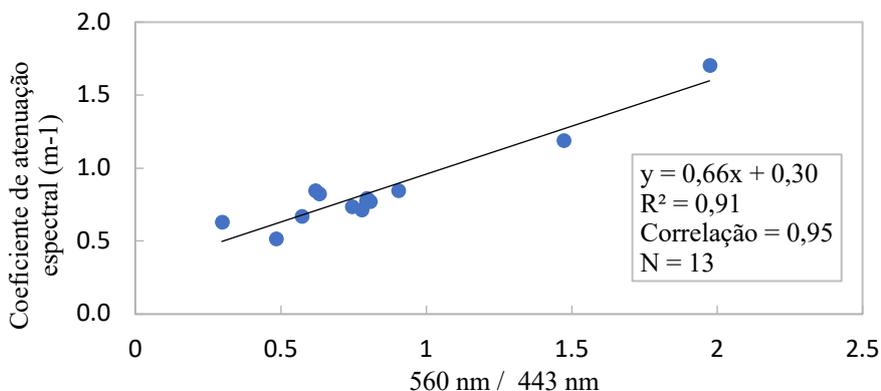


Figura 3. Relação entre o coeficiente de atenuação espectral ( $m^{-1}$ ) e a razão entre a banda 3 (560 nm) e a banda 1 (443 nm) do MSI.

Vários autores aferiram boas relações com altas correlações entre a transparência da água medida a partir do disco de Secchi, e a refletância na banda do azul e do vermelho [13].

Neste trabalho o melhor algoritmo encontrado na relação entre refletâncias à superfície através de imagens de satélite e medições da profundidade de Secchi foi também obtido para as bandas do azul e do vermelho, que no caso do Sentinel-2 é a banda 2 (centrada aos 490 nm) e a banda 4 (centrada nos 665 nm) respetivamente. Esta relação com a razão entre a banda do vermelho e do azul apresenta um elevado coeficiente de determinação e coeficiente de correlação na ordem de 0,9 (Figura 2).

As regiões espectrais correspondentes ao verde (centrado nos 560 nm) e ao azul escuro (443 nm) foram os que apresentaram melhores resultados na comparação com dados medidos de coeficiente de atenuação espectral, com coeficiente de determinação de 0,9 e correlação de 0,95. Dos 13 pontos considerados na comparação refira-se os valores extremos de dia 19 de setembro de 1.2 e 1.7 de coeficiente de atenuação espectral nos ancoradouros da Estrela e Monsaraz respetivamente, permitindo assim estimar o algoritmo com extremos, representando estes um período de fraca qualidade da água, associada à grande presença de algas.

### 3.2 Caso de estudo – Evento de bloom de algas

No Verão de 2017 desenvolveu-se um *bloom* de algas no reservatório de Alqueva, sendo que em agosto afetou a área principalmente na região mais a norte do Alqueva e nas margens à direita do reservatório (Figura 1). O *bloom* continuou a progredir para Sul, afetando em setembro e até meados de outubro praticamente toda a albufeira.

Com recurso ao Sentinel-2 é possível identificar o *bloom* de algas com recurso à imagem RGB (Figura 4 à esquerda) e com o índice *Maximum Chlorophyll Index*. Identifica-se nesta figura de dia 2 de outubro a boa capacidade do índice MCI em identificar os *blooms* de algas, com valores elevados deste índice a coincidir com locais de presença de algas na imagem RGB (Píxeis a verde).

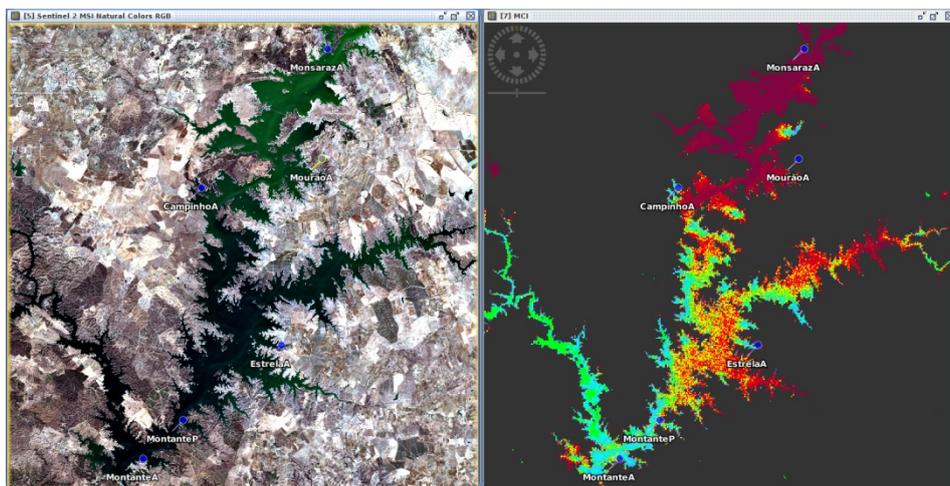


Figura 4. Imagem RGB (Esquerda) e índice *Maximum Chlorophyll Index* (Direita), dia 2 de outubro de 2017.

A presença de algas associada ao aumento de organismos fotossintéticos presentes na água tendem a fazer diminuir a transparência da água, aumentando também a sua turbidez. Espera-se, portanto, nessas condições uma diminuição da profundidade de Secchi (Associada à diminuição da transparência da água) e um aumento no coeficiente de atenuação espectral da água devido ao aumento da atenuação da radiação solar na coluna de água.

O mapeamento da profundidade de Secchi e coeficiente de atenuação espectral foi obtido utilizando as equações apresentadas que melhor relacionam as refletâncias à superfície obtidas através do MSI e medições no local, calculando pixel a pixel as estimativas dos parâmetros analisados para o dia 2 de outubro.

A figura 5 representa os mapas de profundidade de Secchi e coeficiente de atenuação espectral para dia 2 de outubro obtidos com recurso aos algoritmos desenvolvidos e explicados no sub-capítulo anterior, e aplicados para todos os pixels 100% água da albufeira, sem presença de nuvens, nem efeitos de reflexão dos pixels adjacentes de terra.

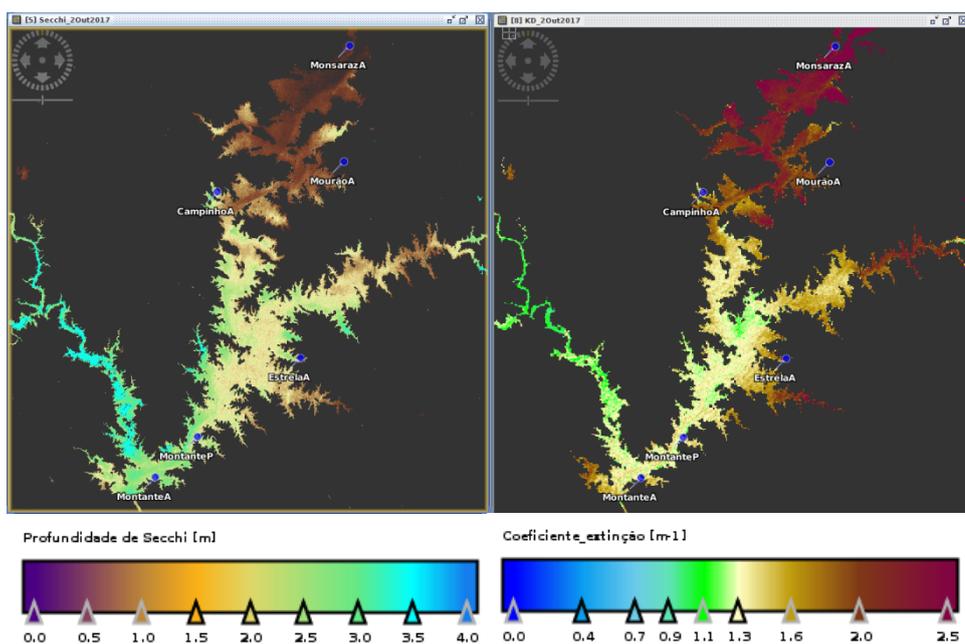


Figura 5. Mapa de Profundidade de Secchi (Esquerda) e de coeficiente de atenuação espectral (Direita), dia 2 de outubro de 2017

Verifica-se pela figura 5 valores muito elevados do coeficiente de atenuação espectral e baixas profundidades de Secchi entre Campinho e Monsaraz, e também nas margens à direita da albufeira. A área apresentando estimativas de melhor qualidade da água é encontrada para o ramal mais a Oeste da Albufeira, com estimativas de profundidade de Secchi superiores a 3 m e de coeficiente de extinção inferiores a  $1.3 \text{ m}^{-1}$ . Este facto estará provavelmente associado à não propagação do *bloom* de algas para este local, tendo assim menores partículas

dissolvidas, água com maior transparência (Maior profundidade de Secchi) e menor atenuação da radiação solar na coluna de água.

Verificando a relação entre os locais de maior presença de algas (Figura 4) com os de menores valores de profundidade de Secchi e valores de coeficiente de atenuação espectral mais elevados (Figura 5) identifica-se este como um bom indicador para estimar os dois parâmetros de qualidade da água analisados através dos algoritmos empíricos obtidos.

#### 4 Conclusões e trabalhos futuros

Desenvolveu-se uma metodologia baseada em imagens do Sentinel-2, relacionando refletâncias à superfície medidas com este satélite com medições *in situ* da profundidade de Secchi e coeficiente de atenuação espectral.

O algoritmo empírico proposto para estimar o coeficiente de extinção espectral na albufeira de Alqueva, baseado nas refletâncias à superfície do Sentinel-2, apresenta uma relação linear entre a razão de refletâncias da banda na região do verde (560 nm) e a do azul escuro (443 nm), com medições no local, apresentando um elevado coeficiente de determinação de 0,9 e correlação de 0,95. O algoritmo proposto para estimar a profundidade de Secchi na albufeira apresenta também uma relação linear entre refletâncias à superfície obtidas através de imagens de satélite e as medições no local, com a razão entre as bandas do vermelho (665 nm) e do azul (490 nm) aquelas que apresentam melhores resultados, com um coeficiente de determinação de 0,85 e correlação de 0,9.

Encontram-se ainda em curso, as medições mensais de profundidade de Secchi e do coeficiente de atenuação espectral, o que permitirá ter um período adequado de medições para a validação dos algoritmos empíricos obtidos.

No entanto, como apresentado, no evento de *bloom* de algas do dia 2 de outubro, o facto de se observarem valores baixos de profundidade de Secchi e valores elevados de coeficiente de atenuação espectral nos locais com maior presença de algas, será um forte indício da boa estimativa através dos algoritmos empíricos obtidos.

Um importante factor na utilização de dados de satélite, para aplicações nos lagos interiores, é o processo de correção atmosférica. Nesse sentido, como trabalho futuro, será feita a comparação da correção atmosférica feita pela ESA para os produtos do Sentinel-2 MSI com outros processos, como por exemplo, recorrendo-se a dados da AERONET para obtenção de vapor de água na coluna e aerossóis.

Apresenta-se ainda como trabalhos futuros, a obtenção de estimativas de qualidade da água com recurso a outros satélites como o instrumento OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) do Sentinel 3.

Pretende-se por fim, definir e relacionar variações nos parâmetros de qualidade da água com alterações nas condições meteorológicas, nomeadamente com o vento, a precipitação, a temperatura do ar e a radiação solar.

## Agradecimentos

Este trabalho é co-financiado pelo COMPETE 2020 através do projeto FCT (UID / GEO /04683/2013) com a referência POCI-01-0145-FEDER-007690, pelo projeto ALOP (ALT20-03-0145-FEDER-000), e ainda, pelo Programa Doutoral em Ciências da Terra e do Espaço.

## Referências

1. Barrett, D.; Frazier, A. Automated Method for Monitoring Water Quality Using Landsat Imagery. *Water* 2016, 8, 257
2. Chandrasekar, K.; Sessa Sai, M.V.R.; Roy, P.S.; Dwevedi, R.S. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. *Int. J. Remote Sens.* 2010, 31, 3987–4005
3. Allan, M.G.; Hamilton, D.P.; Hicks, B.J.; Brabyn, L. Landsat remote sensing of chlorophyll *a* concentrations in central North Island lakes of New Zealand. *Int. J. Remote Sens.* 2011, 32, 2037–2055
4. Nas, B.; Ekercin, S.; Karabork, H.; Berktaş, A.; Mulla, D.J. An application of Landsat-5TM image data for water quality mapping in Lake Beyşehir, Turkey. *Water Air Soil Pollut.* 2010, 212, 183–197.
5. Nechad, B.; Ruddick, K.G.; Park, Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 854–866.
6. Potes, M., Costa, M. J., Silva, J. C. B., Silva, A. M., and Morais, M.: Remote sensing of water quality parameters over Alqueva reservoir in the south of Portugal, *Int. J. Remote Sens.*, 32, 3373– 3388, 2011.
7. Potes, M., Costa, M. J. and Salgado, R. 2012. Satellite remote sensing of water turbidity in Alqueva reservoir and implications on lake modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1623-1633.
8. Drusch, M.; Del Bello, U.; Carlier, S.; Colin, O.; Fernandez, V.; Gascon, F.; Hoersch, B.; Isola, C.; Laberinti, P.; Martimort, P. Sentinel-2: ESA’s optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sens. Environ.* 2012, 120, 25–36
9. Uwe, M.-W.; Jerome, L.; Rudolf, R.; Ferran, G.; Marc, N. Sentinel-2 Level 2a Prototype Processor: Architecture, Algorithms and First Results. In Proceedings of the ESA Living Planet Symposium, Edinburgh, UK, 9–13 September 2013.
10. Kloiber, S.M.; Brezonik, P.L.; Olmanson, L.G.; Bauer, M.E. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sens. Environ.* 2002, 82, 38–47.
11. Olmanson, L.G.; Bauer, M.E.; Brezonik, P.L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota’s 10,000 lakes. *Remote Sens. Environ.* 2008, 112, 4086–4097.
12. Python Software Foundation (PSF). Python Language Reference; PSF: Wilmington, DE, USA, 2014.
13. P. L. Brezonik, L. G. Olmanson, M. E. Bauer, and S. M. Kloiber, “Measuring Water Clarity and Quality in Minnesota Lakes and Rivers: A Census-Based Approach Using Remote-Sensing Techniques,” *Cura Report.*, pp. 3–13, 2007.



## UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA EXTRATIVA DE MÁRMORE ORNAMENTAL NA OLARIA TRADICIONAL

TIAGO ALVES

*Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho 59, Évora, Portugal, tf.pereiraalves@gmail.com*

RÚBEN MARTINS, LUÍS LOPES

*Departamento de Geociências, Escola de Ciências e Tecnologias,  
Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho 59 Évora, Portugal, rubenvm@uevora.pt,  
lopes@uevora.pt*

CELSO GOMES

*Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro,  
Campus Universitário de Santiago, Aveiro, Portugal, cgomes@ua.pt*

MANUELA BAROSO, DULCE SANTOS

*CENCAL – Centro de Formação Profissiona para a Indústria Cerâmica,  
R. Luís Caldas Apartado 39, Caldas da Rainha, Portugal, analises@cencal.pt*

FRANCISCO ROSADO, LUIS ROSADO

*Olaria Xico Tarefa, R. João Anastácio da Rosa 4, Redondo, Portugal, olariaxt-redondo@sapo.pt*

The research presented in this article, was developed in the Department of Geosciences at the University of Évora, Cencal (Vocational Training Center for the Ceramic Industry of Caldas da Rainha) and Pottery XT, Redondo. The studies allowed to verify that the clay materials which exist in Vila Viçosa and Borba councils, may be used not only as a crude raw material, but mixed together in the composition of ceramic pastes and could be applied in the ceramics industry, namely the traditional pottery of Redondo and São Pedro do Corval, due to physical, chemical and mineralogical properties they feature.

### 1. Introdução

O esgotamento gradual dos barreiros de qualidade que alimentam a indústria tradicional de Redondo e São Pedro do Corval, leva a que os oleiros optem por adquirir pastas cerâmicas na região centro do país, ou mesmo a importá-las de Espanha. Acontece que junto destes importantes centros oleiros, existe a indústria extrativa de mármore ornamentais, com forte incidência nos Concelhos de Borba, Estremoz e Vila Viçosa onde ocorrem algumas centenas de pedreiras. Só por si, este dado justifica a pesquisa, caracterização e quantificação de matérias-primas secundárias, por vezes erroneamente classificadas como resíduos resultantes desta indústria.

Na fase de abertura das pedreiras existem matérias-primas argilosas resultantes da remoção de solo de cobertura denominadas de *terra rossa*, que correspondem a um tipo de solo residual, resultante da dissolução de calcários, com empobrecimento em sílica e enriquecimento em óxidos e hidróxidos de ferro. Já o processamento dos mármore com vista à sua transformação em chapa, ladrilhos e produtos por medida, gera matérias-primas não

argilosas (lamas carbonatadas, localmente designadas por “nata”) resultantes do corte, serragem e polimento das rochas carbonatadas (Fig. 1).



Fig. 1 – Depósito de “natas” localizado junto de um olival em Vila Viçosa.

Estes materiais são muitas vezes removidos e depositados a céu aberto junto às unidades extrativas, sem o cuidado necessário com vista a futuras utilizações, tanto na recuperação ambiental de pedreiras já esgotadas, como na aplicação como matéria-prima em outras indústrias, causando impactes visuais e ambientais. Os estudos efetuados consistiram na caracterização física, mineralógica, tecnológica e industrial de várias amostras de *terra rossa* recolhidas de três depósitos diferentes e, de lamas carbonatadas, utilizando-as como matérias-primas ou em diferentes percentagens na composição de pastas cerâmicas, com vista à sua aplicação em cerâmica, particularmente na olaria tradicional.

## 2. Metodologia do Trabalho

A investigação realizada consistiu nas seguintes etapas:

1. Campanha de amostragem;
2. Caracterização física, tecnológica e industrial das matérias-primas argilosas;
3. Formulação de pastas cerâmicas com diferentes contributos percentuais de cada uma das matérias-primas argilosas e não argilosas;
4. Caracterização tecnológica e industrial das pastas cerâmicas formuladas;
5. Ensaio industrial com as pastas cerâmicas formuladas.

Os locais de amostragem selecionados situam-se nos Concelhos de Borba e de Vila Viçosa (Fig. 2). Foram escolhidos por revelarem grandes possanças de *terra rossa*, e por se encontrarem preservados há décadas, dando garantias de muito reduzida contaminação por outros materiais. Estudos anteriormente realizados (Cunha, 2010) indicavam que os materiais destes depósitos revelavam boas características para aplicação cerâmica. Assim sendo, procedeu-se à recolha de três amostras de 30 Kg cada, que mais tarde foram submetidas a ensaios de caracterização mineralógica, tecnológica e industrial. Estes ensaios tiveram como objetivo compará-las entre si, aferindo as potencialidades da *terra rossa*. Atribuíram-se às amostras ensaiadas, as seguintes designações:

1. Borba VV – Depósito com um volume aproximado de 3000 m<sup>3</sup>, formado com material resultante da destapação das pedreiras localizadas junto à Estrada Nacional nº 255 entre Borba e Vila Viçosa;
2. Lagoa – Depósito formado com material resultante da destapação de uma pedreira junto ao Monte da Lagoa, no extremo Sudeste do anticlinal de Estremoz;
3. Biblio VV – Ao contrário dos dois anteriores, este não corresponde a um solo residual de alteração dos mármore, apresentando características diferentes da *terra rossa*. Resultou da escavação para as fundações da biblioteca municipal de Vila Viçosa. Este solo representa uma argila existente na interface entre a Formação de Mares (xistos e metaquartzitos negros) e a Formação Dolomítica (metadolomitos e metavulcanitos).

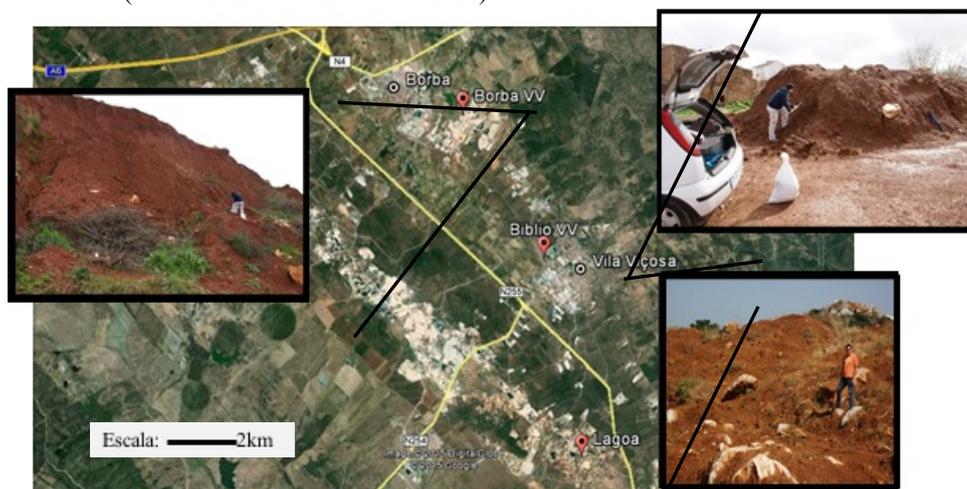


Fig. 2 – Localização dos três locais de amostragem sobre imagem do Google Earth obtida em 10/12/2017.

Após tratamento e beneficiação destes materiais, que incluiu a secagem, desagregação, partição e corte granulométrico a 0,250 mm, com o intuito de avaliar as suas potencialidades para aplicação cerâmica, as três amostras foram submetidas a diversos ensaios de caracterização física e química, que incluíram, entre outros, a Análise Granulométrica, o ensaio dos limites de consistência de Atterberg e a composição mineralógica.

A análise granulométrica realizou-se em duas fases distintas: uma primeira para partículas com diâmetro esférico equivalente superior a 0.075 mm com recurso a peneiração por via húmida com uma bateria de peneiros seguindo a especificação LNEC 239:1970, e outra para partículas com dimensões inferiores a 0.075 mm, com recurso a um granulómetro da marca Sedigraph 5300 com fonte de raios X.

Os limites de consistência de Atterberg incluíram o limite de liquidez, que corresponde à quantidade de água em percentagem, em que um solo passa do estado líquido para um estado plástico, e que foi determinado com recurso à norma Portuguesa NP 143:1969, utilizando para o efeito uma concha de Casagrande que representa a fronteira entre o estado líquido e o estado plástico de um solo. Este ensaio incluiu também a determinação do limite

de plasticidade, que corresponde ao teor de água necessário que um solo necessita para passar de estado plástico para um estado semi-sólido. Este, determina-se através da percentagem do teor de água em que cilindros de solo com cerca de 3 mm de diâmetro começam a romper quando rolados pela mão (palma da mão e dedos) numa placa de vidro.

Por último, a análise mineralógica, que permitiu identificar, caracterizar e quantificar os diferentes minerais existentes nas amostras, através da difração de raios X (DRX), com recurso a um difractómetro Bruker e modelo D8 Discover. Foi utilizada a radiação de  $K\alpha$  Cu ( $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ ), com a eliminação do  $K\beta$  Cu a ser conseguida através de um filtro de Ni e com as seguintes condições de operacionalidade: 40 mA e 40 kV, com um passo de 0,05 °/s e 1 s de medição em cada passo.

Os ensaios de caracterização tecnológica das amostras decorreram nas instalações do CENCAL, tendo sido submetidas a uma homogeneização do material sólido com água, com recurso a um misturador, ao que se seguiu um período de secagem em placas de gesso (Fig. 3A) e posterior conformação de provetes (Fig. 3B). Nestes avaliou-se a trabalhabilidade, extrudibilidade e conformação. Também se procedeu à determinação das percentagens de retração verde-seco, seco/cozido e total, resistência mecânica à flexão, percentagem de absorção e análise térmico-dilatométrica.



Fig. 3 – (A) Secagem em placa de gesso; (B) Conformação de provetes através de extrusão.

Para cada amostra, com base no procedimento de controlo do processo nº C – 00 – 98 do CENCAL, numa extrusora Macocer, produziram-se 80 provetes perfeitamente lineares (100 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro) e sem deformações, para a realização dos ensaios de Retração Húmido-Seco (% Ret. H/S), Retração Seco-Cozido (% Ret S/C) e Retração Total (% Ret Total), Absorção de água (% Abs), Resistência Mecânica à Flexão (RMF) e Análise Térmica-Dilatométrica.

