

“

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLOGICOS

Homenagem ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho

”

L.J.P.F. NEVES, A.J.S.C. PEREIRA,
C.S.R. GOMES, L.C.G. PEREIRA,
A.O. TAVARES

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

(Página deixada propositadamente em branco)

“

MODELAÇÃO
DE SISTEMAS
GEOLOGICOS

Homenagem ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho

”

L.J.P.F. NEVES, A.J.S.C. PEREIRA,
C.S.R. GOMES, L.C.G. PEREIRA,
A.O. TAVARES

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

TÍTULO

Modelação de Sistemas Geológicos | Livro de Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

AUTORES

L.J.P.F. Neves; A.J.S.C. Pereira; C.S.R. Gomes; L.C.G. Pereira; A.O. Tavares;

COMISSÃO CIENTÍFICA E EDITORIAL

L.J.P.F. Neves; A.J.S.C. Pereira; C.S.R. Gomes; L.C.G. Pereira; A.O. Tavares;

CONCEPÇÃO GRÁFICA E PAGINAÇÃO

Vasco M. Mantas e Paulo A. N. Pinto

IMPRESSÃO E ACABAMENTO

G. C. - Gráfica de Coimbra, Lda

EDIÇÃO

Laboratório de Radioactividade Natural da Universidade de Coimbra

Imprensa da Universidade de Coimbra

DATA

2011

TIRAGEM

300 Exemplares

DEPÓSITO LEGAL

321456/11

**ISBN Digital**

978-989-26-1009-2

DOI

<http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-1009-2>



LABORATÓRIO DE RADIOACTIVIDADE NATURAL
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Prefácio

Esta nota de abertura para o livro que acompanha o Simpósio “Modelação de Sistemas Geológicos” realizado na Universidade de Coimbra em homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho, por ocasião do 70º aniversário do homenageado, tem por objectivo uma tentativa de localizar o leitor na intenção que, a meu ver, foi a dos promotores e organizadores deste encontro, simultaneamente científico e de afectuosa gratidão.

Em primeiro lugar, no que respeita à Ciência patente nas apresentações, são de salientar não só a variedade das matérias tratadas e a diversidade dos interesses científicos próprios, das origens e nacionalidades dos respectivos autores, mas sobretudo o desejo de focalizar cada um dos contributos em aspectos directamente relacionados com a actividade científica do homenageado. A modelação de sistemas geológicos, a problemática da energia, a detecção e caracterização das emissões de radão, o estudo do ciclo do carbono, a geoquímica particular e a cartografia geológica, entre outros assuntos igualmente relevantes, são, de uma forma ou de outra, expostos pelos seus autores, conhecidos e reconhecidos nas especialidades que cultivam. Quis aqui propositadamente destacar o capítulo da geomatemática, ciência a que o Professor Manuel Maria Godinho cedo se dedicou sendo, tanto quanto um não-geólogo como eu poderá avaliar, pioneiro desses estudos em Portugal. Este interesse, que continua a cultivar, é para mim (que sou engenheiro, por formação) particularmente relevante já que adoptei a ideia, talvez um tanto redutora, de que só ascende à verdadeira categoria de Ciência – às chamadas ciências exactas – o conhecimento que é, ou pode ser, matematizável. E a Geologia não escaparia, não escapará, a este figurino.

Depois desta brevíssima digressão, necessariamente incompleta, muito sumária e geral, pelos temas do simpósio não quero nem posso deixar de acentuar o contexto e o motivo principal da sua organização: uma homenagem ao Professor quando completa a idade canónica da jubilação universitária. As instituições que se associam à homenagem comprovam a

importância, o alcance e o prestígio do homenageado e da sua obra. E o mesmo se diz das ilustres personalidades presentes. A par delas, entre todos nós, outros, que acorremos ao simpósio, quer especialistas, quer leigos nas Ciências da Terra, há elos de ligação efectivos e fundamentais: a Amizade pelo Manuel Maria Godinho e o apreço que todos temos pelas suas ímpares qualidades humanas e de universitário. Para o Homem de Família que se preza de o ser acima de tudo é com certeza uma felicidade maior ver-se acompanhado da Dr^a. Maria Raquel, sua mulher, dos filhos – Pedro e Luís, também eles nossos confrades no claustro universitário – das noras e dos netos, a quem dedica afectos que só os avós sabem concretizar.

Do professor, investigador e Homem de Ciência alguém mais qualificado que eu na circunstância – colegas de especialidade, colaboradores, discípulos, ou simplesmente alunos – se encarregará de traçar registo fundamentado. Mas não vou passar o ensejo de, nestas curtas linhas de prosa modesta, enaltecer o Homem de Cultura, amante de Poesia, o Universitário que comecei a conhecer vai para um quarto de século, já ele era um respeitado catedrático da nossa Faculdade. Antes disso, Manuel Maria Godinho havia marcado presença, relevante (tanto quanto sei), no Conselho Científico-Cultural da Universidade criado e dirigido pelo saudoso Reitor A. Ferrer Correia, mas foi só quando o Professor António Ribeiro Gomes nos deu a ambos – e ao nosso colega e amigo Professor José António Pereira da Silva – a oportunidade de consigo colaborarmos enquanto vice-presidentes do Conselho Científico da FCTUC por si presidido (e efectivamente dirigido) que no dia-a-dia me fui apercebendo do valor, do rigoroso bom-senso e das qualidades de trabalho e de inteligência daquele a quem hoje, aqui, homenageamos. Nesses quatro anos – de 1987 a 1991 – criaram-se entre nós laços de indissolúvel amizade e de respeito mútuo que até hoje perduram e perdurarão. O cargo de vice-presidente do Conselho Científico é ingrato – não dá direito a benesses várias ou gratificação remuneratória, nem a dispensa ou redução do tempo de serviço lectivo. Pelo contrário, consome insuspeitada dose de trabalho e é muito exigente em dedicação às múltiplas tarefas que se é chamado a desempenhar, nem sempre as mais agradáveis para um investigador e universitário. Mesmo assim, prevalecendo-me da sua amizade, tive a ousadia de lançar o desafio ao Professor Manuel Godinho para que em tais funções me acompanhasse, em 1993, quando fui eleito pela primeira vez, convencido que estava de que o sentimento de cumprir um dever calaria forte em quem voluntariamente se entrega ao serviço da sua Universidade. Com a generosidade que o caracteriza, aceitou e acompanhou-me até ao final de sucessivos mandatos, em 1999.

Manuel Maria Godinho – o Cidadão, democrata – é um aspecto importante de que é necessário falar. Melhor do que a qualquer de nós, será justo deixar dizer o que aqueles que mais de perto têm conhecido esta faceta do carácter e da acção do homenageado enquanto homem que sempre se quis enraizar na comunidade que o viu crescer e afirmar-se na Sociedade. Quer como presidente de mesas eleitorais na sua freguesia, quer como interventor e conselheiro (procurado e convidado) em problemas locais, quer, ainda, como simples cidadão que não fuge, nem fugiu, às responsabilidades de cidadania para que foi convocado. Não só na sua terra, mas também na longínqua Guiné, onde, como oficial miliciano, teve que servir. Manuel Maria Godinho honra-se por ter vivido a difícil prática do quotidiano de então. É um aspecto a que hoje deixou de se atribuir a relevância daquilo que para tantos foi determinante das suas vidas mas que persiste na memória de quem teve que atravessar essa realidade.

Não escrevi aqui, nesta nota que pretendi fosse breve, sem o conseguir, tudo o que seria justo dizer-se do homenageado e do Encontro Científico que lhe é dedicado. Creio, porém, ter focado o principal: a relevância do Simpósio, a oportunidade da homenagem e alguns aspectos que, a meu ver, definem traços essenciais do perfil do Homem, do Cidadão e do Universitário que em hora feliz alguém tomou a iniciativa de homenagear publicamente – o Professor Manuel Maria Godinho.

Lélio Quaresma Lobo
Dezembro, 2010

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Índice

Prefácio

Parte I : Conferências

Radon in neotectonics and earthquake prediction 13 - 27
Fabrizio Aumento

**The International Association for Mathematical
Geosciences** 29 - 41
Vera Pawlowsky-Glahn; Daniel Tetzlaff

**Garnering green energy from granites: Lessons and
opportunities from a UK perspective** 43 - 55
William Stephens

**On Proterozoic ecosystems and the carbon isotopic
composition of carbonates associated with Banded Iron
Formations** 57 - 71
Anthony Fallick; Victor Melezhik; Bruce Simonson

Parte II : Modelação de Sistemas Geológicos

**Relações entre a litologia e a ocupação e uso do solo na
Região da Bairrada** 75 - 86
João Almeida; Pedro Dinis; Alexandre Tavares

**Geotectónica e granitos portugueses: o pioneirismo dos
anos 40** 87 - 102
António Soares de Andrade; Manuel Serrano Pinto

**Modelação da qualidade da água em lagos vulcânicos:
interacção com fluidos de origem magmática** 103 - 115
Paulo Antunes; Gilberto Martins; Daniel Ribeiro; José Cruz; António Brito, Regina Nogueira

O papel da análise de imagem na Geologia Planetária 117 - 124
Teresa Barata; Adriane Machado

- Modelação análoga de um episódio da Geologia de Portugal** 125 - 140
Edite Bolacha; Helena Moita de Deus; Rui Dias; Paulo Fonseca
- A colecção clássica de Lenoir & Forster e o ensino de Paleontologia e Antropologia na Faculdade de Filosofia da Universidade de Coimbra** 141 - 157
Pedro Callapez; Maria Augusta Rocha; Daniela Abrantes; Ana Santos; Ricardo Paredes; Júlio Marques
- O contributo do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra para os estudos de Paleontologia Africana** 159 - 174
Pedro Callapez; Celeste Gomes; Manuel Serrano Pinto; Fernando Lopes; Luís Gama Pereira
- O trabalho de campo no ensino da Geologia. Um estudo com alunos do 7º ano de escolaridade** 175 - 187
Gina Correia; Celeste Gomes
- A utilização de simulações computacionais como ferramenta de apoio à prospecção geofísica com técnicas sísmicas** 189 - 201
Luís Godinho
- Avaliação de projectos mineiros: abordagens clássicas e opções reais** 203 - 217
Pedro Godinho
- Modelos financeiros de projectos mineiros: incorporação do risco e abordagens de avaliação** 219 - 235
Pedro Godinho
- Modelos de anisotropia da susceptibilidade magnética versus modelação de processos geológicos** 237- 246
Celeste Gomes; Helena Sant'Ovaia
- Geologia Estrutural da Península Fildes, Ilha Rei George, Antárctida** 247 - 252
Adriane Machado; Teresa Barata; Farid Chemale Jr.; André Canale; Ivo Karmman

- A detecção remota como suporte à caracterização morfo-estrutural do bordo ocidental do planalto da Huíla (SW de Angola)** 253 - 265
Horácio Mpengo; Fernando Lopes; Alcides Pereira; Vasco Manuel Mantas
- O Estado da Arte do ensino significativo da geologia: A teoria epistemológica da Educação Profissionalizante associada à Geodiversidade** 267 - 276
Magnólia Nascimento; Pedro Douglas Silva ; Cassiano Louzada; Elizângela Tonelli
- Os Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS/HDR) – um desafio para o século XXI** 277 - 290
Luís Neves; Alcides Pereira; José Matos Dias
- Representações pictóricas nos manuais de ensino de Ciências Naturais (7º ano) e de Geologia (10º ano)** 291 - 301
Rita Parreiral; Luís Gama Pereira; Celeste Gomes
- Potencial EGS/HDR da região Centro e Norte de Portugal** 303 - 315
Alcides Pereira; Luís Neves
- O gás radão no contexto da legislação sobre a Qualidade do Ar Interior em edifícios – situação em Portugal** 317 - 328
Paulo Norte Pinto; Alcides Pereira; Luís Neves
- Instabilidade de taludes de escavação no Areeiro, Coimbra** 329 - 342
Mário Quinta-Ferreira; Pedro Andrade; António Saraiva
- Litologias gnaisso-migmatíticas da faixa costeira Lavadores-Madalena: possível significado das paragénese com hercinite** 343 - 351
Maria dos Anjos Ribeiro; Helena Sant’Ovaia; Armanda Dória
- A metodologia de Trabalho de Projecto no ensino e aprendizagem das Geociências** 353 - 362
Ana Rola; Isabel Abrantes; Celeste Gomes
- Modelação de processos de queda de blocos em vertentes na região de Alvaiázere; dois estudos caso** 363 - 373
Pedro Santos; Alexandre Tavares
- As energias renováveis em Portugal. A importância da energia hidroeléctrica e da energia eólica** 375 - 382
António Saraiva

- Contributos sedimentológicos e geoquímicos para a modelação dos sistemas petrolíferos portugueses: as séries jurássicas ricas em matéria orgânica da Bacia Lusitânica (Portugal)** 383 - 391
Ricardo Silva; Luís Duarte; Ana Azerêdo; João Mendonça Filho
- Interações entre os subsistemas terrestres e sua concepção nas esferas sociais e ambientais** 393 - 404
Pedro Douglas da Silva; Magnólia Nascimento; Thiago Crepaldi; Alberto Neto
- Ortognaisse Serra da Cangalha: Interface entre Mapeamento Geológico, Petrografia e Geoquímica** 405 - 417
Pedro Douglas da Silva; Júlio Mendes
- O greisen do depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã (Ovar). Análise geoquímica da associação quartzo-moscovite** 419 - 428
José Velho; Alcina Miranda; M. Cerdeira

Parte III : Resenha Biográfica

- Manuel Maria Godinho: um percurso de Vida** 431 - 442
Luís Neves; Luís Godinho; Pedro Godinho
- O contributo científico da obra do Professor Manuel Maria Godinho** 443 - 449
Graciete Dias
- Publicações científicas do Prof. Doutor Manuel Maria Godinho** 451 - 464

Parte 1
CONFERÊNCIAS

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Radon in neotectonics and earthquake prediction

Fabrizio Aumento¹

¹Geoscientific Consultant, Montefiascone (VT), ITALY, fabaumento@tiscali.it

Key-words: Radon, Neotectonics, Mapping, Earthquakes.

Abstract

Researchers world-wide have spent the last 60 years in trying to develop reliable systems which might provide early warnings prior to the occurrence of earthquakes. Amongst the techniques most studied have been variations in Radon concentration, as measured both in the sub-soil and in ground water. In some cases major increases in Radon emissions, followed by rapid decreases, were reported prior to major earthquakes; these gave very successful predictions that earthquakes were forthcoming; the Haicheng (China) earthquake of 1984 is a fine example of successful predictions. On other occasions identical monitoring systems failed to provide reliable precursors; either false or even no alarms at all were given, as in the Tangshan (China) earthquake of 1985. Poor results continued in subsequent years. The L'Aquila earthquake of 2009 prompted us to report on results of Italian studies on Radon gas variations as applied to exploration, neotectonics and earthquake prediction. These studies are based on data stored from 1997 from two arrays of twelve simultaneously recording Radon stations, one on the volcanic island of Terceira, Azores, Portugal and the other on the Appenninic region of Northern Latium, Italy. We show that it is not sufficient to study data from isolated recordings of variations in Radon peak intensities. There is much more to be learned from multiple, long term data analyses; these permit us to define the characteristic Radon "signals" in each area studied. Unwanted interferences can then be removed from subsequent recordings. The residual anomalies may be indicative of neotectonic activity in both time and space.

Introduction

A massive M=6.3 earthquake struck the town of L'Aquila in the Abruzzi Region of Central Italy on 6th April 2009, causing several hundred deaths. The event initiated a series of heated debates, amongst these, the dubious usefulness of Radon earthquake precursors was much discussed. Also under fire came the advice given by Civil Protection in advising citizen to return to the "safety" of their homes just hours before the main earthquake struck:

authorities had completely disregarded the validity of anomalous Radon emissions as possible seismic precursors. Indeed, Radon alone may not be the answer to earthquake prediction; in the past it has given both encouraging and false results; events in China in the late 90s were good examples of unreliable precursors. But there is abundant evidence from other past events to suggest that there may be some link between Radon, active faults and telluric movements, sufficient to make it worthwhile to at least take into consideration anomalous Radon emissions, especially when combined with other possible precursors. Anomalous Radon signals had been recorded at L'Aquila by Gianpaolo Giuliani from the Gran Sasso laboratories, but these were not taken into consideration by Civil Protection. Indeed, Giuliani was publicly derided by authorities, even to the point of being accused of false alarmism. Senior Civil Protection staff were subsequently charged with manslaughter for having completely disregarded Giuliani's evidence and incorrectly advising the population of L'Aquila on that fateful night of 6th April.

So, if Radon variations may at times be effective in the study of earthquakes, to the extent that increases in levels of ^{222}Rn were recognised by IASPEI (IUGG Meeting, Perugia, 2007) as being possible earthquake precursors, what stops the gas from giving a consistent, reliable early warning signal? The situation is complicated by the very nature of Rn: a radioactive, noble gas, with a very short half life, unable to combine with other elements, but at the same time responsive to other natural disturbances. When one measures the quantity of Radon gas being emitted from below ground, one is in fact detecting the sum of a whole series of factors affecting that emission before the gas reaches recording instruments. This is true both for analyses integrated over time by passive SSNTD detectors and for continuous real-time analyses as determined by electronic instrumentation. Amongst those factors that play an important part in affecting the gas flow, each of which must be accounted for, we find:

- The surrounding geology, its Radon-generating capability, and its permeability (high for pyroclastics and low for clays, the latter having effective sealant properties).
- Cyclic luni-solar effects (Radon "tides" produced by the gravitational effects of the Moon and Sun), giving rise to two peak emissions every 24 hours (synchronous with marine and Earth tides). See Kiess *et al.* 1999; Aumento 2002.
- Content and microstructural location of Radon's generator (Radium); Radium residing deep within crystal lattices will generate Radon which will remain trapped there and never reach the surface.

- The tectonic stability of the area; small seismic shocks, even the transit of heavy vehicles will dilate or tighten existing conduits (fractures, hairline cracks, continuous porosity), which facilitate the migration of Radon.
- The proximity to superficial aquifers; underground water flows tend to pick up Radon in solution and transport it to sites of lower concentrations.
- Similarly, air currents along faults and fractures will pick up and transport Radon.
- The ambient humidity, rainfall, atmospheric pressure, winds, and temperature.
- And finally, the telluric signals we are hoping to detect.

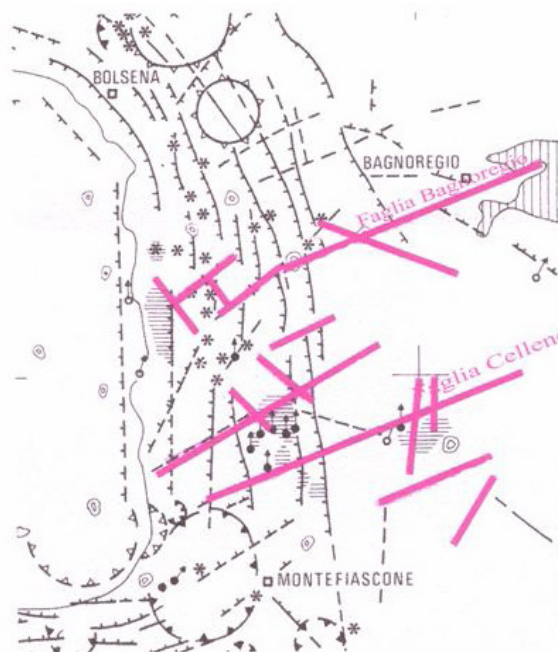
A single measurement of the Radon outflow at a particular site will have been subjected to all these disturbances; this makes it difficult to pick out the influence of a specific effect, including that due to tectonic activity.

Tectonic mapping

Time-integrated spot measurements, using nuclear track films (SSNTDs such as LR-115, CN-85 and others), screened against humidity and buried to standard depths for periods of up to one month have been used as survey tools since the early '70s. At first they were used to detect buried Radon-emitting ore bodies (U and Th deposits in particular). Subsequently in the '80s it was found that Radon mapping could be used to distinguish between open/active faults/fractures from those which were sealed and inactive, even when the latter still retained good morphological features.

In Northern Latium, from Lake Bolsena (a collapsed caldera) through Viterbo (extinct Cimini volcanoes) to Lake Bracciano (extinct Sabatini volcanoes to the South), nuclear track measurements below ground began in 1983. These were commissioned by an AGIP-ENEL Joint Venture intent in finding geothermal activity, the fluids of which were thought to transport Radon gas from thermal sources at depth to surface emissions. The project was extended by the Italian National Research Council in its study of deeply buried, open fractures, again as possible conduits for deep geothermal fluids. After some 3,000 measurements, spread over several years, covering the area (from 1 to 15 measurements per square kilometre), very few Radon emissions were detected either along those faults of regional geological significance (Appenninic trending faults, NW-SE) or those due to the Bolsena caldera collapse. Both these systems appeared to be sealed and inactive; but Radon emanations showed that they had been replaced by new

systems of faults: active and open anti-Appenninic faults, trending NE-SW; examples include the Celleno and Bagnoregio faults: see map of Figure 1 (Aumento & Cherubini, 2008).



The latter system is particularly interesting because, although topographically featureless, the Bagnoregio fault trends from Lake Bolsena (E-NE), past the extreme eastern end of the town of Civita di Bagnoregio and on to the seismically unstable Umbria Region to the East. Radon emissions along this fault line are commonly above 8,000 Bq/m³, and have reached 40,000 Bq/m³ in places.

Figure 1. Lake Bolsena, Upper Latium, tectonic map.

(The thick dark lines are active faults/ fractures which are currently leaking Radon. Inactive faults and other tectonic lineaments are represented by thin lines.)

This fault has often moved in the recent past; the last major movements occurred in the 1670's, when tuffs making up an upper section of the town collapsed into the valley below.

Similar survey techniques were later used in geothermal exploration campaigns in Mexico in 1979-1980 (Gutierrez Negrin & Aumento 1982), in Zambia (Lake Tanganyika) in 1985-1987, on the island of Terceira in 1992-1994 (Aumento 1994), and then over the Mojave desert, in California and Nevada (1992-2000), again for geothermal exploration purposes. The "anomaly" maps so generated provided useful indications as to where to continue exploration, and where geothermal activity was no longer active (Figure 2).

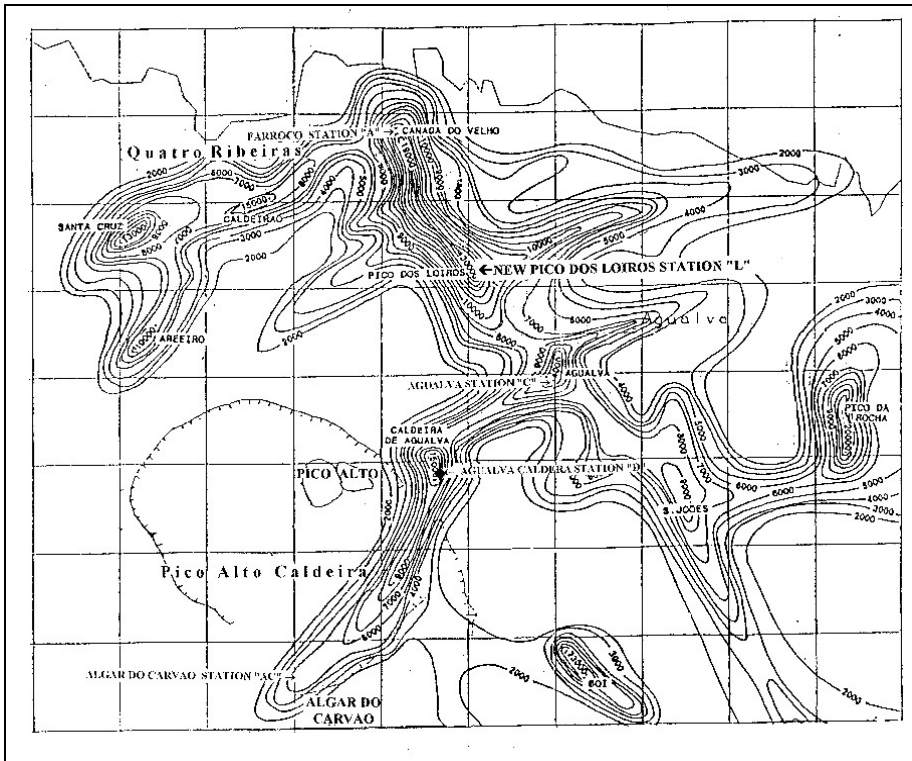


Figure 2. Ground Radon concentrations measured around Pico Alto, Terceira. The map was generated by contouring over 1000 integrative SSNTD stations.

Earthquake monitoring and prediction

Based on long-term studies world-wide since the early 1960's, some earthquake precursors had been tentatively identified (e.g., changes in ion concentrations in water, variation in He, Ne, Ar, Rn and N₂ in the environment, the abnormal behaviour of some animals, series of milder foreshocks before major earthquakes, sudden water-level change in wells, ground deformation, stress build-up in the country rocks (which may in turn alter electric and electromagnetic properties of rocks). The problem with these precursors is that they do not behave consistently: in China, for example, a 1975 early warning and evacuation based on Radon and other parameters saved 150,000 lives when a M=7.3 earthquake struck the Haicheng area (Fu & Tatsuoka, 1984); similar detection techniques did not save some 655,000 souls killed in Tangshan, China, later that year when a 7.8 quake struck unexpectedly; this was reportedly the second largest earthquake ever recorded to have affected human lives: no precursors had

been detected on that occasion (Geotimes, 2005). More effective was the 1995 Kobe (Japan) warning provided by groundwater Radon in wells: concentrations in water started gradually increasing several years before the earthquake, from an original 20 Bq/l, to 60 Bq/l, to a maximum of 250 Bq/l just before the earthquake struck and Rn concentrations dropped back to 30 Bq/l (Igarashi, 1995). It seems that these early warnings are subject to so many different influences that, when taken individually, they behave erratically; they have therefore been discarded and considered unreliable by many researchers. This makes earthquake prediction a controversial issue.

Nevertheless, as shown above for catastrophic events, major changes in Radon concentration have been observed in several earthquake-prone zones a few months/days/hours before, during and after large earthquakes (Martinelli, 1999, Papastefanou *et al.*, 1999, Coutinho *et al.*, 2001, amongst several others). Such behaviour was observed in deep mines, cellars and wells where Radon concentration fluctuations due to disturbing environmental factors could virtually be ruled out. Therefore, it is tempting to consider a sudden erratic fluctuation in Radon concentration, particularly in deep wells in an earthquake-prone zone, as a potential omen for an earthquake (see for example Zhang Zhaocheng and Zhang Wei, 1999). Again, this relationship is not valid consistently.

Because of the short half-lives of Rn isotopes, it is generally and incorrectly believed that most of the naturally occurring Rn in the environment is made up of the longer-lived ^{222}Rn isotope (3.8 days half life) generated only a few tens of metres in depth in the Earth's crust. In effect, fluid transport and open fractures/conduits can very efficiently carry both ^{222}Rn and the shorter-lived ^{220}Rn isotope (Thoron, 52 seconds half-life) from greater depths and over greater distances during their life times (Fleischer and Mogro-Campero, 1978), especially when, in some volcanic rocks, Thoron sometimes occurs as the predominant isotope. We have seen these effects in action over geothermal fields, where fluids transport Radon both vertically and laterally over several tens of kilometres.