Os ensaios de Retração Húmido-Seco, Retração Seco-Cozido e Retração Total, foram realizados segundo a norma de controlo de processo do CENCAL C-07-98, e serviram para determinar a percentagem de retração, ou contração, dos materiais argilosos durante processos de secagem e cozedura. Neste ensaio, utilizaram-se provetes nos quais após

extrusão, se fez uma marca com 50 mm de espaçamento com recurso a um paquímetro, sujeitando-os depois a uma secagem a 110 °C, e diferentes temperaturas de cozedura, calculando depois os valores de retração de acordo com as seguintes equações (Eq. 1, Eq. 2, Eq. 3).

$$\text{Eq. 1 - \% de Retração H/S} = \frac{Ch-Cs}{Ch} \times 100;$$

$$\text{Eq. 2 - \% de Retração S/C} = \frac{Cs-Cc}{Cs} \times 100;$$

$$\text{Eq. 3 - \% de Retração total} = \frac{Ch-Cc}{Ch} \times 100$$

Onde:

- % de Retração H/S significa a percentagem de retração húmido-seco;
- % de Retração S/C representa a percentagem de retração seco-cozido (tendo sido obtidos os valores para cada um dos patamares de temperatura);
- % de Retração total significa a percentagem de retração total;
- Ch, representa a distância inicial entre os dois sulcos em milímetros (neste caso, 50 mm);
- Cs, representa a distância entre os dois sulcos após secagem (mm);
- Cc, representa a distância entre os dois sulcos após a cozedura dos provetes às diferentes temperaturas (mm).

A Resistência mecânica à flexão, baseada no processo de controlo C-04-98 do CENCAL, foi realizada com recurso ao sistema de “three point bending”, ou dobramento em três pontos, utilizando provetes de teste cilíndricos com 100 x 10 mm, secos e cozidos a diferentes patamares de cozedura. Este ensaio realizou-se numa máquina de teste Zwick, onde os provetes eram colocados sobre dois suportes fixos, com espaçamento de 70 mm entre si. Em seguida, aplicava-se sobre o centro do provete, a uma velocidade de 150 mm/min, uma pressão de carga, até que o mesmo chegasse ao seu ponto de rutura.

Já a absorção de água, foi determinada através do processo de controlo C-03-98 do CENCAL, com recurso a provetes de teste obtidos através do ensaio de resistência mecânica à flexão. Em primeiro lugar, foi medido o peso de provetes secos e cozidos, sendo colocados de seguida em copos de água, ficando totalmente imersos durante 24 h. Após este período de tempo e com o auxílio de um plano removeu-se a água superficial destes provetes, pesando-os em seguida. A percentagem de absorção foi determinada através da diferença entre o peso húmido e seco dos provetes, dividido pelo peso seco dos provetes.

### 3. Resultados dos Ensaios de Caracterização Física e Tecnológica das Matérias-primas

Os resultados obtidos no ensaio de Análise mineralógica constam no Quadro nº 1. Neste caso, adotou-se a classificação dimensional das partículas segundo Atterberg, limitando as frações em intervalos dimensionais, fazendo ainda uso do parâmetro D50, que identifica o diâmetro esférico equivalente ( $\mu\text{m}$ ) correspondente a 50% das partículas das amostras. A

distribuição dimensional do grão de uma argila, ou matéria-prima cerâmica, influencia parâmetros como a plasticidade, a variação do volume durante a secagem e cozedura, a absorção de água após cozedura, a resistência mecânica à flexão.

Quadro nº 1 - Parâmetros granulométricos das matérias-primas argilosas.

<b>Fração Granulométrica</b>	<b>Biblio VV</b>	<b>Borba VV</b>	<b>Lagoa</b>
<b>Fração arenosa (%) (0,02 – 2 mm)</b>	25	24	18
<b>Fração siltosa (%) (0,002 – 0,02 mm)</b>	21	17	16
<b>Fração argilosa (%) (&lt; 0,002 mm)</b>	54	59	66
<b>Parâmetro D<sub>50</sub> (µm)</b>	15	25	10

Após a análise do Quadro nº 1, verifica-se que todas matérias-primas apresentam uma elevada percentagem de partículas de dimensões das argilas, variando entre os 54% na matéria-prima Biblio VV e os 66% na matéria-prima Lagoa.

A plasticidade, avaliada através dos limites de Atterberg (Quadro nº 2), corresponde à capacidade que um dado mineral argiloso possui em se deformar por ação de uma força, sem entrar em rutura, mantendo a forma adquirida quando essa força deixa de se exercer, quando se adiciona água à argila em determinada quantidade. É um parâmetro importante em todas as fases do processo cerâmico, onde valores muito elevados podem levar à ocorrência de defeitos nos corpos cerâmicos.

Quadro nº 2 – Valores dos Limites de Consistência e Índice de plasticidade.

<b>Amostra</b>	<b>Limites de Consistência</b>		
	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
<b>Biblio VV</b>	47,50	26	21,50
<b>Borba VV</b>	38	25	13
<b>Lagoa</b>	49	24	25

Através da análise do Quadro nº 2 e segundo a classificação de Atterberg, verifica-se que as matérias-primas Biblio VV e Lagoa são consideradas de alta plasticidade (IP >

20%), enquanto que a matéria-prima Borba VV é considerada de média plasticidade (IP entre 10 e 20%).

A determinação da composição mineralógica numa matéria-prima mineral é fundamental, pois vai determinar o seu potencial para aplicação cerâmica. No Quadro nº 3, são visíveis as percentagens dos minerais não argilosos (quartzo e feldspatos potássicos), dos minerais argilosos (caulinite e ilite) e de um hidróxido de ferro (goethite) que compõem as três matérias-primas argilosas.

Quadro nº 3 – Percentagem de espécies minerais após espectrometria por difração de raios X.

<b>Amostras</b>	<b>Quartzo (%)</b>	<b>Feldspato Potássico (%)</b>	<b>Caulinite (%)</b>	<b>Ilite (%)</b>	<b>Goethite (%)</b>
<b>Biblio VV</b>	15,04	3,05	6,42	67,33	8,16
<b>Borba VV</b>	36,10	11,56	9,98	38,18	4,19
<b>Lagoa</b>	31,85	5,46	15,32	39,04	8,32

Através da análise do Quadro nº 3, constata-se que a maioria das amostras têm percentagens consideráveis de hidróxido de ferro, responsável pela acentuada cor avermelhada que apresentam, sendo importantes nas pastas cerâmicas, porque podem atuar como fundentes e componentes refratários. A existência deste hidróxido de ferro, juntamente com a presença de feldspato potássico, é muito importante uma vez que ajuda a baixar o ponto de fusão da sílica, representada nas três amostras por diferentes percentagens de Quartzo. De todas as amostras, é a matéria-prima Borba VV que apresenta maior quantidade de Quartzo, fazendo dela a matéria-prima mais magra, ou seja, menos plástica. Já a elevada percentagem de Ilite (mineral argiloso), faz da matéria-prima Biblio VV o material mais gordo, ou seja, com maior plasticidade. No fundo, quanto menor for o teor de Quartzo, mais gorda e plástica será a matéria-prima em questão, facilitando assim a sua extrudibilidade e trabalhabilidade.

Em relação à extrudibilidade e trabalhabilidade, as amostras Biblio VV e Lagoa são as que apresentaram maior índice de plasticidade e foram as que melhor se extrudiram, com pressões que variaram entre 1,5 Bar e 2 Bar, revelando boa conformação dos provetes. A amostra Borba VV foi a que apresentou piores resultados de trabalhabilidade, extrudibilidade (com pressões próximas de 3,5 Bar e 4 Bar) e conformação, tendo havido dificuldade na obtenção de corpos de prova perfeitos, uma vez que a maioria apresentava superfícies porosas e gretadas. Este resultado já era esperado devido aos baixos valores de plasticidade e composição mineralógica, mais rica em quartzo.

A secagem é uma das fases mais importantes de todo o processo cerâmico, devido aos reajustes naturais e às variações de volume verificadas nos corpos cerâmicos até atingirem

uma humidade de equilíbrio. No Quadro nº 4, são apresentados os valores referentes ao ensaio de contração ou retração húmido/seco (% Ret. H/S) e os valores de resistência mecânica à flexão (RMF) obtidos a partir dos provetes conformados depois de secos, em estufa ventilada, a uma temperatura máxima de 110 °C.

Quadro nº 4 - Propriedades cerâmicas após secagem.

Amostra	Secagem em estufa a 110 °C	
	RMF (Kgf/cm <sup>2</sup> )	% Ret. H/S
<b>Biblio VV</b>	23,06	5,94
<b>Borba VV</b>	21,45	5,55
<b>Lagoa</b>	33,25	5,58

Após a análise dos valores, verifica-se que a amostra Lagoa é a que apresenta maior valor de resistência mecânica à flexão. De acordo com estes dados e, tendo em conta os baixos valores de resistência mecânica à flexão (23,06 Kgf/cm<sup>2</sup> e 21,45 Kgf/cm<sup>2</sup>) verifica-se que as amostras Biblio VV e Borba VV se comportaram como matérias-primas argilosas mais magras, nas quais a composição mineralógica se revela fundamental para explicar esta propriedade. Em relação às retrações é possível afirmar que elas se situam dentro dos valores normais (inferiores a 10 %) e que todas as amostras apresentam percentagens semelhantes de retração húmido seco, sendo que o maior valor pertence à amostra Biblio VV.

Após a secagem na estufa ventilada a 110 °C, os provetes foram introduzidos em dois fornos elétricos, programados com diferentes gradientes térmicos, conforme a temperatura final de cozedura previamente estabelecida (900 °C, 1000 °C e 1100 °C) de forma a avaliar os parâmetros de retração seco/cozido (% Ret. S/C), retração total (% Ret. Total), resistência mecânica à flexão (RMF (Kgf/cm<sup>2</sup>) e por último a absorção (% Absorção de Água) (Quadro nº 5).

Em todos os patamares de cozedura, relativamente ao parâmetro da retração seco/cozido, é a amostra da matéria-prima Biblio VV a que apresentou o maior valor de retração verificando-se também a mesma tendência para o valor de retração total. Este valor é explicado pela baixa percentagem de quartzo e elevada percentagem de minerais argilosos, que faz desta matéria-prima um material muito plástico. Por outro lado, a amostra Borba VV apresenta os valores mais baixos de retração seco/cozido e de retração total, visto ser a pasta mais magra, e com maior percentagem de quartzo.

Quadro nº 5 - Propriedades cerâmicas das matérias-primas cozidas a 900 °C, a 1000 °C e 1100 °C.

Patamar de Cozedura	% Ret. S/C	%Ret.Total	RMF (kgf/cm <sup>2</sup> )	% Abs
<b>900 °C</b>	Biblio VV – 1,86 Borba VV – 1,08 Lagoa – 0,97	Biblio VV – 7,46 Borba VV – 6,24 Lagoa – 7,03	Biblio VV – 136,92 Borba VV – 78,60 Lagoa – 116,00	Biblio VV – 25,1 Borba VV – 20 Lagoa – 22
<b>1000 °C</b>	Biblio VV – 8,88 Borba VV – 4,54 Lagoa – 6,92	Biblio VV – 14,68 Borba VV – 9,70 Lagoa – 11,88	Biblio VV – 319,58 Borba VV – 161,08 Lagoa – 291,93	Biblio VV – 9,3 Borba VV – 12,3 Lagoa – 9,6
<b>1100 °C</b>	Biblio VV – 11,19 Borba VV – 5,12 Lagoa – 9,46	Biblio VV – 16,31 Borba VV – 10,88 Lagoa – 14,17	Biblio VV – 409,78 Borba VV – 184,84 Lagoa – 374,34	Biblio VV – 4,3 Borba VV – 8,5 Lagoa – 4,9

Quanto à resistência mecânica à flexão são as amostras com maior componente argilosa que apresentam valores mais elevados, com destaque para a amostra Biblio VV. Em relação à absorção de água todas as amostras apresentaram valores elevados para esta propriedade, onde, a capacidade absorvente de alguns minerais argilosos e a distribuição granulométrica das amostras, são os fatores que mais contribuem para tal facto. Neste parâmetro, é visível que com o aumento da temperatura de cozedura, existe um aumento dos valores de resistência mecânica à flexão, com especial destaque para as matérias-primas Biblio VV e Lagoa. Novamente, verifica-se que a matéria-prima Borba VV é de todas, aquela que apresenta valores de resistência mecânica à flexão mais baixos. Já em relação à absorção de água, verifica-se que todas as amostras estudadas apresentaram valores inferiores em patamares de cozedura superiores.

Desta forma, é possível concluir que os parâmetros analisados nos três patamares de cozedura (resistência mecânica à flexão, absorção de água, retração seco/cozido e retração total) apresentam resultados proporcionais. Ou seja, quando se obtêm maiores valores de retração total, também se verificam maiores valores de resistências mecânicas e, por conseguinte, menores absorções, refletindo assim estruturas mais fechadas e com menores porosidades à medida que se aumenta a temperatura de cozedura.

#### 4. Resultados do Ensaio Industrial

O ensaio industrial teve lugar na Olaria XT do Mestre Xico Tarefa, na Vila de Redondo. O material utilizado foi obtido através da peneiração por via seca (corte granulométrico a 250 µm), homogeneizado de forma manual, para aumentar a sua consistência. Este processo foi repetido até que a matéria-prima apresentasse uma boa plasticidade de forma a ser trabalhada e moldada na roda de oleiro. As amostras entregues ao Mestre Xico Tarefa foram espalhadas no chão da olaria para perderem alguma da humidade que ainda conservavam (Fig. 5). Apesar dos valores encorajadores nos ensaios de caracterização física, os resultados das resistências mecânicas a cru (Fig. 4), revelaram baixos valores, suscitando dúvidas, em relação ao seu comportamento após conformação. No

entanto, depois de conformadas as peças e de acordo com a opinião do Mestre Xico Tarefa, todas as matérias-primas ensaiadas possuem trabalhabilidade e qualidade para serem utilizadas em olaria, de forma individual ou através da mistura entre elas.



Fig. 4 – Ensaio de resistência mecânica à flexão com recurso a uma prensa (Cencal).



Fig. 5 – Conformação de uma peça na roda do oleiro.

A amostra Biblio VV oferece uma excelente resposta às diferentes solicitações, comportando-se como “mais que uma pasta”, prevendo-se ainda que eventualmente deverá ser a mais resistente ao choque durante o processo da cozedura. Segundo o mestre Xico Tarefa, devido à excelente trabalhabilidade e plasticidade, existe a possibilidade da mesma se poder misturar com outros barros mais fracos nas proporções 4:1, 3:1 ou 2:1. A amostra Lagoa, tal como a amostra Biblio VV, comporta-se como “mais que uma pasta” tendo o Mestre Xico Tarefa referido que até com a adição de “terra da rua”, se conseguiria formular uma boa pasta para aproveitamento cerâmico. No entanto, alerta para o facto de que pela alta plasticidade não será recomendável para a conformação de peças muito abertas, referindo ainda que a mesma é mais plástica e trabalhável que as outras e que a pasta industrial tradicionalmente usada por si.

A amostra Borba VV foi a que revelou um pior comportamento. Apesar de ser trabalhável, é necessário um pouco mais de astúcia para o fazer. Tal facto explica-se por ser a pasta com maior percentagem de quartzo, classificando-se por isso como a matéria-prima mais magra de todas. Apesar de tudo, também é a mais refratária, e por isso pode ser utilizada como barro de chama ou louça de chama.

De forma a evitar contrações bruscas dos corpos cerâmicos já conformados, a secagem das peças ocorreu numa zona da olaria, onde existe alguma corrente de ar e prateleiras suficientemente espaçadas (Fig. 6), para que se verifique a secagem homogénea de todas as peças. Apesar de a secagem ter ocorrido no mês de julho, quando se registam temperaturas elevadas e consequentemente uma secagem heterogénea e demasiado rápida, não se registaram defeitos relevantes nos corpos conformados.



Fig. 6 – Secagem das peças conformadas.

As peças foram cozidas em forno elétrico durante quase sete horas, valores típicos da indústria da olaria tradicional. Ou seja, o forno à temperatura inicial de 15 °C foi aquecendo lentamente à velocidade de 180 °C/h até atingir a temperatura de 900 °C (cerca de 5h:30m). Seguiu-se uma hora de cozimento até aos 930 °C, a que se seguiu um patamar de 10 min nesta temperatura. Após a cozedura, não se verificaram defeitos nas peças cerâmicas, que evidenciaram ainda as tonalidades características de cada uma, tais como castanho-escuro (Biblio VV), cor-de-laranja (Lagoa) e cor-de-laranja avermelhado (Borba VV) (Fig. 7).



Fig. 7 – Aspectos cromáticos das matérias-primas após cozedura: A – Biblio VV; B – Borba VV; C – Lagoa.

## 5. Formulação e caracterização tecnológica das pastas cerâmicas

Uma pasta cerâmica é uma mistura de matérias-primas e componentes que lhe confere propriedades de forma a melhorar o desempenho aquando da sua aplicação industrial. A formulação deve permitir que as mesmas possam ser trabalhadas por diferentes métodos, permitindo a manipulação das peças em cru, proporcionando ainda que os materiais cozidos apresentem as características ideais para as tarefas que foram concebidos.

Nesta perspetiva, a partir dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização física, tecnológica e industrial atrás referidos e com base nas potencialidades das suas reservas aparentes no terreno, formularam-se cinco pastas cerâmicas diferentes (Quadro nº 6) com o

objetivo de gerar pastas com trabalhabilidades diferentes, adicionando ainda areia como desengordurante (de forma a reduzir os altos valores de retração durante a secagem e cozedura, contrariando a plasticidade excessiva, de forma a possibilitar a abertura do corpo cerâmico) e lamas carbonatadas (“nata”), também como desengordurante.

Quadro nº 6 – Pastas cerâmicas formuladas.

Referência da pasta	Composição
<b>Pasta nº 1</b>	50 % Borba VV + 50 % Biblio VV
<b>Pasta nº 2</b>	80 % Biblio VV + 20 % Areia siliciosa
<b>Pasta nº 3</b>	65 % Lagoa + 35 % Borba VV
<b>Pasta nº 4</b>	88 % Lagoa + 12 % Nata de mármore
<b>Pasta nº 5</b>	65 % Lagoa + 23 % Borba VV + 12 % Nata de mármore

Para efeitos de comparação e por forma a evidenciar o real potencial para aproveitamento cerâmico das pastas formuladas, foram utilizados alguns valores de referência de duas pastas cerâmicas comerciais denominadas Pasta Nacional (Interpastas) e Pasta Estrangeira (Collet) que são tradicionalmente utilizadas pelos oleiros de Redondo e São Pedro do Corval na conformação das peças que produzem.

A Pasta Collet é mineralogicamente constituída por: Quartzo (45 %), Feldspato Potássico (5 %), Feldspato Sódico (5 %), Calcite (10 %), Ilite (15%), Hematite (Óxido de Ferro, 5%) e por Goethite (Hidróxido de Ferro, 5%). Por sua vez, a composição mineralógica da Interpastas apresenta: Quartzo (40 %), Feldspato Potássico (10 %), Feldspato Sódico (10 %), Calcite (15 %), Hematite (5 %), 25 % de minerais argilosos como a Caulinite (15 %) e Ilite (10 %). A caracterização tecnológica foi feita nas instalações do CENCAL, e a metodologia dos ensaios foi executada seguindo os seus procedimentos de controlo.

No Quadro nº 7 são apresentados os valores de retração húmido/seco (% Ret. H/S) e resistência mecânica à flexão (RMF), dos provetes conformados com as pastas cerâmicas, e após secagem numa estufa à temperatura máxima de 110 °C.

Quadro nº 7 - Propriedades cerâmicas dos provetes secos à temperatura de 110 °C.

Amostras	Pasta Collet	Interpastas	Pasta nº 1	Pasta nº 2	Pasta nº 3	Pasta nº 4	Pasta nº 5
Secagem a 110 °C							
RMF (Kgf/cm <sup>2</sup> )	96,88	69,27	16,40	17,75	22,35	24,67	23,28
% Ret H/S	5,50	5,74	6,2	7,3	5,81	5,55	5,60

Em relação à resistência mecânica à flexão, verifica-se que as pastas cerâmicas formuladas apresentam valores bastante inferiores em relação às pastas cerâmicas comerciais. A retração húmida ou verde/seco também revela valores muito semelhantes entre todas as pastas, com o pormenor das pastas nº 1 e nº 2 se destacarem com percentagens superiores às das pastas industriais, podendo estes valores serem explicados pela elevada plasticidade da matéria-prima argilosa Biblio VV (constituente de ambas as pastas). A retração verde/seco indica também o grau de compacidade das pastas por redução dos poros que inicialmente estavam preenchidos com água. Tal facto deveria favorecer maiores resistências mecânicas, o que não se observa. Estes resultados, algo intrigantes felizmente não tiveram comprovação aquando do ensaio industrial, visto as peças, depois de conformadas, terem sido manuseadas com facilidade e sem deformações.

A cozedura dos provetes foi feita com recurso a determinados gradientes térmicos e respeitando diferentes patamares de temperatura. Enquanto nas pastas formuladas neste estudo se adotaram três patamares de temperatura (850 °C, 950 °C e 1050 °C), as pastas comerciais foram sujeitas a patamares de temperatura diferentes (870 °C e 970 °C). Assim sendo, nesta comparação de resultados, apenas serão tidos em conta os valores correspondentes aos dois primeiros patamares de cozedura. No Quadro nº 8 apresentam-se os valores de retração seco/cozido (% Ret. S/C), de retração total (% Ret. total), de resistência mecânica à flexão (RMF) e de absorção de água (% Abs) dos provetes em dois patamares de cozedura.

Em relação à resistência mecânica à flexão, verifica-se que as pastas cerâmicas formuladas continuam a apresentar valores bastante inferiores em relação às pastas cerâmicas comerciais, sendo contudo bastante similares entre si. Quanto aos valores de retração seco/cozido verifica-se que as pastas cerâmicas comerciais apresentaram dilatações, devidas eventualmente à composição carbonatada (Cunha, 2010). Relativamente à retração total, são as pastas cerâmicas formuladas que apresentam maiores valores, com destaque para a pasta cerâmica nº 3.

Quadro nº 8 – Propriedades cerâmicas dos provetes após cozedura.

Amostra	Patamar de Cozedura – 850°C				Patamar de Cozedura – 950°C			
	RMF (kgf/cm <sup>2</sup> )	% Ret Seco/Co zido	% Ret total	% Abs	RMF (kgf/c m <sup>2</sup> )	% Ret Seco/Co zido	% Ret total	% Abs
<b>Collet</b>	251,02	- 0,38	5,20	18	390,1	0,32	5,75	16
<b>Interpast</b>	181,94	- 0,34	5,35	15	259,0	0,47	6,06	14
<b>Pasta nº 1</b>	83.50	0.36	6.18	24.2	256.3	7.56	12.46	12.6
<b>Pasta nº 2</b>	70.45	0.15	6.94	26	256.2	5.3	11.49	15.7
<b>Pasta nº 3</b>	69.97	1.23	7.12	24	208.0	6.53	12.73	14.9
<b>Pasta nº 4</b>	67.97	0.87	6.08	25.2	269	3.5	8.7	11.9
<b>Pasta nº 5</b>	73.38	0.85	6.1	26	274	4.6	9.3	10.7

Relativamente ao segundo patamar de cozedura, considerando a resistência mecânica à flexão, o maior valor pertence à pasta Collet e o menor à pasta nº 3. Com a exceção desta, as restantes pastas formuladas apresentam valores similares e até superiores (pasta nº 5), quando comparadas com a pasta Interpastas. Assim, conclui-se que em termos de resistência mecânica à flexão, as pastas elaboradas possuem um comportamento melhor que a pasta Interpastas.

No parâmetro da retração seco/cozido são as pastas Collet e Interpastas que apresentam menores valores. Em relação a esta propriedade, verifica-se ainda que as pastas nº 4 e nº 5 apresentam valores inferiores. Tal facto deve-se à utilização da “nata” de mármore, que contribuiu para a redução dos valores deste parâmetro. Relativamente à retração total, todas as pastas cerâmicas formuladas apresentam um valor superior, quando comparadas com as pastas comerciais.

Por último, em relação à percentagem de absorção de água, os valores obtidos nas pastas formuladas, são inferiores aos das pastas comerciais. Relativamente a este parâmetro são as pastas cerâmicas com “nata” de mármore na sua constituição, aquelas que apresentam uma percentagem inferior de absorção, quando comparadas com todas as outras pastas cerâmicas. Tal facto deve-se novamente à utilização desta matéria-prima não argilosa, que contribuiu para a redução dos valores deste parâmetro, através do fecho da porosidade dos corpos cerâmicos.

As pastas nº 4 e nº 5 foram ainda submetidas a um terceiro patamar de temperatura, de forma avaliar o comportamento da “nata” de mármore a altas temperaturas de cozeduras. Esta “nata” (Fig. 8) é essencialmente constituída por calcite (> 98% de carbonato de cálcio,  $\text{CaCO}_3$ ), resultante da separação gravítica, acelerada por efeito de tratamento químico com agentes flocculantes, das águas utilizadas durante o corte e polimento do mármore, representando uma prática comum pelas serrações existentes em todo o Anticlinal de Estremoz. Em relação a este terceiro e último patamar de cozedura, no Quadro nº 7 constam os valores referentes às propriedades cerâmicas dos provetes cozidos até 1050 °C.

Quadro nº 7 - Propriedades cerâmicas das pastas cerâmicas nº 4 e nº 5, cozidas a 1050 °C.

Amostra	% Ret. S/C	% Ret. Total	RMF (Kgf/cm <sup>2</sup> )	% Absorção de água	Cor
Pasta nº 4	5,05	9,81	308,87	8,5	Vermelho
Pasta nº 5	4,83	9,66	325,56	9	Vermelho

Tal como anteriormente, relativamente à retração seco/cozido e à retração total, ambas as amostras evidenciaram retrações similares que são em grande parte influenciadas pelas percentagens da matéria-prima argilosa Lagoa, presente em ambas as amostras. Tal como seria de esperar o aumento de retrações, com o incremento da temperatura e em particular quando se atingem valores elevados, tem a ver com a formação da fase Espinela a 980 °C, o surgimento de fases líquidas a partir da fusão do Feldspato a 1050 °C, com a

vitrificação da Ilite e o crescimento da Mulite, levando ao aumento da resistência mecânica e à diminuição da porosidade.

Na resistência mecânica à flexão verifica-se um pequeno aumento em relação aos valores obtidos no segundo patamar de cozedura, passando de 269 Kgf/cm<sup>2</sup> para 308,87 Kgf/cm<sup>2</sup> na pasta nº 4 e de 274 Kgf/cm<sup>2</sup> para 325,56 Kgf/cm<sup>2</sup> na pasta nº 5. Já em relação à absorção de água, as amostras apresentaram valores mais baixos quando comparados ao segundo patamar de cozedura, o que é considerado normal, devido ao fecho dos poros do corpo cerâmico.

## 6. Ensaio industrial das pastas cerâmicas

Tal como sucedeu no ensaio das matérias-primas, também nas pastas cerâmicas formuladas, os resultados das resistências mecânicas em cru, revelaram baixos valores, inferiores aos das matérias-primas, suscitando algumas dúvidas, em relação ao seu comportamento durante a fase de conformação e manuseamento das peças.

Em relação à pasta nº 1, o Mestre Xico Tarefa referiu que esta pasta cerâmica oferece uma excelente resposta às diferentes solicitações durante a conformação, ressaltando que é possível subir as peças em altura (Fig. 9) devido à sua elevada plasticidade. Segundo o Mestre Oleiro, nesta pasta pode-se aplicar o ditado popular “rir ao fazer, chorar ao cozer”. Ou seja, apesar de salientar a sua excelente trabalhabilidade, o Mestre Xico Tarefa alerta para a possibilidade de surgirem ruturas nas peças durante os processos de secagem e cozedura. Apesar dos baixos valores de resistência mecânica em cru (16,40 Kgf/cm<sup>2</sup>), as peças conformadas com esta pasta cerâmica são facilmente manipuláveis sem se danificarem.

Relativamente à pasta cerâmica nº 2, o Mestre Xico Tarefa referiu que, tal como a anterior, oferece uma boa resposta às diferentes solicitações durante a conformação, e que, apesar dos baixos valores de resistência mecânica à flexão em cru (17,75 Kgf/cm<sup>2</sup>), também é possível manipular as peças sem contudo as danificar. Em relação à trabalhabilidade, o Mestre Xico Tarefa aconselha a que esta matéria-prima não seja utilizada em peças muito grandes, devido à sua alta plasticidade, considerando-a até mais plástica que a pasta anterior. Apesar desta pasta já possuir 20 % de areia siliciosa, o Mestre Oleiro aconselha a mistura com outros inertes (areias, “nata” de mármore, matérias-primas argilosas com menor plasticidade) em proporções até 20 %, tornando-a menos gorda (menos plástica) e igualmente apta para o processo cerâmico. Este comentário é importante, uma vez que a matéria-prima Biblio VV é a que apresenta menor volume de reserva aparente no terreno, possibilitando uma enorme margem de progressão em estudos futuros e novas formulações.

Na pasta cerâmica nº 3, o Mestre Xico Tarefa referiu que de todas é a que revelou melhor comportamento, assemelhando-se inclusive às pastas que habitualmente utiliza, todavia revelando melhor trabalhabilidade. Refere ainda que é mais refratária que as anteriores, podendo inclusive aguentar melhor o choque térmico relacionado com os processos de secagem e cozedura. Devido à dificuldade que existe em encontrar depósitos de barro que suportem chama direta e que aguentem o choque térmico, esta pasta cerâmica pode ser utilizada de forma a suprimir essa deficiência.

Relativamente à pasta cerâmica nº 4, o Mestre Xico Tarefa referiu que esta pasta cerâmica, tal como a anterior (semelhante às pastas industriais), oferece uma boa resposta às diferentes solicitações durante a conformação, e que, apesar dos baixos valores de resistência mecânica à flexão em cru ( $24,67 \text{ Kgf/cm}^2$ ), também é perfeitamente possível manipular as suas peças, sem lhes imprimir deformações.

Por último, na pasta cerâmica nº 5 foi referido que, tal como a pasta nº 4, oferece uma boa resposta às diferentes solicitações durante a conformação, considerando-a contudo menos plástica que a anterior.



Fig. 8 – "Nata" de mármore.



Fig. 9 – Conformação de peças cerâmicas a partir da pasta nº 1.

De uma forma geral, todas as pastas cerâmicas, apresentam excelente trabalhabilidade, chegando inclusive a igualar-se às pastas normalmente comercializadas e utilizadas pelo Mestre Oleiro. Segundo o Mestre Xico Tarefa, e estabelecendo um "ranking" das pastas cerâmicas formuladas no âmbito deste estudo, a pasta nº 3 considera-se como a melhor de todas, seguindo-se as pastas nº 4 e nº 5 (havendo pouca diferença entre elas) e por último as pastas nº 2 e nº 1. Este "ranking" estabelecido pelo Mestre Xico Tarefa é muito importante, uma vez que as pastas que revelaram o melhor comportamento foram elaboradas com as matérias-primas argilosas mais abundantes e com maiores reservas na região (Lagoa e Borba VV).

Após a secagem foi ainda aplicado nas peças, um engobe feito à base de caulino. O engobe não é mais do que uma tinta aplicada na olaria tradicional após a fase inicial da secagem da peça, podendo ser de cor vermelha, almagre e branca, servindo para a tingir. Este material é aplicado antes da primeira cozedura de forma a obter uma boa ligação à pasta, ajudando a evitar problemas relacionados com a porosidade, tornando a peça impermeável após a aplicação de vidro numa segunda cozedura.

Após a secagem à temperatura ambiente, as peças foram cozidas num forno elétrico durante um período aproximado de 6 h. O forno à temperatura inicial de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  foi aquecendo lentamente à velocidade de  $180 \text{ }^\circ\text{C/h}$ . Após quatro horas de cozedura que elevaram a temperatura do forno para  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , a temperatura aumentou de novo (à velocidade de  $180 \text{ }^\circ\text{C/h}$ ) até se atingir a temperatura máxima entre  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $920 \text{ }^\circ\text{C}$ . De forma a estabilizar as tensões internas nas peças foi ainda adaptado um patamar de 10 a 15 min entre  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $920 \text{ }^\circ\text{C}$ , no

final das seis horas de cozadura. Depois de cozidas, as peças foram vidradas, por imersão numa tina contendo uma mistura de água com um vidro transparente, referência V 202 da Vitripher. O gradiente térmico durante a cozadura da vidragem foi idêntico ao da cozadura da peça, tendo-se atingido a temperatura máxima entre 940 °C e 950 °C, de forma a estabilizar as tensões internas nas peças, possibilitando uma aderência total do vidro. Foi ainda adotado um patamar de vinte minutos à temperatura máxima, no final das seis horas de cozadura. De forma geral e após observação das peças, concluiu-se que houve muita boa adesão do vidro, não se notando defeitos de enrolamento.

Apesar dos resultados bastante satisfatórios, em algumas peças das pastas nº 4 e nº 5 foram detetados alguns defeitos como o fissuramento e a rotura por choque térmico. No entanto, e de acordo com o Mestre Oleiro, tais defeitos não surgem por características associadas às pastas cerâmicas formuladas, podendo os mesmos resultarem de variadíssimas causas entre elas o choque térmico, provocado pelas resistências do forno elétrico, a secagem irregular e muito rápida das peças no interior da olaria, o “cansaço” da pasta nº5 durante o processo de homogeneização, e alguns processos de aquecimento e arrefecimento demasiado rápidos à temperatura de 573 °C.

## 7. Conclusões

O presente estudo colocou em evidência a existência de matérias-primas argilosas e não argilosas que, apesar de necessitarem de alguma preparação e beneficiação, ficam à disposição dos oleiros, com depósitos existentes a cerca de 20 km de Redondo e 40 km de São Pedro do Corval. Dos resultados tecnológicos correspondentes às matérias-primas argilosas e pastas cerâmicas, concluiu-se que todas as amostras estudadas apresentaram uma excelente trabalhabilidade, tendo-se obtido ótimos resultados durante a extrusão e conformação dos respetivos provetes.

Apesar dos baixos valores de resistência mecânica à flexão em cru, é possível manipular as peças cerâmicas conformadas sem contudo as danificar ou causar defeitos. É de realçar que, com o aumento das temperaturas de cozadura até 950 °C se verifica um aumento dos valores de resistência mecânica à flexão.

Já os valores mais baixos de retração seco/cozido e retração total, estão associados à utilização da “nata” de mármore, que funciona como desengordurante, diminuindo a plasticidade das pastas. De acordo com a opinião do Mestre oleiro, todas mostraram excelente trabalhabilidade, referindo ainda a semelhança das amostras com as pastas industriais, tradicionalmente usadas por si. Após a cozadura de “chacota”, verificou-se que quase todas as peças cerâmicas se apresentavam sem defeitos e com uma elevada tenacidade, com destaque para a matéria-prima Biblio VV (Fig 10). Apesar de, em algumas peças conformadas com as pastas formuladas ter ocorrido o aparecimento de fissuras e fendilhamento, estes não foram causados pelas matérias-primas utilizadas. Ou seja, de acordo com o Mestre Xico Tarefa, estes defeitos poderão ter origem num choque térmico muito forte, uma vez que as pastas se apresentavam com um teor de humidade elevado e foram colocadas muito próximas às resistências do forno.



Fig. 10 – Conjunto de peças vidradas realizadas com as pastas formuladas neste estudo.

Após os trabalhos desenvolvidos foi possível provar que tecnicamente é viável a aplicação da “terra-rossa” em olaria tradicional, porque as matérias-primas argilosas Biblio VV, Borba VV e Lagoa, possuem características que as tornam matérias-primas cerâmicas de qualidade, quando utilizadas por si só ou misturadas entre si, com adição de matérias-primas não argilosas. De uma forma geral, os valores são de facto promissores, com alguns deles a rivalizarem com os resultados correspondentes a pastas comerciais.

Importa ainda destacar a matéria-prima Biblio VV, que apesar de ter apresentado um valor de resistência mecânica em seco baixo, os valores obtidos após cozedura e a sua dureza, permitem classificar este material como de qualidade excepcional. Nela destaca-se ainda a sua coloração, cuja tonalidade castanha escura é muito rara nas cerâmicas produzidas no Alentejo, revelando um aspeto estético bastante apelativo.

## Referências

- [1] Alves, T. F. L. P. (2015) – “*Formulação de Pastas Cerâmicas a partir de Matérias-Primas Argilosas dos Concelhos de Vila Viçosa e Redondo para a Produção de Olaria Tradicional*”. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica, Universidade de Évora, 251p.
- [2] Cunha, A. M. F. (2010) – “*Aplicação na Olaria de Terra Rossa de Ocorrências no Anticlinal de Estremoz*”. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica, Universidade de Évora, 122p.
- [3] Gomes, C. F. (1988) – “*Argilas, o que são e para que servem*”. Fundação Calouste Gulbenkian, 457p.
- [4] Martins, R. S. V. (2007) – “*Investigação científica e tecnológica de matérias-primas minerais de Santiago do Cacém (Alentejo) e das suas potencialidades para a indústria cerâmica*”. Universidade de Évora, Departamento de Geociências, Tese de Doutoramento, 457p.

# APLICAÇÃO DO ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS ÀS MINERALIZAÇÕES DA ZONA DE OSSA-MORENA. OS CASOS DE MOCIÇOS, FERRARIAS E MIGUEL VACAS.

MIGUEL MAIA.

*Universidade de Évora  
ICT – POLO ÉVORA  
Évora, Portugal – mcmaiageo@gmail.com*

VICENTE, S.

*Universidade de Évora  
ICT – POLO ÉVORA  
Évora, Portugal – sandrorpvicente@gmail.com*

PEDRO NOGUEIRA.

*Universidade de Évora  
ICT – POLO ÉVORA  
Évora, Portugal – pnogas@gmail.com*

O presente trabalho enquadra-se no projeto ZOM3D – Modelos metalogénicos da Zona de Ossa-Morena: Valorização de Recursos Minerais do Alentejo. Este projeto procura a construção dos modelos metalogénicos 3D para os jazigos minerais selecionados recorrendo a diversos métodos de estudo na área das geociências, assim, é necessário a colheita de vários dados mineralógicos, geoquímicos e termodinâmicos para a compreensão da dinâmica de circulação de fluidos que potencializou a riqueza de mineralizações da Zona de Ossa-Morena (ZOM). Para este estudo foram utilizadas técnicas de microtermometria e petrografia de inclusões fluídas em quartzos das ocorrências minerais de Cu dos Mociços (quartzo em pente zonado), Miguel Vacas (quartzo crustiforme) e Ferrarias (quartzo em pente). Este estudo permitiu obter os primeiros resultados de temperatura e composição de fluidos associados a mineralizações na ZOM que poderão ter tido um papel fundamental em algumas das principais ocorrências minerais desta zona geotectónica.

Palavras-chave: Inclusões fluídas, mineralizações de Cu, geologia económica, fluidos hidrotermais.

## 1 Introdução

Mociços, Miguel Vacas e Ferrarias correspondem a ocorrências minerais de Cu localizadas no distrito de Évora, pertencem ao sector tectono estratigráfico de Estremoz-Barrancos (Oliveira et al., 1991) caracterizado pelas formações Formação de Terena, Formação de Russianas, Formação dos Xistos Raiados, Formação dos Xistos com Nódulos, Formação de Colorada, Formação de Barrancos, Formação de Ossa, com idades compreendidas entre o Devónico e o Câmbrico, e o complexo ígneo de Barrancos de idade incerto. Sendo os três casos exemplos de mineralizações de Cu que pertencem ao mesmo sector, torna-se importante avaliar a sua semelhança ou diferença no que respeita ao(s) evento(s) mineralizante(s) que potenciaram a formação de jazigos minerais no caso de Mociços e Miguel Vacas, sendo Ferrarias somente uma ocorrência mineral reconhecida.

## 2 Petrografia e Microtermometria das Inclusões Fluídas

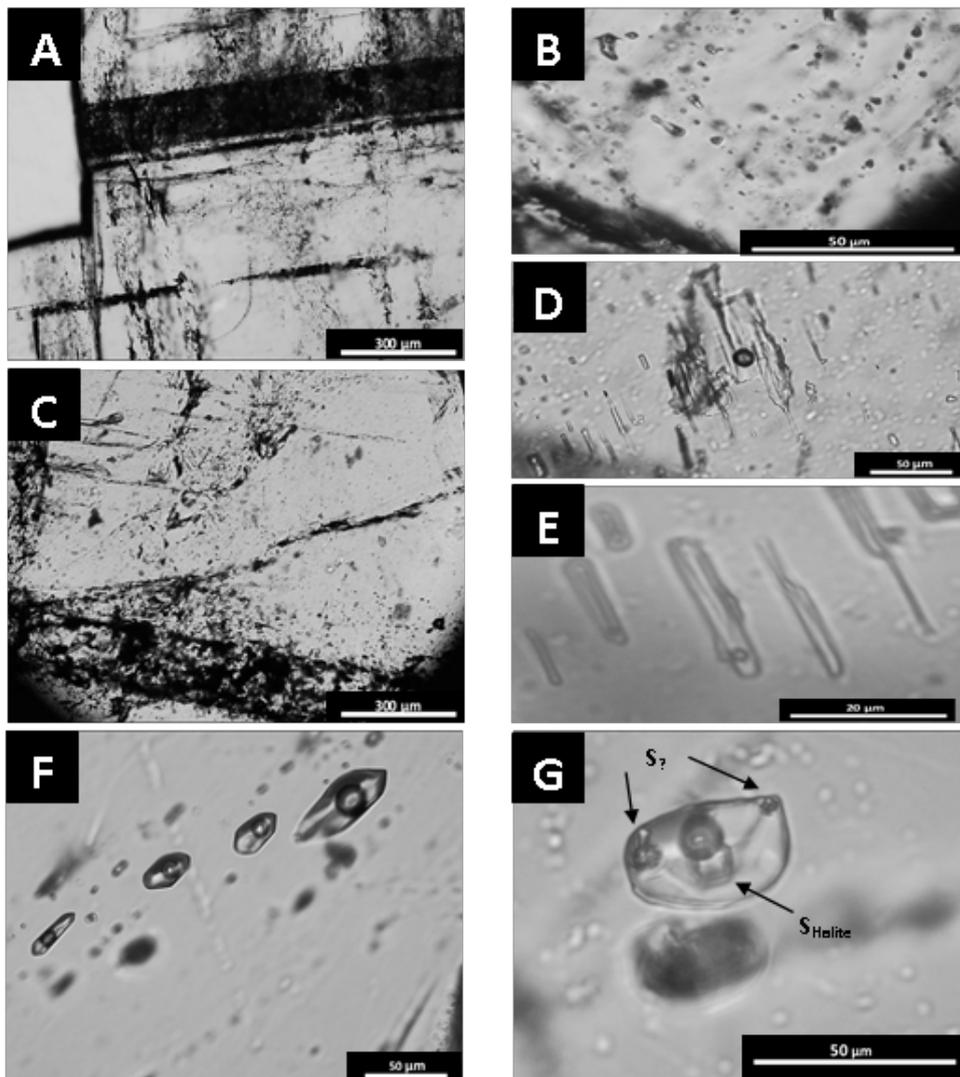


Figura 1. A. Zonamento dos cristais de quartzo com inclusões primárias e secundárias (Mociços). B. Grupo de inclusões fluídas primárias (Ferrarias). C. Detalhe de inclusões paralelas ao zonamento do quartzo (Mociços). D. Inclusão secundária bifásica irregular (Mociços). E. Inclusões primárias bifásicas, de forma tubular (Mociços). F. Inclusões primárias bifásicas em cristal negativo (Ferrarias). G. Inclusão multifásica (Ferrarias).

## 2.1. Mociços

As inclusões fluídas foram estudadas em quartzos, que apresentam claras orlas de crescimento (Fig. 1/A), de amostras do filão principal mineralizado. Foi possível identificar planos de inclusões fluídas primárias (Fig.1/E), secundárias (Fig.1/D) e pseudo-secundárias. O estudo microtermométrico (Fig.2) permitiu verificar que existe um conjunto dominante de IF com temperaturas de homogeneização (Th) com valores compreendidos entre os 92°C e os 160°C ( $Th_{L+V \rightarrow L}$ ). As salinidades das IF revelaram valores mais heterogêneos com valores compreendidos entre os 6,3 e os 30,1 w(NaCl-eq.). Esta variação deve-se à heterogeneidade evidente de tipos de inclusões fluídas bifásicas (L + V) e trifásicas (L+V+S<sub>Halite</sub>).

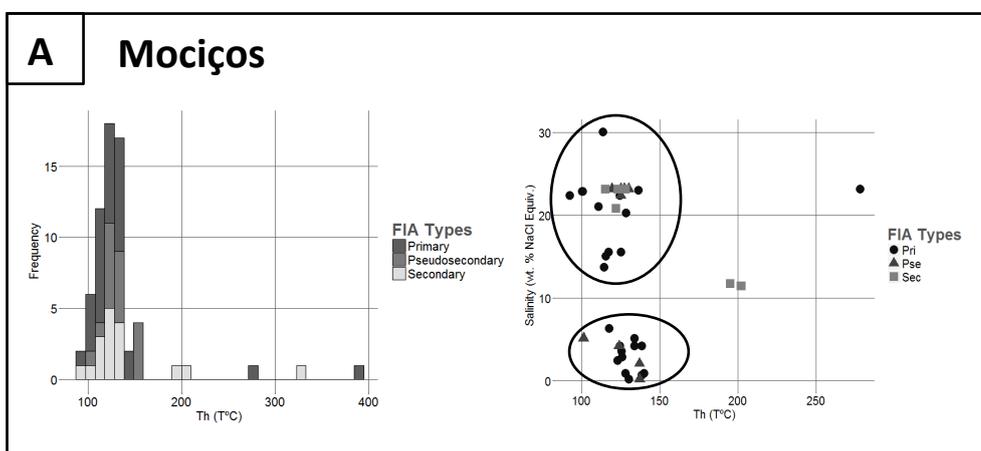


Figura 2. Histograma da frequência de temperaturas de homogeneização (Th) consoante o tipo de inclusões (esquerda). Gráfico de dispersão Salinidade vs Th(°C) (direita). FIA – Associações de inclusões fluídas.

## 2.2. Ferrarias

Foram estudadas inclusões fluídas aprisionadas em cristais de quartzos euédricos que permitiram a identificação de alinhamentos de IF primárias (Fig.1/F), secundárias e grupos de inclusões primárias. Foi identificado um plano de inclusões fluídas (PIF) de inclusões secundárias multifásicas (Fig.1/G) L+V+S(Halite)+S(?) com  $Th_{L+V \rightarrow L}$  compreendidas entre os 267,9°C e os 286,8°C e salinidades entre os 30,1 e os 32,9 w(NaCl-eq.), a salinidade destas inclusões foi obtida através da temperatura de homogeneização da halite ( $Th_{Halite}$ ) com temperaturas entre os 157,5 °C e os 222,3 °C. Um outro PIF de inclusões trifásicas (L+V+S?) foi estudado com  $Th_{L+V \rightarrow L}$  a variar entre os 264,6°C a 274,5°C e salinidades entre os 2,57 – 3,39 w(NaCl-eq.). Foram identificados dois alinhamentos de IF primárias bifásicas muito semelhantes entre si em termos de morfologia e tipologia. Estas inclusões apresentam CO<sub>2</sub> na sua fase líquida e gasosa com temperatura de fusão do CO<sub>2</sub> ( $T_{mCO_2, V+S \rightarrow L+V+S}$ ) entre -

62,3°C e – 66,7°C e a temperatura de fusão dos clatratos ( $T_{mchl}$ ) entre os 7,1°C e os 8,8°C, com salinidades (obtidas pela fusão do gelo) entre os 6,3 – 14,04 w(NaCl-eq.) Os valores de  $Th_{L+V \rightarrow L}$  variam entre 263,8°C e os 285,4°C.