A standard argument for explaining the variation in Radon concentration in faults and water wells before, during and after an earthquake is the variation in release of the gases entrapped in crustal rocks due to pore collapse and/or opening of micro-fractures caused by stress variations (Hushinuma *et al.*, 1999; Tuccimei *et al.*, 2010). Being an inert gas, variations in Radon concentration cannot be due to chemical reactions with other substances exposed by crack build-up in the rocks.

One major problem in using Radon as an earthquake precursor is in the inability to identify the origin of Radon pulses recorded. Major Rn peaks

are not necessarily due to telluric activity. We have recorded numerous strong peaks without associated seismicity, at Vetralla (nr Viterbo, Northern Latium), for example (Figure 3).

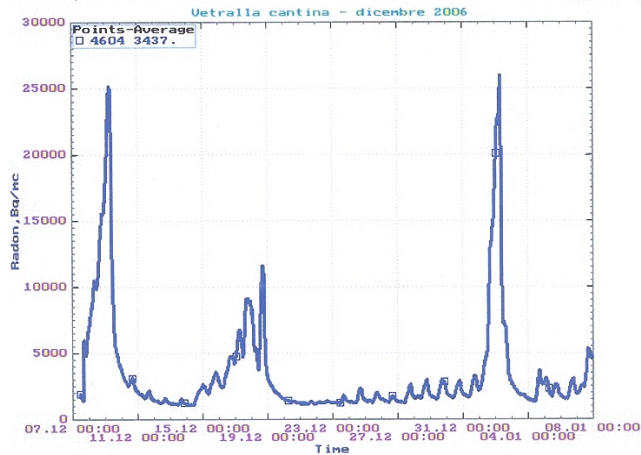


Figure 3. Radon emission concentrations measured continuously during the month of December 2006 in a deep cave at Vetralla, Upper Latium. (The large peaks registered had no associated seismic signals. The small peaks in between are the standard, daily luni-solar controlled Radon emissions.)

It is therefore of primary importance to be able to sort out and identify tectonically induced Radon peaks from other possible causes.

We have used results from two Radon networks, each consisting of up to twelve multiple, synchronous underground monitoring stations (in Terceira, Azores, Portugal and in Upper Latium, Italy: Aumento *et al.* 2002; Aumento and Cherubini, 2008; Aumento, Cristaldi and Zucchetti, 2009). The distribution, timing, size and structure of the Radon pulses recorded by the networks were analysed in detail and shown only in some cases to be related to telluric modifications of the otherwise systematic luni-solar tidal control; the latter is one of the main controlling factors in Radon emissions, both as far as pulse time and strength are concerned (Figure 4).

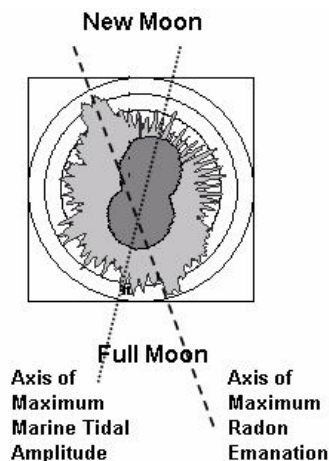


Figure 4. Radon emissions at Pico Alto integrated monthly during one calendar year showing the relationship between Radon maxima, marine tides and phases of the Moon.

Before selecting a site for the installation of continuous monitoring equipment, data from ground-Radon surveys were used in Latium (Figure 1) and Terceira (Figure 2) to choose the locations of active faults which might possibly permit Radon fluxes to reach the surface unhindered. For the Radon data to be useful, several monitoring sites must be operational in each region so as to produce a well-spaced array capable of indicating the timing, provenance and subsequent direction of Radon pulses. Each site must be subject to a minimum of disturbances from external influences, as discussed above. Deep, locked cellars or natural caves usually made the best sites. Since one factor controlling Radon emissions is that of luni-solar gravitational effects, Radon emission intensities recorded on a 60 second basis by the instrumentation were subsequently re-plotted as a function of lunar days/months and not calendar months. When there were no major external secondary disturbances, emission intensities, plotted month after lunar month, showed coincident peaks twice a day, morning and evening directly related to sunrise and sunset times. A typical systematic graph was then generated integrating several lunar months at a time, from which very clear repetitive, monthly patterns emerged (Figure 5).

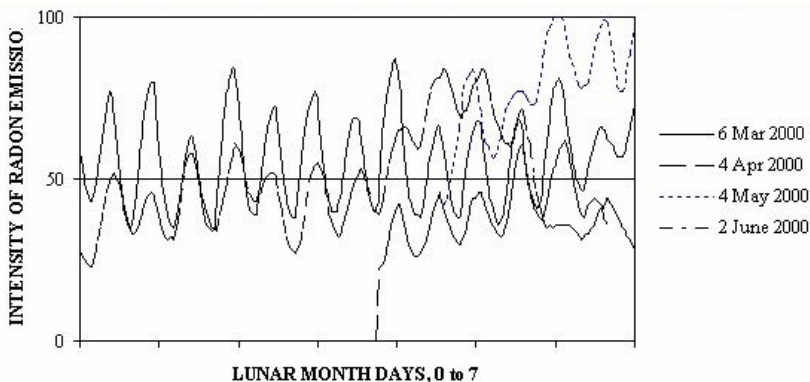


Figure 5. Radon emissions for the first six lunar days of each month showing their repetitive, synchronous pattern when undisturbed by tectonic or other influences.

If a major seismic event occurred during a particular recording period, the new trace no longer coincided with those of previous months; the event will be visible as a sudden, strong disturbance, in terms of both time and intensity, and, given the availability of multiply deployed stations, will be seen to come and leave from a particular direction. Such events have been recorded on Terceira (Figure 6) and at Civita di Bagnoregio: these stations, placed deep in caves, where there are few outside disturbances, have shown the arrival of sudden Radon surges, with emissions ranging from background values of 3,000 to 4,000 Bq/m³ to over 35,000 Bq/m³ in a matter of minutes. Simultaneous, detailed recording of all meteorological data by local authorities showed that these surges were in no way related to atmospheric influences.

In the Upper Latium region of Italy, continuous monitoring commenced on 10th October 1997 soon after the Assisi earthquake struck (on 26th September 1997). Recordings were interrupted only by instrumental damage due to excessively humid conditions. Major Radon flux variations were detected by our arrays from remarkably distant sources: in coincidence with the aftershocks of the 1997 Assisi earthquake (10th October to 6th December 1997), some 80 km away, and recently (2009) from the more distant one at L'Aquila, 120 km away. In the case of these major earthquakes, large, broad Radon peaks developed at each of the component stations, with maxima exceeding 35,000 Bq/m³; peaks then lost intensities within a few days (Figure 7). However, on several other occasions Radon emissions recorded in Latium peaked repeatedly beyond 20,000 Bq/m³ (Figure 8), without accompanying telluric events. These may possibly have been due to some very local events which had passed undetected.

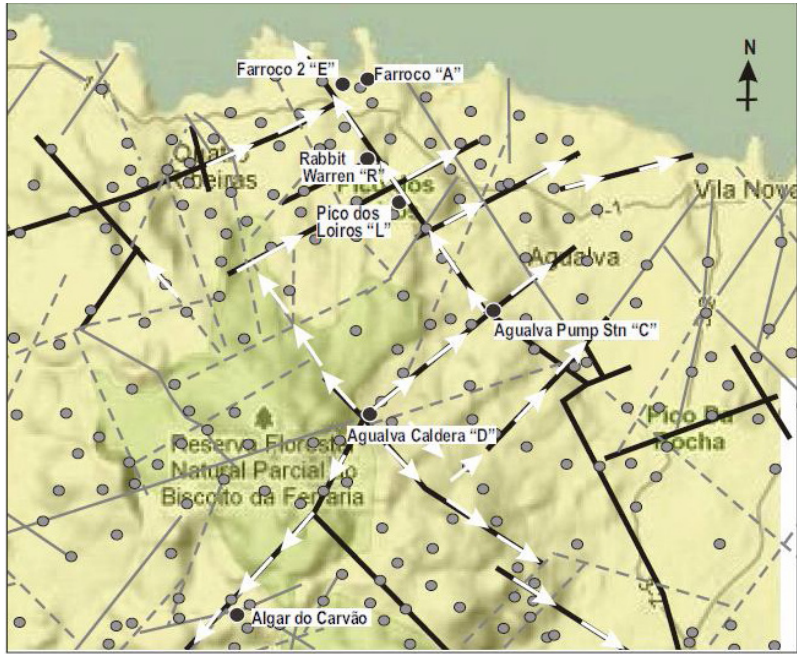


Figure 6. Tectonic map of the NE slopes of Pico Alto Volcano, showing active faults and Radon flow patterns along these lineaments from their origin to sea level. Small grey dots are Rn stations.

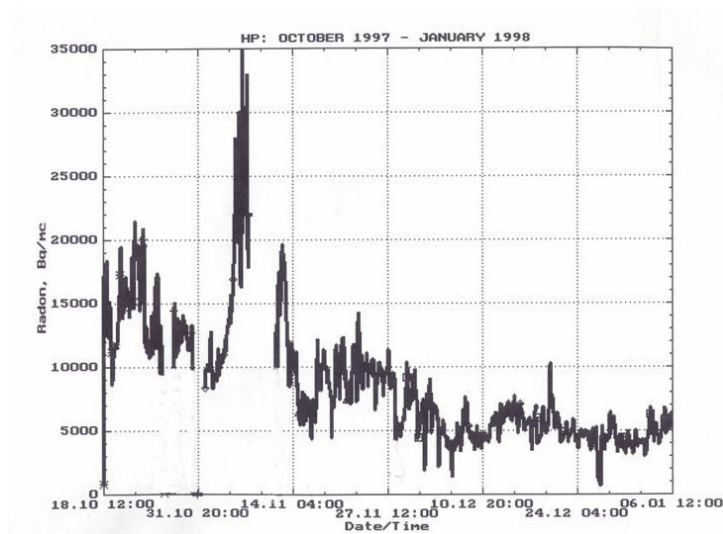


Figure 7. Strong Radon signals (off scale) recorded in a deep cellar at Bagnoregio coincident with after-shocks of the Assisi (Umbria) earthquake, some 80 km away. (Oct. 1997-Jan. 1998).

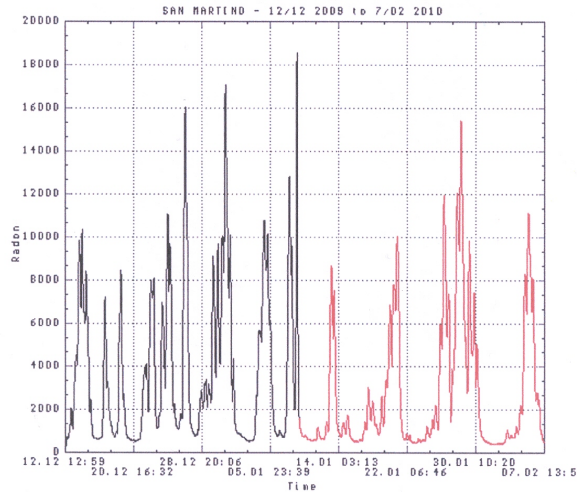


Figure 8. Radon emanations recorded in a deep cellar at San Martino nel Cimino, near Viterbo, Upper Latium. The vicinity to the Cimini hills (extinct volcanoes) aside, no direct relationship was found between these Radon pulses, tectonics or marine tides. (12th Dec. 2009-7th Feb. 2010).

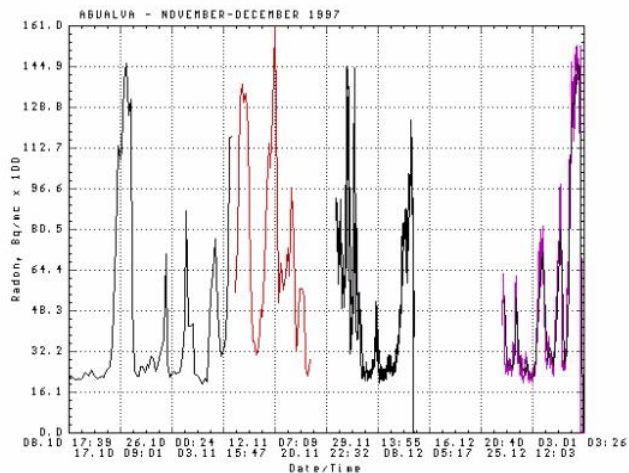


Figure 9. Radon emanations from near the summit of Pico Alto, at Agualva caldera. (Nov. - Dec. 1997)

On Terceira, although there were several instances of coincidences between local, anomalous Radon emissions and a large number of $M < 2$ earthquakes, statistical correlations between these small events and Radon did not produce a convincing story. On the contrary, when more significant events occurred, Radon stations could be seen to respond either to the stress system of the regional Azores/Gibraltar tectonic regime (NW-SE) or to the

more local NE-SW Pico Alto volcanic regime (Figure 6). Peak intensities were seen to shift from one system to another as different tectonic regimes came into play. For example, immediately after a major earthquake on the adjacent island of Faial in July 1998, caused by movement on the regional NW-SE system, Radon intensities measured over said system were observed to drop steadily for several weeks. Subsequently, as underwater eruptions from the nearshore Serreta volcano picked up in intensity, with activity associated with the younger NE-W system, Radon stations over these lineaments showed marked increases in emissions.

Radon emanating from the geothermal field beneath the eastern flanks of Pico Alto volcano flows along open vertical faults/fractures, reaching the surface and then flowing down slope to the sea (Figure 6). Each day, the characteristic twin Radon peaks are first detected at the station nearest the source, i.e., at Agualva Caldera (550 m elevation); these peaks are very sharp and intense, and occur close to sunrise/sunset times (Figure 9), unaffected by marine tide times. Subsequently, as Radon migrates along interconnecting open fractures/faults, the Radon pulses are recorded sequentially, with ever increasing delay, at the down-slope stations: at Agualva Pump Station, then Pico dos Loiros and Rabbit Warren Stations. By this time peaks are not quite as intense, or as sharp, because Radon has travelled further, following a more complex set of fractures. Finally, the last appearances of the Radon pulses appear at sea level over faults at the two Farroco stations (Figure 6). By carefully synchronising the recordings at these different stations, one can follow the movements of Radon as it flows along faults/fractures down to the sea, picking up time delay and gradually losing intensity as it travels away from the source.

Furthermore, tectonics can open/close different conduits, modifying travel paths; travel pattern may become more complicated, and more variable. Indeed, Radon emanation graphs recorded at Farroco (Figure 10) were shown to be very variable, more complex, different from month to month. Not only did the shapes of the peaks vary, but peak times changed as travel paths became longer or shorter (Figure 11). In addition, sometimes more than the two peaks a day (am and pm) were recorded: a small percentage of the Radon may have found other conduits along which to travel, giving another set of smaller, systematic peaks, indicative of the arrival of a smaller fraction of the gas.

A particularly striking example of these time/path shifts was detected at the Farroco station during three years of study: Radon was twice delayed by several hours along its flow from source to sea (Figure 11), at first gradually between July 1997 and April 1998, and again from May 1998 to

May 1999, and then very rapidly to June 1999. These time shifts were seen to be quite independent of marine tide times, the Radon emissions not following the daily tidal delay progressions. Similar shifts were detected at Farroco and at other sea level stations on several other occasions.

For lack of data transmission capabilities in real time, all foregoing observations were performed in retrospect, in the laboratory, working on previously recorded data. The system works well for Radon mapping, but it is not suitable as an earthquake precursor in the short term. A central control station needs to be set up for each network to receive signals from all stations; data would be evaluated there in real time by experienced staff, who would issue early warnings as necessary. In the volcanic regions studied above, this is not quite so easy to accomplish: stations are often lacking electric power supplies, and are deeply buried in tuffs and lava flows, lithologies which shield all radio transmissions.

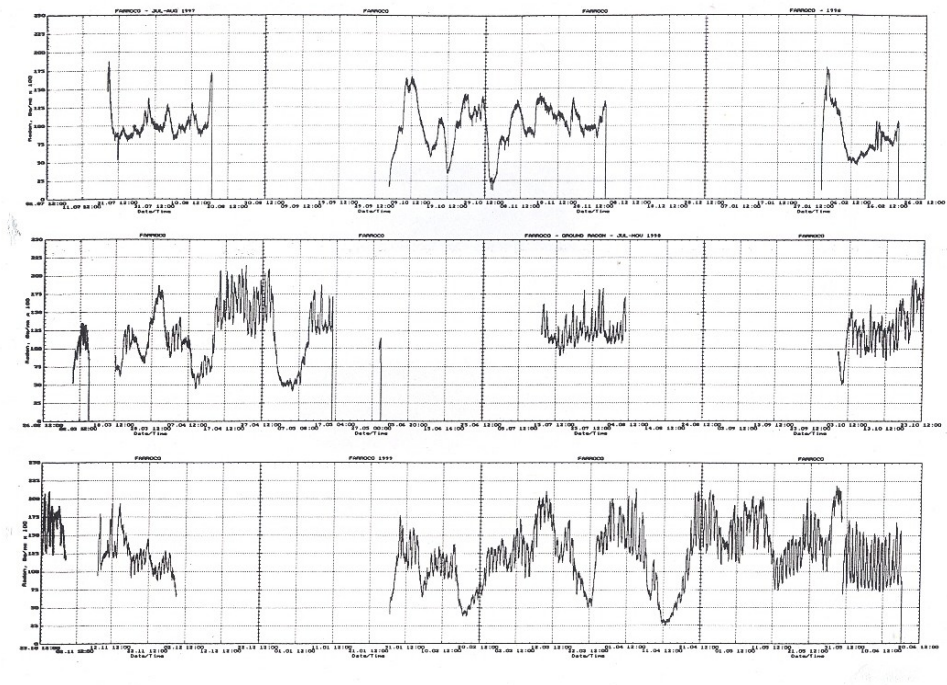


Figure 10. Radon emissions recorded at the Farroco Station from July 1997 to June 1998 showing the variable patterns at that site.

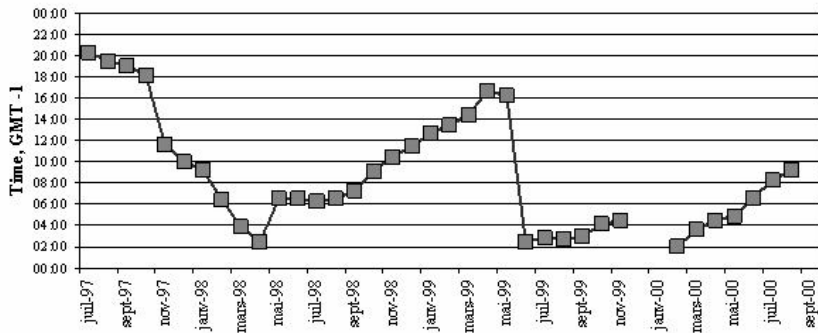


Figure 11. Radon emission times recorded at Farroco over a three year period for its main peak, showing both gradual and sudden time shifts due to the opening/closing of the faults/fractures available to the gas for its migration down to the sea. (July 1997-September 2000).

Acknowledgements

Over the last twenty or so years the Radon research summarized here was supported by a large number of agencies and colleagues; amongst them the Italian National Research Council, the European Community, Dr Frank Monastero of the Geothermal Program of the U.S. Air Force, Ormat Turbines (Nevada), AWARE Electronics Corp., the Republics of Portugal (the Azores), Mexico, Zambia, Kenya, Guatemala, El Salvador, the Dominican Republic, and Yemen. More recently, colleagues from Portugal (Drs Luis Neves, Rui Coutinho, and Alcides Pereira) loaned much needed instrumentation to replace equipment damaged by inclement weather.

References

- Aumento F., (1989) - The Radon hazards in the central Italian volcanic province. Italian edition of Scientific American; July 1989, 9-10.
- (1994) - Terceira Geothermal, JOU2-CT92-0114. Final Report. 200 p.
- (2002) - Radon tides on an active volcano/tectonic/geothermal island (Pico Alto volcano, Terceira, Azores). 6th International Conference on rare gas Geochemistry, Cuernavaca, Mexico, September 2001, Geofisica Internacional; 41/4, 499-505.
- Aumento F. and Cherubini G. (2008) - Continuous radon monitoring of concealed active faults affecting Civita di Bagnoregio: tectonic and health hazards. International Tuff Towns Symposium, World Monument Fund, Civita di Bagnoregio, 14-17 May 2008.
- Aumento F., Cristaldi M. and Zucchetti M. (2009) - Radon flux variations as earthquake precursors. MESAEP International Symposium, Bari, 7-11 October 2009.
- Aumento F., Monastero F. C. (1999) - Variations in continuously monitored radon emanations on Terceira (Azores) reflect changes in tectonic stresses and volcanic activity, Supplement to EOS, Transactions; AGU 80/46, F982.
- Aumento F., Monastero F. C., Dysle W. and Kendrick M. G. (1998) - Continuous radon monitoring of an active volcano-tectonic geothermal system, Terceira Island, Azores. Supplement to EOS, Transactions; AGU 79/45, F958.

- Aumento F. and Siciliani P.D. M. (2003) - Rilevamenti radon e previsioni sismotettoniche nella galleria idraulica di Eggi, Spoleto, Galileo 160, 30-32.Z
- Coutinho R., Gaspar J., Aumento F., Pacheco J., Queiroz G. and Valadão P. (2001) - Emissões de Radão através dos solos registradas na ilha do Faial (Açores) após o terramoto de 1998. [Soil radon emissions recorded at Faial Island (Azores) following the 1998 earthquake]. 2º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Evora (Portugal), 12-13 February 2001
- Fleischer R.L. and Mogro-Campero A. (1978) - Mapping of Integrated Radon Emanations for Detection of Long-Distance Migration of Gases Within the Earth: Techniques and Principles. *J. Geophys. Res.*; 83, 3539-3549.
- Fu S. and Tatsuoka F., 1984. Soil liquefaction during Haicheng and Tangshan earthquakes in China: a review. *Soils and Foundations*; 24/4, 11-29.
- GEOTIMES (2005) - Earthquakes: "predicting the unpredictable". March 2005.
- Gutierrez Negrin A., and Aumento F. (1982) - The Los Azufres, Michoacan, Mexico, geothermal field. *J. Hydrology*; 56, 137-162.
- Hishinuma T., Nishikawa T., Shimoyama T., Miyajima M., Tamagawa Y. and Okabe S. (1999) - Emission of radon and thoron due to the fracture of rock. *Il Nuovo Cimento*; 22 C/3-4, 523-527.
- Igarashi, G. (1995) - Ground water Radon anomaly before the Kobe earthquake. *Science*, 269, 60-61.
- Kies A., Majerus J. and d'Oreye de Lantremange N. (1999) - Underground radon gas concentrations related to earth tides. *Il Nuovo Cimento*; 22 C/3-4, 287-293.
- Martinelli G. (1999) - History of earthquake prediction researches. *Il Nuovo Cimento*; 22 C/3-4, 605-613.
- Neves L., Barbosa S., Pereira A. and Aumento F. (2010) - Soil gas concentration monitoring in an active granite quarry from Central Portugal. *Geophysical Abstracts*; Vol. 12, EGU2010-8006, 2010 EGU General Assembly 2010.
- Papastefanou C., Manolopoulou M., Stoulos S., Ioannidou A. and Gerasopoulos E. (1999) - Radon measurements in association with earthquakes. *Il Nuovo Cimento*, 22 C/3-4, 393-397.
- Pulinets S. A., Alekseev V. A., Boyarchuk B. A., Hegai V.V. and Depuev V. Kh. (1999) - Radon ionosphere monitoring as a means for strong earthquakes forecast. *Il Nuovo Cimento*; 22 C/3-4, 621-626.
- Tuccimei P., Mollo S., Vinciguerra S., Castelluccio M. and Solingo M. (2010) - Radon and thoron emissions from lithophysae-rich tuffs under increasing deformation: an experimental study. *Geophys. Res. Lett.*; 37, L05305.
- Virk H. S. (1999) - Radon/helium studies for earthquakes prediction in N.-W. Himalaya. *Il Nuovo Cimento*; 22 C/3-4, 423-427
- Zhang Wei (1999) - Research on relationships between escaping radon and stress-strain of the crust; *Il Nuovo Cimento*, 22 C/3-4, 437-442.
- Zhang Zhaocheng and Zhang Wei (1999) - The correlation between variation of radon content in groundwater and earthquakes. *Il Nuovo Cimento*; 22 C/3-4, 443-447.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

The International Association for Mathematical Geosciences

Vera Pawlowsky-Glahn¹; Daniel Tetzlaff²

¹President IAMG - 2008-2012; Dep. of Computer Science and Applied Mathematics; University of Girona, SPAIN; e-mail: president@iamg.org

²Secretary General IAMG - 2008-2012; Schlumberger Information Solutions; Houston, Texas, USA; e-mail: dtetzlaff@slb.com

Key-words: *International Association for Mathematical Geosciences; History; Geostatistics*

Abstract

The International Association for Mathematical Geosciences (IAMG) is presented, starting with its origins and looking at the multiplicity of means IAMG has created to fulfill its mission.

The origins

The *International Association for Mathematical Geosciences (IAMG)* was founded on August 22nd, 1968, in Prague under the name of *International Association for Mathematical Geology*. According to its statutes, the aim of IAMG is to promote international cooperation in the application and use of mathematics in geological research and technology. This aim is often formulated as: *The mission of IAMG is to promote, worldwide, the advancement of mathematics, statistics and informatics in the Geosciences.*

IAMG was founded as a non-for-profit association at an impressive historical moment, as can be seen in Figure 1. The tanks were entering Prague, while the fathers of IAMG were approving the foundation of the association.

IAMG celebrated its 40th birthday in 2008, during the 33rd Int. Geological Congress, which took place in Oslo (Norway). At the general assembly held in Oslo in 2008, the name of the association was changed from *International Association for Mathematical Geology* to *International Association for Mathematical Geosciences*. The purpose of the change was to have a broader umbrella to cover all the areas which feel close to IAMG.



Figure 1. Foto taken from the Hotel Europe, Prague, 21/08/1968, by Bert Rowell. Reproduced in (Nemec, 1993).

IAMG is an associate member of the International Union of Geological Sciences (IUGS) and of the International Statistical Institute (ISI). This position, as a bridge between the two different fields of knowledge, is visualised in the IAMG-logo (Figure 2).

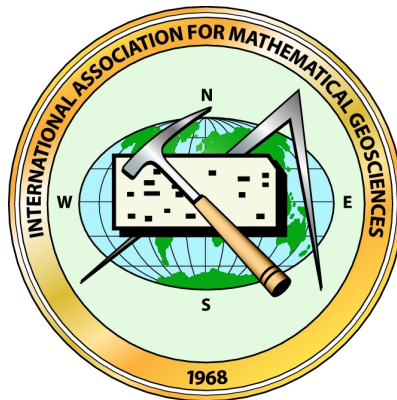


Figure 2. Logo of IAMG.

Nowadays, as shown in Figure 3, IAMG has 617 members in 56 countries.

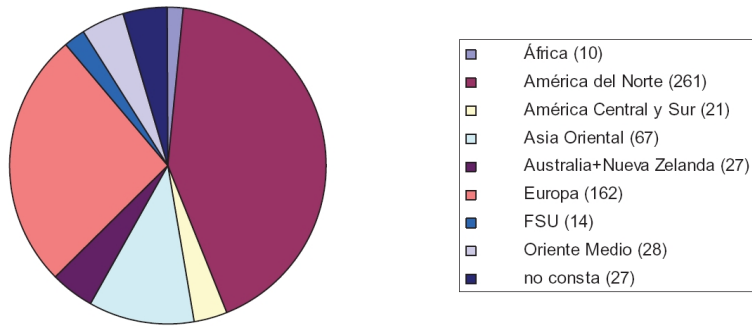


Figure 3. Distribution of IAMG members.

IAMG at present

Over the years IAMG has established several means to pursue its goals: publications, congresses, awards, special lectures, student chapters, student grants for research and travelling. Some details are given below. More recently, in the line of cooperating with other organizations which are professionally concerned with applications of mathematics and statistics to the biological sciences, earth sciences, engineering, environmental sciences, and planetary sciences, IAMG became a member of the International Year of Planet Earth.

Publications

IAMG publishes three scientific journals (Figure 4): *Mathematical Geosciences* and *Natural Resources Research*, published by Springer, and *Computers & Geosciences*, published by Elsevier. IAMG nominates the editors and the editorial board of each journal.

about geology, natural resources and the environment. It is an essential reference for those who develop and apply quantitative methods in the earth sciences and in problems of geoenvironment. At present, the index of rejections is 52%; the impact factor for 2008 is 0.883; and the 5 years impact factor is 1.123. *Mathematical Geosciences* produces 8 issues a year.

The main subject represented in *Mathematical Geosciences* is *geostatistics* (see Table 1.), but there are other subjects well represented in the journal. The common factor that characterizes them is that they are devoted to mathematical methods applied to geoscientific issues.

Table 1. Principal subjects in Mathematical Geosciences (2000-2009). (Author: H. Burger, FU Berlin.)

Subject	Comments	Frequency
Geostatistics		140
Spatial statistics	Markov processes, etc.	67
Deterministic models	Fluid dynamics; geophysical models	46
Classical statistics	Multivariate; tests of hypothesis	45
Compositional data		31
Fractals		30
Stochastic models	Deterministic and random combined	23
Artificial intelligence	Neural networks; genetic algorithms	22
Time series		16
Mathematical morphology	Pattern recognition	14
3D Modelling		7
Directional data		6
Historical		5
Image analysis	Filtering, classification	4
Mathematical models		3

Computers & Geosciences

Computers & Geosciences (Figure 4, middle) was founded in 1975 as an attempt to give visibility to the advancement of computational facilities in the geosciences. It publishes all sorts of computational methods, from spatial analysis and geomathematics, to modelling, simulation, statistical methods and artificial intelligence, e-geosciences, geoinformatics, geomatics, geocomputation, image analysis, remote sensing, and GIS. The term *geosciences* is used in a broad sense, referring to the earth sciences: geology,

geophysics, geochemistry, oceanography, environmental sciences, atmospheric and planetary sciences, hydrology, physical geography, etc... At the present moment, the index of rejections is 65%; the impact factor for 2008 is 1.188; and the 5 year impact factor is 1.442. *Computers & Geosciences* publishes 12 issues a year.

A tabulation of subjects published in recent issues of *Computers & Geosciences* (see Table 2) showed that articles dealing with GIS are the most numerous in this journal, closely followed by studies in applied geophysics and data structures.

Natural Resources Research

Natural Resources Research (NRR) (Figure 4, right) is the youngest journal owned by IAMG. It was founded in 1992, and the first issue was published in the same year. At that time, the name of the journal was Non-Renewable Resources}. The start of the new journal has not been an easy one, and the ISI certification is still pending. NRR publishes quantitative studies about natural resources, including environmental, economic and risk aspects. Typical examples are the validation of sampling techniques; the comparison of exploration strategies; strategies for mining development, use and remediation; important factors for economical and/or technical success; and stochastic and deterministic models.

Table 2. Principal subjects in *Computers & Geosciences* (period analysed 2000-2009). (Author: H. Burger, FU Berlin.)

Subject	Frequency
Geographic Information Systems, GIS	218
Applied geophysics	190
Data structures	190
3D GIS/3D Modelling	140
Artificial intelligence	117
Geostatistics	112
Modelling, simulation	99
Remote sensing	88
E-geoscience, WWW	87
Environmental geology	80
Geoinformatics	67

Table 2 (continued)

Subject	Frequency
Geochemistry, general	65
Engineering geology	62
Hydrogeology	45
Compositional data	39
Statistics	33
Mathematical geology	24
Nonlinear dynamics, incl. fractals, multifractals	16
Time series analysis	10

Studies in Mathematical Geosciences

The series *Studies in Mathematical Geosciences* is published by Oxford University Press. In the words of its founding editor, Richard B. McCammon, *this series ... provides contributions from the geomathematical community on topics of special interest in the Earth sciences. As far as possible, each volume in the series will be self-contained and will deal with a specific technique of analysis. For the most part, the results of research will be emphasized. An important part of these studies will be an evaluation of the adequacy and the appropriateness of present geomathematical and geostatistical applications. It is hoped the volumes in this series will become valuable working and research tools in all facets of geology. Each volume will be issued under the auspices of the International Association for Mathematical Geology.*

Presently, the series includes eight titles, some of which are already sold out.

1. Use and Abuse of Statistical Methods in the Earth Sciences, Size (Ed.) 1987.
2. Oil and Gas Forecasting: Reflections of a Petroleum Geologist, L. Drew, 1990.
3. Geostatistical Glossary and Multilingual Dictionary, R.A. Olea (Ed.) 1991.
4. Techniques for Determining Probabilities of Geologic Events and Processes: A Review, Hunter & Mann (Eds.) 1992.
5. Computers in Geology: 25 Years of Progress, J. Davis & U. Herzfeld (Eds.) 1993.

6. Modern Spatiotemporal Geostatistics, Christakos, 2000 - 3rd printing.
7. Geostatistical Analysis of Compositional Data, V. Pawlowsky-Glahn & R. Olea, 2004.
8. Statistical Methods for Estimating Petroleum Resources, Lee, 2007.

Meetings

Through its Meetings Committee, IAMG supports the organization of its own yearly conference, except for years when the International Geological Congress (IGC) takes place, in which the IAMG holds a set of sessions at the IGC instead. The last meetings have been

- IAMG 2009 - Stanford University; Stanford, CA, USA; August 23 - August 28, 2008; <http://iamg09.stanford.edu>;
- IAMG 2010 - Eötvös Loránd University; Budapest, Hungary; August 29 - September 2, 2010; <http://www.iamg2010-budapest.hu>; while the next meeting will be
- IAMG 2011 - Salzburg, Austria; September 5--9, 2011; <http://iamg2011.at>.

All these meetings are well attended by scientists working in Mathematical Geosciences, and are thus an excellent place to make new acquaintances in this field of research.

IAMG organizes special sessions at the meetings of the IGC, and also invited paper meetings at the congresses of the ISI (International Statistical Institute). The next meetings to take place are

- ISI: 2011 - 21-26 August, Dublin, Ireland;
- IGC: 2012 - 2-10 August, Brisbane, Australia.

But the IAMG also supports other related meetings and courses, such as:

- CoDaCourse (Course on compositional data analysis), Barcelona, Spain, 5-9 July 2010.
- Quantitative image analysis of minerals and rocks, 28-29 August 2010, Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary.
- International School of Fluid Geochemistry, 21-24 September 2010, Abbadia San Salvatore, Siena, Italy.
- CoDaWork (Compositional Data Workshop), Girona, Spain, 10-13 May 2011.

Awards

The IAMG has 4 major awards. An international committee selects the winners among the candidates nominated by members of IAMG. Any member of the association can present candidates. On even-numbered years the following awards are given:

- **William Christian Krumbein Medal** - This is the highest award given by the Association. It is awarded to senior scientists for career achievement, which includes distinction in application of mathematics or informatics in the earth sciences, service to the IAMG, and support to professions involved in the earth sciences. There is no stipulated preference for fields of application within the earth sciences.
- **John Cedric Griffiths Teaching Award** - This award is presented to honor outstanding teaching, especially for teaching that involves application of mathematics or informatics to the Earth's nonrenewable natural resources or to sedimentary geology.

On odd-numbered years the following are given:

- **Felix Chayes Prize for Excellence in Research in Mathematical Petrology** - It is a cash prize endowed in honor of Felix Chayes that is given to recipients of exceptional potential and proven research ability. The prize is given for outstanding contributions to statistical petrology or related applications of mathematics or informatics.
- **Andrei Borisovitch Vistelius Research Award** - Given to a young scientist for promising contributions in research in the application of mathematics or informatics in any field of the earth sciences. A recipient should be 35 years or younger at the end of the calendar year for which he or she has been selected for the award.

Furthermore, the IAMG has established the figures of **Distinguished Lecturer**, who prepares a series of lectures—preferably on a variety of subjects in the mathematical geosciences—to be presented in places where IAMG conferences are not normally held, and of **Georges Matheron Lecturer**, who should be a scientist with proven research ability in the field of spatial statistics or mathematical morphology. This lecture is presented at the annual conference of the IAMG.

The list of awardees, Matheron Lecturers and **Distinguished Lecturers** of IAMG can be found on www.iamg.org. The last ones have been

- 2009-2010 Roussos Dimitrakopoulos, professor, holds the Canada Research Chair (Tier I) in “Sustainable Mineral Resource Development

and Optimization Under Uncertainty – BHP Billiton”, at the Department of Mining and Materials Engineering, McGill University in Montreal, Canada;

- 2008 Donald Myers, Emeritus Professor of Mathematics and Hydrology at the University of Arizona, USA;
- 2007 Vera Pawlowsky-Glahn, professor at the Department of Computer Science and Applied Mathematics of the University of Girona, Spain;
- 2006 Larry W. Lake, professor of the Department of Petroleum and Geosystems Engineering at The University of Texas at Austin (USA) and director of the Enhanced Oil Recovery Research program;
- 2005 Larry Drew, of the U.S. Geological Survey, USA;
- 2004 Frederick P. Agterberg, of the Geological Survey of Canada;
- 2002 John C. Davis, of the Kansas Geological Survey (USA) and author of the classic text “Statistics and Data Analysis in Geology”;

while the Distinguished Lecturer for 2011 is a renowned Portuguese scientist,

- Prof. Dr. Amílcar Soares, from the Centro de Modelização de Reservatórios Petrolíferos.

Other awards and honours established by IAMG are

- The *Best paper award* – Each IAMG journal may select every year the most outstanding paper. Selection of Best Paper is made by a commission appointed by the journal's Editor-in-Chief from members of the journal's editorial board and the Association at large. Each selection commission consists of at least five members.
- The *Best reviewer award*, recently established by *Mathematical Geosciences* to acknowledge the contributions of reviewers.
- *Honorary member*, to recognize people for their contributions to mathematical geosciences and/or to IAMG.
- The *Certificate of Appreciation*, which recognizes exceptional work on behalf of IAMG that is beyond normal expectations, or outstanding donation to the IAMG of time, skill, or financial resources. It may recognize specific effort by individuals upon completion of major tasks. Examples: Editors, Chairs (and possibly members) of committees or commissions that require unusual amounts of time, organizers of annual IAMG conferences.

Student Chapters

Student Chapters were established first in 2004. Up to date, the IAMG has acknowledged 9 **Student Chapters**:

1. 2004: Southern Illinois University – Carbondale, Illinois, USA.
2. 2004: China University of Geosciences – Wuhan, China.
3. 2005: Freiberg University of Mining & Technology, Germany.
4. 2006: University of Alberta – Edmonton, Alberta, Canada.
5. 2006: Stanford University – Stanford, California, USA.
6. 2008: Sun Yat-Sen University – Guangzhou City, China.
7. 2009: University of Colorado at Boulder, Colorado, USA.
8. 2009: ENSG – Nancy University, Nancy, France.
9. 2010: ITC – University of Twente, The Netherlands.

The 10th application is now under consideration.

An IAMG Student Chapter is an active organization of IAMG student members with the purpose of increasing the IAMG's visibility and promoting mathematical geology, geomathematics, and geoinformatics. IAMG Student Chapters are not autonomous institutions, but part of the IAMG. All members and officers of an IAMG Student Chapter must be IAMG members. A Student Chapter may receive funds from the IAMG and exercise its own discretion in using them as long as the uses are compatible with the goals of the IAMG and are approved by the IAMG.

Mathematical Geosciences in Portugal

The disciplines of geostatistics and geomathematics, came to Portugal thanks to the visionary mind of Prof. José Quintino Rogado (Instituto Superior Técnico). In the late 1960's he sent some of his students to take courses in Fontainebleau with Georges Matheron (Geostatistics) and Jean Serra (Mathematical Morphology), basically aiming to tackle the problems of the mining industry (mostly in Angola, former colony), with the flourishing new approaches.

Another important Portuguese pioneer in this field was Prof. Manuel Maria Godinho. Some of his most important publications of the 70's and 80's in this field are listed at the end of this paper. They show his early and broad interest for Mathematical Geosciences. He started in 1973/1974 a course in Geomathematics, for the degree of Geology of the University of Coimbra, that still exists! In the 70's and early 80's he did some work for the National Uranium Company (ENU) using mathematical methods to optimize the design of open pits and geostatistical methods for ore reserve es-

timation. In most of his research work he used geomathematical methods as a tool to understand mineralogical and petrological problems. From 1990 to 2010 he published many more papers using geostatistics, factor analysis, trend surface analysis (polynomial and Fourier series), analysis of characteristics, fractals, correspondence analysis and other geomathematical methods. The most elaborated are probably some papers using mathematical methods to simulate the cooling of granitic plutons and heat transfer to the country rock. In the last few years Prof. Godinho has dedicated most of his attention to the carbon cycle, including also some mathematical modeling.

The Third International Geostatistics Congress, organized in Troia (Portugal, 1992), and the first conference of the geoENV series—Geostatistics for Environmental Applications— which took place in 1996, were two remarkable milestones that definitively contributed to the consolidation and the spread of those disciplines in different portuguese schools and groups linked to the environment, the soil sciences, remote sensing and petroleum.

Invitation

Let us finalize this short report with a warmhearted invitation to join our group (Fig. 6). Together, we can promote and advance the various fields of *Mathematical Geosciences*, alone we are nothing!

Acknowledgements

Thanks are due to Prof. Neves and Prof. Soares for providing information on Mathematical Geosciences in Portugal.



Figure 6. IAMG 2009 annual meeting at Stanford.

References

- Nemec, V. (1993) - Computers in Geology – 25 Years of Progress. International Association for Mathematical Geosciences: Studies in Mathematical Geosciences. Oxford University Press, New York, 316 p.
- Godinho, M. M. (1969) - A note on the error due to impurities in the elemental analysis of mineral concentrates (original in English).
- Godinho, M. M. (1971) - Sobre a possibilidade de aplicação da análise grupal na classificação regional das rochas graníticas. (On the possibility of using cluster analysis for the regional classification of granitic rocks) (original in Portuguese).
- Godinho, M. M. (1974) - Equações para cálculo da composição química de granitóides moscovítico-biotíticos a partir da sua composição modal. (Equations for the calculation of the chemical composition of muscovite-biotite granites from their modal composition) (original in Portuguese).
- Godinho, M. M. (1975) - Programa FORTRAN IV para cálculo de matrizes de substituíbilidade. (translation: A Fortran IV program for the calculation of substitution matrices) (original in Portuguese).
- Godinho, M. M. (1975) - Sequências de grãos no granodiorito filoniano de Mançores (Grain sequences in the granodiorite vein of Mançores) (original in Portuguese).
- Godinho, M. M. (1976) - Ensaio de classificação químico-mineralógica de granitóides da região de Guardão (Caramulo - Portugal). (Mineralogical and geochemical classification of the granites of the Guardão region (Caramulo-Portugal) (original in Portuguese).
- Godinho, M. M. (1976) - Programas FORTRAN IV para análise de sequências geológicas. (FORTRAN IV programs for the analysis of geological sequences) (original in Portuguese).
- Godinho, M. M. (1977) - Grupos reaccionais de elementos químicos petrogenéticos em complexos granitóides hercínicos da Península Ibérica. (Reacting groups of petrogenetical chemical elements in hercian granitoids of the Iberian Peninsula) (original in Portuguese).
- Godinho, M. M. (1978) - Algumas considerações sobre a petrogénese dos granitóides grosseiros porfíroides da região de Viseu (Portugal). Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab, Mineral. Geol., Univ. Coimbra; 85, 43-49. (Some thoughts on the petrogenesis of the porphyritic biotite granites of the Viseu region (Portugal) (original in Portuguese).
- Oliveira, J. M. S. e Godinho, M. M. (1979) - Um caso de aplicação da análise de tendências à prospecção mineira. (An example of trend surface analysis applied to mineral prospecting) (original in Portuguese).
- Godinho, M. M. (1982) - O coeficiente de correlação e a sua variação espacial - o plutónio do Caramulo como caso exemplar. (The correlation coefficient and its spatial variation: the Caramulo pluton as an example) (original in Portuguese).
- Neves, L.J.P.F., Pereira, A.J.S.C. e Godinho, M.M. (1986) - Notícia sobre um banco de dados de rochas ígneas do território continental português. (A database of igneous rocks of the Portuguese territory) (original in Portuguese).
- Godinho, M.M., Neves, L.J.P.F. e Pereira, A.J.S.C. (1988) - A diversidade de rochas do espectro gabbro-granodiorito na região de Farminhão-Portela (Viseu, Portugal Central) - um modelo integrado de diferenciação. (On the diversity of rocks from the range gabbro-granodiorite of the Farminhão-Portela region (Viseu, Central Portugal) – an integrated differentiation model (original in Portuguese).
- Godinho, M.M., Neves, L.J.P.F. e Pereira, A.J.S.C. (1989) - Distribuição espacial de elementos maiores num cristal de biotite - um caso de geometria fractal. (Spatial distribution of major elements in a biotite crystal – a case of fractal geometry) (original in Portuguese).

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Garnering green energy from granites: Lessons and opportunities from a UK perspective

William Stephens¹

¹Department of Earth Sciences, University of St Andrews, St Andrews, Fife KY16 9AL, UNITED KINGDOM, Ed.Stephens@st-andrews.ac.uk

Key-words: Granite, Geothermal energy, Scotland

Abstract

The concept of extracting geothermal energy from hot granitic rock sources at depths of 3-5 kilometres is enjoying a renaissance as a practical concept, and several prospects worldwide are under development. It is noteworthy however that very few hot rock prospects are being developed at latitudes affected by Pleistocene glaciation. Here we examine three regions of high heat producing granites in the United Kingdom that were located either beneath thick ice (Eastern Grampian Highlands of Scotland, North of England) or beyond the ice limit (Cornubia). Heat flow measurements made in 30 relatively shallow boreholes and mines (≤ 300 metres) do not correlate well with heat production as estimated from the concentrations of radiothermal elements, with anomalously low heat flow values restricted to boreholes located in areas covered by Pleistocene ice sheets. Maximum ice sheet thickness is estimated using a model of glacio-isostatic rebound and used as a proxy for the magnitude of the glacial cooling and inter-glacial warming effects on near-surface heat flow. No significant correlation is observed between measured heat flow and heat generation despite all areas having large negative Bouguer gravity anomalies indicating thick batholithic masses of granite underlying all boreholes. However a strong correlation is observed between heat flow and maximum ice thickness suggesting this is a primary control on present day heat flow at shallow levels. A deep borehole is required to test this hypothesis. The geochemistry of these high heat producing granites in Scotland is examined and their potassic and fractionated characteristics are used to show that other plutons in Scotland may share their heat generating potential. It is concluded that the East Grampian batholith in Scotland may have been mistakenly excluded as a region of hot rock geothermal potential, and its inclusion would add significantly to the UK's hot rock resources. If this is a generic feature of glaciated terrains then many more hot resources may be hitherto unidentified in the higher latitudes of the northern hemisphere.

Introduction

A scientific consensus has emerged that combustion of fossil fuels is contributing to long-term changes in the planet's climate system. The EU is committed to reducing greenhouse gas emissions relative to 1990 levels and the UK has set a reduction target of at least 80% by 2050 (anon 2010). This means installing considerable renewable energy capacity and the UK's strategic priority is to exploit its extensive onshore and offshore wind resources while developing new technologies for utilising wave and tidal resources. Policy-makers presently envisage only a minor role for geothermal energy in the power generating mix by 2050 (anon 2010). In other countries such as Germany the potential of deep, radiothermal granites to fill some of the impending heat and power gap has been recognised, and overcoming the considerable technological challenges in exploiting these resources is being viewed as a major market opportunity (Nitsch 2008). Increasing costs of fossil fuels, the need to reduce emissions and pressures to secure indigenous energy supplies combine to bring the geothermal option into consideration.

The partitioning of K, U and Th by silicic magmas and further concentration by fractional crystallisation provides the geochemical basis for high heat producing granites (HHP), radioactive decay being the principal source of deep hot rock geothermal energy in crustal rocks (MIT 2006). HHP granites are typically uranium-rich and promising hot rock resources usually generate 5-10 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ through radioactive decay. High enthalpy fluids ($>150^\circ\text{C}$) can be extracted in a closed loop by injecting cold fluids from the surface through an engineered fracture system in hot rocks at depth and returning steam or hot fluid to the surface to drive a turbine (MIT 2006). Such enhanced (or engineered) geothermal systems provide the basis for optimism that geothermal energy sources may be available for exploitation in many continental regions with no proximity to volcanic activity. [Note that the descriptors hot fractured rock (HFR) and enhanced geothermal system (EGS) are technically more correct but hot dry rock (HDR) is in common usage.]

It has been three decades since the first HDR project at Fenton Hill (Los Alamos, USA) but large-scale generation of power at commercial cost from HDR sources has eluded available technologies. A breakthrough came in 2009 following a proof-of-concept test at Innamincka in the Cooper Basin in South Australia where a reservoir was stimulated at 4.25 km depth in rocks at 247°C between two wells some 560 metres apart. The closed loop test over six weeks successfully demonstrated fluid circulation between the

injection and production wells (Wyborn 2010). The Cooper Basin resource appears to be colossal. The operators, Geodynamics Ltd, recently submitted evidence to the Australian Government stating that “there is in the order of 10,000 MW of long term, emission free, baseload generation capacity that can be economically extracted from the company's tenements in the Cooper Basin” (Geodynamics 2009). For comparison, this is a quantity well in excess of the present total electricity usage in Scotland or Portugal.

The aim of this paper is to re-examine the data on which the EGS potential of northerly regions of the UK was judged to be limited, and to interpret measured heat flow patterns in granites in the context of glacial-interglacial geothermal patterns. Elsewhere in northern Europe it has been clearly demonstrated that post-Pleistocene geothermal gradients formerly under thick ice sheets terrain have not yet reached a steady state and heat flow estimated from gradients derived from shallow boreholes can very significantly underestimate present-day heat flow at depth. Data used to evaluate the UK potential in the 1980s are here re-examined in this light and the geothermal potential reconsidered.

Heat generation and heat flow in UK granites

Following the oil crises of the 1970s the UK (and later the EU) developed a major programme of research into its indigenous geothermal resources. Here we consider only the deep geothermal resources of the UK, all associated with HHP granites. The programme concluded that three regions hosted interesting HHP granites (Wheildon and Rollin 1986), namely Devon and Cornwall in SW England (Cornubia), the Lake District and Co Durham (N.England), and the eastern Grampian Highlands of Scotland (E.Grampians) (Figure1). Comparison of the heat flow in these regions, however, indicated major differences in geothermal potential (Lee 1986). (Note that all heat flow estimates for the N.England and E.Grampians are taken from boreholes typically 300 metres deep whereas those in the Cornubian granites are more typically 100 metres deep although the values broadly coincide with much deeper estimates from the South Crofty and Geevor mines in the Land’s End and Carnmenellis plutons respectively.)

Bodies of HHP granite can be identified by modelling the heat production of rock samples from their concentrations of U, Th and K. The granites of interest in this study are of Caledonian age (about 390-430 Ma) in Scotland and N.England, and Hercynian (290-260 Ma) in Cornubia. Heat production values for representative samples of Scottish granites have been

calculated using data from our own laboratories as well as the literature. The data indicate that most HHP granites are located in the east of Scotland, primarily in the eastern Grampian Highlands (Figure 1) in a group of plutons collectively termed the Cairngorm Suite (Stephens and Halliday 1984) and found from Cairngorm (Figure 1) eastwards. Four plutons, namely Cairngorm, Ballater, Bennachie and Mount Battock, were investigated in detail.

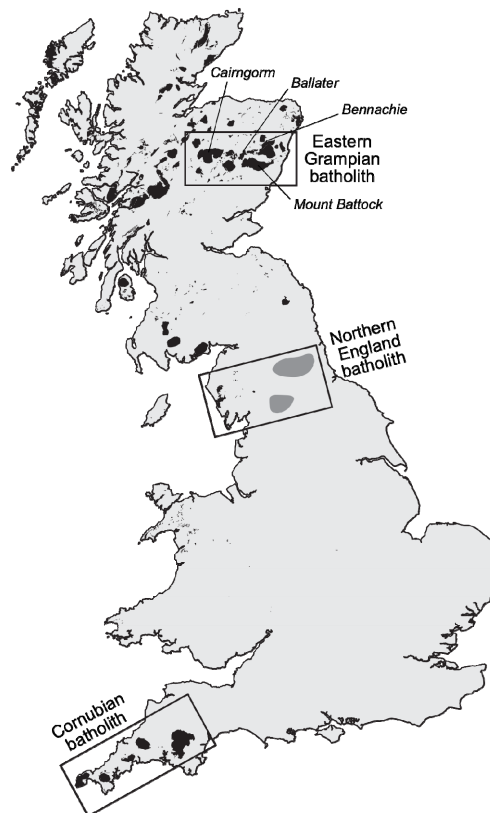


Figure 1. Map of the locations of the main batholithic areas with containing heat producing granites. Negative gravity anomalies underlie all three batholiths. Black areas are granite bodies and dark grey areas are granite plutons identified by gravity anomalies. Four plutons in the Eastern Grampian batholith discussed in the text are indicated.

The Cairngorm Suite granites of the eastern Grampian Highlands have a mean heat production of $6.0 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (standard deviation 2.2), and many fall in the range of the Big Lake granodiorite underlying the Cooper Basin,

calculated to produce 7-10 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (Beardsmore 2005). This is currently regarded the best large-scale EGS prospect in the world, producing water temperatures during circulation tests in 2009 ranging from 212°C at the wellhead to 244°C at the bottom of the hole (Wyborn 2010). Another major project at Soultz (France) in the Rhine graben has granitic source rocks with heat production calculated to range between 2-5 $\mu\text{W}/\text{m}^3$. Indeed most of the Cairngorm Suite samples significantly exceed the heat production of the granites of Cornubia and N.England (means of 4.6 and 4.1 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ respectively), the former regarded as one of the best EGS prospects in the European Union. These comparisons suggest that Scotland may have some large granite plutons suitable for high enthalpy EGS and thus power generation.

The E.Grampian (Cairngorm Suite) granites are generally high heat producing but this is not matched by elevated levels of measured heat flow. This apparent contradiction accounts for the low level of interest in these granites as potential geothermal resources (Wheildon, King *et al.* 1984). There are various explanations for this paradox, including:

- That the granites are present as shallow sheets rather than thick plutons, leading to a much smaller volumetric contribution than the areal distribution of granite outcrops might suggest.
- That the actinides are heterogeneously distributed with uranium in particular concentrated nearer the surface where the survey samples were collected, perhaps redistributed by hydrothermal processes.
- That there are large differences in heat flow from the mantle and crustal basement rocks beneath the granites, with the basement in Scotland (north of the major Iapetus suture line representing the accretion of the Avalonian microcontinent to Laurentia) having significantly lower heat flow than the basement beneath the N.England and Cornubian granites.