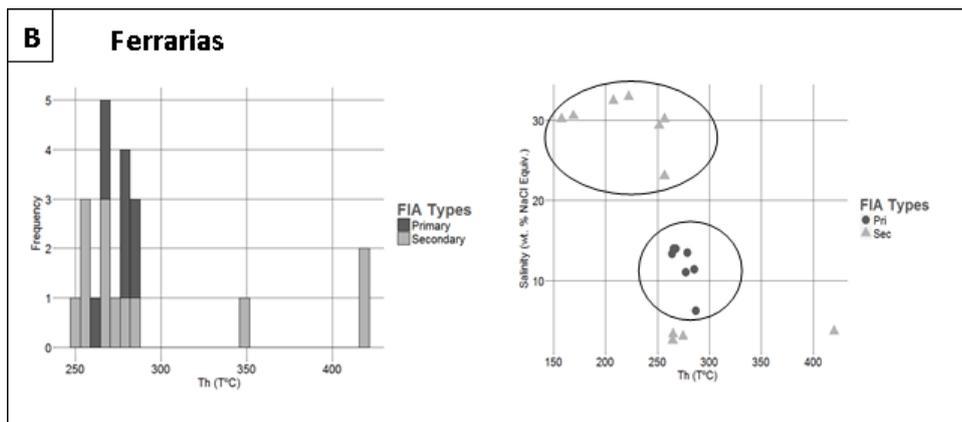


Figura 3. Histograma da frequência de temperaturas de homogeneização (Th) consoante o tipo de PIF (esquerda). Gráfico de dispersão Salinidade vs Th(T°C) (direita).

### 2.3. Miguel Vacas

As amostras de quartzo estudadas pertencem à zona mineralizada, provenientes de amostras de sondagens realizadas na antiga mina. Nestas amostras existe uma clara paragênese mineral entre mineralização de calcopirite e pirite com o quartzo estudado. As IF contidas nestes quartzos são de dimensões muito pequenas (1 $\mu$ m - 5 $\mu$ m) com uma dispersão abundante de PIF primários e secundários (Fig.1/E), o tamanho das inclusões é um manifesto impedimento para que seja feito um estudo mais extensivo nas amostras tratadas até ao momento. A microtermometria revela preliminarmente fluidos com temperaturas mínimas de aprisionamento entre os 210°C e os 310°C (Fig. 4) com salinidades compreendidas entre os 19.53 e 22.78 w(NaCl-eq.). Importa referir que os dados obtidos até ao momento não são suficientes para que se possa traçar qualquer conclusão definitiva relativamente aos fluidos em interação nesta mineralização.

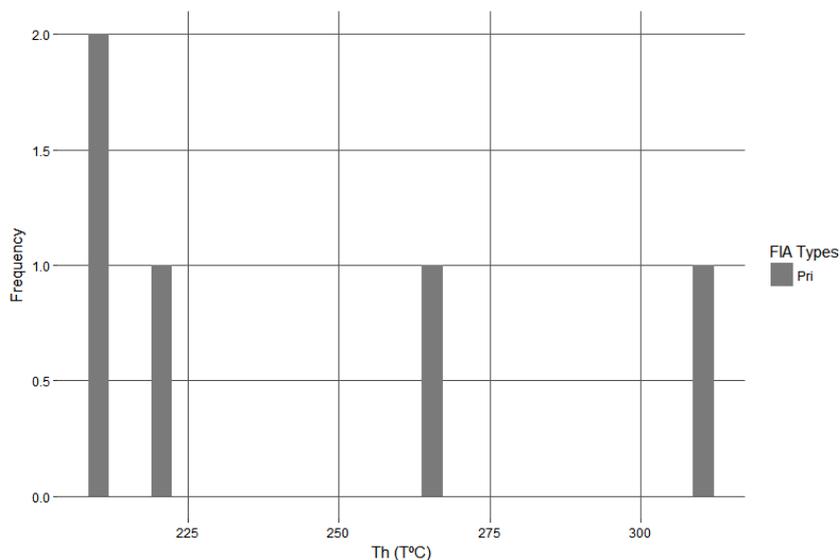


Figura 4. Histograma da frequência de temperaturas de homogeneização (Th) resultante do estudo das IF de Miguel Vacas.

### 3 Conclusões

Os resultados demonstram que no caso dos Mociços existe a presença de fluido(s) de temperatura mais baixa ( $100^{\circ}\text{C}$ - $150^{\circ}\text{C}$ ) em que foi possível separar grupos de inclusões hipersalinas e inclusões de baixa salinidade. Este sistema será um sistema do tipo  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$ , e os valores de Th e salinidade são idênticos aos descritos para jazigos do tipo VMS (“Vulcanogenic Massive Sulphides”) com inclusões mais ao menos salinas abundantes e sem  $\text{CO}_2$  detetável em microtermometria (Bodnar, 2014). O caso de estudo das Ferrarias revela dois grupos de inclusões distintos (Fig.3), IF primárias com  $\text{CO}_2$ , IF secundárias trifásicas  $\text{L}+\text{V}+\text{S}(?)$  e multifásicas  $\text{L}+\text{V}+\text{S}(\text{Halite})+\text{S}(?)$ . As IF primárias com presença de  $\text{CO}_2$  aparentam uma ligação com Th mais altas e têm salinidades mais baixas, e pertencem a um sistema  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{CO}_2$ - $\text{NaCl}$ . Por outro lado, as inclusões secundárias apresentam salinidades bastante mais elevadas (Fig.3) e a estas estão unicamente associadas IF trifásicas e multifásicas, a fase  $\text{S}(?)$  não foi identificada uma vez não homogeneizar ( $\text{Th}>600^{\circ}\text{C}$ ), podendo corresponder a cristais de carbonatos. Futuramente, a identificação destas fases sólidas será feita recorrendo a espectroscopia de Raman. Assim as IF primárias pertencem ao sistema  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{CO}_2$ - $\text{NaCl}$  e as secundárias a um sistema  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$  hipersalino (salmoura) o que levanta questões relativamente à passagem de um fluido rico em  $\text{CO}_2$  primário para um fluido secundário do tipo salmoura, revelando que o mesmo deveria estar em ebulição para ocorrer uma separação entre fases volátil e não volátil.

No caso de Miguel Vacas os dados recolhidos são insuficientes para uma projeção relevante, no entanto desenha-se um fluido primário de temperatura e salinidade mais elevada. Na figura 5 é apresentada uma projeção dos dados recolhidos nas amostras estudadas em Ferrarias e Mociços por forma a ser possível a compreensão da real diferença entre os fluidos de ambas as mineralizações. Desta forma, com esta imagem é possível perceber as principais diferenças descritas nos pontos anteriores. Miguel Vacas não se encontra projetado neste diagrama uma vez que, não se nos parece que os dados obtidos até ao momento apresentem uma validade suficientemente consistente para que se os possam comparar com as mineralizações de Mociços e Ferrarias.

Complementar este estudo com outras técnicas de estudo e diferentes áreas é um objetivo essencial, sendo que, para isso o decorrer dos trabalhos terão de ser realizados com um maior número de amostras e em áreas mais abrangentes, nomeadamente com amostragem de sondagens realizadas em campanhas de sondagens com fins de prospeção.

O trabalho aqui apresentado foi apresentado e publicado no VII Congresso de Jovens Investigadores/LEG 2017 e foi submetido e aprovado um *follow-up* para apresentação e publicação no XIV Congresso Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, este último trabalho apresenta já alguns resultados relativamente às análises por espectroscopia de Raman nas fases sólidas e gasosas das inclusões fluídas estudadas.

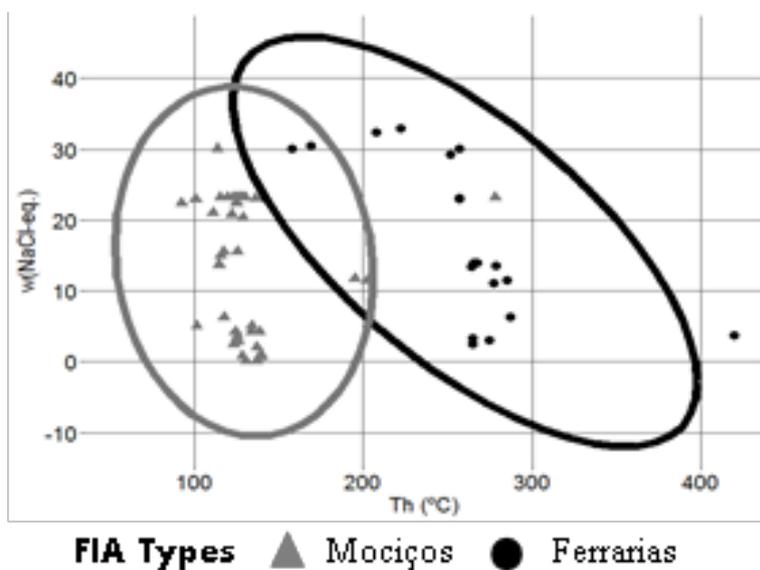


Figura 5. Gráfico dispersão comparativo entre os resultados obtidos do estudo microtermométrico das inclusões fluídas estudadas nas zonas mineralizadas.

## **Agradecimentos**

Este trabalho é financiado pela União Europeia através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, enquadrado no Programa ALENTEJO 2020 (Programa Operacional Regional do Alentejo) através do projeto "Modelos metalogénicos 3D da zona de Ossa Morena: valorização dos recursos minerais do Alentejo", com a referência ALT20-03-0145-FEDER-000028.

## **Referências**

18. Bodnar, R.J., 1981. Use of fluid inclusions in mineral exploration: comparison of observed features with theoretical and experimental data on ore genesis. *Geol. Soc. Am. Abstr. Progr.* 13, 412.
19. Oliveira, J. T., Oliveira, V. & Piçarra, J. M. (1991) Traços gerais da evolução tectonoestratigráfica da Zona de Ossa-Morena, em Portugal: síntese crítica do estado actual dos conhecimentos. *Cad. Lab. Xeol. Laxe.*, 16: 221-250.
20. Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*, vol. 12, 644 p.
21. Wilkinson, J. J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55: 229–272.



# GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS MAIORES EM SEDIMENTOS DE BARRAGENS DOMINICANAS: ANÁLISE DA SUA PROVENIÊNCIA

JOANA ARAÚJO

*Departamento de Geociências, Universidade de Évora, Évora, Portugal, [joanaaraujo93@gmail.com](mailto:joanaaraujo93@gmail.com)*

PEDRO NOGUEIRA

*Departamento de Geociências, Universidade de Évora, Évora, Portugal, [pnogas@gmail.com](mailto:pnogas@gmail.com)*

RITA FONSECA

*Departamento de Geociências, AmbiTerra, Universidade de Évora, Évora, Portugal, [rfonseca@uevora.pt](mailto:rfonseca@uevora.pt)*

CATARINA PINHO

*Departamento de Geociências, AmbiTerra, Universidade de Évora, Évora, Portugal, [c\\_pinho@uevora.pt](mailto:c_pinho@uevora.pt)*

ALEXANDRE ARAÚJO

*Departamento de Geociências, Universidade de Évora, Évora, Portugal, [araujo@uevora.pt](mailto:araujo@uevora.pt)*

The climatic conditions of Dominican Republic are conducive to the existence of high erosion rates, which may represent high sedimentation rates, that can make the dams silted. It is intended to do a geochemical characterization of the dam's sediments, in order to study the sedimentary processes of the drainage basins. Through the analysis of the sediments of the bottom of two dam reservoirs (Tavera and Sabana Yegua) and the soils from the drainage basins, we intend to make a comparative geochemical analysis to identify the main sources of the sedimentary material of each dam. This study corresponds to a preliminary approach, which consists of the analysis of major elements by ICP-OES, in an attempt of identifying the sediments provenance.

## 1 Introdução

Este trabalho está a ser desenvolvido no âmbito do projecto “Aproveitamento dos sedimentos das barragens como nutrientes para a fertilização de solos agrícolas na República Dominicana”, resultante de uma parceria entre a Universidade de Évora e o INDRHI (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos da República Dominicana). Este projecto, ainda em fase de desenvolvimento, pretende abordar o problema da sedimentação excessiva e deterioração da qualidade da água das albufeiras da República Dominicana, com conversão dos sedimentos num recurso natural renovável. Centrando-se no estudo de duas barragens, Tavera e Sabana-Yegua, tem como principal objectivo a caracterização sedimentar e geoquímica, e a avaliação da extracção dos sedimentos e seu uso como fertilizante alternativo de solos agrícolas. De forma a melhor compreender esta sedimentação, este estudo tem como objectivo a caracterização geoquímica dos elementos maiores dos sedimentos de fundo destas barragens e uma avaliação da sua proveniência, através de um estudo comparativo com os solos das respectivas bacias de drenagem.

As condições climáticas da República Dominicana são propícias à ocorrência de elevadas taxas erosivas devido a factores tais como, a ocorrência de furacões que afectam anualmente a ilha, os quais, associados a elevados declives das bacias de drenagem, e em clima tropical húmido, conduzem a elevadas taxas de erosão. Como consequência do excesso de erosão, há uma elevada sedimentação nas albufeiras, levando a uma diminuição da produção de energia eléctrica e do potencial de armazenamento de água. Pretende-se deste modo determinar qual a real influência de cada sub-bacia de drenagem, no processo de sedimentação das barragens em causa. A análise dos elementos maiores foi feita recorrendo a espectrometria de indução de plasma (ICP-OES). Realizou-se por isso um estudo comparativo entre solos e sedimentos, com recurso a correlações lineares, relativamente aos seus teores em elementos maiores e fracções granulométricas. Num futuro próximo serão realizadas análises para estudo dos elementos menores e em traço, incluindo os elementos terras raras, em sedimentos, solos e rochas das bacias de drenagem, incluindo a análise petrográfica das rochas.

## **2 Enquadramento Geográfico e Geológico**

A República Dominicana pertence ao Arquipélago das Antilhas no Caribe, localizando-se na Isla Hispaniola, fazendo fronteira com o Haiti. Sabana Yegua e Tavera encontram-se em regiões distintas da ilha, sob condições climáticas diferentes. Tavera situa-se a Norte do sistema montanhoso central da ilha, numa região acidentada e com maior pluviosidade média anual, e Sabana Yegua, a Sul, numa das regiões mais quentes e secas do país.

A bacia de drenagem de Sabana Yegua é caracterizada pela ocorrência de rochas vulcano-sedimentares de origem em arco-ilha, tonalitos, arenitos, conglomerados e rochas vulcânicas intermédias. No caso da bacia de drenagem de Tavera, esta é caracterizada pela predominância de tonalitos, rochas magmáticas e vulcano-sedimentares originadas em arco-ilha. Embora com idênticas litologias enquadrantes, a principal diferença entre a geologia das duas bacias é o facto de toda a área de Sabana Yegua e uma grande parte dos seus afluentes, se encaixarem em formações sedimentares, detríticas e carbonatadas.

## **3 Metodologias**

### **3.1 Amostragem de Solos e Sedimentos**

A amostragem dos sedimentos realizou-se em dois períodos sazonais, numa rede de estações que abrange toda a extensão dos lagos, com diferentes profundidades e em zonas com condições representativas das distintas fontes de alimentação e das diferentes condições hidrodinâmicas. O objectivo desta metodologia de amostragem é a obtenção da máxima informação relativa à distribuição dos sedimentos em toda a área lacustre. A amostragem superficial dos sedimentos foi realizada por dragagem, recorrendo a uma draga do tipo Shipeck modificada, permitindo a colheita de sedimentos com uma espessura máxima de 15 cm. A amostragem de solos foi realizada num único período sazonal, numa rede de pontos de amostragem que foi dividida em diversos sectores, de acordo com a litologia predominante e

a topografia. A amostragem foi realizada recorrendo a um trado manual, permitindo a amostragem de uma espessura de solo até 20cm (Simpson et al, 2005).

### **3.2 Métodos Analíticos**

O estudo da química total das amostras de solos e sedimentos permite o conhecimento dos elementos nas suas formas totais, isto é, os elementos que fazem parte da estrutura dos minerais silicatados, os elementos associados a óxidos, sulfuretos, adsorvidos nos complexos de troca das partículas coloidais, dissolvidos na fase aquosa e complexados com compostos orgânicos. Os teores dos elementos maiores (Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, Mn e P) foram determinados através de espectrometria por indução de plasma (ICP-OES, *Perken-Elmer, Optima 8300*). Para tal, foi necessário que a totalidade das amostras, previamente pulverizadas em moinho de argolas de ágata, passasse para a fase solúvel através de fusão. Esta obteve-se com introdução das amostras homogeneizadas com fundente (Spectroflux) em cadinhos de grafite pura, fundidas em mufla a 1000<sup>o</sup>C. Após a fusão formou-se uma pérola, posteriormente dissolvida em solução nítrica. As amostras foram filtradas antes da análise em ICP-OES (Xu, 2012). A análise textural dos solos e sedimentos permitiu a determinação das 3 principais fracções granulométricas: arenosa, limosa ou siltosa (o limo é uma classe dimensional dos solos e o silte dos sedimentos) e argilosa. A separação destas 3 classes foi realizada recorrendo-se à crivagem para a separação da classe das areias, e através da pipetagem para a separação das classes de silte ou limo e argilas. Foi ainda realizada a análise de carbono orgânico, recorrendo-se a um analisador elementar da marca *Elementar Vario Micro Cube* (Simpson et. al, 2005).

## **4 Resultados e Discussão**

### **4.1 Análise Textural**

A distribuição granulométrica é uma característica de extrema importância, uma vez que determina a superfície específica de cada partícula, por unidade de volume ou massa do solo ou sedimento. Inúmeros processos físicos e químicos poderão ocorrer na superfície específica das partículas, como por exemplo, as trocas catiónicas que costumam ocorrer nas fracções argilosas. A composição mineralógica está por isso, estritamente relacionada com a dimensão das partículas, influenciando deste modo a composição química e mineralógica dos solos e dos sedimentos (Håkanson & Jansoon, 1983).

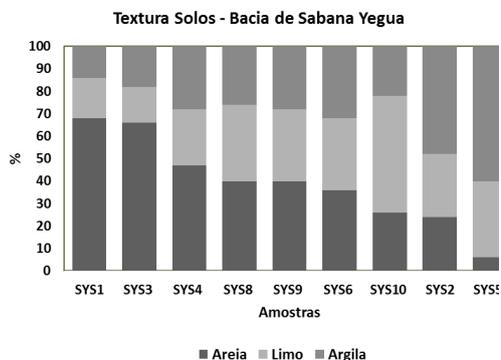


Gráfico 1. Análise textural dos solos da bacia de drenagem de Sabana Yegua.

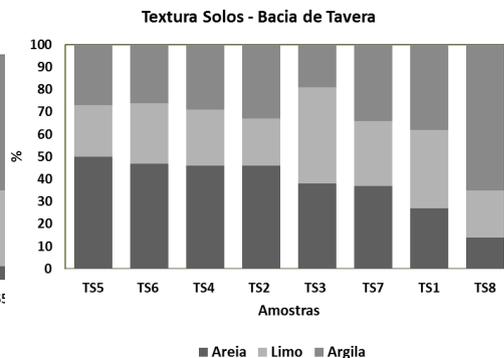


Gráfico 2. Análise textural dos solos da bacia de drenagem de Tavera.

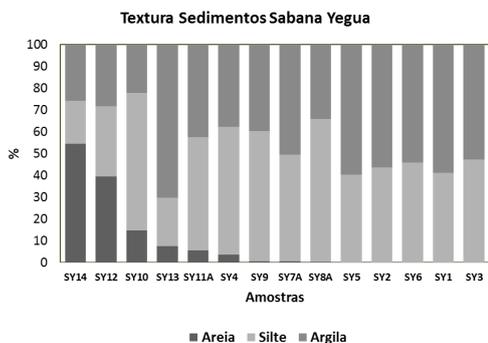


Gráfico 3. Análise textural dos sedimentos do fundo da barragem de Sabana Yegua.

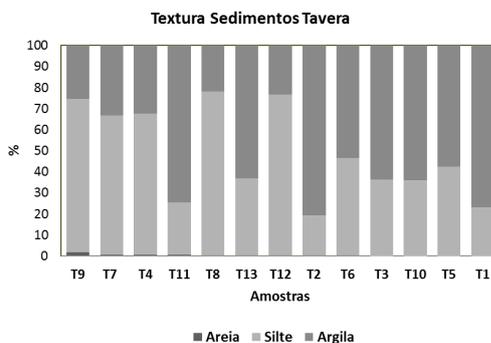


Gráfico 4. Análise textural dos sedimentos do fundo da barragem de Tavera.

Analisando os gráficos 1 e 2, referentes aos solos das bacias de drenagem de Sabana Yegua e de Tavera, é possível verificar que a bacia de Tavera apresenta uma granulometria mais homogénea relativamente à de Sabana Yegua. Tal facto está de acordo com a litologia aflorante mais uniforme, maioritariamente constituída por rochas ígneas. Contudo, no caso da amostra TS8, identifica-se um menor teor de areia relativamente às restantes amostras. Recorrendo ao mapa de amostragem de solos (Figura 1), é possível observar que o ponto de amostragem TS8 se localiza numa zona bastante acidentada, a montante da barragem de Tavera, constituída por rochas tonalíticas de fina granulometria.

Os solos de Sabana Yegua registam uma maior heterogeneidade granulométrica, apresentando valores de partículas grosseiras e finas bastante variáveis. Novamente estes dados reflectem uma maior heterogeneidade litológica da bacia. Correlacionando os dados texturais com os pontos de amostragem (Figura 2) verifica-se que, regra geral, a distribuição

dos elementos grosseiros vai diminuindo de montante para jusante o que está de acordo com a calibração natural dos materiais em zonas de topografia acidentada. As amostras SYS8 e SYS9 foram colhidas na mesma região de drenagem, muito perto do Rio Las Cuevas, estando sob uma zona de natureza detrítica e carbonatada e apresentando valores muito semelhantes na distribuição granulométrica. Este factor pode ser indicador de uma zona com idêntica topografia e com solos desenvolvidos a partir de rochas-mãe de natureza semelhante. As amostras SYS1 e SYS3 são as que têm um maior teor em partículas grosseiras. Ambas se localizam na mesma zona de drenagem, perto das margens do Rio Yaque del Sur, no entanto SYS1 numa zona de maior altitude (774 m) sob influência de rochas tonalíticas e numa região mais próxima da vertente Sul da Cordilheira Central estando, portanto, sob maior influência dos processos erosivos das zonas de maior altitude desta cadeia montanhosa. O solo SYS3 amostrado a uma cota mais baixa (230 m) deve o seu carácter mais grosseiro à natureza conglomerática e arenítica das rochas aflorantes. É de notar que a amostra SYS2, que foi colhida na mesma margem do rio, tem uma textura mais fina, com baixa percentagem de fracção arenosa, pelo facto de se situar numa zona de fronteira entre as rochas detríticas e as de natureza vulcano-sedimentar.

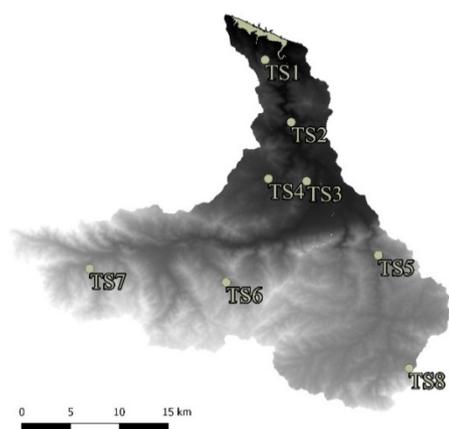


Figura 1. Distribuição dos pontos de amostragem de solos na bacia de drenagem de Tavera.

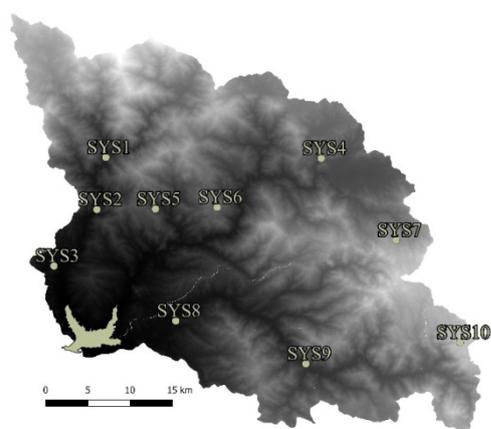


Figura 2. Distribuição dos pontos de amostragem de solos na bacia de drenagem de Sabana Yegua.

Com base na análise textural comparativa dos solos e dos sedimentos, é possível identificar uma predominância das classes mais finas nos sedimentos, o que aponta para a ocorrência de uma erosão selectiva de partículas mais finas e menos densas dos solos, associado a um processo de calibração natural ocorrido durante o transporte. Esta textura mais fina vai condicionar toda a química dos sedimentos do fundo das barragens (Gráficos 1, 2, 3 e 4). Comparando as texturas dos sedimentos das duas barragens (Gráficos 3 e 4), é possível verificar que Sabana Yegua apresenta um enriquecimento na classe textural das areias,

relativamente a Tavera. Recorrendo ao mapa de amostragem de Sabana Yegua (Figura 3), é possível notar que as amostras cuja distribuição granulométrica apresenta teores de areia superiores a 5% encontram-se em locais de entrada das linhas de água desta barragem. A amostra SY14, cujo teor em areia é o mais alto, corresponde à desembocadura do Rio Las Cuevas, que drena o sector detrítico e carbonatado da bacia de drenagem desta albufeira. A única amostra que se encontra afastada da entrada destas linhas de água e que apresenta um teor em areia maior relativamente às restantes amostras, é a amostra SY4. Esta amostra foi recolhida na zona marginal da albufeira, devendo-se o maior teor em elementos grosseiros provavelmente à erosão das margens do lago. É de salientar que este sector se encontra periodicamente emerso. É ainda observável um gradiente negativo na granulometria, desde os locais de alimentação dos rios, até ao paredão da barragem, como seria expectável. As amostras SY11A e SY8A são dois casos, onde a jusante dos seus locais de amostragem se encontram pontos cuja granulometria é mais grosseira, nomeadamente SY10 e SY13, respectivamente. Contudo, estes locais de amostragem encontram-se em zonas onde o caudal dos rios é intermitente, pelo que existe uma maior deposição de materiais que são transportados em suspensão, passando o caudal dos rios, em períodos de seca, ao lado destes locais.

Tavera (Gráfico 4) regista valores muito homogéneos na sua distribuição granulométrica, tendo teores de partículas grosseiras inferiores a 2%. A amostra T9 foi a que registou maior teor em elementos grosseiros (1,67%), localizando-se numa zona marginal. Isto pode dever-se à influência de uma pequena linha de água que drena junto ao ponto de amostragem, à erosão local da margem, ou inclusivamente, à possibilidade de ocorrência de remobilização de solo a montante devido a actividades agrícolas. Contudo, o facto de Tavera apresentar teores em elementos finos consideravelmente altos e homogéneos poderá corroborar a hipótese da ocorrência de um elevado hidrodinamismo no interior desta barragem, facilitado também pela sua fisiografia estreita e alongada.

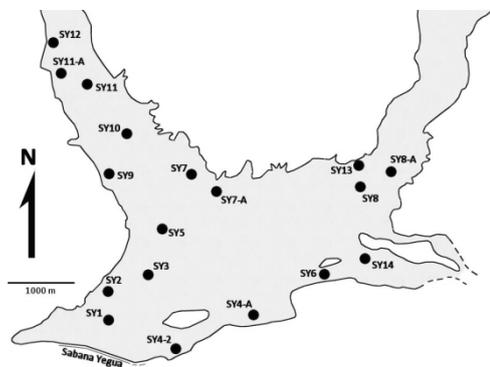


Figura 3. Distribuição dos pontos de amostragem dos sedimentos ao longo da albufeira de Sabana Yegua.

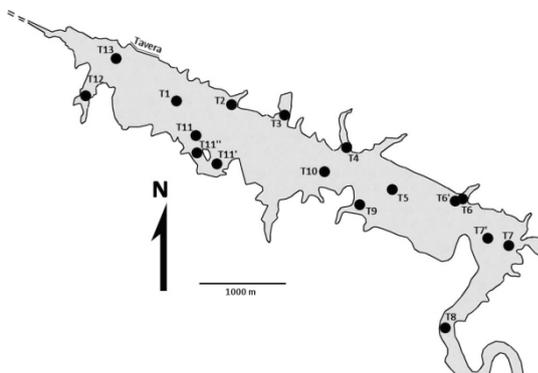


Figura 4. Distribuição dos pontos de amostragem dos sedimentos ao longo da albufeira de Tavera.

#### 4.2 Análise geoquímica: Elementos Maiores

Através da comparação dos dados geoquímicos dos elementos maiores nos sedimentos e nos solos de Tavera e de Sabana Yegua (Gráficos 5, 6, 7 e 8) é visível a ocorrência de uma maior homogeneidade nos teores destes elementos nos sedimentos das albufeiras. Este facto sugere assim que ocorre uma sedimentação homogénea e uniforme ao longo das albufeiras, aliado ao facto de os elementos mais móveis (Na, K e Mg) apresentarem uma maior facilidade de distribuição, reflectindo-se na sua grande homogeneidade nos sedimentos. Os solos apresentam uma elevada heterogeneidade, possivelmente pelo facto destes terem sido amostrados em diversos sectores, sendo eles os mais representativos dos diferentes litótipos das bacias.

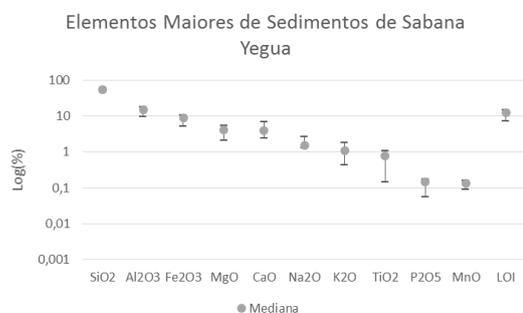


Gráfico 5. Distribuição dos teores máximos, mínimos e medianos dos elementos maiores nos sedimentos de Sabana Yegua.

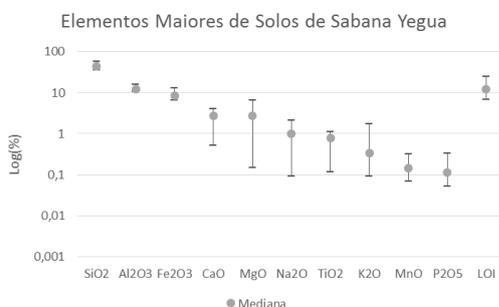


Gráfico 6. Distribuição dos teores máximos, mínimos e medianos dos elementos maiores nos solos de Sabana Yegua.

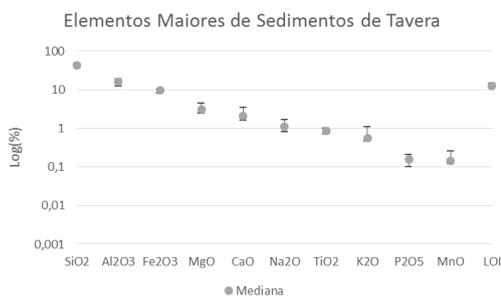


Gráfico 7. Distribuição dos teores máximos, mínimos e medianos dos elementos maiores nos sedimentos de Tavera.

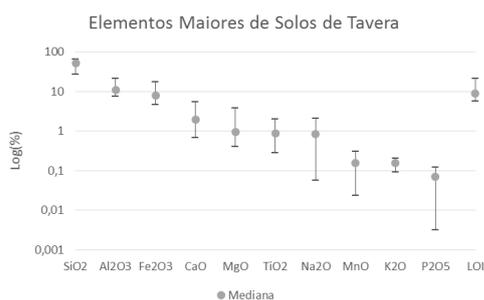


Gráfico 8. Distribuição dos teores máximos, mínimos e medianos dos elementos maiores nos solos de Tavera.

Quer em Sabana Yegua, quer em Tavera, existem manifestações evidentes que contestam a mobilidade dos elementos geoquimicamente mais móveis, assim como a sua associação preferencial a partículas mais finas, como é o caso do K em Sabana Yegua, onde surge nos sedimentos com o triplo do teor verificado nos solos (Gráficos 5 e 6). Este elemento tem associação preferencial a partículas mais finas, entrando geralmente na constituição das ilites.

Em Tavera, o Mg e o K aumentaram também para cerca do triplo nos sedimentos em relação ao seu teor nos solos (Gráficos 7 e 8), mais uma vez atestando a mobilidade geoquímica destes elementos. Os valores dos elementos maiores nos sedimentos de ambas as albufeiras são muito semelhantes, revelando deste modo uma proveniência a partir de um background geoquímico semelhante nas bacias de drenagem. Embora a litologia das bacias seja muito idêntica, notam-se algumas diferenças entre os sedimentos das duas albufeiras relativamente a alguns elementos maiores (Tabela 1).

Tabela 1: Comparação dos valores das medianas dos elementos maiores dos sedimentos de Tavera e de Sabana Yegua.

Sabana Yegua	(medianas)	Tavera
53,85%	← SiO <sub>2</sub> _____	43,50%
4,25%	← MgO _____	3,12%
3,94%	← CaO _____	2,12%
1,52%	← Na <sub>2</sub> O _____	1,13%
1,09%	← K <sub>2</sub> O _____	0,56%
14,82%	_____ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> →	16,00%
8,76%	_____ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> →	9,51%
0,80%	_____ TiO <sub>2</sub> →	0,85%
0,13%	_____ MnO →	0,14%
0,15%	_____ P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15%

Com base na análise das tabelas 1 e 2, é possível observar uma maior influência de rochas detríticas e carbonatadas (arenitos, conglomerados, margas arenosas) para a barragem de Sabana Yegua. Em Tavera, nota-se uma maior influência das rochas básicas e ultramáficas, associadas às formações vulcano-sedimentares, como se pode verificar através das cartas geológicas destas bacias. O maior enriquecimento dos sedimentos de Tavera em Fe, Mn, Al e argila, justifica a maiores correlações lineares encontradas entre os seus teores. Por outro lado, os maiores teores em SiO<sub>2</sub> e areia em Sabana Yegua justificam a maior correlação encontrada entre estes 2 parâmetros, sendo não significativa em Tavera. A composição dos sedimentos relativamente aos elementos maiores reflecte associações mineralógicas de distintas fácies deposicionais. A correlação positiva de SiO<sub>2</sub> e areia, sobretudo em Sabana Yegua sugere que a fracção mais grosseira dos sedimentos seja predominantemente composta por quartzo e feldspatos. A correlação linear positiva entre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e argila, sendo superior em Tavera, sugere que a fracção fina seja rica em minerais argilosos, possivelmente de natureza caulinitica (Cronan, 2009). Esta ilação está de acordo com os baixos valores de correlação linear entre Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e a argila e a inexistência de correlação entre %Argila e %C<sub>org</sub>, o que leva a crer a ausência ou a presença vestigial de minerais argilosos com maior capacidade de adsorção e fixação de matéria orgânica, como é o caso dos minerais argilosos ricos em Fe (clorite e esmectite). Esta mineralogia será identificada posteriormente através da análise por difracção de raios-X.

Tabela 2: Comparação dos valores das granulometrias dos sedimentos de Tavera e de Sabana Yegua.

Sabana Yegua	(medianas)	Tavera
0,636%	Areia ←	0,332%
46,573%	← Silte	42,534%
46,397%	Argila →	57,418%

Tavera apresenta uma maior homogeneidade na distribuição dos elementos, como se pode verificar no exemplo abaixo (Gráficos 9), possivelmente por se localizar numa região com maior declive e precipitação, o que incrementa a ocorrência de lixiviação e mistura de elementos em toda a albufeira. A sua fisiografia é estreita e alongada o que facilita a distribuição mais homogénea dos materiais transportados para o seu interior, além disso promove um maior hidrodinamismo da albufeira. A actuação das correntes internas da barragem leva a que possa ocorrer um remeximento e mistura de todos os componentes particulados no fundo da barragem.

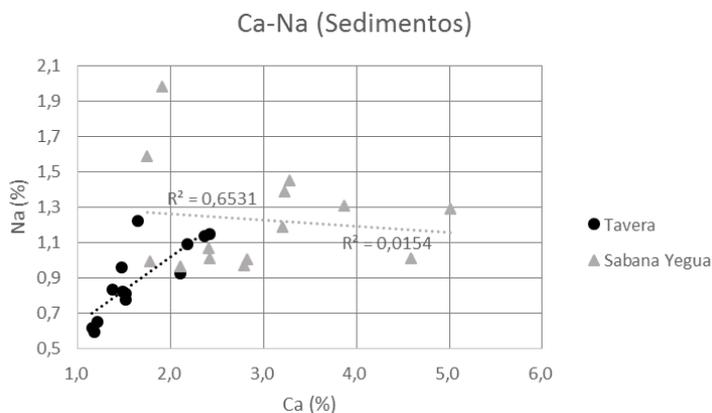


Gráfico 9. Distribuição dos elementos maiores nos sedimentos de Tavera e Sabana Yegua

Nos sedimentos de Tavera, relativamente aos solos da bacia, verifica-se um aumento nítido dos elementos mais móveis (Tabela 3), ou preferencialmente associados a partículas de menores dimensões (Ca, Mg, Na e K). Verifica-se igualmente um aumento de Al nos sedimentos, o que poderá revelar estar preferencialmente associado à fracção argilosa. Os elementos mais imóveis registam valores muito idênticos entre solos e sedimentos. Considerando que os teores dos elementos nos sedimentos e a sua relação com os valores médios dos solos têm a ver com a sua mobilidade geoquímica, estes dados apontam para um ambiente de forte meteorização química. Os sedimentos recebem e concentram, uma grande parte dos elementos químicos lixiviados das bacias, com particular destaque para os elementos com elevada mobilidade: K, Na, Mg, e Ca. O Al e o Fe, embora sejam elementos

com baixa solubilidade, deverão estar nos solos preferencialmente associados a partículas de menor dimensão (Cronan, 2009; Giblin, 2009) ( $R^2$   $Fe_2O_3/Argila=0,694$  e  $R^2$   $Al_2O_3/Argila=0,9352$  para os solos de Tavera). Estas são as partículas mais facilmente transportadas para as albufeiras, sendo por isso o seu transporte feito sob a forma particulada. A bacia de drenagem de Tavera encontra-se sob uma maior influência de rochas vulcano-sedimentares. As elevadas correlações entre  $TiO_2$  e  $Fe_2O_3$ , quer nos solos ( $R^2=0,910$ ), quer nos sedimentos ( $R^2=0,691$ ) indicam que as rochas que estão na origem do Fe poderão também constituir fonte de Ti. A elevada correlação verifica-se igualmente entre o  $TiO_2$  e o  $MgO$ , porém, apenas nos sedimentos. Em Tavera, apenas se verifica uma correlação linear significativa entre  $Fe_2O_3$  e  $Al_2O_3$  nos solos ( $R^2=0,633$ ). A correlação entre Fe e Mg nos solos e nos sedimentos apresenta valores muito baixos.

No caso de Sabana Yegua, as correlações positivas entre os teores de  $TiO_2$  e os óxidos de Fe e Mg apenas foram verificadas nos sedimentos. Em qualquer um dos sistemas, nos solos o  $TiO_2$  encontra-se preferencialmente associado a  $SiO_2$ . Contrariamente a Tavera, Sabana Yegua regista uma importante correlação entre Fe e Mg ( $R^2=0,475$ ) e Fe e Al ( $R^2=0,7746$ ) nos sedimentos, sugerindo uma importante influência de sedimentação de aluminossilicatos de Fe e Mg nesta albufeira e uma origem idêntica para estes três elementos (sugerindo a mesma litologia como proveniência) (Giblin, 2009). Tal como em Tavera, os elementos mais móveis (Ca, K, Mg, Na), têm maior incremento nos sedimentos. Os teores de Fe, com valores muito idênticos em solos e sedimentos, são mais baixos relativamente a Tavera, devido à maior influência das rochas sedimentares detríticas na sedimentação da albufeira. Contrariamente a Tavera, os teores de  $SiO_2$  são mais elevados nos sedimentos. Este facto deve-se ao facto de a maior parte dos solos analisados ter maior representação no sector de rochas vulcano-sedimentares (SYS 2, SYS 5, SYS 6, SYS 7), onde os teores de  $SiO_2$  raramente ultrapassam os 50%. Além disso, a sedimentação da albufeira tem uma maior influência das rochas detríticas (arenitos, margas arenosas, conglomerados), cujos solos originados a partir da sua meteorização têm teores de  $SiO_2$  superiores (>50%).

Tabela 3. Teores de elementos maiores em Tavera e Sabana Yegua, nos sedimentos e nos solos.

Tavera		Sabana Yegua	
Sedimentos	Solos	(medianas)	Solos
43,50%	52,56%	$SiO_2$	45,03%
16,00%	11,18%	$Al_2O_3$	12,07%
9,51%	8,00%	$Fe_2O_3$	8,37%
3,12%	0,97%	MgO	2,70%
2,11%	1,99%	CaO	2,78%
1,13%	0,85%	$Na_2O$	1,01%
0,85%	0,88%	$TiO_2$	0,77%
0,56%	0,16%	$K_2O$	0,34%
0,15%	0,07%	$P_2O_5$	0,11%
0,14%	0,16%	MnO	0,14%

## 5 Considerações Finais

Através das razões e dos gráficos de correlação linear entre os elementos maiores não é possível definir as principais fontes para cada elemento ou grupo de elementos. O estudo de proveniência apenas deverá ser possível através da análise das rochas-mãe e de elementos do grupo das terras raras (a realizar brevemente). A partir da análise dos elementos maiores dos solos e sedimentos apenas se será possível concluir que: (1) existe uma deposição preferencial nas albufeiras, das partículas mais finas dos solos, enriquecidas em Al, Fe e Mg; (2) em Sabana Yegua existe uma forte influência dos depósitos detríticos e rochas carbonatadas, o que contribui para uma sedimentação mais rica em Ca e Mg; (3) o hidrodinamismo elevado no interior das albufeiras, em especial em Tavera, pode levar a uma elevada homogeneidade na distribuição dos elementos químicos.

### Referências

1. Cronan, C.S. 2009. Major cations in freshwaters: Ca, Mg, Na, K, and Al. In Gene E. Likens (ed) *Encyclopedia of Inland Waters*, pp. 360-377, Oxford – Elsevier Publishers, NY.
2. Giblin, A.E. (2009) Iron and Manganese. In Gene E. Likens (ed) *Encyclopedia of Inland Waters*, pp. 368-377, Oxford – Elsevier Publishers, NY.
3. Håkanson, L., Jansson, M. (1983). *Principles of Lake Sedimentology*. Springer (Berlim).
4. Simpon, S. L., Barley, G. E., Chariton, A. A., Stauber, J. L., King, C. K., Chapman, J. C., Hyne, R. V., Gale, S. A., Roach, A. C., Maher, W. A. (2005). *Handbook for Sediment Quality Assessment* (CSIRO: Bangor, NSW)
5. Xu, G., Hannah, J.L., Bingen, B., Georgiev, S., Stein, H.J. (2012). Digestion methods for trace element measurements in shales: Paleoredox proxies examined. *Chemical Geology*, 324 – 325, pp. 132 – 147.



# INTERAÇÃO DE AEROSSÓIS COM NUVENS EM EVENTOS DE POEIRA DO SAHARA SOBRE A PENÍNSULA IBÉRICA

EDUARDO CARDOSO

Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59 Évora, Portugal

*m37075@alunos.uevora.pt*

Ao longo deste trabalho aborda-se a interação dos aerossóis com as nuvens, nomeadamente no que respeita a eventos de poeira do Sahara sobre a Península Ibérica. Descrevem-se este tipo de partículas, os seus impactos e as incertezas associadas na avaliação desses impactos. Apresentam-se os métodos utilizados no estudo destes eventos. Dá-se uma introdução à tecnologia lidar, à fotometria solar e a radiometria de micro-ondas. Apresenta-se o método baseado em dados de observações lidar, de coeficientes de dispersão e razões de despolarização, denominado POLIPHON (*Polarizing Lidar Photometer Networking*), aplicável em condições nebulosas durante eventos de poeira, que permite obter valores de razões de depolarização, de coeficientes de extinção e retrodispersão, de concentrações de núcleos de gelo atmosférico, perfis de temperatura, humidade e vento, com o objetivo de estudar as interações entre os aerossóis e as nuvens.

## 1 Introdução

As partículas de poeira mineral são um dos principais constituintes de aerossóis atmosféricos, e têm influência no balanço radiativo da atmosfera. A evolução da interação entre as poeiras e a radiação é essencial para a avaliação do forçamento quer à escala global, quer à escala regional. As partículas de poeira mineral são transportadas pela baixa troposfera por longas distâncias até zonas remotas em poucos dias [1]. Ocorrem processos de troca no limiar da camada limite, entre esta camada e a troposfera livre, que levam a uma eficiente mistura de poeiras na direção da superfície. No presente trabalho, falar-se-á destas partículas associadas ao deserto do Sahara e da sua influência sobre a Península Ibérica, dos seus impactos e das incertezas associadas à sua influência na interação com a radiação e com as nuvens, nas técnicas de deteção remota utilizadas no estudo das mesmas, onde se incluem o sistema de deteção remota lidar (*light detection and ranging*), técnicas de fotometria solar e radiometria de micro-ondas. Para concluir falar-se-á do POLIPHON, um método utilizado para estimar a concentração de núcleos de gelo em poeiras do deserto e a distribuição vertical em termos de número de partículas por volume, utilizando dados combinados das técnicas de deteção remota referidas.

## 2 Poeiras do Sahara e Península Ibérica

As poeiras do Sahara são a mais importante fonte de poeira mineral do hemisfério Norte. A poeira proveniente do norte de África, é injetada na atmosfera e transportada até diferentes altitudes em diferentes áreas do mundo. Ocorrem frequentemente intrusões no espaço aéreo europeu, mas as poeiras do Sahara podem mesmo atingir o continente americano. Estas, são um exemplo de como partículas de poeira mineral, podem influenciar consideravelmente as condições climáticas e ambientais, e ter um impacto extraordinário na qualidade do ar das

regiões do Sul da Europa [2]. Além disso, as poeiras do Sahara podem atingir e persistir em altitudes até 10 km [3]. A península Ibérica é frequentemente afetada por estas intrusões de poeira africana, com grande carga de aerossóis, o que modula a climatologia dos aerossóis no Sul de Espanha e em Portugal. No norte de África, perto da região de origem das poeiras, e após algum tempo, pode ocorrer mistura com outro tipo de aerossóis, alterando assim as propriedades óticas destas poeiras, nomeadamente mistura com aerossóis antropogénicos, como por exemplo, as provenientes das emissões de partículas localizadas em áreas urbanas nessa região, ou com aerossóis marinhos, ao chegar ao Oceano Atlântico, ou, ao cruzar o mar Mediterrâneo. Estas emissões, podem ser relevantes durante eventos de poeira africana, sobre alguns lugares do Mediterrâneo, ideia suportada por valores do expoente de Ångström, relativamente elevados, em medições efetuadas durante eventos de poeira do Sahara. Este parâmetro pode ser obtido da determinação da espessura ótica dos aerossóis, e permite a análise da dependência espectral da espessura ótica, e aumenta se diminui a dimensão das partículas. Se o processo de dispersão é dominado por partículas de modo fino, aproxima-se de 2; se pelo contrário é dominado pelo modo grosso, o valor tenderá a aproximar-se de zero [4].

### 3 Técnicas a utilizar

Para a determinação de perfis, são utilizadas técnicas de deteção remota passiva e ativa aos quais se juntam dados da rede lidar da EARLINET (*European Aerosol Research Lidar Network*), para observação das intrusões de poeira africana sobre o Sul de Espanha e Portugal. No estudo dos impactos destas poeiras, utilizam-se além disso, dados de fotometria solar e de radiometria de micro-ondas fornecidas pela rede AERONET. Estabelecem-se perfis de lidar, e combinam-se os dados recolhidos com os obtidos a partir do fotómetro solar, com o objetivo de reforçar o conhecimento sobre as interações entre os aerossóis e as nuvens a uma escala continental, visto que neste ponto ainda não há muita informação confiável. O método computacional POLIPHON, permite melhorar estimativas de concentrações de núcleos de gelo em poeiras do deserto, através da obtenção de perfis verticais onde se distinga a presença destas poeiras dos outros tipos de aerossóis [1]. Podem comparar-se os dados com os fornecidos por satélite e ainda selecionar-se dados combinados do lidar e da radiometria de micro-ondas.

#### 3.1 LIDAR

A deteção remota é o processo de observar determinado meio ou processo, sem entrar em contacto direto com esse meio ou processo. É fulcral no estudo, por exemplo, das alterações climáticas, incluindo a relação que os aerossóis têm com as nuvens e com a radiação, bem como outros fatores, por exemplo a relação das alterações climáticas, com a presença de nuvens. Os dados recolhidos pela deteção remota são por isso importantes para regiões em risco de desertificação: estes dados revelam zonas de perda de disponibilidade de água, e onde

haverá maior probabilidade de secas prolongadas, ocorrência de cheias, e onde o gelo tende a desaparecer com o aumento global da temperatura média.