None of these explanations fully accounts for the major observed differences in heat flow. The evidence of negative Bouguer gravity anomalies suggests that a deep batholith (“East Highlands batholith”) underlies the HHP granites of the E.Grampians region to a depth of 13 km (Lee 1986), rather than sheets. Investigation of surface samples and those from boreholes indicates that accessory minerals are often important primary repositories of actinides but there is some grain boundary redistribution of uranium and uraninite is also present. Some leaching of

uranium might be expected in near-surface samples and so the estimates used here, based on bulk analyses of surface samples, are considered likely to be underestimates of the radioelement concentrations in deep rocks (Webb and Brown 1984), but the depth profile of heat producing elements is not known with any certainty. As for variations in mantle and deep crustal sources, the area-weighted amplitude of the UK-wide background, omitting measurements made in granite areas, is estimated as 52 ± 9 mW/m² (Wheildon and Rollin 1986). Comparison of this figure with the heat flow map of the UK does not indicate any major difference between the background heat flows in Scotland, N.England and Cornubia. As the difference between the heat flows in HHP granites of Cornubia and Scotland is of the same order this factor alone is only likely to make a small contribution. Overall, these factors do not appear to account for the magnitude of difference between those HHP that generate high heat flows and those that do not. An alternative possible explanation is considered below.

Influence of Late Pleistocene glaciation

It has been known for a very long time that protracted glaciation has a significant effect on measured temperatures in boreholes, with greatest effects closest to the surface and discernible down to about two kilometres (Benfield 1939). Evidence from careful measurements in very deep boreholes indicates that heat flow estimates in terrain formerly beneath thick ice sheets are transient and may be significantly affected by changes in surface temperatures. Estimates on long-term heat flow only become reliable below about 2 kilometres depth (Majorowicz, Safanda *et al.* 2008). Recently such perturbations have been extensively modelled to retrieve climate change information, and the unreliability of heat flow estimates in northerly latitudes has been highlighted (Majorowicz and Wybraniec 2010). In extreme cases such as Sidorowka-Udryn in Poland the gradient of temperature with depth is zero and even negative within the top several hundred metres of the borehole.

It is noteworthy that the sequence of low through intermediate to high heat flow plutons in the UK HHP granites follows an approximately N-S regional trend from Scotland through N.England to Cornubia. This prompts the question as to whether this also reflects a glacial-interglacial transition pattern. Late Pleistocene glaciation strongly affected much of the UK but the effects did not extend as far south as the Cornubian granites and are

concentrated in Scotland and upland areas of Wales and England (Clark, Evans *et al.* 2004; Fretwell, Smith *et al.* 2008). The UK may represent a microcosm of a European-wide ice margin effect following the last glaciation (Majorowicz and Wybraniec 2010). The current published map of heat flow in Europe has very few areas of high heat flow north latitude 50°N; even Iceland has a modest heat flow of about 60 mW/m² (Hurtig, Cermak *et al.* 1992). A new map which attempts to model the glacial-interglacial effects on heat flow applies corrections up to about 20 mW/m² (Majorowicz and Wybraniec 2010) and generates a much less polarised distribution, suggesting that some reasonably high heat flow regions do indeed exist in northerly latitudes. The observed heat flow difference between the E.Grampian and Cornubian granites is of the order of 50 mW/m² (Figure 2a), somewhat larger than the typical 20 mW/m² correction applied by the model (Majorowicz and Wybraniec 2010) and much greater than the 5-10 mW/m² suggested by the 1980s study of the UK's geothermal potential (Wheildon and Rollin 1986).

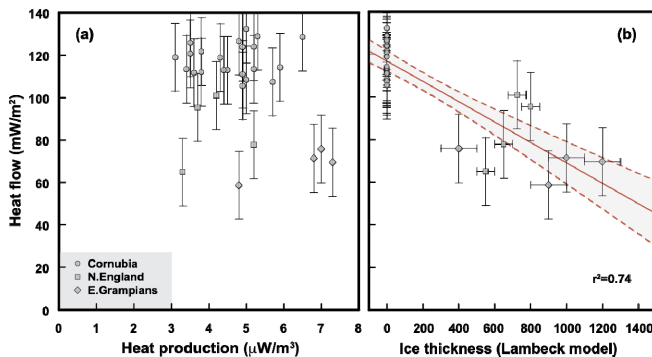


Figure 2. (a) Relationship between calculated heat production and heat flow in boreholes within granites located in three regions of the UK (Cornubia, N.England and E.Grampian Highlands of Scotland). (b) Comparison of heat flow with ice thickness during late Pleistocene glaciation over the UK (regression line significant at $p < 0.001$). Ice thicknesses derived from the model of Lambeck [17].

The UK offers an opportunity to examine the relationship between apparent heat flow in relatively shallow (≤ 300 metres) boreholes and Pleistocene glaciation over a traverse from more than a kilometre of ice sheet to unglaciated terrain within broadly the same lithology, namely high

heat producing granites. Heat flow data obtained from thirty 100-300 metre boreholes in granites from the E.Grampian, N.England and Cornubian batholiths (Figure 3) were taken from a compilation of UK boreholes (Lee 1986). Because of its very high heat flow (often 120 mW/m^2) the Cornubian batholith is well represented with 22 boreholes, the other two regions have four boreholes each. As a proxy of the magnitude of the glacial effect the 1995 glacio-isostatic rebound model of Lambeck is adopted in this study (Lambeck 1995). Maximum ice thickness values were derived by subtracting terrain elevation from the Lambeck model of ice surface elevation (Fretwell, Smith *et al.* 2008), and thickness contours are shown on figure 3. Ice thicknesses at each borehole location were estimated from this map.

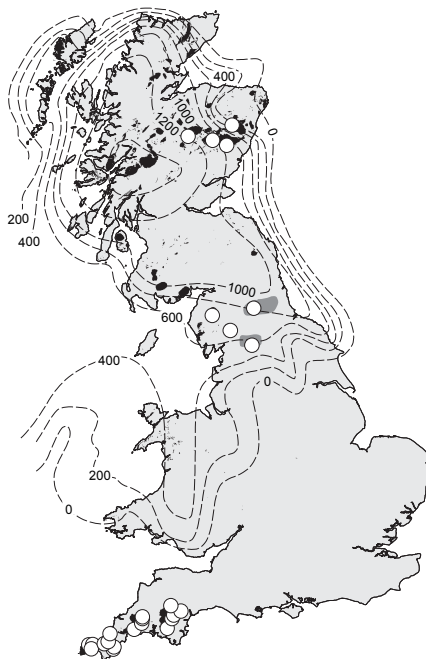


Figure 3. Map showing the locations of the boreholes used in this study (white circles) and contours of maximum ice thickness during Pleistocene glaciation from Lambeck (1995) [17] used to estimate ice thickness over each borehole.

The most important factors that determine heat flow in thick granitic plutons are heat production that can be modelled using measured concentrations of U, Th and K in samples obtained from surface outcrops or cores, and heat flow from beneath the pluton. In order to explore the

possibility that the glaciation effect is important regression analyses of the dependence of heat flow on heat production and ice thickness was undertaken. It is assumed that the measured heat flows used in the study are due to conductive heat transfer and have not been disturbed by fluid circulation (quality selection was applied in the original datasets). A single value for heat flow, heat production and ice thickness is used to represent each borehole in this analysis. This approximation is justified on grounds that radioelement decay is the dominant source of heat in HHP granites of batholithic proportions (Pollack 1982) and the study aims to identify the major controls on the geographical variation in heat flow in shallow boreholes within broadly similar HHP granites, rather creating an accurate model of heat flow at individual sites.

Figure 2a shows that there is no significant correlation between heat production and heat flow between the different granite regions of the UK. In contrast ice thickness does a significant inverse relationship with heat flow ($\rho < 0.001$) (Figure 2b). Thus there is a strong suggestion in the data that the ice sheet effect is real and that heat flow estimates within glacial terrains may reflect transient conditions and provide significant underestimates of steady state heat flow. Confidence in this outcome comes from knowing that the results conform to a well-established pattern of reduced apparent heat flow in the regions of Pleistocene ice sheets in the northern hemisphere (Majorowicz and Wybraniec 2010).

While this analysis oversimplifies a complex set of relationships, the results suggest that glaciation has reduced current estimates of heat flow in the N.England and E.Grampian regions, probably significantly in excess of the 20 mW/m^2 typical for northern Europe (Majorowicz and Wybraniec 2010). If this is correct then the decision not to prospect for hot rock geothermal resources in the HHP granites of the E.Grampians of Scotland (Wheildon, King *et al.* 1984) in favour of the HHP granites of England would appear premature and may have overlooked a significant potential resource.

Numerical modelling indicates that this transient glacial-interglacial effect extends to around 2 kilometres depth and persists for approximately twenty thousand years after melting (Majorowicz, Safanda *et al.* 2008). Thus estimates of heat flow in terrain affected by ice sheets during the Pleistocene and deglaciated in the Holocene are likely to be strongly affected, especially in boreholes of the depths used in this study (≤ 300 metres).

Reassessment of the geothermal potential of the Scottish granites

This analysis suggests that high heat producing granites associated with low heat flow in the northern regions of the UK should be re-examined. Most of the HHP granites in northern England are concealed and were discovered on the basis of strong negative gravity anomalies and proved by drilling. Scotland however has a large number of exposed plutons some of which may be candidates for geothermal systems. As well as the four plutons shown on figure 1 there may be other granites among the Scottish plutons that have HHP characteristics. To examine this possibility a database of whole rock compositions of the Caledonian Newer Granite plutons in Scotland was compiled from in-house analyses and the literature.

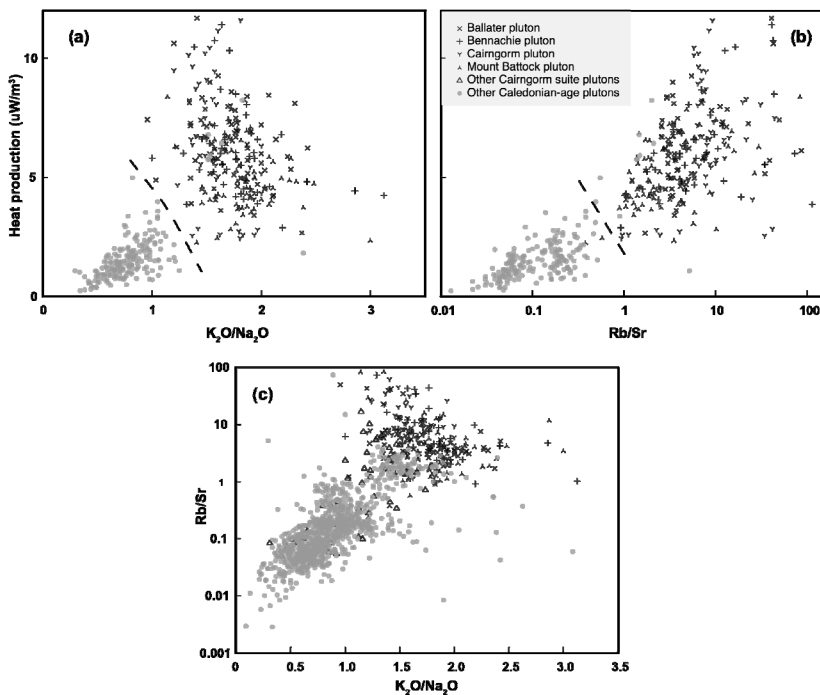


Figure 4. (a) and (b) Heat Production as a function of K₂O/Na₂O and Rb/Sr respectively in plutons for which accurate radioelement data are available. These whole rock ratios are effective at discriminating the HHP plutons of Ballater, Bennachie, Cairngorm and Mt Battock, separated from non-radiothermal granites by the dashed line. (c) Application of these ratios to a much larger dataset including other plutons within the Cairngorm suite and other suites within the Caledonian Newer Granites of Scotland [8] with the aim of identifying other possible HHP plutons. Key for all diagrams shown in (b).

A subset of samples in the dataset includes analyses of the radioactive elements from which heat generation was calculated, and the bulk characteristics of these samples were examined for geochemical features that typify the Scottish HHP granites. These HHP granites tend to be rich in SiO_2 , and in mineralogical and geochemical terms they have bulk characteristics typical of I-type granites, with high field strength element abundances overlapping into A-types. Figure 4a shows that they are also notably potassic in terms of the alkalinity ratio ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$). Rb/Sr is usually taken as an indicator of fractional crystallisation, and figure 4b shows this parameter on a logarithmic scale indicating that these HHP granites in Scotland are strongly fractionated.

Applying both parameters to the full dataset results figure 4c shows that many other granites plutons, both within the Cairngorm suite of the E.Grampians and elsewhere in Scotland, have the same highly potassic fractionated granite characteristics of those known to be high heat producers. There is also a complementary group of plutons that are devoid of these features and are very unlikely to be capable of supporting geothermal systems.

It is particularly important to test the model for HHP granites developed above, particularly the explanation of the heat production-heat flow paradox. If the explanation is correct then Scotland may escape the ranks of the geothermally barren. Testing would require drilling a borehole up to two kilometres deep, and if successful there is the potential of adding a new province of approximately the same size of the Cornubian province to the inventory of national hot dry rock geothermal resources.

Conclusions

1. This work supports a growing awareness that good hot rock geothermal prospects may be overlooked in terrains that have been under Pleistocene ice sheets if evaluation is based entirely on heat flow obtained from shallow boreholes.
2. Anomalies in the relationship between heat generation and heat flow are highlighted, and heat flow is frequently lower than predicted from heat generation (but never higher).
3. These negative heat flow anomalies lie exclusively at locations that lay beneath thick ice sheets in the late Pleistocene, and most measurements in these areas share this feature.

4. High heat producing granites in Scotland have a distinctive potassic and fractionated geochemistry. This can be used as a predictive tool to identify other plutons with geothermal potential as well as those without such potential.
5. If the concept of systematic underestimation of heat flow in heavily glaciated regions is demonstrated in the east of Scotland by deep boreholes then a large new region may be added to the UK's potential hot dry rock resources.

The era of hydrocarbon-based energy dominance is coming to an end, and we are embarking on a new era of technological exploitation of emission-free energy sources. Geology can make a major contribution through geothermal energy extracted from radiothermal granites at depth. The technology is highly challenging but rapidly developing. The potential resources are considerable and widespread, unlike volcanic sources of geothermal energy that are effectively restricted to plate boundaries. It is important that the locations of useful resources are identified so that the energy may be garnered as soon as the technology becomes available and the commercial environment conducive. Of all the “green” energy sources available, geothermal is almost unique in its zero carbon emissions, low environmental footprint and capability of supplying baseload power regardless of climatic conditions.

Acknowledgements

It is a pleasure to acknowledge discussions on granites spanning more than three decades with my friend Professor Manuel Godinho. Professor Luís Neves is also thanked for his help in getting the manuscript published. I am grateful to numerous students at the University of St Andrews for their contributions over many years to the granite sample database. The pioneering research of the teams working on hot rock geothermal prospects in the UK during the 1970s and 80s is also acknowledged, and it is anticipated that their faith in the concept will soon be vindicated.

References

- Anon (2010) - 2050 Pathways Analysis. London, HM Government.
- Beardsmore, G. R. (2005) - Thermal Modeling of the Hot Dry Rock Geothermal Resource Beneath GEL99 in the Cooper Basin, South Australia. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.

- Benfield, A. E. (1939) -Terrestrial heat flow in Great Britain Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences; 173, 428-450.
- Clark, C. D., D. J. A. Evans, et al. (2004) - Map and GIS database of glacial landforms and features related to the last British Ice Sheet; *Boreas* 44(4), 359-375.
- Fretwell, P. T., D. E. Smith, et al. (2008) - The Last Glacial Maximum British-Irish Ice Sheet: a reconstruction using digital terrain mapping. *Journal of Quaternary Science*; 23, 241-248.
- Geodynamics. (2009) - Submission to the Senate Select Committee on Fuel and Energy. Retrieved 16 February 2010, from http://www.aph.gov.au/senate/Committee/fuelenergy_ctte/submissions/sub0106.pdf.
- Hurtig, E., V. Cermak, et al. (1992) - Geothermal atlas of Europe, H. Haack Verlagsgesellschaft mbH und Geogr.-Kartogr. Anstalt, Gotha.
- Lambeck, K. (1995) - Late Devensian and Holocene shorelines of the British Isles from models of glacio-isostatic rebound. *Journal of the Geological Society*; 152, 437-448.
- Lee, M. K. (1986) - Heat flow. Hot Dry Rock. R. A. Downing and D. A. Gray, British Geological Survey; 21-41.
- Majorowicz, J., J. Safanda, et al. (2008) - Heat flow variation with depth in Poland: evidence from equilibrium temperature logs in 2.9-km-deep well Torun-1. *International Journal of Earth Science*; 97, 307-315.
- Majorowicz, J. and S. Wybraniec (2010) - New terrestrial heat flow map of Europe after regional paleoclimatic correction application. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*.
- MIT (2006) - The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century, Massachusetts Institute of Technology.
- Nitsch, J. (2008) - Further development of the “Strategy to increase the use of renewable energies” within the context of the current climate protection goals of Germany and Europe. Retrieved 4/11/2010, 2010, from <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/42726/42455/>.
- Pollack, H. N. (1982) - The heat flow from continents. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*; 10, 459-481.
- Stephens, W. E. and A. N. Halliday (1984) - Geochemical contrasts between late Caledonian granitoid plutons of northern, central and southern Scotland. *Transactions Royal Society Edinburgh: Earth Science*; 75, 259-273.
- Webb, P. C. and G. C. Brown (1984) - The Eastern Highlands granites: heat production and related geochemistry. Investigation of the geothermal potential of the UK. Keyworth, British Geological Survey, 77pp.
- Wheildon, J., G. King, et al. (1984) - The Eastern Highlands granites: heat flow, heat production and model studies. Investigation of the geothermal potential of the UK. Keyworth, British Geological Survey; 77pp.
- Wheildon, J. and K. E. Rollin (1986) - Heat flow. *Geothermal Energy: The potential in the UK*. R. A. Downing and D. A. Gray, British Geological Survey; 8-20.
- Wyborn, D. (2010) - Update of Development of the Geothermal Field in the Granite at Innamincka, South Australia. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

On Proterozoic ecosystems and the carbon isotopic composition of carbonates associated with Banded Iron Formations

Anthony Fallick¹; Victor Melezhik^{2,3}; Bruce Simonson⁴

¹Scottish Universities Environmental Research Centre, G75 0QF, SCOTLAND, tony.fallick@glasgow.ac.uk

²Norwegian Geological Survey, Leiv Erikssons vei 39, N-7491 Trondheim, NORWAY, victor.melezhik@ngu.no

³Centre for Geobiology, University of Bergen, Postboks 7803, N-5020, NORWAY

⁴Department of Geology, Oberlin College, Oberline, OH44074-1052, USA, Bruce.Simonson@oberline.edu

Key-words: Proterozoic, Carbon isotopes, Banded Iron formations

Abstract

A compilation of over 400 carbon isotope analyses of carbonates associated with Banded Iron Formations (BIF) reveals a strong major mode at $\delta^{13}\text{C} \sim -7\text{‰}$ (VPDB), a second major mode at $\delta^{13}\text{C} \sim -10\text{‰}$, and a minor mode at $\delta^{13}\text{C} \sim -1\text{‰}$. The minor mode is readily attributed to contemporaneous marine bicarbonate, perhaps slightly modified by mixing with carbon of lower $\delta^{13}\text{C}$ (i.e. $< 0\text{‰}$). We compared the two major modes with literature examples of the structure of histograms of $\delta^{13}\text{C}$ of secondary carbonate cements from Phanerozoic sandstones which are hydrocarbon reservoirs. The processes and mechanisms responsible for the predominant modes in the sandstone cements $\delta^{13}\text{C}$ are thought to be reasonably well understood. Whereas the BIF-mode at $\delta^{13}\text{C} \sim -10\text{‰}$ corresponds to the most salient mode in the Jurassic cements (also $\delta^{13}\text{C} \sim -10\text{‰}$) and is accordingly ascribed to deep burial (thermal) remineralisation of organic matter, the BIF-mode at $\delta^{13}\text{C} \sim -7\text{‰}$ is not prominent in the sandstone cement compilations. We suggest it is attributable to a hydrothermal source. We conclude that the BIF-carbonate data can be explained without invoking a significant carbon source from biogenic processing of organic matter during shallow burial. We note that the absence of such microbial recycling of organic matter would preclude significant accumulation of biogenic CH_4 in the sediments until a vibrant community of appropriate obligate anaerobes became established in the subsurface.

Introduction

Banded Iron Formations (BIF) are sedimentary rocks deposited mainly in the interval ~ 3.6 to ~ 2 billion years age (Trendall, 2002; Simonson, 2003;

Clout and Simonson, 2005; Klein, 2005 and Beukes and Gutzmer, 2008 for reviews) in which components rich in iron alternate with others rich in silica; carbonates can be associated with both. BIF have long attracted the attention of earth scientists because of their intriguing episodicity in the geological record (James, 1983); because *inter alia* they have been considered to offer insight into palaeoenvironmental conditions during earlier phases of planetary development (e.g. Cloud, 1983, as a thoughtful example) and because of their economic significance as major sources of iron ores (Dalstra and Flis, 2008). Iron Formations are conventionally classified into three groups *viz* Lake Superior, Algoma and Rapitan (see Beukes and Gutzmer, 2008 for a recent discussion).

Important advances in our understanding of the sedimentology, architecture and depositional environment of BIF have recently been achieved through: critical syntheses; new approaches including sequence stratigraphy; recognition of the diverse range of microbial processes which could contribute to iron oxide precipitation; and application of new geochemical and isotopic methods (mass-independent S isotope fractionations, iron isotope ratios, etc). – see e.g. Beukes and Gutzmer, 2008; Simonson, 1985 and 2003; Konhauser *et al.*, 2005. An exhalative hydrothermal source seems likely for the iron (Gross, 1980; Simonson, 1985) and also for the Rare Earth Elements, especially Nd (Beukes *et al.*, 1990; Beukes and Klein, 2008). Raiswell (2006) has recently provided a critical evaluation and quantitative estimate of the potential of diagenetic recycling to contribute iron to BIF; he concluded that this mechanism is unlikely to provide a major iron source, albeit the diagenetic flux can be amplified by special factors such as an enhanced ratio of the area of source to sink.

Very recent ideas which have not, as yet, achieved acceptance and which will likely be the focus of much discussion, include biological iron oxidation (Konhauser *et al.*, 2007, and discussion therein), and cycling between microbially-mediated iron mineral deposition and abiotic silica mineral precipitation (thereby accounting for the alternating mineral assemblages) by natural ambient temperature fluctuations in the water column (Posth *et al.*, 2008).

Notwithstanding all this significant progress, consensus has yet to be achieved on certain issues, including interpretation of the carbon isotopic composition of BIF-associated carbonates. We recently hypothesised (Fallick *et al.*, 2008) that the pre-2000 Ma biosphere had a general mode of operation which differed from the modern one in that remineralisation of organic matter was predominantly in the anoxic water column and sediment-

water interface, and rarely within sediments. The bases for the proposal were the relative paucity of sedimentary concretions in the geological record prior to c. 2000 Ma, and the observation that – for the older rocks – diagenetic carbonates usually resemble contemporaneous sedimentary carbonates in having $\delta^{13}\text{C} \sim 0 \pm 3\text{‰}$ (VPDB). We explicitly recognised that within this context BIF-associated carbonates were anomalous in frequently displaying low $\delta^{13}\text{C}$ values.

The oxygen isotopic composition of quartz and iron oxides from banded iron-formations was reviewed by Müller *et al.* (1986), mainly from the perspective of metamorphic re-equilibration. Whilst noting the complexity introduced in polymetamorphic instances, they pointed to a broad agreement between temperatures of metamorphism deduced from petrological constraints and those calculated from oxygen isotope distributions. What then of low $\delta^{13}\text{C}$ carbonates associated with BIF being a consequence of metamorphic resetting via late stage organic matter oxidation by ferric oxides? Whilst this view has been suggested by Perry *et al.* (1985), it was discounted by Baur *et al.* (1985) and had previously been rejected by Becker and Clayton (1972), on the grounds of internal consistency with low organic matter concentrations, observations of occurrence of ferrous and ferric iron minerals, and preservation of small scale isotopic inhomogeneity in vertical sections.

The purpose of the present paper is firstly to expand a little on the previously proposed organic matter (OM) recycling hypothesis (Fallick *et al.* 2008), and secondly to look in greater detail at $\delta^{13}\text{C}$ of BIF-associated carbonates based on already published data. The objective here is to contribute to the debate over the extent to which these low $\delta^{13}\text{C}$ values document substantial remineralisation of organic matter, as opposed to for example a significant component of low $\delta^{13}\text{C}$ from a hydrothermal exhalative source. Our approach is to compare the frequency distribution of compiled BIF-associated carbonate $\delta^{13}\text{C}$ values with those of other published databases, together with theoretical considerations, taken as representing relatively pure end-member cases (deep-seated “hydrothermal” carbon, carbon derived from remineralised organic matter by a variety of mechanisms, etc).

Development of the Proterozoic Ecosystems Hypothesis

An implication of the hypothesis, not examined in Fallick *et al.* (2008), concerns generation of methane within the sediment column. In the absence of a sedimentary community of fermenting organisms, it seems unlikely that

there would be significant generation therein of biogenic CH₄, and consequently no opportunity to build up sizeable concentrations of methane-hydrate clathrate until thermogenic methane production commences. The opportunity for sedimentary biogenic methane accumulation arises (perhaps for the first time?) when fermentative recycling of buried organic matter is enabled by a vibrant and active community of appropriate organisms in the sediment: see Table 1 for a summary of some relevant key events, not necessarily in strict temporal sequence.

Table 1. Aspects of Palaeoproterozoic

APPROXIMATE TIME (Ga)	OBSERVATIONS AND SPECULATIONS
~2.5	
~2.4	Global Rifting. ¹ Development of oxygenic photosynthesis. ² Onset of Huronian glaciation. ³
~2.3	Water column OM recycling falters. ⁴ Water column not conducive to obligate anaerobes. ⁴ ?Start of L-J isotope excursion.
~2.2	Accumulation of sedimentary CH ₄ . ⁵ Development of deep water basins. ⁶
~2.1	Vibrant subsurface biosphere allows efficient OM recycling in sediments. ⁴ Sedimentary concretions abundant. ⁴ End of L-J isotope excursion. ⁷
~2.0	

Notes: Most timings are not well-constrained and so neither is the sequence implied in the Table.

References are: 1. Heaman 1997; Vogel *et al.* 1998. 2. Kirschvink 2005; Kopp *et al.* 2005. 3. Young *et al.* 2001; Hannah *et al.* 2004; Melezhik 2006; 4. Fallick *et al.* 2008. 5. This work. 6. Bekker and Eriksson 2003; Wanke and Melezhik 2005. 7. Karhu and Holland 1996; Melezhik *et al.* 2007.