O lidar é um sistema de detecção remota ativa que emite pulsos eletromagnéticos de lasers desde solo, ou desde sistemas instalados em aviões. Utilizam-se comprimentos de nas regiões espectrais do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. O sensor do lidar, recolhe o sinal retornado dispersado e devolvido pelos componentes atmosféricos, sendo depois convertido em sinal elétrico, permitindo-se a recolha abundante de dados (muitos por segundo). A distância percorrida entre o emissor e o agente dispersor é determinada pelo tempo decorrido entre a emissão do feixe e a sua receção. Para calcular a distância entre os objetos e o sensor, utiliza-se a velocidade da luz, multiplicando o tempo de viagem do pulso por essa velocidade da luz, dividindo pelos 2 percursos, de ida e de volta do pulso de luz. O lidar pode operar durante o dia e durante a noite, exceto em condições de precipitação ou ocorrência de nevoeiro, fornecendo perfis verticais de diferentes propriedades óticas e físicas com elevada resolução temporal e espacial. A técnica de detecção remota ativa lidar, é bastante proveitosa no estudo da composição da atmosfera terrestre com base na dispersão dos pulsos de laser. Permite uma visão sobre a evolução das nuvens presentes entre a camada de aerossóis que servem de núcleos de condensação e de gelo e permite a determinação de perfis de aerossóis e nuvens em simultâneo. Pela discriminação das camadas de nuvens de cristais de gelo de nuvens de gotículas, e com a avaliação de propriedades óticas dos aerossóis. [7]. Estes dados, em conjunto com os fornecidos pelo fotómetro, permitem a recolha de informação acerca da distribuição média das partículas (*particle size-distribution*), prevendo-se por exemplo, as respetivas concentrações de aerossóis de maior tamanho, e estimando-se a concentração de núcleos de gelo ao nível das nuvens [9]. O lidar é assim importante na avaliação da influência da distribuição dos aerossóis por altitude. No estudo da formação das nuvens, utilizam-se parâmetros como a razão de depolarização, os coeficientes de extinção e dispersão, a razão de partículas de poeira, e fazem-se estimativas da concentração de núcleos de gelo, perfis e temperatura, etc. Questões que se podem fazer neste tipo de estudos são, por exemplo; que tipos de nuvem apresentam formação de gelo em zonas de eventos de poeira? O que se conclui a partir das observações de lidar acerca da geração de partículas de gelo? O que indicam as observações de lidar acerca da temperatura do topo das nuvens? Tem essa temperatura valores suficientemente baixos para que a produção significativa de gelo comece? Será mesmo a existência de nuvens líquidas necessárias antes da formação de cristais de gelo através de processos de congelamento heterogéneos?

### 3.2 Fotómetro Solar e Radiometria

A fotometria solar, permite realizar medições de certas propriedades dos aerossóis durante o dia. A rede AERONET, fornece por exemplo dados relativos a espessuras óticas de aerossóis (coeficientes de extinção ao longo de uma coluna de ar) para vários comprimentos de onda a nível global, a partir dessas medições da extinção solar devido a dispersão e absorção por parte de aerossóis, e de radiação difusa (que atinge a superfície resultante da dispersão na

atmosfera). Através destas medições, podem analisar-se propriedades microfísicas e óticas dos aerossóis durante eventos de poeiras. Para uma análise adequada do papel das poeiras na modelação do clima, é importante a construção de perfis verticais em que se distingam partículas de modo fino (de diâmetro inferior a 1 micrómetro), e de modo grosso (superior), visto que influenciam o balanço radiativo, os processos das nuvens e as condições do ambiente, de diferentes maneiras, sendo que o modo grosso, tende a estar mais ligado às propriedades óticas e ao impacto radiativo das partículas, enquanto que as de modo fino, tendem a ter um maior impacto na qualidade do ar, ainda que também tenha influência nas propriedades microfísicas e óticas do total de poeiras, sendo por isso importante, a sua medição. [7]. Usualmente, ocorre um aumento da espessura ótica dos aerossóis, durante eventos de poeira do Sahara, o que indicia a presença de partículas de modo fino, até aos 4 a 5 quilómetros [2]. Podem ainda obter-se a fração do modo fino dos aerossóis sobre o total dos aerossóis (em espessura ótica) [7]. Importa saber como evoluem ambos os modos, em alturas de eventos de poeiras, e que percentagem de cada modo é responsável pela espessura ótica da camada. Para a separação dos modos fino e grosso cabe realizar uma análise dos resultados comparando com os dados do lidar, a fim de se verificar a confiabilidade dos valores obtidos. O radiómetro de micro-ondas é utilizado com o fim de monitorizar perfis de temperatura na troposfera, temperatura de brilho e perfil do vapor de água na troposfera, através da detecção direta de radiação. Estes perfis de temperatura são depois utilizados para a determinação da altura da camada limite, onde ocorrem processos turbulentos de mistura.

#### **4 Impactos das Poeiras e Incertezas Associadas**

Os eventos de poeira que afetam o norte de África, no Sul de Espanha tendem a alterar os valores instantâneos do forçamento radiativo por parte dos aerossóis [5]. São realizados estudos a fim de compreender que propriedades químicas, microfísicas e óticas das poeiras do Sahara, são relevantes em termos radiativos para o estudo dos efeitos diretos no clima. Poderão haver impactos, por exemplo, nos altocúmulos que se formam no topo da camada de poeira sahariana, tendendo a não ocorrer formação de gelo nessas nuvens [6]. Na troposfera livre acima da camada de poeiras, tende a haver pequenas nuvens de água, formadas a  $-30^{\circ}\text{C}$  que tendem a produzir virga de gelo, sendo que esta virga pode causar produção de gelo considerável nestas nuvens até temperaturas de  $-12^{\circ}\text{C}$  [6]. As partículas contêm componentes solúveis, mas também componentes insolúveis, responsáveis em parte, por essa formação heterogénea de gelo. A fração solúvel favorecerá a formação de gotículas superarrefecidas, que podem mais tarde congelar e que podem nem sempre resultar em partículas de gelo geradas. Questões a responder neste tipo de estudos é se devem existir nuvens líquidas, antes de ocorrer formação de cristais de gelo, ou se a formação heterogénea de gelo pode levar à produção rápida de gelo em nuvens de água e influenciar a formação de precipitação [7], ou ainda se as observações indicam que temperatura deve existir no topo de uma camada para que se inicie produção de gelo. Partículas insolúveis, poeiras envelhecidas de transporte longo, podem ter consequências para a nucleação, podendo ocorrer mecanismos de reforço da produção de gelo. Qual a relação com a camada de poeiras, no que respeita à formação de

gelo nas camadas de altocúmulos que se formam no topo da camada de poeira do Sahara? [7] O que se observa em termos de formação de gelo heterogéneo em partes convectivas das nuvens (ambientes turbulentos)? A que temperaturas se observa ou não formação de gelo em camadas de cúmulos e estratos superficiais em condições de poeira?

Importa, investigar o papel da mistura turbulenta e convectiva, na distribuição das gotículas por tamanho, nos rácios de arrefecimento, nas condições de humidade relativa, no congelamento heterogéneo e na formação de precipitação. É fundamental para uma avaliação dos efeitos indiretos dos aerossóis no clima.

O transporte de longo alcance destas poeiras é influenciado pela poluição antropogénica, que também constituem núcleos de condensação ou núcleos de gelo. A presença de poeira e por consequência, um número elevado de núcleos de gelo, não resulta automaticamente na formação de gelo, que parece fortemente dependente da temperatura. Essa formação de gelo pode assim, ocorrer, ou não, em quantidades significativas. [7]. As nuvens líquidas são necessárias antes de ocorrer a formação de gelo (via nucleação heterogénea).

Com o objetivo de diminuir as incertezas que prevalecem, neste tipo de estudos realizam-se avaliações de parâmetros como a espessura ótica; verificam-se por exemplo, os dias de observação lidar em que ocorreu a formação de cúmulos por cima da região, que período do dia em que começa a formação de nuvens, quando termina esse período de formação, e ainda de quando se dissolvem as nuvens; verificam-se além disso, as trajetórias ao longo dos dias de formação de nuvens, padrões de fluxos durante situações com elevada carga de poeira, ventos predominantes na camada de poeiras e em camadas mais acima, bem como a origem das massas de ar e ainda a distância de transporte de poeiras e duração. Na figura seguinte, observam-se exemplos de dados que se obtêm: na figura 1.1, está um exemplo de distribuição de concentração volúmica das partículas pelo raio das partículas (derivado a partir medições feitas pelo fotómetro AERONET (Aerosol Robotic Network)), onde se indica a concentração de Aerossóis (APC), a altitude da camada de poeiras (DLH) e espessura ótica dos aerossóis (AOD), em três ocasiões, e onde se observa um pico na concentração para partículas de cerca de 2mm de raio de volume. Na figura 1.2, está um exemplo de dados relativos à concentração de aerossóis com raios superiores a 250 nm pelo coeficiente de extinção da camada de poeiras do Sahara, com objetivo de se estimar a concentração de núcleos de gelo ao nível das nuvens.

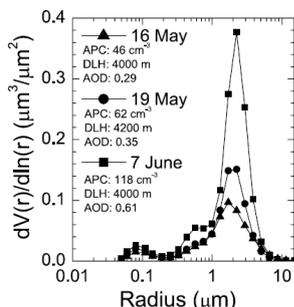


Figura 1.1. Concentração volúmica de partículas vs. raio das partículas.

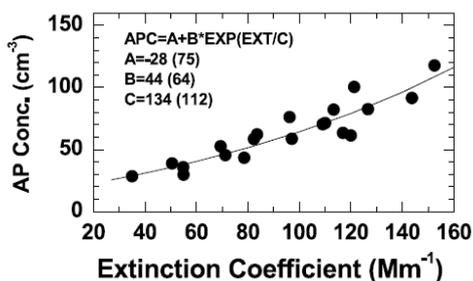


Figura 1.2. Concentração de aerossóis vs. coeficiente de extinção da camada de poeiras do Sahara. Fonte: [7]

Na figura 2, observa-se no topo, formação de nuvens ondulatórias no topo da camada de poeiras do Sahara (a vermelho ao amarelo) e respetiva razão de depolarização em função da altura e tempo. No topo, à esquerda, está o registo de perfis verticais do coeficiente de extinção de partículas de poeira, razão extinção/dispersão. Em baixo, e à esquerda, aparece um perfil de humidade relativa, temperatura, temperatura virtual potencial, permitindo verificar como está distribuída a camada de poeiras e quando a saturação é atingida (base das nuvens), e a partir de nível há disponibilidade para congelamento. A cor azul, sugere nuvens, com uma razão de depolarização correspondente a <15%, nuvens de água líquida.

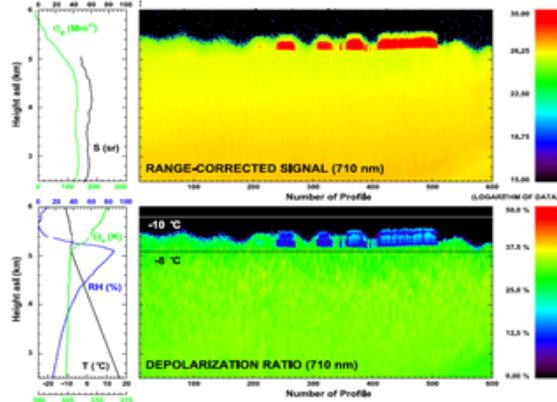


Figura 2: Perfis verticais de coeficiente de dispersão das partículas e humidade relativa, sendo que no caso não seria evidente o aumento do coeficiente de dispersão. Fonte: [7]

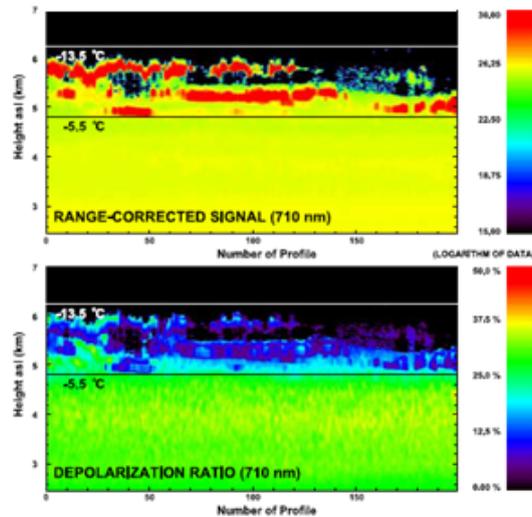


Figura 3: Desenvolvimento horizontal de nuvens de água no topo da camada de poeiras. Fonte: [7]

Na figura 2, observam-se dados relativos a perfis verticais de coeficiente de dispersão das partículas e humidade relativa, sendo que no caso não seria evidente o aumento do coeficiente de dispersão (crescimento das partículas de poeira) com o aumento da humidade relativa, sendo aparentemente observável uma pluma de poeira pura. O sinal medido de dispersão é dominado por dispersão de partículas de tamanhos superiores a 1 milímetro. Assim, permite-se avaliar a relação entre a concentração de aerossóis grandes e a concentração de nucleação de gelo. Na figura 3, encontra-se um perfil do mesmo género, retratando o desenvolvimento horizontal de nuvens de água no topo da camada de poeiras.

## 5 POLIPHON

O método POLIPHON (*polarization-lidar photometer networking*) é aplicável em condições nebulosas que ocorram durante eventos de poeira, e é por isso, importante no estudo das interações nuvem-aerossol. É utilizado com o fim de distinguir dispersão e extinção por poeiras, de aerossóis de outros tipos. Além disso, é útil na separação de propriedades de poeiras dos modos fino, de poeiras de modo grosso e dos restantes aerossóis. A interpretação das observações de polarização com lidar, permite a recolha de dados da concentração de massa de cada componente de uma mistura de dois tipos de aerossol. [5], [6] A análise é efetuada através dos métodos computacionais 1-step e 2-step.

As partículas tendem a alterar o estado de polarização de uma fração de luz incidente [5], [7], ou seja, o estado obtido pela sobreposição de ondas com a mesma frequência cuja oscilação (por exemplo da onda eletromagnética) é perpendicular à direção de propagação da onda. O fenómeno de polarização só se dá com ondas transversais.

Um parâmetro importante nestes estudos, é a chamada razão de depolarização das partículas (linear)  $\delta$ , definida como a razão de intensidade entre a componente perpendicular e a componente paralela da luz dispersada, calculada a partir da razão entre a fração de luz polarizada perpendicularmente à luz incidente pela componente do sinal que é paralela [7].

Diferentes tipos de aerossóis devem apresentar razões de depolarização diferentes [2] podendo haver interferência na determinação de perfis de poeira por parte de partículas que não são poeira desértica. Assim, conhecendo valores de depolarização típicos, e sabendo a localização da fonte no início da medição, a técnica de polarização lidar permite a determinação de perfis verticais da razão de depolarização, prever-se os vieses ocorridos durante a determinação destes perfis devido à depolarização originada por outros tipos de aerossóis.

A necessidade de estimar a fração dispersa de partículas que não são poeira, resulta do facto de que se quer separar três componentes de aerossóis (partículas esféricas, poeira fina e poeira grossa) através da observação das razões de depolarização.

## 5.1 Razão de Depolarização dos Diferentes Aerossóis

Técnicas de depolarização lidar podem ser aplicadas para a deteção da camada limite planetária em regiões afetadas frequentemente por eventos de poeira, estudando-se os processos de mistura entre a os aerossóis da troposfera livre e esta mesma camada. É importante pelas interações que podem ocorrer entre camada limite e a camada de poeiras, e, portanto, na avaliação dos mecanismos dessa interação [5] e ainda porque a dita camada funciona como limite à dispersão de aerossóis, sendo que acima da sua altura máxima, a carga de aerossóis é muito menor. A camada limite é influenciada por processos convectivos e de mistura que podem então a elevar a camada, ou bem acelerar a reentrada de poeiras em regiões mais próximas à superfície, alterando as propriedades óticas dos aerossóis.

Fazem-se estudos para obtenção de razões de depolarização linear combinando a análise com dados de outras propriedades óticas, permitindo-se a caracterização de diferentes tipos de aerossóis, como por exemplo as poeiras do Sahara. A técnica é baseada na alteração do estado de polarização entre o sinal emitido e o sinal recebido. Para partículas esféricas, a razão de depolarização linear volúmica  $\delta'$ , definidos pela razão entre a componente perpendicular (despolarizada) do coeficiente de dispersão dos aerossóis pela componente da radiação polarizada incidente que é paralela, tende a ser menor do que para partículas não esféricas. [5].

## 5.2 POLIPHON 1-step

Os métodos POLIPHON 1-step e POLIPHON e 2-step utilizam técnicas de separação semelhantes. A partir da equação da razão de depolarização das partículas, procede-se à separação do material de poeiras do restante material. Representa-se com a equação (1) a soma das componentes paralelas do coeficiente de polarização das partículas de não poeira pelo coeficiente de polarização de partículas de poeira.

$$\delta_p = \frac{\beta_{nd}^\perp + \beta_d^\perp}{\beta_{nd}^\parallel + \beta_d^\parallel} \quad (1)$$

Somando as quatro contribuições de coeficientes de dispersão,  $\beta_{nd}^\perp, \beta_d^\perp, \beta_{nd}^\parallel, \beta_d^\parallel$ , obter-se-á o coeficiente de dispersão. Assim, resulta que, o coeficiente de dispersão de partículas de que não são poeira, é dado pela diferença entre o coeficiente de dispersão total e o coeficiente de dispersão das poeiras,  $\beta_{nd} = \beta_p - \beta_d$ . Obtém-se:

$$\beta_d = \beta_p \frac{(\delta_p - \delta_{nd})(1 + \delta_d)}{(\delta_d - \delta_{nd})(1 + \delta_p)} \quad (2), \text{ para } \delta_{nd} \leq \delta_p \leq \delta_d$$

Com  $\delta_p < \delta_{nd}$ , em ambientes de nevoeiro urbano, onde a contribuição das poeiras para os coeficientes de dispersão é negligenciável, seleciona-se  $\beta_{nd} = \beta_p$ . Com pouca contribuição

de material que não é poeira  $\delta_p > \delta_a$ , seleciona-se  $\beta_a = \beta_p$ . Assim, neste caso, a fração de poeiras é assumida conter apenas o modo grosso, podendo essa fração ser interpretada como a fração total de poeira (ambos os modos). Se, a razão de depolarização das partículas é inferior à razão de depolarização das poeiras, admite-se que o coeficiente de dispersão dessas partículas é igual ao coeficiente de dispersão das poeiras. Se a razão de depolarização das partículas é maior que a razão de depolarização das poeiras apenas, seleciona-se que o coeficiente de dispersão das poeiras é igual ao coeficiente de dispersão total, ou seja, o coeficiente das partículas que não são poeiras é negligenciável. [2]. Para os resultados do método de um passo, assume-se que a fração de poeira ou a matéria não esférica contem apenas partículas de poeira de modo grosso, mas a fração de poeira pode também ser interpretada como a fração de poeira total (modos fino e grosso). [5]

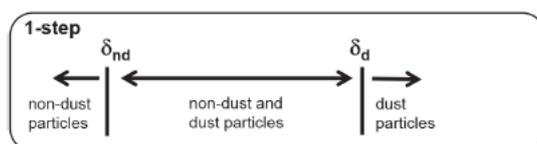


Figura 4 – Ilustração do método de separação *1-step*

Fonte: [2]

A figura 4, representa a separação de partículas pelo método de *1-step*, de poeira de partículas que não são poeira, utilizando a razão de depolarização das partículas.

### 5.3 POLIPHON *2-step*

O perfil resultante no método *1-step*, para os modos fino e grosso das partículas de poeira, pode ser usado como comparação com os respectivos perfis obtidos pelo método *2-step*, como parte de análise de incertezas.

Permite-se distinguir com este método, três tipos de aerossóis; partículas que não são poeira, que causam uma razão de depolarização linear de partículas de um dado valor; partículas de modo fino que causam uma razão de depolarização de outro valor e partículas de poeira desértica de modo grosso, que causam uma razão de depolarização de partículas com um outro valor.

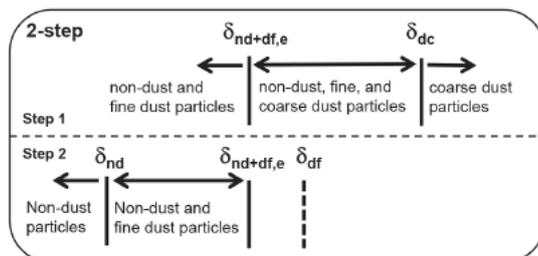


Figura 5 – Ilustração do método de separação *2-step*

Fonte: [2]

A figura 5, representa a separação de partículas de poeira de modo fino e de partículas que não são poeira, numa primeira instância, seguido do segundo passo, onde se passa a separar partículas de material que não é poeira, de poeira do modo fino, e de poeira de modo grosso. Os cálculos efetuados são semelhantes aos realizados no método de *1-step*. Antes da separação dos coeficientes de dispersão das partículas residuais (não poeira + modo fino de poeira), separa-se primeiramente o coeficiente de dispersão do modo grosso do coeficiente de dispersão devido ao modo fino de poeiras somado à dispersão devida a partículas que não são poeira. (1) passa a (3) no método *2-step*, com “*dc*” e “*df*” a representarem os modos grosso e fino respetivamente.

$$\delta_p = \frac{\beta_{nd}^{\perp} + \beta_{df}^{\perp} + \beta_{dc}^{\perp}}{\beta_{nd}^{\parallel} + \beta_{df}^{\parallel} + \beta_{dc}^{\parallel}} \quad (3)$$

Para a separação entre as partículas que não são poeiras e o modo fino das partículas de poeira, removem-se os efeitos óticos do modo grosso de poeira, a partir do coeficiente do valor total de dispersão das partículas e a razão de depolarização das partículas. No primeiro passo do método *2-step*, começa-se por separar o modo grosso da poeira, das restantes partículas. Definindo a razão de desolarização como  $\delta_{nd+df,e} \leq \delta_p \leq \delta_{dc}$  Obtem-se um coeficiente de dispersão do modo grosso de

$$\beta_{dc} = \beta_p \frac{(\delta_p - \delta_{nd+df,e})(1 + \delta_{dc})}{(\delta_{dc} - \delta_{nd+df,e})(1 + \delta_p)} \quad (4)$$

Onde  $\delta_{nd+df,e}$  é a razão de depolarização para partículas residuais depois de removida a influência do modo grosso. O coeficiente de dispersão de partículas de modo fino com partículas que não poeira é obtido por  $\delta_{nd+df} = \beta_p - \beta_{dc}$ . Fazendo cálculos semelhantes aos apresentados para o primeiro método, obter-se-á

$$\delta_{nd+df} = \beta_p \frac{\beta_{dc}(\delta_p - \delta_{dc}) + \delta_p(1 + \delta_{dc})\beta_{nd+df}}{\beta_{dc}(\delta_{dc} - \delta_p) + \beta_{nd+df}(1 + \delta_{dc})} \quad (5)$$

Que pode ser simplificado para  $\delta_{nd+df} = \beta_p$  para  $\delta_p \leq \delta_{nd+df,e}$  e  $\delta_{nd+df} = \beta_p$  para  $\delta_{nd+df,e} < \delta_p$ .

Assumem-se valores do coeficiente de depolarização do modo grosso e dos aerossóis residuais (excluindo o modo grosso de poeira).

Os perfis do modo fino e modo grosso em termos de coeficientes de extinção e dispersão e as concentrações de volume e massa podem ser obtidos através do esquema de análise de dados método de dois passos. Em conjunto, os métodos *1-step* e *2-step* fornecem dados complementares indicando o intervalo de potenciais soluções para os três componentes de aerossóis separados no segundo método.

A informação retirada destas medições pode ser útil para a caracterização das partículas não esféricas, utilizando-se uma base confiável de valores de razões de depolarização de ambos os modos, fino e grosso. Pode verificar-se se os dados obtidos pelo método computacional

POLIPHON são acompanhados pelos dados da fotometria, e assim avaliar a consistência dos seus resultados, em parâmetros como a espessura ótica dos aerossóis, o expoente de Ångström e fração do modo fino de poeiras.