The modern analogue suggests that the CO₂ produced during methanogenesis would usually (but not always) be lost to the overlying water column, resulting in a local CO₂ source with high δ¹³C. By contrast,

the carbon remaining sequestered in the sediment comprises that fraction of the organic matter not recycled and low $\delta^{13}\text{C}$ carbon in carbonate cements, plus the retained methane with $\delta^{13}\text{C} \sim -50\text{‰}$. Recall that we expect the flux of organic carbon into the sediment to be high because of relatively inefficient processing in the newly oxic water column as aerobic recyclers become established. Note, too, that retention of low $\delta^{13}\text{C}$ carbon as methane decreases the amount of reduced carbon (and so *ceteris paribus* the fraction of carbon sequestered that is reduced) necessary to achieve a given increase in marine carbonate $\delta^{13}\text{C}$, *i.e.* sequestered low $\delta^{13}\text{C}$ methane makes around twice the contribution (per atom of carbon) to isotope balance as does the burial of organic matter of primary production at -25‰ . At the present day the size of the methane clathrate-hydrate carbon reservoir is intermediate between the atmospheric reservoir of carbon dioxide and the reservoir of carbon in fossil fuels.

An interesting corollary is that the carbon stored as methane clathrate-hydrate will be expected to be recycled to the ocean/atmosphere as the environments of storage (outer continental margins) are destroyed. Given that the overall picture is one of supercontinent breakup and dispersal of the fragments by early plate-tectonic processes, the appropriate timescale is that of a tectonic cycle and the process is expected to be secular and episodic rather than catastrophic. The implication being examined here thus predicts a slow decline in marine carbonate $\delta^{13}\text{C}$ from the peak value of the Lomagundi-Jatulia isotope excursion, possibly accompanied by shorter-term internal structure of non-monotonic variation in $\delta^{13}\text{C}$, over a time scale of several tens of millions of years. The sedimentary record will contain low $\delta^{13}\text{C}$ diagenetic carbonates and only indirect evidence (e.g. collapse structures?) of the reduced carbon originally buried as methane clathrate-hydrate, and the “Paradox” of Melezhik and Fallick (1996) is somewhat alleviated – see also Shields (1997) and Melezhik and Fallick (1997).

The implication being considered here has a certain explanatory power, but a rather modest potential for testable predictions (at least in our hands). In mitigation, we note that this is an endemic feature of hypotheses related to methane storage and release. One prediction which can be made is that the set of circumstances envisaged should on occasion result in secondary carbonates (e.g. as cements or even parts of nodules) with carbon derived from the high- $\delta^{13}\text{C}$ CO_2 usually lost from the sediments. If an analogy with Phanerozoic cements is of any merit, this might be observed in the order of 1% of occurrences (see data presented in Figure 4 of Macaulay *et al.* 2000, amended here as Figure 2). In contrast to the weak predictive power of the methane implication of the new anoxic biosphere hypothesis,

there is *strong* predictive power in the hypothesis itself: the low-abundance carbonate nodules and diagenetic cements preceding the Lomagundi-Jatulian $\delta^{13}\text{C}$ excursion should normally have $\delta^{13}\text{C}$ which does not reflect microbial processing of organic matter within the shallow sediment. As was demonstrated in Fallick *et al.* (2008), this test was passed for the analysed samples outwith BIF– associations. Thus, we must turn our attention to the exceptions and reconsider BIF-associated low $\delta^{13}\text{C}$ carbonates as a potential counterexample.

BIF-associated carbonates

Methodological considerations

It is entirely conceivable that different BIF have associated carbonates of different modes of genesis, e.g. bedded carbonates in the same stratigraphic sequence; primary and/or secondary carbonates directly within a BIF package; nodular carbonates etc. Whilst it is clear that in any particular case the carbonate formation mechanism should be approached by careful, comprehensive field, petrographical and geochemical study of the rocks themselves, we here offer a different approach and investigate critically its efficacy in offering elucidation of the process(es) influencing sources of carbon, and carbonate precipitation.

The approach involves compiling the carbon isotope data from a multitude of individual studies and seeing whether distinct patterns emerge from the statistically large database. We recognise that there are potential problems with this approach (see below), which is essentially a form of statistical inference (Till, 1974 p48 *et seq.*), but it has a long and reasonably honourable history in geochemistry.

Amongst the potential problems recognised are:

(1) Sampling biases are a perennial problem, rarely conducive to solution. The collection of samples included in the compilation used here is unlikely to have been either random or comprehensively systematic, and as Till (1974, p48) has noted “... the usefulness of a statistical result depends on the care taken in designing the sampling procedures”. Where sampling bias has been circumvented – e.g. in the sulphur isotope anatomy of a world-class base metal ore deposit through $\delta^{34}\text{S}$ measurement of ore concentrates – the frequency distribution of isotopic composition proved to be quite different from that generated by intensive investigation of hand

specimens, albeit the genetic model remained basically the same (compare Anderson *et al.* 1998 with Fallick *et al.* 2001).

(2) Spurious patterns may emerge from a compilation which includes different categories of sample, e.g. diagenetic carbonates associated with organic-matter fermentation reactions often have high $\delta^{13}\text{C}$ and would overlap with primary sedimentary carbonates of the Lomagundi-Jatulian (c. 2200Ma) carbon isotope excursion. And overall trends may mask the characteristics – possibly unique – of specific individual studies.

(3) It may be tempting to classify sample groupings according to their isotopic composition (*i.e.* modes in the frequency distribution) without a robust theoretical understanding of the isotope fractionation mechanisms which produced the actual values e.g. uncritical assignment of diamonds of low ($\sim -25\text{‰}$) $\delta^{13}\text{C}$ to an origin from subducted organic carbon. Put differently, one must strive to avoid issues of circularity.

Accepting these (and other) deficiencies, we nevertheless recognise that examination of the internal structure of compilations has proven informative under favourable circumstances.

The BIF Associated Carbonate $\delta^{13}\text{C}$ Database

The database of $\delta^{13}\text{C}$ for BIF-associated carbonates used in this study has been compiled from published sources by VM at the Norwegian Geological Survey, from whom it is available; aspects of it were included in Figure 1 of Fallick *et al.* (2008) and references are given in the caption to that Figure. It consists of 440 entries, 209 of which pertain to the Dales Gorge Member of the Brockman Iron Formation, a component of the Hamersley Group on the Pilbara craton of Western Australia. Data for four other Formations comprise more than 30 samples each, viz. Krivoj Rog from the Ukrainian Shield ($n=66$), the Transvaal Supergroup of South Africa ($n = 50$), the Biwabik Iron Formation of the Mesabi Range in the Lake Superior region ($n = 32$), and the Hamersley Group Marra Mamba Iron Formation; the Mt Sylvania Formation, also of the Hamersley Group, is represented by 29 samples.

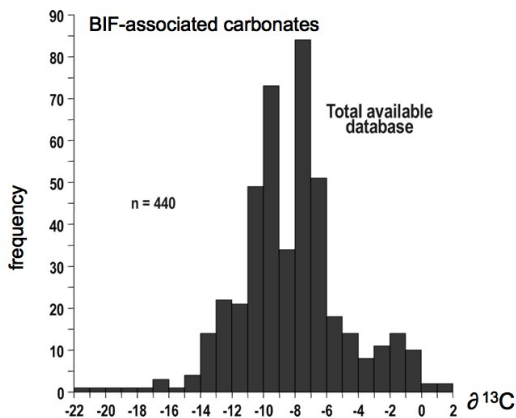


Figure 1. Histogram of carbonate $\delta^{13}\text{C}$ for 440 published analyses of BIF-associated carbonates. Note the major mode at around -7‰ , another strong mode at around -10‰ and a minor mode at around -1‰ .

The frequency distribution of the total available $\delta^{13}\text{C}$ database is shown in Figure 1. A 1‰ bin size has been selected as this will comfortably cover analytical errors, interlaboratory differences and intercalibration issues, whilst not being particularly sensitive to major geological processes. It is immediately apparent that the histogram is complex, with major modes centred on -7‰ and -10‰ (these are separated by a clear minimum), and a weaker but plausible mode at about -1‰ . This overall structure, with prominent nodes at -7 and -10‰ can be clearly seen also in the restricted distributions for the individual BIF of the Dales Gorge Member, Krivoj Rog, Marra Mamba and Transvaal Supergroup (located at present on three different continents). The range extends continuously from $+2$ to -22‰ , so there is skew to low $\delta^{13}\text{C}$ values. Whilst it is well-known that a batch or Rayleigh fractionation process operating on a closed pool generates a unimodal, but strongly asymmetric or skewed frequency distribution of isotope ratios (see e.g. Schwarcz and Burnie, 1973 for an apposite review), such a mechanism is unlikely to be of strong explanatory value here. This is because skew to low $\delta^{13}\text{C}$ would demand a fractionation process favouring the heavy rather than the light isotope (*i.e.* ^{13}C rather than ^{12}C): this would be a most unusual fractionation process indeed!

A Priori Expectations

(1) *Hydrothermal carbon*

Mantle (or deep-seated) carbon is normally characterised as having $\delta^{13}\text{C}$ around -5 to -7‰ (e.g. Taylor, 1986; Matthey, 1987), although this is certainly an oversimplification (see Deines, 1992 and discussion in Melezhik *et al.*, 2005). The isotopic composition of hydrothermal CO_2 will then be determined by the $\delta^{13}\text{C}$ of this source carbon, the ratio of CO_2 to CH_4 plus higher hydrocarbons in the exhalative system, and the temperatures at which carbon isotope exchange between oxidised and reduced carbon attain closure.

(2) *Normal marine dissolved inorganic carbon*

There is a general consensus, without sustained challenge, that the $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon in the open ocean (as opposed to environments of BIF-deposition) in the early Proterozoic was close to 0‰. This view has been advanced *inter alia* by Becker and Clayton (1972), Belevtsev *et al.* (1983), Baur *et al.* (1985) and Fischer *et al.* (2009).

(3) *Oxidised organic carbon*

The isotopic composition of carbonate resulting from the diagenetic remineralisation of organic matter will be determined by the original isotopic composition of the organic material and any isotopic fractionation involved in the remineralisation process; the latter depends intimately on the specific pathway (e.g. fermentation, thermal decarboxylation etc), see Irwin *et al.* (1977).

To estimate the starting isotopic composition of organic matter prior to degradational production of oxidised carbon for possible incorporation into carbonate, we conservatively suggest a value of around -25‰. For 33 organic matter $\delta^{13}\text{C}$ values reported for the Transvaal Supergroup, of South Africa by Beukes and Gutzmer (1990), the mean ($-25.7 \pm 2.1\text{‰}$) and mode (about -25‰) are similar, and also comparable to an average of $-26.1 \pm 1.2\text{‰}$ reported by Beukes *et al.* (1990) for oxide-rich BIF, also from the Transvaal Supergroup, though note that organic matter in other associations is notably isotopically lighter. Lower values (predominantly between -30 and -35‰) were reported by Fischer *et al.* (2009), and also by Baur *et al.* (1985) for the Marra Mamba Iron Formation, whereas a mean of $-18.6 \pm$

3.7‰ for the prehnite-pumpellyite grade Bruno's Band, and $-25.9 \pm 2.0\text{‰}$ and $-21.4 \pm 0.4\text{‰}$ for macrobands in the Dales Gorge Member were reported by the latter authors in their study of the Hamersley Group of Western Australia.

The different carbon isotope fractionations between original organic matter at -25‰ and the product CO_2 or bicarbonate are revealed in the range of $\delta^{13}\text{C}$ in secondary carbonates (albeit potentially modified by mixing with oxidised carbon from other sources). Our analogy for this will be the large database of $\delta^{13}\text{C}$ values of carbonate cements from sandstone oil reservoirs in the northern North Sea. Whilst we appreciate that a database closer in age to BIF deposition would be preferable, the exigencies of research funding dictate what is available and has an acceptable integrity. Interestingly, from our current perspective, there are two different categories of reservoir. Firstly, Jurassic sandstones received carbon predominantly during **late diagenesis** as hydrocarbons were generated during thermal maturation of adjacent organic-rich mudrocks (Macaulay *et al.* 1998). Free oxygen is not thought to have been available. Secondly, Tertiary sandstones, submarine fan deposits and marine sheet sandstones, were charged with oil in the Oligocene and ingress of meteoric water allowed fermentative and oxidative processes to occur during **early burial** (Macaulay *et al.* 2000). Note that the hydrocarbon source rocks for both Jurassic and Tertiary reservoirs are the Kimmeridge Clay Formation, perhaps with a contribution from coals in the Brent Group (Espitalié *et al.* 1991 and references therein).

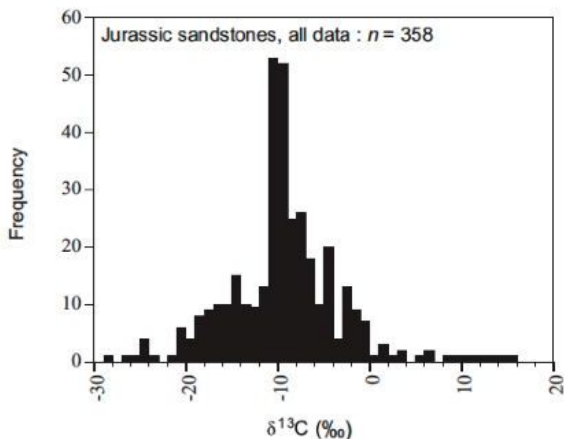


Figure 2. Histogram of $\delta^{13}\text{C}$ of carbonate cements for 358 analyses compiled by Macaulay *et al* (1998) from 13 Jurassic sandstone reservoirs in the North Sea. Note the very strong mode at around -10‰ .

The isotopic composition of on shore Kimmeridge Clay kerogen has been reported as -21‰ with extractable bitumen at -23.5‰ (Andresen *et al.* 1994). Clayton and Bjorøy (1994) reported $\delta^{13}\text{C}$ for four North Sea oils which defined a maturity sequence (from early generation through to early stages of gas cracking) giving -29.8, -28.9, -28.6 and -28.5‰. They also noted oil generation results in a small increase (around 1‰) in $\delta^{13}\text{C}$ and that source facies variations usually lead to an increase in $\delta^{13}\text{C}$ where the source is terrestrially influenced. Ness Formation coal measured by Andresen *et al.* (1994) had $\delta^{13}\text{C}$ of -26.4‰.

Macaulay *et al.* (1998) compiled 358 isotopic analyses of diagenetic cements in Jurassic reservoir sandstones from 13 oilfields. Whilst $\delta^{13}\text{C}$ ranges widely (+15.8 to -28.8‰, see Figure 2) there is a very strong mode at around -10‰, with approximately 40% of the data between -9 and -11‰. The few fermentation-related high $\delta^{13}\text{C}$ values were from cements (mainly ankerite and siderite) in Middle Jurassic deltaic sandstones.

For the Tertiary sandstones susceptible to meteoric water flushing during early burial, Macaulay *et al.* (2000) compiled 178 isotopic analyses with $\delta^{13}\text{C}$ spanning +18‰ to -30‰ (see Figure 3).

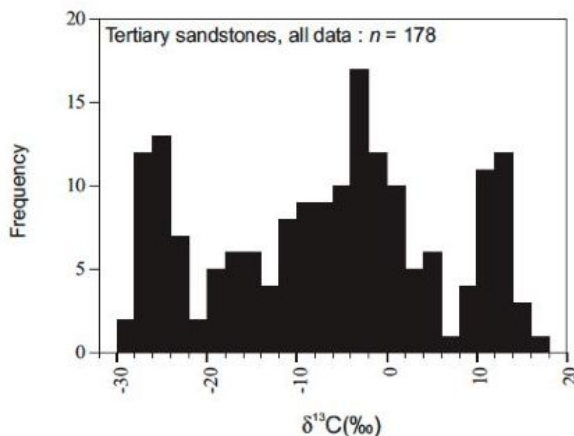


Figure 3. Histogram of $\delta^{13}\text{C}$ of carbonate cements for 178 analyses compiled by Macaulay *et al.* (2000) for Tertiary sandstones in the North Sea. Note the trimodal distribution with peaks around -26‰, -3‰ and +12‰.

By contrast to the Jurassic reservoir data, the histogram is trimodal with strong peaks around -26‰ (cements associated with oxidative oil biodegradation), -3‰ (attributed to mixed sources strongly influenced by marine bicarbonate), and +12‰ (bacterial fermentation reactions, see also Dimitrakopoulos and Muehlenbachs, 1987).

Discussion

The strongest mode (centred on $\delta^{13}\text{C}$ of -7‰) for the BIF-associated carbonates in Figure 1 is not prominent in either compilation of North Sea data (Figures 2 and 3). We suggest it is more plausibly attributed to a hydrothermal exhalative source. Thus ~ 50% of the data compiled in Figure 1 can be accounted for without invoking organic matter as a carbon source. The clearly separate mode at -10‰, by analogy with the data of Figure 2, is likely derived from deep burial (thermal) organic matter recycling, as are lower $\delta^{13}\text{C}$ values. The minor mode close to -1‰ is likely strongly influenced by open seawater bicarbonate, free of hydrothermal influence.

We propose therefore that the salient features of the distribution of $\delta^{13}\text{C}$ amongst BIF-associated carbonates – including the prominent low- $\delta^{13}\text{C}$ modes – can be explained without invoking biologically-induced shallow burial recycling of organic matter. In this sense, such BIF-associated carbonates do not provide a counter argument to the Palaeoproterozoic biosphere hypothesis advanced by Fallick *et al.* 2008. The conclusion that the predominance of low $\delta^{13}\text{C}$ values for Archaean-Palaeoproterozoic BIF-associated carbonates is highly influenced by a carbon source associated with exhalative processes, with remineralisation of organic carbon also a significant process, is not new but deserves emphasis. Re-examination of the exhalative origin for the large-scale BIF of early Proterozoic age was advocated by Simonson (1985), and Beukes *et al.* (1990 p.664) explicitly noted that: “Depletion of ^{13}C , therefore, may derive not from degradation of organic matter but from hydrothermal activity...”. Instructively, the statistically highly significant negative correlation between carbonate $\delta^{13}\text{C}$ and magnetite (ferric) iron, reported in the painstaking study of Baur *et al.* (1985) for the Hamersley Marra Mamba Formation, pertain to a suite of ankerite microbands for which mean $\delta^{13}\text{C} = -9.9 \pm 2.9$ ‰ (data in their Table 2). A biological origin was attributed, and our interpretation of deep-burial diagenesis concurs. By contrast, a separate sample suite of Marra Mamba carbonates reported in their Table 1 with mean $\delta^{13}\text{C} = -7.35 \pm 0.06$ ‰ would correspond nicely with our postulated hydrothermal source, and the tight cluster is consistent with a strongly predominant single source for carbon.

So, to conclude, why are BIF-associated carbonates distinctive, in the sense of Fallick *et al.* (2008)? The answer, at least in part, may be that the ready availability of (frequently hydrothermal) bicarbonate and cations, including iron, resulted in relatively rapid precipitation. This often occurred before mixing with other sources of bicarbonate compromised the tell-tale isotopic signature. The argument applies to hydrothermal carbonate as well

as that produced by deep-burial remineralisation of organic matter. Such opportunity was not so prevalent distal from the hydrothermally-influenced water bodies. To adapt Cloud's (1988) memorable terminology, the perhaps fecund (cf. Emerson and Moyer 2002) BIF-environments were, in a certain sense, 'oases in space'. Clearly, such a scenario, whilst illuminating, allows for much local variation – both in space and time.

Acknowledgements

We respectfully dedicate this paper to Professor Manuel Godinho of the University of Coimbra, Portugal to commemorate his retirement.

The three authors thank Dr Luis Neves and his colleagues for assistance, and their respective funding agencies for on-going financial support. ICDP support of the FAR-DEEP drilling programme provided a context for the paper. Mike Russell is thanked for stimulating discussions.

References

- Anderson, I. K., Ashton, J. H., Boyce, A. J., Fallick, A. E. and Russell, M. J. (1998) - Ore depositional processes in the Navan Zn-Pb deposit, Ireland. *Economic Geology*; 96, 885-890.
- Andresen, B., Thronsdon, T., Barth, T. and Bolstad, J. (1994) - Thermal generation of carbon dioxide and organic acids from different source rocks. *Organic Geochemistry*; 12, 1229-1242.
- Baur, M. E., Hayes, J. M., Studley, S. A. and Walter, M. R. (1985) - Millimeter-scale variations of stable isotope abundances in carbonates from Banded Iron-Formations in the Hamersley Group of Western Australia. *Economic Geology*; 80, 270-282.
- Becker, R. H. and Clayton, R. N. (1972) - Carbon isotopic evidence for the origin of banded iron-formation in Western Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*; 36: 577-595.
- Bekker, A. and Eriksson, K.A. (2003) - A Paleoproterozoic drowned carbonate platform on the southeastern margin of the Wyoming Craton. *Precambrian Research*; 120, 327-364.
- Belevsev, Ya., N., Belevsev, R. Ya and Siroshtan, R. I. (1983) - The Krivoy Rog Basin. In: A. F. Trendall and R. C. Morris, Eds. *Iron Formation: Facts and Problems*. Developments in Precambrian Geology, 6, Elsevier, Amsterdam; 211-251.
- Beukes, N. J. and Gutzmer, J. (2008) - Origin and paleoenvironmental significance of major iron formations at the Archean-Paleoproterozoic boundary. *Reviews in Economic Geology*; 15, 5-47.
- Beukes, N. J. and Klein, C. (1990) - Geochemistry and sedimentology of a facies transition – from microbanded to granular iron-formation – in the early Proterozoic Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*; 47: 99-139.
- Beukes, N. J., Klein, C., Kaufman, A. J. and Hayes, J. M. (1990) - Carbonate petrography, kerogen distribution, and carbon and oxygen isotope variations in an early Proterozoic transition from limestone to iron-formation deposition, Transvaal-Supergroup, South Africa. *Economic Geology*; 85, 663-690.
- Clayton, C. J. and Bjorøy, M. (1994) - Effect of maturity on $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of individual compounds in North Sea oils. *Organic Geochemistry*; 6/7, 737-750.

- Cloud, P. (1983) - Banded iron-formation – A gradualist's dilemma. In: A. F. Trendall and R. C. Morris, Eds. *Iron Formation: Facts and Problems. Developments in Precambrian Geology*, 6, Elsevier, Amsterdam; 401-416.
- Cloud, P. (1988) - *Oasis in Space. Earth History from the Beginning.* Norton, New York; 508p.
- Clout, J. M. F. and Simonson, B. M. (2005) - Precambrian iron formation and iron formation-hosted iron ore deposits. *Economic Geology*; 100, 643-679.
- Dalstra, H. and Flis, M. (2008) - High grade iron ore exploration in an increasingly steel-hungry world: The past, present and future role of exploration models and technological advances. *Reviews in Economic Geology*; 15, 73-106.
- Deines, P. (1992) - Mantle carbon: concentration, mode of occurrence, and isotopic composition. In: Schidlowski, M., Golubic, S., Kimberley, M. M., McKirdy, D. M., Trudinger, P. A. (Eds.). *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resources.* Springer-Verlag, Berlin; 133-146.
- Dimitrakopoulos, R. and Muehlenbachs, K. (1987) - Biodegradation of petroleum as a source of ¹³C-enriched carbon dioxide in the formation of carbonate cement. *Chemical Geology (Isotope Geosciences)*; 65, 283-291.
- Emerson, D. and Moyer, C. L. (2002) - Neutrophilic Fe-oxidising bacteria are abundant at the Loihi Seamount hydrothermal vents and play a major role in Fe oxide deposition. *Applied and Environmental Microbiology*; 68, 3085-3093.
- Espitalié, J., Lafargue, E. and Eggen, S. (1991) - Petroleum potential of terrestrial and marine organic matter in Jurassic sequences of the Northern North Sea and offshore Mid-Norway. In: A. M. Spencer, Ed. *Generation, Accumulation, and Production of Europe's Hydrocarbons.* Special Publication of the European Association of Petroleum Geoscientists; 1, 49-63. Oxford University Press.
- Fallick, A. E., Ashton, J. H., Boyce, A. J., Ellam, R. M. and Russell, M. J. (2001) - Bacteria were responsible for the magnitude of the world-class hydrothermal base metal sulfide orebody at Navan, Ireland. *Economic Geology*; 96, 885-890.
- Fallick, A. E., Melezhik, V. A and Simonson, B. M. (2008) - The ancient anoxic biosphere was not as we know it. In: N. Dobretsov, N. Kolchanov, A., Rozanov, G., Zavarzin, Eds. *Biosphere Origin and Evolution*, Springer, New York; 169-188.
- Fischer, W. W., Schroeder, S., Lacassie, J. P., Beukes, N. J., Goldberg, T., Strauss, H., Horstmann, U. E., Schrag, D. and Knoll, A. H. (2009) - Isotopic constraints on the late Archean carbon cycle from the Transvaal Supergroup along the western margin of the Kaapvaal Craton, South Africa. *Precambrian Research*; 169, 15-27.
- Hannah, J.L., Bekker, A., Stein, H.J., Markey, R.J. and Holland, H.D. (2004) - Primitive Os and 2316 Ma age for marine shale: implications for Paleoproterozoic glacial events and the rise of atmospheric oxygen. *Earth and Planetary Science Letters*; 225, 43-52.
- Heaman, L.M. (1997) - Global mafic volcanism at 2.45 Ga: Remnants of an ancient large igneous province? *Geology*; 25, 299-302.
- Irwin, H., Curtis, C. D. and Coleman, M. (1977) - Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments. *Nature*; 269, 209-213.
- James, H. L. (1983) - Distribution of banded iron-formation in space and time. In: Trendall, A. F. and Morris, R. C. Eds. *Iron-formation: Facts and Problems, Developments in Precambrian Geology*, 6, Elsevier, Amsterdam; 471-490.
- Karhu, J.A. and Holland, H.D. (1996) - Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen. *Geology*; 24, 867-879.
- Kirschvink, J. L. (2005) - Red earth, white earth. *Engineering and Science*; 4, 10-20.
- Klein, C. (2005) - Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin *American Mineralogist*; 90, 1473-1499.
- Konhauser, K. O., Amskold, L., Lalonde, S. V., Posth, N. R., Kappler, A. and Anbar, A. (2007) - Decoupling photochemical Fe(II) oxidation from shallow-water BIF deposition. *Earth and Planetary Science Letters*; 258, 87-100.