## 6. Conclusão

Para o estudo da formação de gelo em nuvens, utilizam-se uma série de dados de propriedades óticas de partículas de poeira, e efetuam-se estimativas de concentrações de núcleos de gelo. Além disso, podem obter-se perfis de temperatura, humidade, vento e trajetórias seguidas por um determinado evento. Utiliza-se uma extensão de um método computacional recente, o POLIPHON, na versão *2-step*, com o fim de separar propriedades óticas dos modos fino e grosso dos aerossóis, sendo uma extensão do já bem estabelecido método *1-step* do POLIPHON, que separava material de poeira de material que não é poeira. Os métodos poderão ser utilizados como complementares. A separação é feita em termos de coeficientes de dispersão e extinção e concentração de massa e volúmica de partículas. A utilização desta técnica tem permitido uma evolução nas pesquisas relacionadas com as propriedades das poeiras e no estudo da sua influência na formação de nuvens e das consequências ambientais que trazem consigo.

## References

- [1] Ansmann, A., et al. (2003), Long-range transport of Saharan dust to northern Europe: the 11-16 The 11-16 October 2001 outbreak observed with EARLINET,
- [2] R. E. Mamouri and A. Ansmann, 2011, fine and coarse dust separation with polarization lidar. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- [3] Gian Paolo; Barnaba, Francesca; Giorgi, Riccardo; Santacasa, Alessandra, 2000 Altitude-resolved properties of a Saharan dust event over the Mediterrane, *Atmospheric Environment*
- [4] Seinfeld, J. H., and Pandis, S. N., 1998. *Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change. Atmospheric Chemistry and Physics*, John Wiley, New York.
- [5] Bravo Aranda, J. A., 2014, Lidar Depolarization Technique: Assesment of the Hardware Polarizing Sensitivity and Applications, Granada
- [6] A. Valenzuela, F. J. Olmo, H. Lyamani, M. Anton, A. Quirantes, and L. Alados-Arboledas, 2012. Aerosol radiative forcing during African desert dust events (2005-2010) over South-Eastern Spain. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*
- [7] A. Ansmann, M. Tesche, D. Althausen, D. Müller, P. Seifert, V. Freudenthaler, B. Heese, M. Wiegner, G. Pisani, P. Knippertz, and O. Dubovik, 2007. Influence of Saharan

dust on cloud glaciation in southern Morocco during the Saharan Mineral Dust Experiment

- [8] Cantrell, W., and A. Heymsfield (2005), Production of ice in tropospheric clouds: A review, *Bull. Am. Meteorology. Society*
- [9] DeMott, P. J., A. J. Prenni, M. S. Richardson, S. M. Kreidenweis, C. H. Twohy, and D. C. Rogers (2006), Ice nuclei variability, relation to ambient aerosol properties, and impacts on mixed-phase clouds, Sixteenth ARM Science Team Meeting.
- [10] Sugimoto and Lee, 2006. Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki, Japan.
- [11] Bohren, C. F., and D. R. Huffman (1983), *Absorption and scattering of light by small particles*, Wiley
- [12] Freudenthaler et al., 2009. Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006
- [13] Heritage, G. L. and Large, A.R.G., 2009. Laser Scanning for the Environmental Sciences.

# LEVANTAMENTO CLIMATOLÓGICO DA PRECIPITAÇÃO EM PONTA DELGADA NO ANO 2017

VANDA COSTA

*Universidade de Évora, Departamento de Física, Rua Romão Ramalho, 59 Évora  
Évora, Portugal, m37060@gmail.com*

Este trabalho consiste na análise da precipitação ocorrida no ano de 2017 em Ponta Delgada, principal cidade da ilha São Miguel da Região Autónoma dos Açores. Foram utilizados dados de 10 minutos da estação meteorológica automática (EMA) da Nordela, que faz parte da rede nacional de estações meteorológicas do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. e a sua análise efetuada no Microsoft Excel. Na análise comparativa com a Normal Climatológica 1961-1990 verifica-se que no ano em estudo apresenta um défice de precipitação anual.

**Palavras chave:** Ponta Delgada. Climatologia. Precipitação.

## 1. Introdução

A precipitação é uma das variáveis climáticas mais importantes para a nossa civilização e para os nossos ecossistemas, desempenhando um papel fundamental no ciclo global de energia e água (Frei et al, 1998). A informação da precipitação é crítica para compreender o balanço hidrológico e as interações complexas entre os componentes de pequena e grande escala dentro do ciclo hidrológico. A distribuição espacial e temporal da precipitação é crucial para a capacidade de modelar e prever o estado do tempo e identificar mudanças climáticas. A distribuição da precipitação é também importante para a gestão da água, agricultura, pecuária, energia e controle de inundações e seca (Hatzianastassiou et al, 2008).

Identificar se os valores ocorridos de precipitação em determinada altura (dia, mês, anos ou conjunto de anos) estão acima ou abaixo da precipitação esperada, é resultado da comparação com os valores climatológicos para a determinada região presentes nas Normais Climatológicas de Referência. Identificando-se assim períodos em que ocorreu excesso ou défice de precipitação, contudo pode-se igualmente interpretar como mais ou menos eventos da precipitação do que o normalmente esperado para a posição e o tempo particulares do ano. (Epstein, 1990)

A Região autónoma dos Açores é constituída por 9 ilhas, divididas em 3 grupos, nomeadamente o grupo Ocidental (Flores e Corvo), o grupo Central (Faial, Pico, São Jorge, Graciosa e Terceira) e o grupo Oriental (São Miguel e Santa Maria). São Miguel é então a ilha com maior população e Ponta Delgada é a maior cidade dos Açores. Nestas condições, explica-se que o estudo em causa incida sobre a estação que se encontra em Ponta Delgada, a Estação Meteorológica Automática da Nordela (EMA Nordela). Esta, assinalada na figura seguinte (Figura 1), encontra-se a uma altitude 79 m, numa latitude 37°44' N e longitude

25°42'W. É uma estação que pertence à rede Nacional de Estações Automáticas de Portugal, pertencentes ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).



Figura 1 – Localização da estação da Nordela, cidade de Ponta Delgada na ilha de São Miguel, Açores. Fonte: Google Maps.

## 2. Metodologia

Os dados foram cedidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Tratam-se de dados obtidos a cada 10 minutos e foram tratados com recurso ao programa *Microsoft Excel*.

## 3. Resultados/discussão

A tabela seguinte (Tabela 1) apresenta a distribuição do total da precipitação mensal e anual. Identifica-se em cada mês o máximo de precipitação no registo de 10 minutos. O dia do mês em que se verificou maior quantidade de precipitação e o total de precipitação ocorrido no respetivo dia.

Outubro foi o mês com maior valor de precipitação (167,6 mm), e agosto o que apresenta menor valor (10,0 mm), num total anual de 904,1 mm. Maio foi o mês com mais dias com registo de precipitação (22 dias), já em julho apenas se apurou 9 dias com precipitação. Anualmente contabilizou-se um total de 180 dias em que ocorreu precipitação.

O máximo de precipitação registado em 10 minutos aconteceu no mês de outubro com um valor de 11,6 mm. O dia do ano em que o valor da precipitação foi maior, com 45,9 mm, foi o dia 24 em abril. O dia 24 de agosto foi o dia que apresenta um máximo de precipitação menor, com apenas 2,1 mm.

Tabela 1. Distribuição do total da precipitação no ano 2017.

Mês	Total Precipitação (mm)	Número de dias com precipitação	Máximo de precipitação em 10 minutos	Dia de maior precipitação	Total de precipitação do dia
<b>Janeiro</b>	71,4	14	4,9	24	25,9
<b>Fevereiro</b>	77,0	14	2,1	8	15,8
<b>Março</b>	45,0	13	2,1	9	4,1
<b>Abril</b>	114,8	19	4,5	24	45,9
<b>Mai</b>	71,8	22	2,8	2	12,9
<b>Junho</b>	27,3	14	1,9	1	13,4
<b>Julho</b>	33,7	9	1,9	21	22,8
<b>Agosto</b>	10,0	12	1,0	24	2,1
<b>Setembro</b>	89,7	11	7,7	26	39,6
<b>Outubro</b>	167,6	16	11,6	27	40,1
<b>Novembro</b>	128,0	20	10,6	23	35
<b>Dezembro</b>	67,8	16	7,2	1	37,6
<b>Anual</b>	904,1	180	11,6	24/abril	45,9

Numa análise direta da Figura 2, apura-se que não existe qualquer relação direta entre o número de dias com precipitação e quantidades de precipitação. Ou seja, verifica-se que maio foi o mês com mais número de dias que se registou precipitação, contudo outubro é o mês com maior valor de precipitação mensal e abril o mês com o maior valor diário de precipitação.

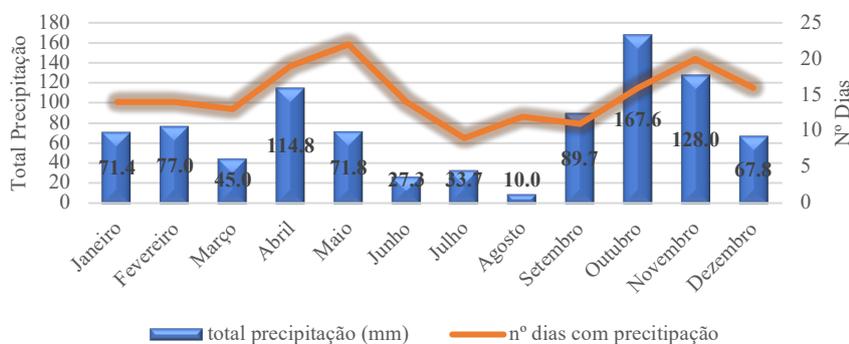


Figura 2. Quantidade de precipitação mensal em relação ao número de dias com registro de precipitação por mês

A normal de referência 1961-1990, aponta o mês de julho como o menos chuvoso (29,6 mm) e o mês de novembro onde deverá ocorrer mais precipitação (129,0 mm). Ao analisar os valores registados verificamos que efetivamente a precipitação ocorrida em novembro de 2017 é bastante próxima do valor esperado, com apenas 1,0 mm de diferença, contudo este não foi o mês com maior precipitação.

Comparando os registos de precipitação do ano 2017 com os valores esperados (Tabela 2), apresentados na normal de referência 1961-1990, e através do *Desvio Relativo* (Eq. A.1) da precipitação em relação ao valor da normal de referência 1961-1990, obtém-se uma perspetiva importante do comportamento da precipitação no ano em estudo (tabela 2 e figura

2). Sendo assim, verifica-se que a diferença entre o total anual de precipitação e o total de referência é de apenas -90 mm equivalendo a um déficit anual de -9,0% (relativo à normal de referência). Outubro é o mês que apresenta o maior excesso de precipitação, ou seja, ocorreu 68,6% mais precipitação do que a esperada, e agosto o mês com maior déficit (-77,8%), resultante de uma diferença entre 10,0 mm de precipitação ocorrida em relação a 45,0 mm de precipitação esperada.

Tabela 2. Relação dos totais de precipitação mensais e anual com os valores da normal de referência 1961-1990. Desvio Relativo.

Mês	Total de Precipitação (mm)		Desvio Relativo (%)
	Observada 2017	Normal de referência (1961-1990)	
<i>Janeiro</i>	71,4	118,0	-39,5
<i>Fevereiro</i>	77,0	90,2	-14,6
<i>Março</i>	45,0	96,2	-53,2
<i>Abril</i>	114,8	72,3	58,8
<i>Mai</i>	71,8	62,7	14,5
<i>Junho</i>	27,3	39,0	-30,0
<i>Julho</i>	33,7	29,6	13,9
<i>Agosto</i>	10,0	45,0	-77,8
<i>Setembro</i>	89,7	94,4	-5,0
<i>Outubro</i>	167,6	99,4	68,6
<i>Novembro</i>	128,0	129,0	-0,8
<i>Dezembro</i>	67,8	118,2	-42,6
<b>Anual</b>	<b>904,1</b>	<b>994,0</b>	<b>-9,0</b>

Apesar de se verificar uma grande variabilidade mensal entre excesso e déficit de precipitação ocorrida em 2017 em relação à precipitação apresentada na normal 1961-1990, o desvio relativo anual é relativamente pequeno, sendo de apenas 9,0% (Figura 3).

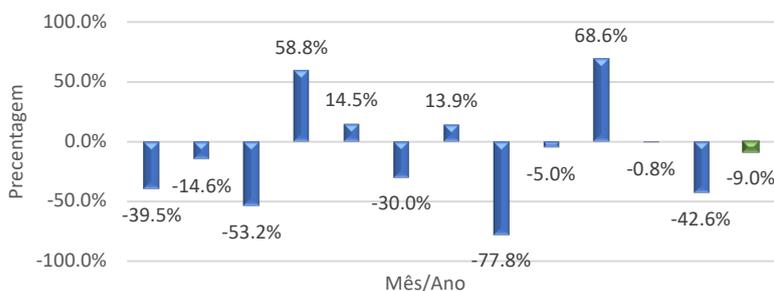


Figura 3. Erro Relativo entre a precipitação registrada em 2017 e a normal de referencia 1961-1990.

Relativamente aos máximos de precipitação do ano 2017 em relação aos máximos apresentados pela normal de referencia 1961-1990, verifica-se que apenas o mês de abril o valor máximo da normal de referencia foi ultrapassado (Tabela 3 e Figura 4).

Tabela 3. Relação entre máximos de precipitação com os valores da normal de referência 1961-1990

<i>Mês</i>	<i>Total Precipitação 2017</i>	<i>Máximo diário 2017</i>	<i>Máxima diário Normal (1961-1990)</i>
<i>Janeiro</i>	71,4	25,9	145,2
<i>Fevereiro</i>	77,0	15,8	41,1
<i>Março</i>	45,0	4,1	63,3
<i>Abril</i>	114,8	45,9	37,4
<i>Mai</i>	71,8	12,9	165,7
<i>Junho</i>	27,3	13,4	41,2
<i>Julho</i>	33,7	22,8	35,3
<i>Agosto</i>	10,0	2,1	66,8
<i>Setembro</i>	89,7	39,6	56,4
<i>Outubro</i>	167,6	40,1	84,5
<i>Novembro</i>	128,0	35,0	91,1
<i>Dezembro</i>	67,8	37,6	73,0
<b>Total</b>	904,1	45,9	165,7

Segundo a normal de referência 1961-1990, maio é o mês onde, por norma, se regista o valor máximo de precipitação (165,7 mm) já o menor máximo de precipitação ocorre no mês de julho (35,3 mm).

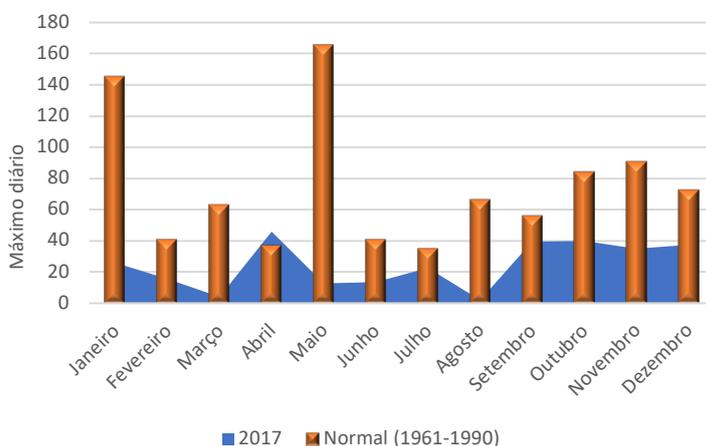


Figura 4. Máximos diários de precipitação do ano 2017 e da normal de referencia 1961-1990.

#### 4. Conclusões

O ano 2017, comparativamente à normal de referência de 1961-1990, foi um ano que apresentou um desvio relativo mensal bastante dispare, indo de um excesso de 68,6% até um déficit de -77,8%. Contudo, o desvio relativo anual apresenta um déficit de apenas -9,0%.

O mês de agosto apenas registou 10,0 mm, sendo assim o mês com menor precipitação. Já outubro foi o mês com maior valor de precipitação mensal com 167,6mm.

#### 5. Agradecimentos

Agradecimentos ao instituto Português do Mar e da Atmosfera I.P. pela cedência dos dados utilizados.

#### 6. Apêndice

Equação utilizada para obter o desvio relativo da precipitação observada em relação à precipitação da normal de referência 1961-1990.

$$\text{Desvio Relativo} = \frac{\text{Total Observado} - \text{Total da normal}}{\text{Total da normal}} \times 100 \quad (\text{A.1})$$

#### 7. Referências

1. Frei, C. and Schär, C. 1998. *A Precipitation Climatology Of The Alps From High-Resolution Rain-Gauge Observations*. International Journal Of Climatology Int. J. Climatol. **18**: 873–900.
2. Normal Climatológica 1961-1990 – Instituto de Meteorologia I.P.
3. Epstein, E.S. and Barnston, A. G. 1990. *A Precipitation Climatology of 5-Day Periods*. J. Climate, 3, 218-236.
4. Hatzianastassiou, N., B. Katsoulis, J. Pnevmatikos, and V. Antakis, 2008. *Spatial and Temporal Variation of Precipitation in Greece and Surrounding Regions Based on Global Precipitation Climatology Project Data*. J. Climate, 21, 1349–1370.

## GEOMAGNETISMO: O CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA

PEDRO TEIXEIRA

*Instituto de Investigação e Formação Avançada (IIFA), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671 Évora, Portugal, d40809@alunos.uevora.pt*

The area of Geomagnetism deals with the study of the Earth's magnetic field and the magnetic properties presented by the rocks. But the magnetism demonstrated by both is not the same and this article aims to simply and concisely start by distinguishing the magnetic fields of the two objects. Following by an exploration through the formation mechanisms of the internal magnetic field, addressing the dynamo theory, and the external magnetic field, represented by the magnetosphere. Overall, the Earth's magnetic field is the sum of different magnetic fields that together protect the planet Earth from the harms of the solar wind.

### 5 Introdução

O Geomagnetismo é a área da ciência que estuda o campo magnético do planeta Terra, os mecanismos da sua formação e também a variação espacial e temporal do campo. Numa escala diferente, estuda também os fenómenos relacionados com as propriedades magnéticas das rochas. A palavra geomagnetismo significa magnetismo da Terra ou magnetismo das rochas mas, na verdade, o magnetismo apresentado em ambos os casos é um pouco diferente. Para compreender essa diferença é necessário saber o que é o magnetismo e como ele é criado. No início deste artigo começa-se por fazer essa distinção para assim poder explicar os mecanismos de formação do campo magnético terrestre com mais clareza. A força magnética deste campo tem duas origens diferentes, uma interna que é explicada pela teoria do dínamo e outra externa resultante da interação do vento solar com o campo magnético terrestre. No texto seguinte serão explorados um pouco destes processos, mencionando também algumas descobertas recentes que contribuem para um melhor entendimento sobre o tema, nomeadamente, a lua como um importante elemento na criação do campo magnético terrestre e a descoberta de uma nova barreira de origem humana, que se junta ao campo magnético na tarefa de proteção do planeta.

### 6 Magnetismo

Se se perguntar porque existe magnetismo, a questão pode parecer um tanto filosófica e sem resposta definitiva. Mas do ponto de vista da física, na natureza não existem partículas magnéticas, por isso, nesta perspetiva já faz sentido questionar como aparece então a força magnética. Sendo um campo o lugar no espaço onde uma força atua, pela relatividade restrita, os campos elétrico e magnético são dois aspetos inter-relacionados de um mesmo objeto que se designa por campo eletromagnético. Desta forma existe apenas uma partícula fundamental transportadora da força eletromagnética, o fóton. Mas a força magnética não se manifesta isoladamente, ela é gerada através de movimentos de cargas e na interação entre corpos. Na

prática, um campo magnético aparece sempre que existem cargas elétricas em movimento, também chamadas de correntes elétricas, que geram um campo magnético ao seu redor. Em física, cargas elétricas são partículas com carga positiva ou negativa, como prótons e elétrons. O campo magnético de um corpo representa o espaço interior e à volta dele onde a força magnética atua. A forma apresentada pelo campo caracteriza a distribuição da força magnética no espaço. A forma mais comum de um campo magnético, e também aquela que o planeta Terra apresenta, é a de um dipolo magnético que, como o nome indica, é um campo com dois polos de sinais opostos onde temos linhas do campo magnético a sair do polo positivo e a entrar no polo negativo desenhando linhas curvas e fechadas.

Mas existem casos onde o campo magnético não resulta do movimento de cargas elétricas, como são exemplo as rochas que apresentam propriedades magnéticas sem apresentarem correntes elétricas. O fenómeno em que certos materiais e rochas apresentam magnetismo permanente chama-se de ferromagnetismo e só materiais classificados como ferromagnéticos é que conseguem exibir estas propriedades. A causa do ferromagnetismo está relacionada com o *spin* dos elétrons e o seu momento magnético, quando estes estão arrançados de uma forma regular. Este tipo de magnetismo é induzido nos materiais ferromagnéticos por um campo magnético externo aquando da sua formação, que faz com que as suas moléculas adquiram uma orientação predominante, atribuindo desta forma ao material um magnetismo permanente. Além do ferromagnetismo, existem também o paramagnetismo e o diamagnetismo. Estes dois últimos casos ocorrem em materiais que reagem de forma mais fraca a um campo magnético e em que as propriedades magnéticas são apenas temporárias.

Depois de esclarecidas as formas de criação do magnetismo pode-se fazer então a distinção entre o campo magnético apresentado por um planeta como a Terra e aquele apresentado por uma rocha magnetizada. No caso do campo que envolve a Terra trata-se de um campo magnético variável gerado por correntes elétricas também elas variáveis. Este tipo de campo apresenta variações espaciais e temporais e também de intensidade. No caso de um material ferromagnético magnetizado trata-se de um campo magnético estático, ou seja, com intensidade constante no espaço e no tempo e que é gerado pelas propriedades intrínsecas das cargas elétricas.

A razão de se saber que o campo magnético terrestre é gerado por correntes elétricas e não por depósitos de ferro magnetizados deve-se a um parâmetro designado por temperatura de Curie. Este parâmetro designa o ponto de temperatura crítica acima do qual um material magnetizado perde o magnetismo permanente, quando as orbitais dos elétrons perdem a sua ordenação e tornam-se aleatórias. Como a temperatura de Curie do ferro é 1043 K e a temperatura no interior da Terra é mais elevada que esse valor, o campo magnético terrestre só pode ser produzido por correntes elétricas, além de apresentar outras particularidades que caracterizam um campo magnético variável.

## 7 O campo magnético terrestre

O campo magnético terrestre é uma grandeza com carácter vetorial, isto quer dizer que em qualquer ponto no espaço o campo tem uma direção e uma dimensão, que caracteriza a força

magnética presente em cada ponto. Como referido anteriormente, o campo magnético da Terra é variável, isto significa que a distribuição da força magnética no espaço não é homogénea e a sua intensidade possui variações no tempo. Estas variações podem ocorrer em períodos curtos e são causadas pela interação do vento solar com o campo magnético terrestre. Exemplos deste tipo de variações são as variações diárias, as tempestades magnéticas e impulsos magnéticos. Ou então podem ser lentas e de longa duração, com origem na atividade do núcleo externo e designam-se por variações seculares. O eixo do dipolo do campo magnético de um planeta geralmente não coincide com o eixo de rotação do mesmo (Saturno é a exceção que tem os dois eixos alinhados), podendo até haver uma diferença muito grande, mas no caso da Terra essa diferença é baixa, sendo apenas em cerca de  $11,3^\circ$ . A maior diferença está no facto de, atualmente, o polo norte magnético corresponder ao polo sul geográfico, e vice-versa. Por isso se diz que o campo magnético terrestre se encontra atualmente numa fase inversa. Ao contrário da inversão regular do campo magnético do Sol, que ocorre a cada onze anos, o da Terra é irregular e pode ocorrer entre algumas dezenas a centenas de milhares de anos. A causa desta inversão ainda não é totalmente conhecida, mas poderá estar relacionada com mecanismos interiores do planeta.

Em corpos planetários como a Terra, o campo magnético é gerado principalmente por correntes elétricas, produzidas por um fluido condutor no interior do planeta. Este material condutor está relacionado com a composição do planeta e pode diferir entre diferentes planetas, no caso da Terra é o ferro em estado líquido que toma esse papel. Como curiosidade, só existe mais um planeta no Sistema Solar, além da Terra, a possuir ferro líquido como fluido condutor, é o planeta terrestre Mercúrio. Entre os restantes planetas com um campo magnético global, Júpiter e Saturno possuem hidrogénio metálico líquido e Úrano e Neptuno utilizam água salgada como fluido condutor de correntes elétricas.