- Konhauer, K. O., Newman, D. K. and Kappler, A. (2005) - The potential significance of microbial Fe (III) reduction during deposition of Precambrian banded iron formations. *Geobiology*; 3, 167-177.
- Kopp, R. E., Kirschvink, J. L., Hilburn, I. A. and Nash, C. Z. (2005) - The Paleoproterozoic snowball Earth: A climate disaster triggered by the evolution of oxygenic photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*; 102, 11131-11136.
- Macaulay, C. I., Fallick, A. E., Haszeldine, R. S. and McAulay, G. E. (2000) - Oil migration makes the difference: regional distribution of carbonate cement $\delta^{13}\text{C}$ in northern North Sea Tertiary sandstones. *Clay Minerals*; 35, 69-76.
- Macaulay, C. I., Fallick, A. E., McLaughlin, O. M., Haszeldine, R. S. and Pearson, M. J. (1998) - The significance of $\delta^{13}\text{C}$ of carbonate cements in reservoir sandstones: a regional perspective from the Jurassic of the northern North Sea. In: S. Morad, Ed. *Carbonate Cementation of Sandstones*; Spec. Publ. Int. Assoc. Sedimentol, 26, 395-408. Blackwells, Oxford, UK.
- Mattey, D. P. (1987) - Carbon isotopes in the mantle. *Terra Cognita*; 7, 31-37.
- Melezhik, V. A. (2006) - Multiple causes of Earth's earliest global glaciation. *Terra Nova*; 18, 130-137.
- Melezhik, V. A. and Fallick, A. E. (1996) - A widespread positive $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ anomaly at around 2.33 – 2.06 Ga on the Fennoscandian Shield: a paradox? *Terra Nova*; 8, 141-157.
- Melezhik, V. A. and Fallick, A. E. (1997) - Paradox regained? Reply. *Terra Nova*; 9, 148-191.
- Melezhik, V. A., Fallick, A. E. and Pokrovsky, B. G. (2005) - Enigmatic nature of thick sedimentary carbonates depleted in $\delta^{13}\text{C}$ beyond the canonical mantle value: the challenges to our understanding of the terrestrial carbon cycle. *Precambrian Research*; 137, 131-165.
- Müller, G., Schuster, A. and Hoefs, J. (1986) - The metamorphic grade of banded iron-formations: oxygen isotope and petrological constraints. *Fortschritte der Mineralogie*; 64(2), 163-185.
- Perry, E. C., Tan, F. C. and Morey, G. B. (1973) - Geology and stable isotope geochemistry of the Biwabik iron formation, Northern Minnesota. *Economic Geology*; 68, 1110-1125.
- Raiswell, R. (2006) - An evaluation of diagenetic recycling as a source of iron for banded iron formations. In: S. E. Kesler and H. Ohmoto, Eds. *Evolution of Early Earth's Atmosphere, Hydrosphere and Biosphere – Constraints from Ore Deposits*. Geological Society of America Memoir; 198, 223-238.
- Schwarcz, H. P. and Burnie, S. W. (1973) - Influence of sedimentary environments on sulphur isotope ratios in clastic rocks: a review. *Mineralium Deposita*; 8, 264-277.
- Shields, G. (1997) - Comment: Paradox lost? *Terra Nova* ; 9, 148.
- Simonson, B. M. (1985) - Sedimentological constraints on the origins of Precambrian iron formations. *Geol. Soc. America Bulletin*; 96, 244-252.
- Taylor, B. E. (1986) - Magmatic volatiles: isotopic variation of C, H and S. *Reviews in Mineralogy*; 16, 185-226.
- Till, R. (1974) - *Statistical Methods for the Earth Scientist*, Macmillan, London; 154p.
- Trendall, A. F. (2002) - The significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record. *International Association of Sedimentologists Special Publication*; 33, 33-66.
- Vogel, D.C., Vuollo, J.I., Alapieti, T.T. and James, R.S. (1998) - Tectonic, stratigraphic, and geochemical comparison between ca. 2500-2440 Ma mafic igneous events in the Canadian and Fennoscandian Shields. *Precambrian Research*; 92, 89-116.
- Wanke, A., and Melezhik, V.A. (2005) - Palaeoproterozoic sedimentation and stromatolite growth in an advanced intracontinental rift associated with the marine realm: a record of the Neoarchaean continent breakup? *Precambrian Research*; 140, 1-35.
- Young, G.M., Long, D.G.F., Fedo, C.H. and Nesbitt, H.W. (2001) - The Paleoproterozoic Huronian Basin: Product of a Wilson cycle accompanied by Glaciation and Meteorite Impact. *Sedimentary Geology*; 141-142, 233-254.

(Página deixada propositadamente em branco)

Parte 2

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Relações entre a litologia e a ocupação e uso do solo na Região da Bairrada

João Almeida¹; Pedro Dinis²; Alexandre Tavares³

¹Universidade de Coimbra, Dep. de Ciências da Terra, PORTUGAL, jpedrodealmeida@gmail.com

²Universidade de Coimbra, Dep. de Ciências da Terra, IMAR, PORTUGAL, pdinis@dct.uc.pt

³Universidade de Coimbra, Dep. de Ciências da Terra, CES, PORTUGAL, atavares@ci.uc.pt

Palavras-chave: Região da Bairrada, Unidades líticas, Uso e ocupação do solo, Vinha

Resumo

No presente trabalho analisamos as relações espaciais entre a ocupação e uso do solo e a natureza lítica na Região da Bairrada (segundo a delimitação proposta para a área de produção vinícola, DOC-VQPRD). Esta análise permite diferenciar um domínio central e duas faixas, a oriente e ocidente, com maior afinidade com as regiões confins. No domínio central há uma clara simpatia das vinhas com unidades calco-margosas do Jurássico. Contudo, estas unidades líticas e de ocupação ocorrem numa área muito limitada não tipificando a região. Os “sistemas culturais parcelares complexos” (bairros), pela frequência e distribuição, parecem constituir a principal característica unificadora da região da Bairrada.

Key-words: *Region of Bairrada, Lithic units, Land use, Vineyards*

Abstract

In this work we analyse the spatial relationships between soil use and bedrock lithology in the region of Bairrada (defined following the limits proposed for the wine production region, DOC-VQPRD). This analysis reveals a central domain and two strips, to the west and east, with higher affinity with bordering regions. In the central domain there is a clear empathy between vineyards and Jurassic marl to calcareous units. However, these lithologic and soil use units are present in restricted areas. The “complex cultivation patterns” (“bairros”), by their frequency and distribution, seem to be the main unifying feature of region of Bairrada.

Introdução

O substrato lítico condiciona as características dos solos e as potencialidades dos terrenos para os vários tipos de ocupação, sendo o

entendimento das relações entre a geologia e tipos específicos de ocupação do solo especialmente importante quando estão em causas produtos cujo valor (económico, cultural ou outro) se pretende valorizar. Nesse sentido, têm sido publicados diversos trabalhos sobre a geologia de regiões produtoras de vinhos de qualidade (Pomerol, 1985; Wilson, 1998; Munóz, 2009).

Os limites da região da Bairrada foram historicamente mutáveis. As sucessivas definições apresentam alguma semelhança com a sugerida no mapa de António Augusto de Aguiar (Paiz vinhateiro da Bairrada, de 1867), tendo como elemento diferenciador da Região a grande apetência vitivinícola e as características que lhe estão associadas (Mota, 1993). No Decreto-Lei N.º 301/2003, de 4 de Dezembro, Portaria N.º836/2004, de 13 de Julho e Reg. (CE) 1493/99, de 17 de Maio, é apresentada a delimitação da região, que visa a produção de vinhos D.O.C.-V.P.Q.R.D. O território da Região Demarcada da Bairrada ocupa parte dos distritos de Aveiro e Coimbra, estendendo-se pelo todo ou parte dos concelhos de Anadia, Mealhada, Oliveira do Bairro, Águeda, Aveiro, Cantanhede, Coimbra e Vagos. É esta definição geográfica (Figura 1), por ser a mais recente e aquela que define a área de produção vitivinícola que se pretende valorizar, que suporta a análise agora apresentada.

No presente trabalho faz-se uma análise das relações (naturais ou antropogénicas) entre a natureza do suporte lítico e o tipo de ocupação do solo na região da Bairrada. Procedeu-se também a uma avaliação da distribuição espacial destas duas variáveis no seio da região.

Metodologia

A representação do substrato lítico da Região envolveu a integração e conciliação de diferentes fontes cartográficas, como a resultante da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50.000 (Teixeira e Zbyszewski, 1976; Barbosa, 1981; Barbosa *et al.*, 1988) e dos esboços geológicos da cidade de Coimbra (Soares *et al.*, 1985), do concelho de Coimbra (Tavares, 1999), do vale do Cértima (Courbouleix, 1972; Dinis, 2004) e da Plataforma Litoral a norte do rio Águeda (Gomes, 2008), e novos levantamentos cartográficos. Procedeu-se a uma generalização da representação lítica de forma a obter unidades com homogeneidade composicional e estrutural capaz de condicionar a ocupação e uso dos solos, desvalorizando-se as informações cronostratigráficas. O mapa litológico assim criado foi georreferenciado e representado em suporte digital recorrendo-se ao software ArcGis 9.2 (ESRI®) e aparece representado na Figura 1.

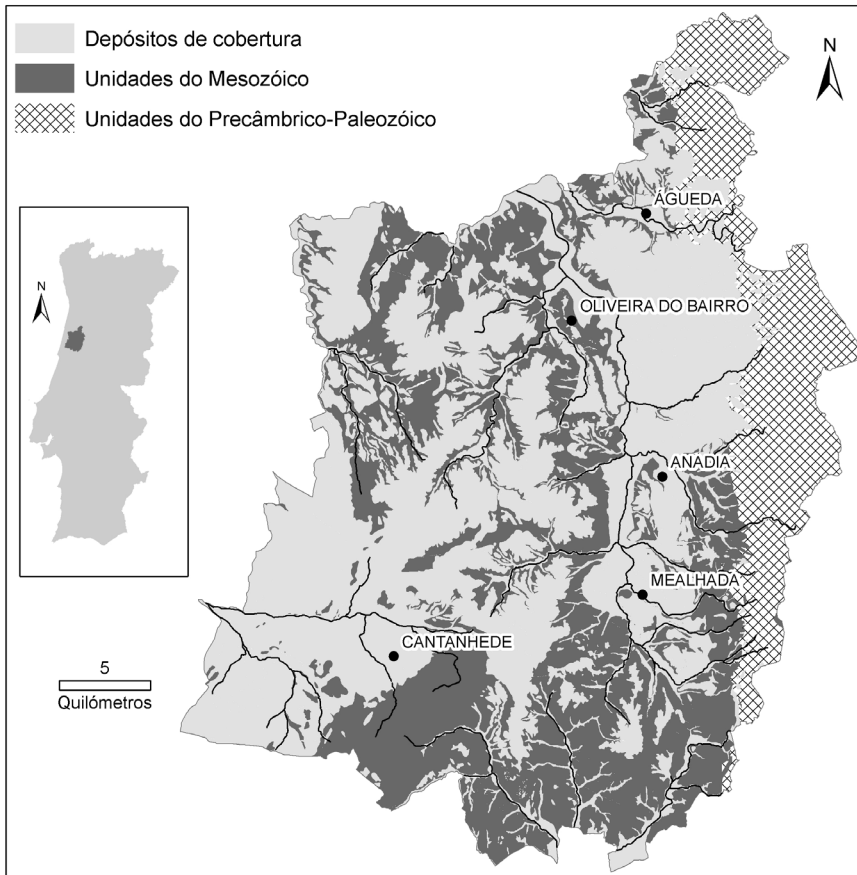


Figura 1. Localização da região da Bairrada no território português e distribuição dos grandes conjuntos líticos da Região.

A informação sobre a ocupação cultural da região baseou-se na classificação e representação de biótopos de CORINE (Corine, 2000; Caetano *et al.*, 2009), tendo-se utilizado os vários níveis de classificação (níveis 1 e 2 e classes).

Para a análise das relações entre as unidades líticas e a ocupação do solo recorreu-se às ferramentas Analysis Tools e Spatial Analyst Tools do software ArcGis 9.2 (ESRI®). A significância das relações foi determinada a partir de tabelas de contingência, com teste de χ^2 .

Natureza do substrato lítico

A Região Demarcada da Bairrada apresenta, genericamente, como suporte litológico os terrenos da Orla Mesocenozóica e do Maciço Hercínico, materializados por rochas metamórficas pelíticas, rochas sedimentares carbonatadas e detríticas, com diferentes níveis de coesão, e uma cobertura de sedimentos friáveis. Num primeiro nível de análise, as unidades líticas foram agrupadas em “depósitos de cobertura”, “unidades do Mesozóico” e “unidades do Precâmbrico-Paleozóico” (Tabela 1).

Nos depósitos de cobertura estão integrados os sedimentos de idade pliocénica a holocénica, friáveis, de disposição sub-horizontal, que, regra geral, constituem suportes líticos pouco espessos. Ficam neste grupo de unidades as aluviões, as areias eólicas, os depósitos de terraço, os sedimentos areno-cascalhentos litorais e os sedimentos argilo-cascalhentos continentais (Tabela 1, Figura 1). Estes sedimentos estão presentes em 55673,9 hectares, correspondendo a 54,7 % da área total da Região.

As unidades do Mesozóico estão representadas por conjuntos predominantemente carbonatados e detríticos com diferentes estados de consolidação. Para uma melhor caracterização, o conjunto dos materiais do Mesozóico foi subdividido em cinco unidades líticas: argilosas do Cretácico; areno-carbonatadas do Cretácico; calcárias do Jurássico; calcomargosas e dolomíticas do Jurássico; e detríticas do Triásico-Jurássico (Tabela 1, Figura 1). Algumas das unidades consideradas apresentam grande variabilidade volumétrica dos termos líticos, mas preservando uma homogeneidade genética e de registo sedimentar que permite o cruzamento com outros níveis de informação. As unidades do Mesozóico têm uma representação superficial de 29.839,5 hectares, constituindo 32,1% da área total da Bairrada.

As unidades do Paleozóico e Precâmbrico posicionam-se na zona mais oriental da Bairrada, ocupando 13% da área da Região. Foram considerados quatro sub-conjuntos: “xistos” da Zona Centro Ibérica; “xistos” da Zona de Ossa Morena; filádios e quartzitos do Ordovícico-Sílicico (ZCI); unidades detríticas do Carbónico-Pérmico (Tabela 1, Figura 1).

Tabela 1. Unidades líticas definidas para a região da Bairrada

	Unidades	Unidades geológica julgadas equivalentes	Termos líticos dominantes
Depósitos de cobertura	Aluvião	Aluvião	Cascalhos, areias e argilas
	Areias eólicas	Dunas holocénicas/Areias de Gândara (Barbosa, 1981; Barbosa et al., 1988)	Areias bem calibradas
	Depósitos de terraço	Depósitos de terraços Q2b, Q3 e Q4 (Barbosa, 1981; Teixeira e Zbyszewski, 1976)	Cascalhos, areias e argilas

Tabela 1 (continuação)

	Unidades	Unidades geológica julgadas equivalentes	Termos líticos dominantes
Depósitos de cobertura	Sedimentos areno-cascalhentos litorais	Depósitos de terraços Q1, Q2a e Q2b (Barbosa, 1981; Teixeira e Zbyszewski, 1976)	Areias finas cobertas por areias grosseiras com seixo; níveis cascalhentos
		Porção inferior da Formação de Aguada (Grade & Moura, 1980-81)	
		Areias de Cordinhã, Cascalheiras de Gordos e Areias de Cantanhede (Barbosa <i>et al.</i> , 1988)	
		Sedimentos argilo-cascalhentos continentais	U1 e U2A (Dinis, 2006)
	Porção superior da Formação de Aguada (Grade & Moura, 1980-81)	U2B e U3 (Dinis, 2006)	
Unidades do Mesozóico	Unidades argilosas do Cretácico	Argilas da Pampilhosa (Marques <i>et al.</i> , 1974)	Argilitos com níveis arenosos intercalados; corpos carbonatados
		Argilas de Aveiro (Teixeira & Zbyszewski, 1976)	
		Argilas de Vagos (Barbosa, 1981)	
		Argilas de Viso (Barbosa <i>et al.</i> , 1988)	
	Unidades areno-carbonatadas do Cretácico	Arenitos de Mamodeiro (Teixeira e Zbyszewski, 1976)	Comporta, do topo para a base: - Arenitos e conglomerados com argilas intercaladas; - Calcários, margas, grés calcários e calcáris gresosos;- - Arenitos e conglomerados com argilas intercaladas
		Grés de Palhaça, Calcários de Mamarrosa, Grés de Furadouro, Grés de Oiã, Grés de Verba (Barbosa, 1981)	
		Arenitos do Carrascal, Calcários de Tentúgal, Grés de Furadouro, Grés de Oiã (Barbosa <i>et al.</i> , 1988)	
		Formação da Figueira da Foz (Dinis, 2001)	
	Unidades calcárias do Jurássico	Calcários de Ançã e Calcários de Andorinha (Barbosa <i>et al.</i> , 1988)	Calcários micríticos, cresosos e detríticos, por vezes margosos
	Unidades calco-margosas e dolomíticas do Jurássico	Camadas de Coimbra, Margas e Calcários Margosos de Eiras e Margas e Calcários Margosos de Pedrulha (Soares <i>et al.</i> , 1985)	Calcários dolomíticos; calcários margosos ou micríticos com alternâncias margosas, mais ou menos espessas
Formação de Vale das Fontes, F. Lemedo, F. S. Gião, Calcários de Póvoa da Lomba (Duarte & Soares, 2002)			
Unidades detríticas do Triásico-Jurássico	Grés de Eirol (Teixeira & Zbyszewski, 1976)	Arenitos, conglomerados e argilitos; níveis margosos e dolomíticos	
	Grés de Silves (Palain, 1976)		
U. Precámbr.-Paleozóico	Unidades detríticas do Carbónico-Pérmico	Formação de Algeriz, F. Vale da Mó, F. Monsarros (Domingos <i>et al.</i> , 1983)	Arenitos, conglomerados e argilitos; níveis de carvão
	Filádios e quartzitos do Ordovícico-Silúrico	Ordovícico e Silúrico (Delgado, 1908)	Quartzitos e filitos
	"Xistos" da ZCI	Complexo Xisto-grauváquico (Medina, 1996)	Filitos e metagrauvaques
	"Xistos" da ZOM	Unidades de Arada, S. João de Ver e Albergaria-a-Velha (Chaminé, 2000; Chaminé <i>et al.</i> , 2003)	Filitos, micaxistos, metagrauvaques, xistos negros, e liditos

Ocupação e uso do solo

A ocupação cultural, definida a partir da cartografia Corine 2000, está organizada hierarquicamente em ocupação de nível 1, nível 2 e classes (Tabela 2). A região da Bairrada apresenta 19 classes distintas de ocupação do solo, definindo manchas cartográficas muito fragmentadas e com reduzida representação superficial¹.

Os tipos de ocupação cultural de nível 1 com maior representação são as “florestas e meios semi-naturais” (49%) e as “áreas agrícolas” (46%). Os “territórios artificializados” representam apenas 5% da Bairrada, enquanto as “zonas húmidas” e “massas de água” se limitam a percentagens residuais da região.

Tabela 2. Unidades de ocupação cultural para a região da Bairrada.

Nível 1	Nível 2	Classe	Área (%)
Territórios artificializados	Tecido urbano	Tecido urbano descontínuo	3,1
	Indústria, comércio e transportes	Indústria, comércio e equipamentos gerais	1,4
		Redes viárias e ferroviárias e espaços associados	0,1
	Áreas de construção, extracção e depósitos de resíduos	Áreas de extracção mineira	0,4
Áreas agrícolas	Culturas anuais	Culturas anuais de sequeiro	3,2
		Culturas anuais de regadio	1,6
		Arrozais	0,4
	Culturas permanentes	Vinhas	12,4
		Olivais	0,4
	Pastagens	Pastagens	0,1
	Áreas agrícolas heterogéneas	Culturas anuais associadas às culturas permanentes	1,9
		Sistemas culturais e parcelares complexos	18,9
		Agricultura com espaços naturais	6,7
Florestas e meios semi-naturais	Florestas	Florestas de folhosas	10,5
		Florestas de resinosas	18,1
		Florestas mistas	16,4
	Vegetação arbustiva e herbácea	Espaços florestais degradados, cortes e novas plantações	4,0

¹ Os mapas com a distribuição espacial dos vários níveis e classes de ocupação de uso podem ser observados em Almeida (2009).

Tabela 2 (continuação)

Nível 1	Nível 2	Classe	Área (%)
Florestas e meios semi-naturais	Zonas descobertas e com pouca vegetação	Vegetação esparsa	0,0
Zonas húmidas	Zonas húmidas interiores	Paais	0,2
	Zonas húmidas costeiras	Sapais	0,0
Massas de água	Águas interiores	Planos de água	0,2
	Águas marinhas	Lagunas litorais	0,0

De entre as áreas classificadas como agrícolas, os “sistemas culturais e parcelares complexos” são a classe de ocupação mais frequente (19%). Este tipo de ocupação representa uma estrutura complexa em que predomina o minifúndio, aparecendo distribuída de forma relativamente homogénea pela região, mas sobretudo nas proximidades dos agregados populacionais ou acompanhando o povoamento disperso ordenado ao longo das vias tradicionais de comunicação. As “vinhas”, muitas vezes tidas como as culturas que caracterizam a Bairrada, ocupam apenas 12% da área total da Região, com representações muito reduzidas nos sectores orientais e ocidentais.

As florestas estão representadas pelas seguintes classes: “florestas de folhosas” (11%), sobretudo na zona oriental; “florestas de resinosas” (18%), sobretudo na zona sudoeste; e “florestas mistas” (16%), mais comum na faixa de transição dos sectores mais elevados, a oriente, para o vale do rio Cértima ou, numa forma dispersa, a ocidente deste rio.

Relações entre as unidades líticas e o uso do solo

A análise da distribuição das unidades líticas e de ocupação e uso do solo sugere algumas tendências de associação. De facto, o teste de χ^2 aplicado à tabela de contingência para as relações entre os tipos de substrato lítico e de ocupação do solo (Tabela 3) indica, para uma probabilidade de 95%, que estas duas variáveis não são independentes ($\chi^2_{\text{obs.}} = 106,1 > \chi^2_{0,05; (13-1), (7-1)} = 99,6$).

Os resultados expressos na Figura 2 mostram que as “florestas de folhosas” são mais frequentes em materiais do Paleozóico e Precâmbrico e que as “florestas de resinosas” são dominante nas areias eólicas (Figura 2). Por seu lado, as “florestas mistas” são especialmente comuns nas unidades que sublinham a zona de contacto entre o Maciço Hercínico e a Orla Mesocenozóica Ocidental (“unidades detríticas do Triásico-Jurássico” e

“sedimentos argilo-cascalhentos continentais”, tidos como plio-quadernários).

No que respeita às áreas agrícolas, a distribuição das vinhas merece particular atenção. Verifica-se que 42% das vinhas estão localizadas nas “unidades calco-margosas e dolomíticas do Jurássico” e que, 60% das “unidades calco-margosas e dolomíticas do Jurássico” são ocupadas por vinhas (Figura 3). A relação das vinhas com as “unidades calco-margosas e dolomíticas do Jurássico” é comprovada pelo teste de χ^2 aplicado a tabela de contingência de duas entradas em que se considera a presença ou ausência destes tipos litológicos e de ocupação de solos ($\chi^2_{obs.} = 6,5 > \chi^2_{0,05; (2-1).(2-1)} = 3,8$).

Tabela 3. Representação espacial das principais classes de uso e ocupação (com ocupação superior a 5%) e das várias unidades líticas.

Ocupação e uso do solo / Unidade lítica (%)	Vinhas	Sist. culturais e parcelares complexos	Agricultura em espaços naturais	Florestas de Folhosas	Florestas de Resinosas	Florestas Mistas	Outros	Total
Aluvião	1,3	3,3	1,0	0,2	1,2	1,0	3,6	11,6
Areias eólicas	0,2	0,6	0,8	0,0	5,5	0,4	1,3	8,7
Terraços	0,2	1,5	0,2	0,0	0,3	0,6	0,8	3,6
Sedimentos areno-cascalhentos litorais	3,3	6,4	1,1	0,3	4,8	4,2	5,0	25,1
Sedimentos argilo-cascalhentos continentais	0,2	0,8	0,2	0,5	0,3	3,3	0,9	6,1
Unidades argilosas do Cretácico	0,1	0,4	0,3	0,0	0,9	0,6	0,3	2,5
Unidades gresosas e carbonatadas do Cretácico	1,6	2,3	1,6	0,0	4,2	2,5	1,8	14,1
Unidades Calcárias do Jurássico	0,3	0,4	0,5	0,0	0,6	0,2	0,3	2,2
Unidades Calco-margosas e dolomíticas do Jurássico	5,2	1,5	0,6	0,0	0,3	0,3	0,7	8,6
Unidades detríticas do Triásico-Jurássico	0,1	1,2	0,3	0,3	0,0	2,0	0,5	4,4
Unidades detríticas do Carbónico-Pérmico	0,0	0,1	0,0	1,8	0,0	0,3	0,0	2,2
Filádios e quartzitos do Ordovícico-Silúrico	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,2	0,0	0,6
“Xistos” da Zona Centro Ibérica	0,0	0,4	0,1	6,7	0,0	0,7	1,6	9,5
“Xistos” da Zona de Ossa Morena	0,0	0,1	0,1	0,5	0,0	0,2	0,0	0,9
Total	12,4	18,9	6,7	10,5	18,1	16,4	16,8	100

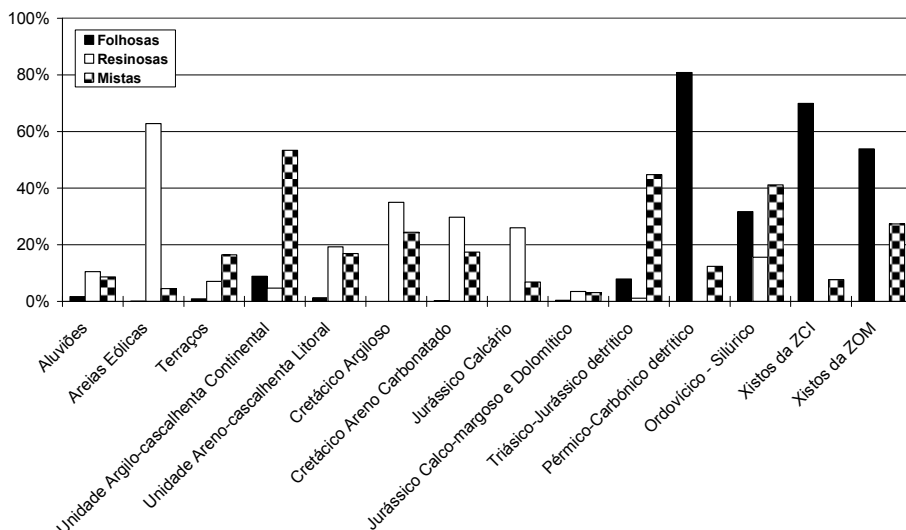


Figura 2. Percentagem de ocupação pelos diferentes tipos de floresta nas várias unidades líticas.

As distribuições desiguais das unidades líticas e de ocupação cultural leva-nos a considerar três sectores homogéneos:

- Faixa ocidental, de relevo pouco acentuado e suportada por areias eólicas, que apresenta uma ocupação dominada pelas “florestas de resinosas”, revelando grande afinidade com a contígua região da Gândara.

- Faixa oriental, frequentemente com vertentes muito declivosas, em que se atingem as cotas mais elevadas, suportada por unidades do Paleozóico e Precâmbrico e onde domina a “floresta de folhosas”;

- Zona central, ainda que com grande heterogeneidade lítica e de ocupação do solo, em que aparecem bem representados os usos agrícola (em especial os “sistemas culturais e parcelares complexos” e as “vinhas”) e florestal (com domínio das “florestas mistas” nos sectores mais orientais e de “florestas de resinosas” nos sectores mais ocidentais).

Este último sector surge como o mais característico das actividades e paisagem que determinaram a individualização da região da Bairrada.

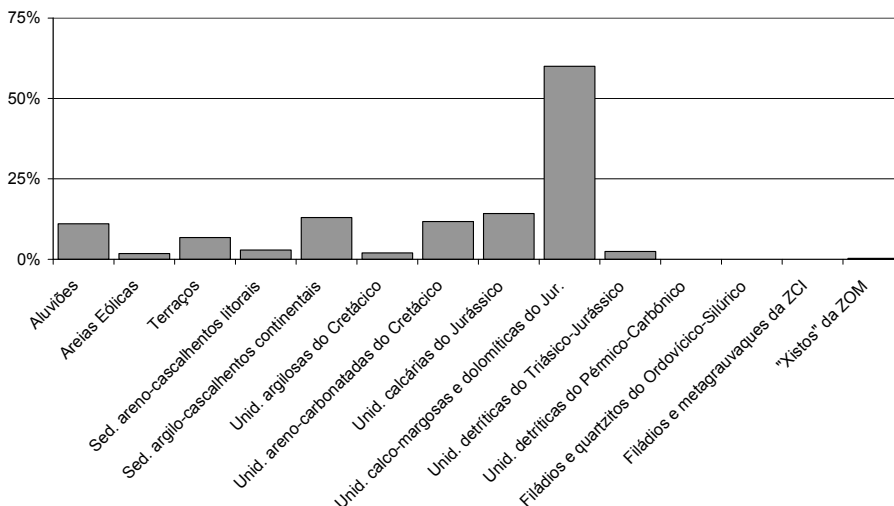


Figura 3. Percentagem de ocupação por vinhas nas diferentes unidades líticas.

A relação estabelecida entre a representação das unidades líticas e o uso e ocupação do solo permitem discutir ainda algumas das aceções da região da Bairrada. Assim, entender a região da Bairrada como uma área de “barros”, tomando os limites da região DOC-VQPRD da Bairrada, revela-se de significado limitado dado que as unidades que poderiam promover solos argilosos, ricos em “barro”, ocupam uma percentagem relativamente reduzida na Região (9% de “unidades calco-margosas e dolomíticas do Jurássico”, 3% de “unidades argilosas do Cretácico” e 6% de “sedimentos argilo-cascalhentos continentais”).

O entendimento da região da Bairrada como relacionada com a produção vitivinícola parece igualmente limitado, já que a ocupação por vinha é reduzida e está distribuída de forma muito heterogénea pela Região, apresentando grande simpatia com as “unidades calco-margosas e dolomíticas do Jurássico”.

A região da Bairrada no sentido de “bairro rural, isto é, subúrbio extenso” ou “conjunto de bairros” (Rodrigues, 1959 *in* Silveira, 1994) mantêm alguma validade na sua zona central, que menos se confunde com as áreas confins a ocidente e oriente. De facto, os “sistemas culturais e parcelares complexos”, muito associados à presença dos “bairros” e de espaços de interface urbano/rural, apresentam uma distribuição homogénea e pouco dependente do substrato lítico naquele sector central. Esta aceção, relacionada com uso e ocupação do solo, parece ainda hoje constituir um elemento unificador da região da Bairrada.

Conclusões

As áreas mais orientais e ocidentais da Bairrada apresentam grande afinidade em termos de suporte lítico e de ocupação e uso do solo com as regiões confinadas. Se retirarmos estas zonas sobra-nos um sector central mais homogéneo, mas que ainda apresenta variabilidade significativa relativamente às características líticas e de uso e ocupação do solo. Contrariamente ao que muitas vezes é sugerido, a região da Bairrada, segundo a delimitação proposta para a área de produção vinícola (DOC-VQPRD), não constitui “uma zona de barros” dado que as unidades líticas com estas características são pouco representativas.

Por sua vez, a cultura da vinha, surge distribuída de forma muito irregular, exibindo maior relação com as “unidades calco-margosas e dolomíticas do Jurássico”.

A análise realizada salienta ainda que os “sistemas culturais e parcelares complexos”, associados ao conceito de “bairros”, são o tipo de ocupação mais comum e apresentam uma distribuição consistente na zona central da Bairrada, parecendo ser esta a principal característica unificadora da região.

Bibliografia

- Almeida J. P. (2009) - Caracterização física da região da Bairrada: Contribuição para a valorização dos recursos endógenos. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, 99p.
- Barbosa, B. P. (1981) - Notícia Explicativa da Folha 16-C (Vagos) da Carta geológica de Portugal na escala 1/50000. Serviços Geológicos de Portugal, 60p.
- Barbosa, B. P., Soares. A. F., Rocha, R. B., Manuppela, G., Henriques, M. H. (1988) - Notícia Explicativa da Folha 19-A (Cantanhede) da Carta geológica de Portugal na escala 1/50000. Serviços Geológicos de Portugal.
- Caetano, M., V. Nunes, A. Nunes. (2009) - CORINE Land Cover 2006 for Continental Portugal. Relatório técnico, Instituto Geográfico Português, 97p.
- Chaminé, H. I. (2000) - Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho-Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas. Tese de doutoramento, Universidade do Porto, 497p.
- Chaminé H. I., Gama Pereira L. C., Fonseca P. E., Moço L. P., Fernandes J. P., Rocha, F. T., Flores D., Pinto de Jesus A., Gomes C., Soares de Andrade A. A., Araújo, A. (2003) - Tectonostratigraphy of Middle and Upper Palaeozoic black shales from the Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo shear zone (W Portugal): new perspectives on the Iberian Massif. *Geobios*, nº 36, 649-663.
- Corine Land Cover (2000) - Disponível em: <http://www.iambiente.pt>. Consultado em Abril de 2008.
- Courbouleix, S. (1972) - Etude geologique des regions de Anadia Mealhada, au Nord de Coimbra (Portugal). Mem. Faculte des Sciences, Universite Lyon, 342p.
- Delgado, N. (1908) - Système silurique du Portugal. Etude de stratigraphie paléontologique. Mem. e Comunic. dos Serviços Geológicos de Portugal, 245p.
- Dinis, J. L. (2001) - Definição da Formação da Figueira da Foz – Aptiano a Cenomaniano do sector central da margem oeste ibérica. *Com. Inst. Geol. e Mineiro*, Lisboa, 88, 127-160.

- Dinis, P. (2004) - Evolução pliocénica e quaternária do vale do Cértima. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 351p.
- Dinis, P. A. (2006) - Depósitos neogénicos anteriores à incisão fluvial actual entre Coimbra e Aveiro: fácies, arquitectura deposicional e controlos sobre a sedimentação, *Comunicações Geológicas*, 93, 81-104.
- Domingos, L. C., Freire, J. L., Gomes da Silva, F., Gonçalves, F., Pereira, E., Ribeiro, A. (1983) - The structure of intramontane upper carboniferous basins in Portugal. *Actas The carboniferous of Portugal*. M. J. Lemos de Sousa and J. T. Oliveira, (Eds.), Mem. Ser. Geol., Portugal, 187-194.
- Duarte, L. V., Soares, A. F. (2002) - Litostratigrafia das séries margo-calcárias do Jurássico inferior da Bacia Lusitânica (Portugal). *Com. Inst. Geol. e Mineiro, Lisboa*; 89, 135-154.
- Gomes, A. (2008) - Evolução Geomorfológica da Plataforma Litoral entre Espinho e Águeda. Dissertação de doutoramento, Universidade do Porto, 345p.
- Grade, J., Moura, C. (1980-81) - Le basin sédimentaire d'Aguada-de-Cima (centre du Portugal). *Bol. Soc. Geol. Portugal*; 22, 197-260.
- Medina, J. (1996) - Contribuição Para o Conhecimento da Geologia do Grupo das Beiras (CXG) na Região do Caramulo-Buçaco (Portugal). Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 200p.
- Marques, L. F., Soares, A. F., Lima, L. S. (1974) - Contribuição para o estudo do Cretácico em Portugal (o Cretácico Superior de Marmeleira do Botão). *Mem. Not. Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Univ., Coimbra*; 78, 105-133.
- Mota, A. (1993) - Estudos regionais sobre a Bairrada. *Figueirinhas*, 114p
- Munóz, A. (2009) - *Geologia y Vinos de España*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, 540p.
- Pomerol, C. (1985) - *Terroirs et vins de France. Itinéraires Enologiques et Géologiques*. Editions BRGM, 350p.
- Palain, C. (1976) - Une série détritique terrigène. Les Grés de Silves: Trias et Lias inférieur du Portugal. *Mem. Serv. Geol. Portugal*; 25, 377p.
- Soares, A. F.; Marques, J. F. & Rocha, R. B. (1985) - Contribuição para o Conhecimento Geológico de Coimbra. *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*, 100, 43-71.
- Tavares, A. M. O. S. (1999) - Condicionantes Físicas ao Planeamento. Análise da susceptibilidade no espaço do concelho de Coimbra, Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra. 346 p.
- Teixeira, C., Zbyszewski, G. (1976) - Notícia Explicativa da Folha 16-A, Aveiro da Carta geológica de Portugal na escala 1/50000. *Serviços Geológicos de Portugal*.
- Wilson, J. E. (1998) - Terroir: the role of geology climate and culture in the making of French wine. *Mitchell Beazley*, 1998, 336p.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Geotectónica e granitos portugueses: o pioneirismo dos anos 40

António Soares de Andrade¹; Manuel Serrano Pinto²

¹Departamento de Geociências (Geobiotec), Universidade de Aveiro, PORTUGAL, asandrade@ua.pt

²Departamento de Geociências (Geobiotec), Universidade de Aveiro, PORTUGAL, mspinto@ua.pt

Palavras-chave: Geologia, Geotectónica, Península Ibérica, Anos 40

Resumo

A década de 1940 marca o início de uma renovação da Geologia portuguesa, graças sobretudo ao entusiasmo de dois jovens geólogos da Universidade do Porto, Carlos Teixeira e Coteló Neiva, e à experiência do seu Mestre comum, J. Carrington da Costa. O posicionamento geológico dos granitos do centro e norte de Portugal é então objecto de uma interessante controvérsia entre o petrólogo Coteló Neiva e o estratígrafo Carlos Teixeira; mas a falta de uma detalhada cartografia geológica pouco mais permite do que legítimas dúvidas e perspicazes conjecturas. É também na década de 40 que, na vizinha Espanha, e já com bom suporte cartográfico, os alemães W. Carlé e P. Schmidt-Thomé conseguem ser cronologicamente 3 grupos de granitos hercínicos: novos, velhos e mais velhos. Mas são diferentes os critérios que utilizam; de modo que aqueles nomes não designam exactamente as mesmas coisas. É ainda na década de 40 que surgem, de modo independente, dois notáveis ensaios geotectónicos, um mais fixista (“hercínico”) e bem conhecido (F. Lotze), o outro mais mobilista (“alpinotípico”) e ainda hoje praticamente desconhecido (A. Schneider). Ambos são pioneiros e permitem, cada um à sua maneira, entender melhor a lógica dos granitos na orogenia varisca da Península Ibérica.

Key-words: *Geology, Geotectonics, Iberia, Pioneering forties*

Abstract

Knowledge of the geology of Portugal received in the 1940s a strong impulse of renovation due mainly to the enthusiasm of two young geologists, Carlos Teixeira and Coteló Neiva, both working at the Oporto University under the guidance of J. Carrington da Costa. The geological age of the granites occurring in northern and central Portugal was the theme of an interesting controversy between Neiva, a petrologist, and Teixeira, a stratigrapher. Unfortunately the lack of detailed geological maps of such areas did not allow them to do much more than presenting reasonable doubts and cute conjectures. In the same decade but in Spain the German geologists W. Carlé and P. Schmidt-Thomé, based on good mapping, succeeded in establishing a chronological sequence of three groups of Hercynian granites: new, old and older ones. But for that effect they used different criteria and so such names do not mean the same thing. Still in the 1940s two notable geotectonic essays were

published, one by the well known F. Lotze and the other by the practically unknown (still today) A. Schneider, the former of the fixist type (hercynotype) and the latter of the mobilist type (alpinotype). Both are pioneering studies that, each in its own way, allowed for a better understanding of the role of granites during the Hercynian orogeny in the Iberian Peninsula.

Introdução

O Maciço Hespérico é, como se sabe, o mais extenso dos diversos afloramentos da cadeia hercínica ou varisca da Europa (por uma questão de comodidade, os termos varisco e hercínico serão aqui considerados sinónimos). Mas ele é também aquele em que mais extensamente afloram rochas graníticas (s.l.). Por isso não deixa de surpreender a pouca atenção que, até à década de 40 (1940), aquelas rochas mereceram da parte dos investigadores portugueses: ainda em 1922 o Prof. Ernest Fleury se via obrigado a declarar, num pequeno texto muito didáctico, que, *“contrariamente a uma opinião muito espalhada, os granitos não são rochas vulcânicas nem as formações mais antigas. São rochas que se introduziram e solidificaram através dos terrenos do Primário médio e base do Superior e, se eles afloram, foi a erosão que os poz a nú, e, por consequência a Meseta perdeu uma grande parte da sua cobertura”* (Fleury, 1922a, p. 10).

A década de 40 marca o início de uma renovação da Geologia portuguesa; representam-na sobretudo os jovens Carlos Teixeira e Cotelos Neiva que, com o seu Mestre Carrington da Costa, fundam em 1940, na cidade do Porto, a Sociedade Geológica de Portugal (Neiva, 2009). Cotelos Neiva inicia então uma carreira dedicada em grande parte ao estudo petrológico e metalogénico dos granitos portugueses (nomeadamente Minho e Beiras). Carlos Teixeira e Cotelos Neiva viriam mais tarde a liderar, com o sucesso que é de todos conhecido, as escolas de Lisboa e de Coimbra, respectivamente.

É também na década de 40 que os alemães W. Carlé e P. Schmidt-Thomé elaboram, com detalhado apoio cartográfico, uma seriação temporal “moderna” dos granitos aflorantes na Galiza e em Castela-Estremadura, respectivamente.

É ainda na década de 40 que vão surgir, de modo independente, dois ensaios geotectónicos fundamentais, onde a problemática dos granitos hercínicos do Maciço Hespérico ocupa um lugar relevante e adquire aspectos de originalidade. Os autores são ambos alemães; mas se um (Franz Lotze) era então já bastante prestigiado, o outro (André Schneider) ainda

hoje permanece um ilustre desconhecido.

Muita desta actividade é hoje mal conhecida. Vale a pena recordá-la.

Cotelo Neiva, Carlos Teixeira e os granitos portugueses

O estudo sistemático dos granitos portugueses teve pois início nos anos 40, com os primeiros trabalhos de Cotelo Neiva. Importa contextualizá-los.

Estes trabalhos são feitos “em voo rasante”, isto é, as rochas graníticas são analisadas sistematicamente, afloramento por afloramento, em termos petrográficos e, sempre que possível, geoquímicos e metalogénicos, onde é perceptível a influência de Paul Niggli. Era um tempo de inventariação, obviamente com trabalho de campo, mas sobretudo de laboratório. E, à boa maneira indutiva, sem grande necessidade de um quadro geotectónico integrador e guia das observações. O que explica a ausência de cartas geológicas detalhadas (ex.: 1/50000) integrando aquelas descrições. Refira-se, a propósito, que, embora a Geologia seja uma ciência muito “visual”, era de certo modo uma tradição portuguesa que as publicações geológicas apresentassem pouca informação cartográfica de apoio: vejam-se, por exemplo, as teses de doutoramento de Cotelo Neiva e de Carlos Teixeira e sobretudo de Carrington da Costa. A mais notável excepção é, como se sabe, o “lusó-suíço” Paul Choffat.

A ênfase dada por Cotelo Neiva aos granitos do centro e norte do país ter-se-á devido a factores quer “logísticos” (nascimento e infância em S. Mamede de Riba Tua, estudos superiores na Universidade do Porto) quer “opcionais” (atracção pelo então valiosíssimo volfrâmio, como bom exemplo da “Geologia ao serviço do Homem”). Mas aquela ênfase não impedia um olhar atento sobre as intrusões, mais diversificadas, do Alto Alentejo, pontual mas sistematicamente descritas 3 décadas atrás por outro eminente petrógrafo, Vicente de Souza-Brandão. Cotelo Neiva nunca deixaria, aliás, de sublinhar o contraste entre os tardios granitos do Minho e Beiras e os precoces dioritos, tonalitos e gabros do Alto Alentejo.

A idade dos granitos do Minho e Beiras alimentou, nos anos 40 (e subsequentes), uma proveitosa controvérsia entre o petrólogo Cotelo Neiva e o estratígrafo Carlos Teixeira:

Para Cotelo Neiva, 1) dada “*a inexistência de calhaus de granito nos conglomerados westfalianos das proximidades de São-Félix e de Moinhada-Ordem, quer nos estefanianos que dos arredores do Pôrto se estendem até próximo de Queiriga e nos conglomerados autunianos do Buçaco; a existência de calhaus rolados de granito nos afloramentos triássicos de Coimbra e do Buçaco; a existência de detritos de pegmatites graníticas no*

Triássico desta última região; a metamorfização do Estefaniano médio pelos granitos, reconhecível na pequena mancha de São-Miguel-o-Anjo, próximo do Porto, na região do Gafanhão (Castro Daire), e também bem visível próximo das povoações de Nogueira e Côta (Viseu); e o idêntico quimismo de variados tipos de granitos”, 2) estando, “na generalidade, comprovado que, após ter sido atingido, num movimento orogénico, o período de mais forte compressão, formativo de intenso dobramento, ocorreram abundantes intrusões graníticas” e 3) “sendo a fase saálica (...) a mais importante dos movimentos hercínicos no nosso País (...), é muito natural que, sendo os granitos posteriores ao Estefaniano médio e ante-triássicos, estejam relacionados com os movimentos orogénicos paroxismais daquela fase “(...) pelo que “dataria muito provavelmente do Pérmico a intrusão granítica das Beiras e do Norte de Portugal” (Neiva, 1944b, p. 3-4).

Carlos Teixeira adopta uma posição mais matizada. Aceitando embora que *“o extenso afloramento de granito porfíroide das Beiras e do Minho e os afloramentos da mesma rocha dispersos por Trás-os-Montes, correspondem, sem dúvida, à mesma intrusão”* (Teixeira, 1954, p. 35), defende que a sua idade seria carbónica e não pérmica, uma vez que a fase astúrica seria talvez a mais importante: *“é o movimento astúrico que parece apresentar maior generalidade, atingir mais extensa área. É porém com a fase saálica que o Dr. Coteló Neiva julga estar relacionada (...) a intrusão granítica das Beiras.”* (Teixeira, 1944, p. 120). Teixeira levanta, contudo, uma questão interessante: *“De um modo geral, pode dizer-se que a maior parte dos granitos intrusivos são post-tectónicos em relação aos movimentos principais. Contudo, em certos casos, observam-se granitos anteriores à orogénese principal, embora posteriores a uma fase mais antiga”* (Teixeira, 1945, p. 120). O que o conduza a uma conclusão lógica mas, na falta de uma cartografia detalhada, hipotética: *“Isso apenas demonstraria a existência de intrusões graníticas de diferentes épocas. O problema parece-me de difícil solução tendo apenas como base a esrtatigrafia”* (Teixeira, 1945, p. 124). Notaremos, de passagem, que já Fleury havia tido idêntica percepção: *“Les granites indiqués sur la Carte Géologique [de 1899] ne sont pas tous de même âge et cette Carte, ne fut-ce qu’en raison de son échelle, ne peut pas montrer leur véritable allure”* (Fleury, 1922b, p. 77).

Em qualquer dos casos, a uniformidade geoquímica (elementos maiores) reconhecida por Coteló Neiva apontava para uma única intrusão granítica. Esta posição, bem perceptível no mapa geológico 1/1000000 que acompanha a tese de Coteló Neiva, seria aceite nas Cartas Geológicas de

Portugal (1/1000000) de 1952 e de 1968.

Lotze e o modelo “hercínico” do Maciço Hespérico

A geologia Maciço Hespérico desde sempre se revelou difícil, devido a factores como a diversidade litológica, a complexidade das estruturas, a variabilidade do metamorfismo, as lacunas do registo fóssilífero e, até aos anos 60, a ausência de informação geocronológica.

Deve-se ao geólogo e “hispanófilo” alemão Franz Lotze (discípulo de Stille) o ter pela primeira vez “arrumado a casa”: o seu famoso ensaio de 1945 (pouco tempo depois traduzido para castelhano) mostra-nos o Maciço Hespérico) dividido em 6 “zonas” geologicamente distintas e grosseiramente simétricas em relação à zona axial, granítico-metamórfica, Galaico-Castelhana (Fig.1). Respingando da tradução castelhana:

Zona Cantábrica (ZC) - “Una zona marginal del geosinclinal paleozoico de la Meseta”.

Zona Astúrico-Leonesa (ZAL) - “(...) desarrollo intenso del Paleozoico inferior”.

Zona Galaico-Castelhana (ZGC) - “la zona medular de los variscides de la Meseta”.

Zona Luso-Alcúdice (ZLA) - “(...) tiene cierto parecido con la Asturoccidental-Leonesa”.

Zona de Ossa-Morena (ZOM) - “la (...) más variada, abigarrada y movida de toda la Meseta Ibérica”.

Zona Sul-Portuguesa (ZSP) - “zona marginal del orógeno varisco”.



Figura 1. A divisão zonal de Lotze (1945/1950)

O modelo de Lotze é bastante “hercínico”, no sentido de essencialmente verticalista, por oposição à cadeia alpina (“alpinotípica”), onde o papel da movimentação horizontal (mantos de carreamento) era de há muito reconhecido; sublinhamos que os termos “hercínico” e “alpinotípico” são aqui tomados no sentido que lhes deu H. Zwart (1967). Lotze terá sofrido alguma influência de F. Kossmat, que já em 1927 havia proposto uma divisão zonal idêntica para o Maciço da Boémia (zonas Reno-Hercínica, Saxo-Turíngica e Moldanúbica). De qualquer modo, a atitude de Lotze é didacticamente interessante, na medida em que basta contemplar um mapa geológico da Península para que nos pareça fácil chegar a um esquema zonal análogo. O problema faz lembrar o "ovo de Colombo": qualquer um podia tê-lo resolvido, mas foi Lotze quem primeiro o fez...

Lotze não avança nada de significativamente novo quanto ao plutonismo da Zona de Ossa-Morena. Já o mesmo se não pode dizer no que diz respeito à Zona Galaico-Castelhana.

A Zona Galaico-Castelhana (ZCA) e os seus granitos.

Para Lotze, a ZCA é caracterizada por “*un poderoso predominio de los granitos y de las rocas de la serie cristallino-pizarreña*” a que se subordinam “*elementos menos metamórficos de la serie sedimentaria paleozóica*” (Lotze, 1945, p. 154). Os xistos metamórficos são considerados paleozóicos, e os granitos hercínicos. A orogenia varisca estender-se-ia do Devónico inferior ao Estefaniano. Lotze não descarta deformações posteriores, possivelmente saálicas; mas hesita quanto à idade do dobramento principal (bretão? sudético? astúrico?).

A importância dos granitos no espaço galego da ZCA havia sido já realçada por investigadores como I. Parga-Pondal (1935). Lotze reinterpreta-os com base nos trabalhos realizados pelos seus discípulos W. Carlé e P. Schmidt-Thomé. A Carlé tinha sido atribuída a cartografia de um sector da Galiza (Carlé, 1945); Schmidt-Thomé tinha ficado com a cartografia da região de Salamanca-Cáceres (Schmidt-Thomé, 1945). Ambos distinguíam, cartográfica e petrograficamente (Figuras 2 e 3), três grupos cronológicos de granitos (novos, velhos e mais velhos); mas os critérios não eram os mesmos, e a terminologia não deixava de originar alguma confusão. Lotze, com a sua grande experiência e visão sintética, esclarece rapidamente a questão em dois parágrafos e um quadro muito didáctico (Quadro 1):

“Ambos han podido llegar a una división cronológica de los granitos; así diferencia Carlé los granitos: “más viejo”, “viejo” y “joven”; y Schmidt-Thomé: “más viejo”, “viejo” y “más joven”. Estos no se

correspondem del todo, sino que de las investigaciones realizadas independientemente por ambos se deduce la existencia de cuatro tipos distintos, que se pueden paralizar de acuerdo con la representación que se ofrece en el cuadro adjunto.

Con respecto a la situación cronológica de los granitos, parece diferenciarse mucho las concepciones de ambos autores, y, sin embargo, ello depende de los diferentes puntos de vista en que los autores se an colocado: Schmidt-Thomé prestó especial atención a las intrusiones, y, como consecuencia, a sus relaciones con la orogénesis; Carlé, por el contrario, a la solidificación y, por conseguinte, a la textura. De esta manera el cocepto “sinorogénico”, para Carlé, no es identico con el “sinorogénico” de Schmidt-Thomé” (Lotze, 1945, p. 155).

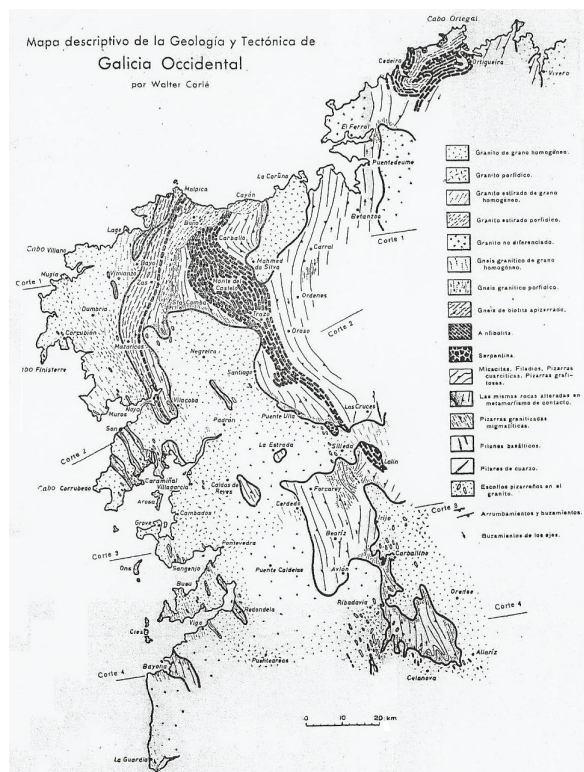


Figura 2. Carta geológica da Galiza Occidental segundo Carlé (1945/1950).

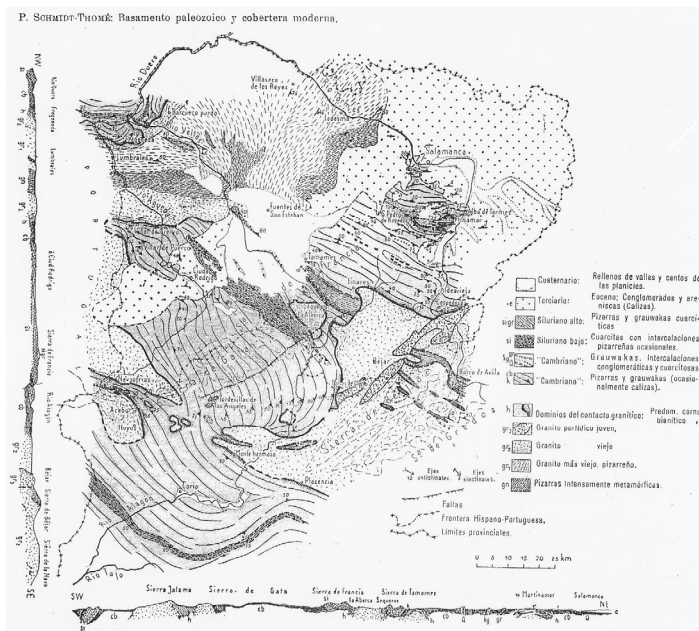


Figura 3. Carta geológica da região de Salamanca Cáceres segundo Schmidt Thomé (1945/1950).