O campo magnético terrestre não tem apenas uma origem. Ele resulta da união de diferentes campos que são produzidos em locais diferentes. Para estudar os mecanismos de formação deste campo é necessário distingui-lo em duas componentes. A primeira componente é o campo magnético com origem interna, responsável por cerca de 90% da força magnética do campo magnético global. A segunda é o campo magnético com origem externa e que contribui com os restantes 10% da força magnética para o campo magnético terrestre. Os mecanismos de formação envolvidos em cada uma destas partes serão explorados nas secções que se seguem.

### ***7.1 Mecanismos de Origem Interna***

A componente principal do campo magnético terrestre é gerada no interior do planeta através de um processo semelhante ao de um dínamo. A teoria do dínamo é a explicação científica atualmente mais aceite para explicar como a Terra produz o seu campo magnético interno e o mantém durante longas escalas de tempo.

### 7.1.1 Teoria do Dínamo

Em física, um dínamo é um aparelho que converte energia mecânica em energia elétrica e, de modo semelhante, os movimentos mecânicos do fluido condutor produzem correntes elétricas criando aquilo que se designa por geodínamo. Para este processo ocorrer no interior de um planeta são necessários três requisitos. Primeiro é necessário existir um fluido condutor de eletricidade. Segundo é necessária energia cinética proveniente da rotação do planeta que induza movimento de rotação no fluido. Por último, o terceiro requisito é uma fonte de energia interna que provoque movimentos convectivos no fluido. No caso da Terra, o núcleo externo comporta-se como um gerador elétrico natural e reúne os três requisitos para colocar o geodínamo em funcionamento. O núcleo externo encontra-se em estado líquido e é composto principalmente por ferro, com a presença de algum níquel e também outros elementos em muito baixa quantidade. A indução de um campo magnético requer um fluido em rotação. A rotação do núcleo externo provém do efeito de Coriolis causado pela rotação da Terra. A força de Coriolis tende a organizar o material do núcleo externo em colunas de fluido e correntes elétricas alinhadas com o eixo de rotação da Terra (Figura 1). Estas correntes elétricas por si só já produzem campo magnético, mas sem mais nenhum processo envolvido o campo acabaria por desaparecer por dissipação da energia elétrica, num período de 15 a 20 mil anos. Por isso, para manter o campo, é necessário existirem mecanismos de convecção. Estes mecanismos são provavelmente uma combinação de convecção termal causada pelo decaimento radioativo e convecção composicional produzida pela diferenciação química. Os movimentos convectivos induzem a formação de novas correntes elétricas que irão produzir novos campos magnéticos associados a elas. Se a geometria entre o fluido e os campos recém-formados for a ideal, estes últimos somam-se ao campo magnético preexistente produzindo um geodínamo que é autossustentável. Este é o modelo que a teoria do dínamo utiliza para explicar a criação e manutenção do campo magnético terrestre.

Do ponto de vista eletromagnético o processo acontece da seguinte forma:

1. correntes elétricas variáveis, produzidas pelo fluido condutor em movimento, geram campos magnéticos variáveis;
2. um campo magnético variável gera um campo elétrico;
3. a presença dos dois campos (magnético e elétrico) exerce uma força no fluido que induz a formação de correntes elétricas variáveis;

As correntes elétricas do passo 3 geram novos campos magnéticos que se unem ao campo preexistente completando assim o ciclo que é autossustentável. A quantificação física das três etapas é resumida pela equação de indução magnética (Eq. 1).

$$\partial B / \partial t = \eta \cdot \nabla^2 \cdot B + \nabla \times (u \times B) \quad (1)$$

Onde:

$B$  é o campo magnético;

$\partial B / \partial t$  é a derivada parcial do campo em ordem ao tempo ( $t$ );

$\nabla^2$  é o operado de Laplace;

$\nabla \times$  é o operador rotacional

$u$  é a velocidade do fluido;

$\eta = 1/\sigma\mu$  é a difusividade magnética ( $\sigma$  é a condutividade elétrica e  $\mu$  é a permeabilidade);

A equação de indução magnética é uma equação diferencial parcial que permite quantificar o campo magnético ( $B$ ) e resulta da combinação de três leis físicas: a lei de Ampère, a lei de Faraday e a força de Lorentz.

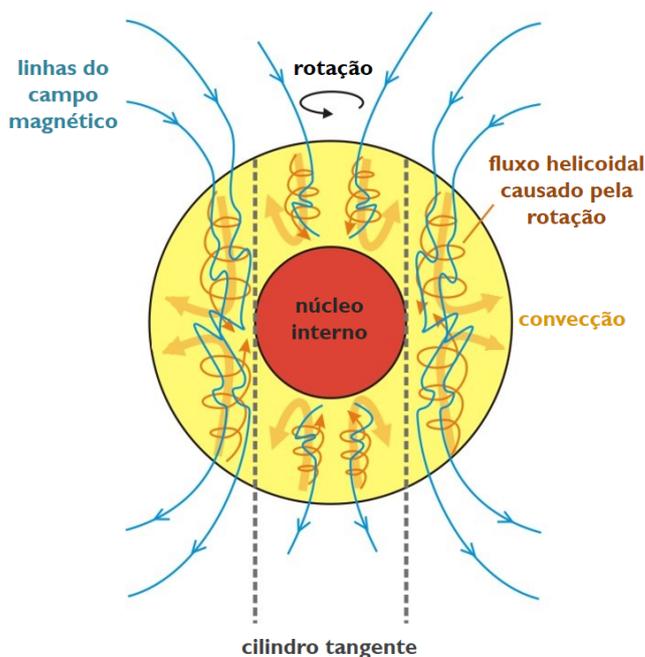


Figura 1. Esquemática da teoria do dínamo em ação. Representação da organização tendencialmente colunar do fluido condutor, no núcleo externo, exercida pelos movimentos de rotação e convecção. (Imagem retirada e adaptada de “all-geo.org”)

### 7.1.2 A Lua e o Geodínamo

A explicação clássica da formação do campo magnético terrestre requeria, para que o geodínamo funcionasse, que o planeta tenha estado totalmente derretido há quatro mil milhões de anos. Isso implica que o núcleo do planeta tenha arrefecido de uma temperatura inicial de cerca de 7100 K para o valor atual de 4100 K. Contudo, modelos recentes que conjugam a evolução da temperatura no interior da Terra com estudos geoquímicos da composição dos basaltos e carbonatitos mais antigos não são compatíveis com um arrefecimento dessa magnitude. Por isso, um grupo de investigadores do CNRS (*Centre National de la Recherche Scientifique*) e da Universidade Blaise Pascal, propuseram uma nova fonte de energia. A ação

da Lua sobre a Terra tem sido muitas vezes deixada de lado, mas a sua influência bastaria para manter o geodínamo a funcionar ao longo deste tempo e colocar de parte o arrefecimento de cerca de 3000 K. No trabalho publicado pela equipa (Andrault *et al.*, 2016) é mostrado como a Lua compensaria as perdas de energia ao longo do tempo, sendo sugerido que o arrefecimento do núcleo tenha sido apenas de 300 K em relação a uma temperatura inicial de 4400 K.

O planeta Terra possui uma forma esférica levemente achatada e roda em volta de um eixo de inclinação que oscila em torno dos polos, originando o movimento de precessão. As forças de maré causadas pela Lua exercem no manto da Terra uma deformação elástica. Da mesma forma o Sol também causa deformações cíclicas sobre a Terra. No trabalho acima citado é mostrado como o efeito do movimento de precessão e das forças de maré pode induzir movimentos contínuos no ferro líquido que compõe o núcleo externo, gerando o campo magnético no processo. O planeta Terra recebe de forma contínua  $3,7 \times 10^9$  W de potência através da transferência de energia gravitacional e rotacional produzida pelo sistema Terra-Lua-Sol e pensa-se que mais de um terço dessa energia esteja disponível para sustentar os movimentos do fluido no núcleo externo. Esta energia é suficiente para gerar o campo magnético da Terra e em conjunto com a Lua é suficiente para resolver o problema do enorme arrefecimento apresentado pela explicação clássica.

Como nem a rotação da Terra em volta do seu eixo, nem a direção do seu eixo, nem a órbita da Lua são perfeitamente regulares, o seu efeito conjunto produz movimentos instáveis no núcleo e pode produzir flutuações no geodínamo. Este efeito pode ser também responsável pelos pulsos de calor que ocorrem no núcleo externo e na fronteira com o manto. A novo modelo sugerido mostra, assim, que os efeitos da Lua sobre a Terra vão mais além do que o efeito das marés nos oceanos.

## **7.2 Mecanismos de Origem Externa**

As regiões externas ao planeta Terra onde se produz parte do seu campo magnético são: na magnetosfera, através da interação com o vento solar, e na ionosfera através da ionização de moléculas da atmosfera superior. De seguida procede-se a um detalhamento das duas regiões.

### **7.2.1 Magnetosfera**

A magnetosfera representa a região no espaço em redor de um corpo planetário onde a força do seu campo magnético está a atuar, por outras palavras, é a extensão do campo magnético para fora do planeta. Apesar do nome, a magnetosfera tem uma forma assimétrica que é esculpida pela pressão que o vento solar exerce sobre o campo magnético terrestre. A tarefa principal da magnetosfera é impedir, desviar e atrasar a propagação das partículas carregadas do vento solar direcionadas à superfície do planeta. Aquilo que se designa por vento solar são partículas como eletrões, prótons e subpartículas como neutrinos, muito energéticas e que são emitidas continuamente a partir da coroa solar. Além de serem portadoras de elevadas energias, as partículas do vento solar também transportam o campo magnético do Sol para

além dos confins do Sistema Solar. Devido a ter uma extensão muito grande, a magnetosfera compreende regiões no espaço onde o campo magnético, as partículas, subpartículas e todos os outros constituintes que a compõem apresentam comportamentos, características e/ou propriedades físicas um pouco diferentes. Por isso, para um melhor reconhecimento, existem várias regiões na magnetosfera que são diferenciadas segundo esses aspectos. A Figura 2 apresenta uma versão simplificada das principais zonas que compõem a magnetosfera, para facilitar a sua compreensão.

A região mais exterior da magnetosfera é a frente de choque, onde o vento solar incide a grande velocidade (entre 200 a 1000 km/s) e encontra resistência pela primeira vez, sofrendo uma diminuição abrupta na velocidade de propagação.

A bainha magnética é composta principalmente pelo vento solar abrandado e é uma região que exhibe fluxos de energia de partículas elevados e onde a direção e a magnitude do campo magnético variam erráticamente. Age como uma almofada na transmissão da pressão do vento solar ao campo magnético do planeta.

A magnetopausa marca a fronteira entre o meio físico solar e o meio físico terrestre e sustenta correntes elétricas que asseguram essa descontinuidade. É a zona de convergência entre o campo magnético da Terra com o vento solar, onde a pressão do primeiro iguala a pressão exercida pelo segundo. Como os dois lados contêm plasma magnetizado, as interações nesta região são muito complexas. A forma e a dimensão da magnetopausa varia consoante a pressão exercida pelo vento solar.

A região frontal da magnetosfera tem um prolongamento de cerca de 10 raios terrestres e, como o nome indica, é a zona que fica sempre voltada para o Sol e onde o vento solar incide diretamente.

A região mais interior da magnetosfera é a plasmasfera e compreende partículas carregadas de baixa energia (elétrons e íons), também designadas por plasma. Esta zona começa a uma altitude de cerca de 60 km, em relação à superfície do planeta, e estende-se até 3 ou 4 raios terrestres. É uma região em forma de toro (forma de *donut*), que roda em torno da Terra acompanhando o seu movimento de rotação. Sobrepostos nesta região encontram-se os Cinturões de Van Allen (não assinalado na figura), duas regiões concêntricas em forma de pneu, que são caracterizados por íons altamente energéticos e que são uma fonte de problemas para satélites e astronautas quando por eles passam. As partículas carregadas dos Cinturões são mantidas nas respetivas regiões pelas linhas do campo magnético.

Por último, a cauda magnetosférica que é o prolongamento da magnetosfera na direção oposta ao Sol devido à ação que o vento solar exerce no campo magnético do planeta. Esta região estende-se para além dos 200 raios terrestres e contém dois lobos, referidos como lobo norte da cauda, onde as linhas do campo magnético terrestre apontam para o planeta, e lobo sul da cauda com as linhas do campo magnético terrestre direcionadas para longe do planeta. Os dois lobos encontram-se separados por uma lâmina de plasma, uma região onde o campo magnético é mais fraco e a densidade de partículas carregadas é maior.

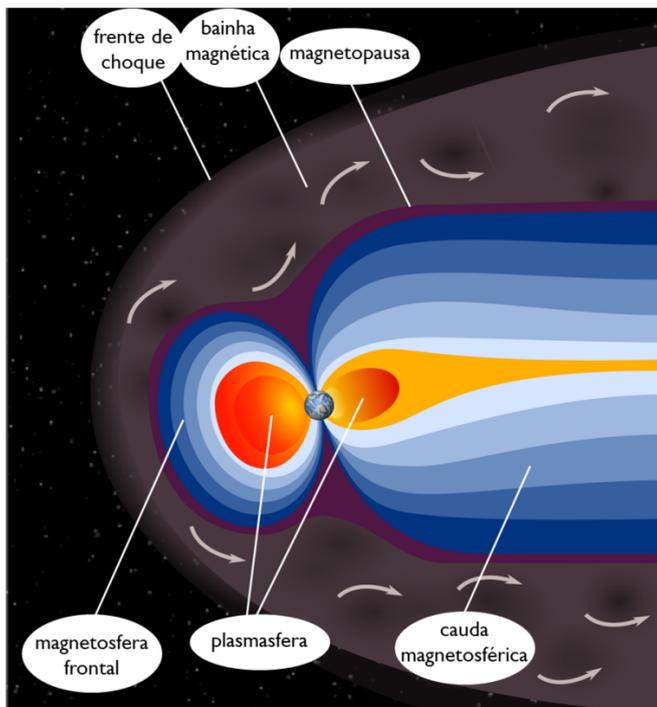


Figura 2. Representação da magnetosfera com as principais zonas que a compõe assinaladas. (Imagem retirada e adaptada de “wikipedia.org/wiki/earth\_magnetic\_field”)

Tal como no núcleo externo da Terra, também aqui existem cargas elétricas em movimento que produzem campos magnéticos, e também estes se somam ao campo magnético global contribuindo com os cerca de 10% da força total do campo. A diferença é que na magnetosfera os impulsionadores de corrente são as interações entre partículas e radiações de diferentes meios, terrestre, solar e extrassolar.

Como foi referido atrás, a principal função da magnetosfera é proteger o planeta, não só das partículas altamente energéticas do vento solar, mas também de radiação cósmica proveniente de fora do Sistema Solar. Se o vento solar atingisse a Terra com toda a sua força, as moléculas da atmosfera seriam desintegradas e perder-se-iam para o espaço e a superfície do planeta seria altamente erodida. Ao proteger a constituição da atmosfera terrestre, a magnetosfera contribui também para que a pressão atmosférica se mantenha e que seja propícia à existência de água líquida na superfície. Por consequência, garante também a existência das condições básicas necessárias para que a vida na Terra possa prosperar.

### 7.2.2 Barreira VLF

Há muito tempo que os humanos vêm modificando a superfície da Terra, e, recentemente, descobriu-se que esta ação estendeu-se para o ambiente espacial próximo, só que desta vez de uma forma positiva. Comunicações rádio de muito baixa frequência (VLF - *very low*

*frequency*) têm interagido ao longo tempo com as partículas do espaço em redor do planeta, afetando a forma como se movimentam e para onde. Em determinadas alturas estas interações criam uma região que age como uma barreira à passagem de radiação e partículas de altas energias vindas do espaço. Estes resultados foram publicados por Gombosi *et al.* (2017) num trabalho intitulado *Anthropogenic Space Weather*.

Os sinais rádio VLF são transmitidos a partir de estações na superfície do planeta com uma enorme quantidade de energia, de forma a ser possível comunicar com os submarinos que navegam a grandes profundidades nos oceanos. Apesar da intensão ser a transmissão destas ondas para abaixo da superfície, elas acabam por se expandir para todo o lado e para além da atmosfera, englobando o planeta numa bolha de sinais VLF. Esta bolha invisível foi detetada pelas sondas Van Allen da NASA que estudam as interações de iões e eletrões no ambiente próximo da Terra, mais especificamente nos Cinturões de Van Allen, referidos na secção anterior. A região afetada pelos sinais rádio VLF começa por volta dos 60 km de altitude, e as sondas notaram que a sua extensão máxima coincide com o início do primeiro Cinturão de Van Allen, algo à volta de 0,2 raios terrestres ou cerca de 1000 km. Este facto leva a crer que a barreira VLF tem tido um papel importante ao manter os Cinturões de Van Allen mais afastados da superfície do planeta, os quais representam um perigo para sistemas orgânicos e eletrónicos. Comparações com dados de 1960, altura em que a utilização das ondas rádio VLF ainda era limitada, mostram que os Cinturões se encontravam a altitudes mais baixas, apoiando esta descoberta. Tal como outras regiões da magnetosfera, esta barreira VLF tem a forma de um toro, forma esta que é desenhada pelas linhas do campo magnético, e tal como as outras regiões também apresenta variações espaciais e temporais.

Em geral, a radiação no espaço de fontes artificiais é considerada um género de poluição cósmica, mas esta barreira tem vindo a atuar em favor do planeta, adicionando uma nova camada de proteção contra as perigosas tempestades solares. Prevê-se que no futuro, as transmissões VLF possam ser usadas para remover o excesso de radiação do ambiente espacial próximo, o qual aparece em alturas de maior atividade solar. Há ainda quem sugira que esta barreira poderá ter um valor mais acrescido numa altura de inversão do campo magnético, protegendo-nos da radiação enquanto o campo magnético terrestre procura equilibrar-se.

### 7.2.3 *Ionosfera*

A Ionosfera é a região inferior da plasmasfera e representa a zona da atmosfera que é ionizada pela radiação vinda do espaço. Esta região está definida entre cerca de 60 a 1000 km de altitude, em relação à superfície da Terra, e engloba a Termosfera e partes da Mesosfera e da Exosfera. A ionização nesta região acontece quando um átomo ou molécula recebem energia suficiente para quebrar as suas ligações e/ou libertar eletrões, produzindo iões com carga positiva ou negativa. A principal fonte de radiação ionizante na ionosfera é o Sol, com um pequeno contributo produzido por meteoritos e por radiação cósmica vinda de fora do Sistema Solar. A ionização das partículas só é dominante nas regiões superiores da atmosfera terrestre,

devido à baixa densidade de gases, átomos e moléculas. Conforme se aproxima da superfície, a atmosfera torna-se mais densa e a existência de íões e elétrons livres torna-se cada vez menor porque a recombinação entre os átomos prevalece sobre a ionização. A ionização produz cargas elétricas em movimento, e tal como nas regiões anteriores, o campo magnético gerado por estas correntes une-se ao campo magnético global.

Um fenómeno de grande destaque que ocorre na ionosfera são as auroras polares, em altitudes em torno dos 100 e 200 km. Elas resultam de partículas do vento solar que conseguem penetrar na magnetosfera e que são redirecionadas para as regiões polares do planeta pelas linhas do campo magnético. Nos polos, ao interagirem com os constituintes da atmosfera superior, provocam ionização e libertação de radiação, resultando nas belíssimas auroras boreal e austral. Além da Terra, as auroras já foram observadas também em Marte, Vénus, Júpiter e Saturno.

Entre outras funções, a ionosfera tem um papel ativo em relação aos fenómenos atmosféricos elétricos, como as trovoadas, e é também uma região aproveitada pelos humanos como uma forma de propagar sinais rádio para longas distâncias na superfície do planeta.

### 7.3 *Portais Magnéticos*

Como curiosidade e para encerrar este artigo sobre geomagnetismo, irá ser mencionada de seguida um fenómeno relacionado com o campo magnético da Terra e que lembra algo de ficção científica. Em ficção, um portal é uma abertura no espaço ou no tempo que liga dois lugares distantes, de forma direta, um ao outro e é isso que os portais magnéticos reais fazem. Descobertos na magnetosfera do nosso planeta, são um tipo de atalho ou autoestrada que ligam o planeta Terra à atmosfera do Sol, a cerca de 150 milhões de quilómetros de distância. O assunto já tem mais de uma década, mas continua a intrigar quem o estuda. Há alguns anos, um grupo de investigação da Universidade de Iowa, fundado pela NASA, descobriu uma possível forma de encontrá-los no espaço. Após isso, a missão MMS (*Magnetospheric Multiscale Mission*), compreendendo 4 satélites equipados com detetores de partículas energéticas e sensores magnéticos, foi lançada em 2014 para estudar o fenómeno. Antes da missão MMS já tinham sido feitas observações com cinco satélites THEMIS da NASA e com quatro satélites Cluster da ESA. As observações mostraram que o aparecimento dos portais magnéticos ocorre onde o campo magnético terrestre encontra o vento solar, que também é o campo magnético do Sol. A maioria destes portais são pequenos e de curta duração enquanto outros possuem uma dimensão mais vasta e são sustentados por períodos de tempo mais longos. Através de uma abertura destas pode fluir uma imensidão de partículas energéticas que provocam efeitos na Terra, como aquecer a atmosfera superior, despoletar tempestades geomagnéticas e/ou produzir auroras polares muito luminosas. A dificuldade em encontrar estes portais deve-se a serem invisíveis e instáveis.

Os portais magnéticos formam-se por um processo designado por reconexão magnética, onde linhas dos campos magnéticos da Terra e do Sol se misturam, enrolando e cruzando, originando os chamados “pontos-X”. A união inesperada dos dois campos magnéticos cria

aquilo que se chama uma região de difusão de elétrons, nos pontos-X, por onde jatos de partículas carregadas são propelidas. Pela forma como ocorre, este fenômeno é designado por FTE, sigla de *flux transfer event* em inglês. A mistura das linhas dos dois campos ocorre principalmente no lado diurno do planeta e acontece quando o campo magnético da Terra é pressionado contra o campo magnético do Sol. Um dos aspectos ainda por compreender dos FTEs é que a reconexão magnética ocorre aproximadamente a cada oito minutos. O portal criado tem a forma de um cilindro magnético e pode ser tão largo quanto o diâmetro da Terra. Os cilindros magnéticos podem também diferir na forma (retos no equador ou curvados para os polos do planeta) e na resistência que oferecem à passagem das partículas carregadas. Todas estas informações resultaram das observações levadas a cabo pelos satélites THEMIS e Cluster. A missão MMS continua em atividade e tem reunido dados que servirão para estudos futuros e uma melhor compreensão deste fenômeno. Além da Terra, os FTEs já foram observados também em Mercúrio e Saturno, provando que não é algo exclusivo do planeta Terra, mas que pode ocorrer em qualquer corpo planetário com um campo magnético global. Com esta curiosidade pretende-se mostrar como o campo magnético terrestre é um sistema complexo e ainda parcialmente compreendido. Tal como este fenômeno é provável que ainda existam outros aspectos geomagnéticos por descobrir e compreender e com muito potencial para gerar estudos futuros.

## Referências

22. D. Andrault, J. Monteux, M. Le Bars, H. Samuel, The deep earth may not be cooling down, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 443, p. 195-203, (2016)
23. T. I. Gombosi, D. N. Baker, A. Balogh, P. J. Erickson, J. D. Huba, L. J. Lanzerotti, Anthropogenic Space Weather, *Space Science Reviews*, vol. 212, p. 985-1039, (2017)
24. W. Lowrie, Fundamentals of Geophysics, *Cambridge University Press*, cap. 5, (2011)
25. W. Gonzalez, E. Parker, Magnetic Reconnection Concepts and Applications, *Springer Astrophysics and Space Science Library*, (2016)
26. All-geo.org, <http://all-geo.org/highlyallochthonous/2008/03/where-the-earths-magnetic-field-comes-from/>, acessado pela última vez a 21-01-2018.
27. Earth's Magnetic Field, [https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s\\_magnetic\\_field](https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_magnetic_field), acessado pela última vez a 21-01-2018.
28. Ionosphere, <https://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere>, acessado pela última vez a 21-01-2018.
29. Magnetism, <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetism>, acessado pela última vez a 21-01-2018.