Como seria de prever, Lotze não deixa de fazer uma referência às inevitáveis repercussões na geologia portuguesa:

“La orogénesis de la zona galaico-castellana corresponde, cronológicamente hablando, al intervalo de tiempo comprendido entre el Devoniano inferior y el Estefaniense. Este último sólo se presenta en una localidad, y consiste en un sinclinal bastante largo y estrecho ubicado en la zona de Vallongo. Yace allí discordante con respecto a la estructura antigua, pero experimentó también otras deformaciones posteriores (quizás saálicas). Pero si el plegamiento varisco principal fué bretónico, sudético o astúrico, es tan difícil de decidir como en la zona Astur occidental leonesa. Por eso tampoco podemos decir a qué intervalo corresponden las intrusiones graníticas; posiblemente, las primeras son ya variscas antiguas, pero las últimas son quizá incluso post-estefanienses. Podría tal vez aclararse esto en Portugal, en Vallongo y al oeste de Castro-Daire” (Lotze, 1945, p. 156).

Quadro 1. Comparação entre a classificação de Carlé e a de Schmidt-Thomé segundo Lotze.

CUADRO I								
Tipo	Atribución según		Textura	Relación orogenética	Cronología			
	CARLÉ	SCHMIDT-THOMÉ			De la intrusión según SCHMIDT-THOMÉ	De la solidificación según CARLÉ		
IV	Granito joven	Granito más joven Granito viejo	Normal	netamente discordante	sinorogénico tardío sinorogénico máximo	post orogénico		
III							Granito más viejo	De estrado a apizarrado. raramente Granito gneísico
II	Granito medio	Granito gneísico	completamente concordante	sinorogénico tardío				
I					Granito más viejo	Gneis de Biotita		

Schneider e o modelo “alpinotípico” do Maciço Hespérico

Diferentemente do esquema de Lotze (indutivo e fundamentalmente descritivo), o modelo, mais dedutivo e interpretativo, proposto em 1947 por André Schneider tem permanecido a bem dizer ignorado; para tanto terão contribuído 1) o seu conteúdo “avançado” para a época, 2) a escolha do português como língua veiculante e 3) a muito reduzida expansão da revista hospedeira (TÉCNICA, Revista dos Estudantes do IST). Vale a pena meditar um pouco nestas três justificações.

Schneider (“Ex-Assistente dos Profs. P. Ramdohr e H. Stille”) veio discretamente para Portugal nos anos 40, escreveu em 1947 dois artigos para a Técnica e um para o Bol. Soc. Geol. Portugal, e sumiu discretamente.

A ideia básica porventura mais audaciosa do esquema de Schneider (Figura 4) consistiu em ver nos Alpes o modelo padrão de *todos* os orógenos; mas todo o discurso está, aliás, repleto de ideias audaciosas, como parece ser timbre deste investigador: “*O progresso das Ciências nunca caminhou pelas vias das grandes demonstrações; - recebeu sempre os seus mais fecundos impulsos pelas grandes hipóteses, que, suscitando o ataque e*

impondo a defesa, revelaram pouco a pouco o tesouro de interpretações de que eram susceptíveis” (Schneider, 1947, p. 523).

Integrando o Maciço Hespérico no segmento da cadeia hercínica a que chamou o “sistema orogénico Ibero-Atlântico”, Schneider dividiu-o em duas partes ou “troncos” (“Ibero-Aquitano” a norte, “Lusitano-Açoreano” a sul), separados por um bloco intermediário mais antigo (“inter-país”) de cratonização pré-varisca. A sua progressiva compressão entre 2 blocos cratónicos exteriores à cadeia (“ante-países”) conduziu ao desenvolvimento de mega estruturas tipicamente alpinas (*mantos de carreamento*, ou “*capas*” no português de Schneider). Schneider analisa com algum pormenor no caso do **Tronco Lusitano-Açoreano** (Figura 4). Este aparece-nos constituído por uma zona autóctone (**Zona Subvarisca**) e por duas zonas cada vez mais fortemente carregadas sobre aquela (**Zona das Plesiocapas** e **Zona das Telecapas**); no interior desta última, os sinclinais ordovícicos (“dobradiças tectónicas”, numa feliz expressão) separam 3 capas, respectivamente, de sul para norte, **Estremenho-Cordovesa**, **Beirã-Mariânica** e **Toledano-Cacerenha**:

TRONCO IBERO-AQUITANO (não analisado por Schneider)

TRONCO LUSITANO-AÇOREANO

- **Zona das Telecapas:**

- Capa Toledano-Cacerenha

- Capa Beirã-Mariânica

- Capa Estremenho-Cordovesa

- **Zona das Plesiocapas**

- **Zona Subvarisca**

Embora, recorde-se, nos interesse analisar sobretudo o posicionamento dos granitos do Minho e Beiras, parece oportuno referir aqui um aspecto marcante da Zona das Plesiocapas: os seus limites abarcam a Zona de Ossa-Morena *mais uma parte* (Faixa Piritosa) da Zona Sul-Portuguesa de Lotze. Curiosamente, a integração da Faixa Piritosa na Zona das Plesiocapas confirma-lhe a *unidade na diversidade*:

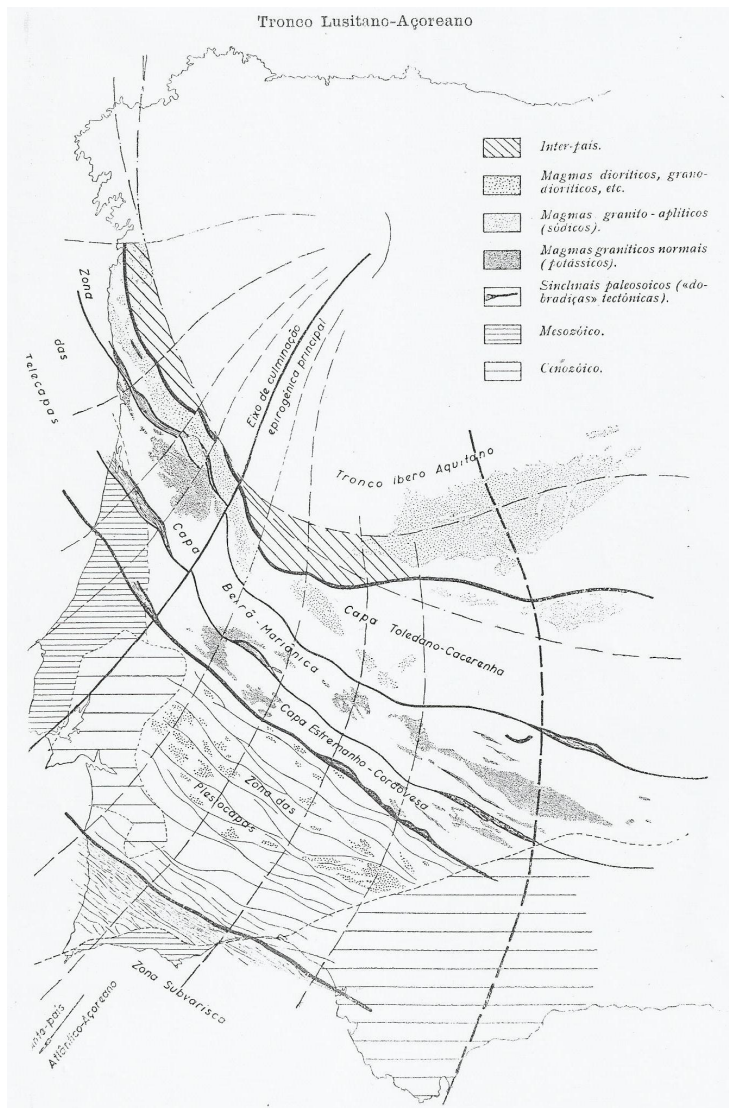


Figura 4. O esquema zonal de Schneider (1947).

“Voltando agora à análise geotectónica (...) reconhecemos com mais facilidade a relação que existe entre a região de alçamento epirogenético pronunciado de Evora, onde a diferenciação das unidades tectónicas é apenas fracamente marcada pela configuração lenticular dos afloramentos graníticos circundados de xistos metamórficos, e a área das séries metamórficas e silúricas da extremidade ocidental da Serra Morena, onde os núcleos graníticos das capas e dobras alpinas ficam abaixo da actual

superfície de denudação. Tanto a configuração dos afloramentos das raízes graníticas das unidades tectónicas que formam esta zona, como as estreitas faixas do Carbónico intercaladas na vasta área menos levantada dos terrenos predominantemente silúricos, indicam que esta zona geotectónica está ocupada por unidades tectónicas de estilo alpino, mas de amplitude relativamente reduzida, provavelmente do carácter das “plesiocapas de carreamento”. Examinando o mapa geológico da região mineira de Rio Tinto e Sevilha, podemos avaliar em 6 até 8 o número destas capas” (Schneider, 1947, p. 534-535).

A Zona das Telecapas e os granitos portugueses

A zona dos grandes carreamentos ou “telecapas” é dividida em 3 unidades, ligadas pelos sinclinais (ou “dobradiças” tectónicas, na feliz expressão de Schneider) paleozóicos de Anadia - Penacova - S. Mamede - Belmez e de Esposende - Valongo - Queiriga - Almadén - Puertollano.

“Destas 3 capas de carreamento de grande amplitude, a unidade inferior, que designaremos por “capa estremenho-cordovesa”, ocupa o espaço entre a zona das plesiocapas e a linha Anadia - Penacova - S. Mamede. Nas suas intersecções com os eixos de culminação epirogenética afloram na superfície os núcleos graníticos do Alto Alentejo e da Serra de los Santos (Cordoba). Suas características paleogeográficas, cujo conhecimento nos permite determinar quais dos “klippes” aloctonos que flutuam sobre a zona das plesiocapas (região de Sevilha) derivam desta unidade, indicam, por exemplo, que a bacia de Carbónico produtivo de Santa Susana, constitui um retalho aloctono pertencente à capa estremenho-cordovesa. Entre as analogias mais marcadas, assinalamos o Westefaliano D de Belmez e de Santa Susana, e o Autuniano de Bussaco e da região de Sevilha.

A capa de carreamento que recobre directamente esta unidade inferior da zona das telecapas (...) designaremos-la por “capa beirã-mariânica”, cujo distintivo estratigráfico mais marcado é o Estefaliano produtivo.

A terceira unidade, a “capa cacerenha-toledana”, apresenta um desenvolvimento atrofiado nas regiões ocidentais e tem a sua maior expansão no S e SE dos Montes Toledanos (...). O espraiamento desta unidade sobre as capas “beirã-mariânica” e “estremenho-cordovesa” deve ter atingido uma amplitude particularmente vasta, pois foi nesta região que foram acumuladas as mais espessas camadas paleozóicas e que a sedimentação principiou mais cedo, e terminou também mais tarde” (Schneider, 1947, p. 536-538).

Curiosamente, a problemática dos granitos que afloram na Zona das

Telecapas torna-se porventura mais compreensível quando se encara o conjunto do Tronco Lusitano-Açoreano (p. 538):

Se voltarmos agora a considerar o conjunto do tronco lusitano açoreano com as várias divisões que acabamos de esboçar, torna-se evidente que cada uma dessas zonas foi dobrada numa fase tectónica distinta. Como foi universalmente comprovado, uma telecapa de carreamento superior, espraia-se sempre sobre um substracto formado pelas capas inferiores, originadas durante fases tectónicas anteriores. Segundo este critério, podemos estabelecer o esquema seguinte da evolução orogenética do tronco lusitano-açoreano (...):

Zona das plesiocapas:

dobramento simultâneo de capas de extensão reduzida, dispostas em festões, durante a fase sudética (?).

Zona das telecapas:

Capa inferior ou “estremenho-cordovesa”: fase erzica (conglomerado do Westefaliano D)

Capa média ou “beirã-mariânica”: fase astúrica (conglomerado sinorogénico do Estefaliano).

Capa “cacerenha-toledana”: fase saálica (por comparação com o tronco ibero-aquitano, região de St. Girons).

Zona subvarisca:

último dobramento na fase saálica (ou palatina ?).

Embora reconhecendo a fragilidade deste esquema cronológico, Schneider não hesita em apresentá-lo à discussão pública, e isto por duas razões que nos interessa particularmente referir aqui, visto que ligadas à problemática dos granitos portugueses:

Em primeiro lugar, porque “se baseia sobre o princípio firmemente estabelecido da propagação espacial e temporal dos dobramentos dentro dum tronco orogénico, e desfaz certas controvérsias e mal entendidos sobre a idade dos dobramentos e das intrusões graníticas da Península, satisfazendo todas as opiniões em jogo” (p. 539).

Em segundo lugar, porque, “sem ter estabelecido previamente uma distinção entre as zonas geotectónicas e esclarecido a sequência cronológica dos processos pliomagmáticos respectivos, nunca poderemos obter uma ideia clara sobre a diferenciação dos magmas-troncos durante a orogenia, sobre a evolução química destes magma sem relação com a deslocação sucessiva dos fenómenos intrusivos numa zona geotectónica para outra, etc..., problemas de importância capital para a análise das zonas metalogenéticas” (p. 539).

Enfim, um aspecto suplementar, com fortes incidências

metalogénicas, tem que ver com os granitos tardios:

“Outro fenómeno tectónico típico para estas áreas [andares geotectónicos elevados] é o “diapirismo magmático” originado pelos granitos saálicos. O magma-tronco saálico, de acidez particularmente elevada e de tipo potássico, irrompe nas capas ante-saálicas com violência, formando batólitos de extensão relativamente reduzida e de configuração nitidamente discordante com as estruturas alpinas. Em casos frequentes, o magma saálico penetra nos granitos astúricos, ou ainda anteriores, originando auréolas de metasomatismo e fenómenos de hibridização granítica. A metalogénese tungsteno-estaniífera está quase exclusivamente relacionada com estas intrusões “diapíricas”, e segundo o nível atingido por estas intrusões, temos tipos estruturais diferentes dos jazigos de estanho e volfrâmio. Particularmente característicos são os filões subhorizontais, de disposição chamada “lit-par-lit”, que se observam na maioria dos grandes jazigos de volframite (Panasqueira, Borralha, Arouca, Cassayo, etc...), cuja formação está estreitamente relacionada com o diapirismo magmático exercido pelos granitos saálicos nestas áreas” (p. 539).

A comparação entre os modelos de Lotze e de Schneider é um exercício deveras interessante e digno de ser praticado. Caricaturando um pouco as coisas, pode dizer-se que as zonas de Lotze se encontram *justapostas* (lado a lado) e as de Schneider (parcialmente) *sobrepostas*. O modelo de Lotze faz apelo a movimentos (sobretudo) verticais da crosta, o de Schneider a movimentos (sobretudo) horizontais (*mas não exactamente no sentido wegeneriano*, ou seja, não implicando necessariamente continentes à deriva). As zonas de um raramente coincidem (se é que coincidem) com as zonas do outro. Elaborados no quadro da Teoria Geossinclinal, teoria refinada pelo mestre comum, Stille, e então de certo modo paradigmática, ambos constituem preciosas fontes de reflexão, num tempo em que as atenções se concentram na Tectónica de Placas.

Conclusão

Como é sabido, o conhecimento dos granitos portugueses sofre um fortíssimo impulso em meados dos anos 50, com os trabalhos realizados na Beira Alta pela Escola de Amesterdão, nomeadamente a síntese preliminar de Westerveld (1955) e a tese seminal de Schermerhorn (1956). Trabalho idêntico seria realizado na Galiza nos anos 60 (pelas Escolas de Leiden e de Montpellier), culminando com a tese, também seminal, do francês Capdevila (1969). É o início da “explosão moderna”, onde se integra uma nova, entusiasta e cada vez mais numerosa falange de granitólogos

portugueses e espanhóis. As ferramentas disponíveis enriquecem-se e diversificam-se, sejam elas materiais (geofísica, geoquímica oligoelementar e isotópica, detecção remota...) ou conceptual (tectónica de placas, modelação matemática...). É costume, pelo menos em Portugal, enraizar todo este edifício moderno nos trabalhos da Escola de Amesterdão. Mas seria injusto não reconhecer que os alicerces foram construídos, com trabalho, inteligência e imaginação, na década de 40.

É com grande prazer que dedicamos este breve exercício histórico ao colega e amigo Manuel Maria Godinho. Ele foi o introdutor de uma nova e rigorosa forma de tratar a problemática dos granitos portugueses (Godinho, 1980). E fez escola, na Universidade de Coimbra, com a criação de um pequeno e belo grupo de discípulos. Mas ele próprio foi também ilustre discípulo de um dos pioneiros da década de 40, o Prof. Cotelto Neiva.

Bibliografia

- Capdevila, R. (1969) - Le métamorphisme régional progressif et les granites dans le segment hercynien de Galice Nord Orientale (NW de l'Espagne). Tese Univ. Montpellier; 430 p.
- Carlé, W. (1945) - Ergebnisse geologischer Untersuchungen im Grundgebirge von Galicien (Nordwest Spanien). Geotekt. Forsch; 6 (trad. esp. por J.M. Rios, in Publ. Estranj. Geol. España, 1950; V, 61-91).
- Cotelto Neiva, J. M. (1944a) - Manifestações de actividade magmática em Portugal. Bol. Soc. Geol. Portugal; 4(1-2), 41-60.
- Cotelto Neiva, J. M. (1944b) - Jazigos portugueses de cassiterite e de volframite. Tese Univ. Porto e Comunic. Serv. Geol. Portugal; 25, 1-251.
- Cotelto Neiva, J. M. (2009) - A fundação da Sociedade Geológica de Portugal e os seus primeiros sócios. Bol. Soc. Geol. Portugal; 35, 11-12.
- Fleury, E. (1922a) - O que pode ler-se na Carta Geológica de Portugal. J. Sci. Nat.; 1, 1-2, 7-12.
- Fleury, E. (1922b) - Les plissements hercyniens en Portugal. Comunic. Serv. Geol. Portugal; 13, 65-83.
- Godinho, M. M. (1980) - O plutonito do Caramulo. Tese Univ. Coimbra e Publ. MLMG Univ. Coimbra; 269 p.
- Lotze, F. (1950) - Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. Geotekt. Forsch, 1945; 6 (trad. esp. por J.M. Rios, in Publ. estranj. geol. España; V, 149-166).
- Schermerhorn, L. J. G. (1956) - Igneous, metamorphic and ore geology of the Castro Daire - S. Pedro do Sul - Sátão area (Northern Portugal). Tese Univ. Amesterdão e Comunic. Serv. Geol. Portugal; 37, 617 p.
- Schmidt-Thomé, P. (1945) - Paläozoisches Grundgebirge und junges Deckgebirge in Westlichen Zentralspanien (Provinz Salamanca und Cáceres). Geotekt. Forsch; 6: 37.77 (trad. esp. por J.M. Rios, in Publ. estranj. geol. España, 1950; V, 93-146).
- Schneider, A. (1947) - Prospecção mineira e zonas geotectónicas na metalogénese ibérica. II Parte - As zonas geotectónicas da Península Ibérica. *TECNICA, Revista dos Estudantes do IST*, Lisboa; 176, 522-540.
- Teixeira, C. (1945) - O Antracólítico continental português (Estratigrafia-Tectónica). Tese Univ. Porto e Bol. Soc. Geol. Portugal; 5(1-2), 1-139.
- Teixeira, C. (1954) - Notas sobre geologia de Portugal. O sistema Permo-Carbónico. Ed. Autor, 55 p.

- Westerveld, J. (1955) - Roches eruptives, gîtes métallifères et métamorphisme entre Mangualde et le Douro dans le nord du Portugal. Bol. Soc. Geol. Portugal; 12, 101-127.
- Zwart, H. (1967) - The duality of orogenic belts. Geol. En Mijnb.; 46e(8), 283-309.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Modelação da qualidade da água em lagos vulcânicos: interacção com fluidos de origem magmática

Paulo Antunes¹; Gilberto Martins²; Daniel Ribeiro²; José Cruz¹; António Brito², Regina Nogueira²

¹Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, PORTUGAL, pantunes@uac.pt

²IBB – Institute for Biotechnology and Bioengineering, Universidade do Minho, PORTUGAL.

Palavras-chave: Lagos vulcânicos, CO₂, fluidos vulcânicos

Resumo

O modelo utilizado decorre do esforço desenvolvido no sentido de se compreender a dinâmica entre a qualidade da água dos lagos do arquipélago dos Açores e a eventual interacção com fluidos de origem vulcânica nos sistemas lacustres localizados no interior de vulcões activos. Com o intuito de utilizar estes sistemas aquáticos na monitorização vulcânica, recorreu-se ao modelo DYRESM_CAEDYM para se perceber uma entrada ocasional de carbono inorgânico de origem vulcânico, na Lagoa Verde das Sete Cidades. O resultado do modelo permitiu constatar que, actualmente, a concentração do carbono inorgânico dissolvido na água da Lagoa Verde é superior ao modelado, sugerindo que este “excesso” de dióxido de carbono seja proveniente de uma entrada no lago de fluidos de origem vulcânica. Também o resultado dos cenários modelados permitiu compreender o comportamento do lago face à entrada de grandes concentrações de carbono neste sistema, resultante de um cenário pré-eruptivo. O modelo é limitado no estudo da Hidrogeoquímica, não sendo possível modelar o contributo de voláteis nos sistemas aquáticos ou tirar qualquer ilação relativamente aos processos de interacção água-rocha, nomeadamente na lixiviação dos metais alcalinos e alcalino-terrosos e do silício. Contudo, para o objectivo proposto, o programa DYRESM-CAEDYM apresenta potencial na aplicação e exploração da monitorização vulcânica, nomeadamente na simulação do input do carbono inorgânico.

Key-words: *Volcanic lakes, CO₂, Volcanic fluids*

Abstract

The DYRESM_CAEDYM was used for a better understanding of the water environment related to the CO₂ dynamic in the Azorean lakes, namely, on the Lagoa Verde located in the Sete Cidades volcano. The main goal was the modulation of the volcanic CO₂ input on the water lake for a better understanding of the behavior of CO₂ equilibrium. The modulation results show a lower dissolved inorganic carbonate (DIC) concentration when compared to the observed data of the last years. The hydrogeochemical studies in this system show a

volcanic fluids contribution that explained the highest CO₂ contribution. The scenarios modulated in Lagoa Verde allowed to understand the behavior of DIC in depth face an pre-eruptive scenario. Related to hydrogeochemical study, the software is limited and is impossible to modulated the volcanic volatiles contribution and the hydrolyze of rock concerning to the water acidification. However, for the goal proposed the program show a great potential to predict future scenarios face a volcanic input in water lake.

Introdução

De uma forma geral, a água dos lagos dos Açores, são predominantemente frias, com temperaturas a variar entre os 5,2 °C e os 23,5 °C e demonstram uma tipologia cloretada sódica a bicarbonatada sódica (Antunes, 2008).

A Lagoa Verde apresenta uma temperatura da água mínima de 12,7°C e máxima de 23,3°C, entre os anos de 2002 a 2007, e do tipo cloretada sódica, reflectindo o contributo do transporte de sais de origem marinha através do acarreio atmosférico. O pH da água apresenta um intervalo de valores considerável, principalmente no Verão (mín. = 6,59; max. = 9,61). Este facto, advém da estratificação da água de origem térmica, mas também se deve aos processos biológicos relacionados com a eutrofização que se observa neste sistema. A estratificação da água do lago reflecte o aumento da concentração do dióxido de carbono no fundo. O contributo do dióxido de carbono no *hipolimnion* poderá estar relacionado com outra fonte, além da degradação da matéria orgânica que fica limitada aos processos anaeróbicos, pelo que não será de excluir uma contribuição de origem vulcânica (Antunes 2008).

A aplicação de modelos numéricos relativos à qualidade da água com a perspectiva de gerir os sistemas aquáticos é largamente utilizada em lagos, reservatórios, rios e estuários (Romero *et al.*, 2004; Martins *et al.*, 2008). A necessidade de gerir e, principalmente, de prever cenários relativos à evolução da qualidade da água devido à constante pressão antropogénica sobre os recursos hídricos e, em especial, ao incremento da eutrofização e da poluição dos lagos a nível global, contribuiu, decisivamente, para a evolução dos modelos aplicados nesta vertente de estudo, à qual não é alheio o desenvolvimento e acessibilidade da tecnologia informática (Canfield e Hoyer, 1988; Jørgensen, 1995; Hamilton e Schladow, 1997; Gal *et al.*, 2003; Burger *et al.*, 2008).

A informação obtida pelos modelos acerca de fenómenos complexos e muitas vezes não totalmente assimilados e entendidos pelo ser humano poderá contribuir para uma melhor compreensão, tomada de decisões e respostas, muitas vezes exigidas prontamente, no que diz respeito a

problemas que poderão ter um grande impacte numa comunidade populacional (Martins *et al.*, 2008).

A escolha do programa de modelação a utilizar na Lagoa Verde, que em conjunto com a Lagoa Azul constituem a designada Lagoa das Sete Cidades, em concreto, na ilha de São Miguel, recaiu sobre o modelo hidrodinâmico DYRESM acoplado ao modelo ecológico CAEDYM (DYRESM_CAEDYM). Este arquétipo apresenta-se como um modelo mais complexo, modelando uma diversidade de parâmetros físicos, biológicos ou químicos, relativamente a outros modelos que se limitam a entradas e saídas. Esta complexidade, relativa à interacção entre atmosfera, coluna de água (incluindo os biotas) e sedimento, permite uma melhor compreensão quanto aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nestes sistemas lacustres (Imberger *et al.*, 1978; Hamilton e Schladow, 1997; Hornung, 2002; Balistrieri *et al.*, 2006).

Nesse sentido o presente trabalho teve por objectivo compreender o comportamento da concentração do carbono na água do lago em resultado de uma entrada, deste elemento, de origem vulcânico.

Metodologia

Para a modelação, foram inicialmente considerados 4 anos (2004 a 2007), período correspondente aos dados recolhidos no campo (Antunes, 2008) e capazes de descrever a dinâmica observada na Lagoa Verde. Para configurar os ficheiros correspondentes ao ano de 2004, utilizaram-se os dados cedidos pela DROTRH e os apresentados por Martins *et al.* (2008).

Esta metodologia foi possível de desenvolver, na estruturação dos diferentes ficheiros de configuração, devido aos lagos apresentarem características físico-químicas e biológicas cíclicas e estáveis. Deste modo, os ficheiros de configuração utilizados na preparação do modelo são mais robustos, devido à existência de dados de campo mais completos no provimento dos ficheiros relativos aos 366 dias do ano de 2004 e seguintes. Após o modelo ter sido calibrado para este intervalo de tempo, utilizou-se a mesma metodologia na formatação das diferentes extensões para se proceder à execução dos cenários para 10 anos, objectivo final do estudo.

Calibração

A calibração do modelo foi efectuada para a temperatura, oxigénio dissolvido, pH e fosfatos. A calibração hidrodinâmica assentou na manipulação dos dados meteorológicos. Este facto contradiz os resultados

apresentados por outros autores (Imberger e Patterson (1990; Hamilton e Schladow, 1997; Hornung, 2002; Copetti *et al.*, 2006), nomeadamente, no que se refere à resposta do DYRESM em diferentes lagos internacionais e que sempre apresentou resultados congruentes com os registados nas diferentes massas de água, independentemente do objectivo do estudo desenvolvido. No presente estudo, a necessidade de calibração do modelo, relativo à parte hidrodinâmica, deveu-se ao facto de os dados meteorológicos utilizados na configuração do modelo, serem registados, de uma forma geral, por postos hidrométricos e estações meteorológicas afastados deste sistema lacustre e muitas vezes localizados a altitudes significativamente mais elevadas. Na figura 1 apresenta-se a comparação entre os resultados simulados para a temperatura e outros dados de campo (Figura 2 e 3).

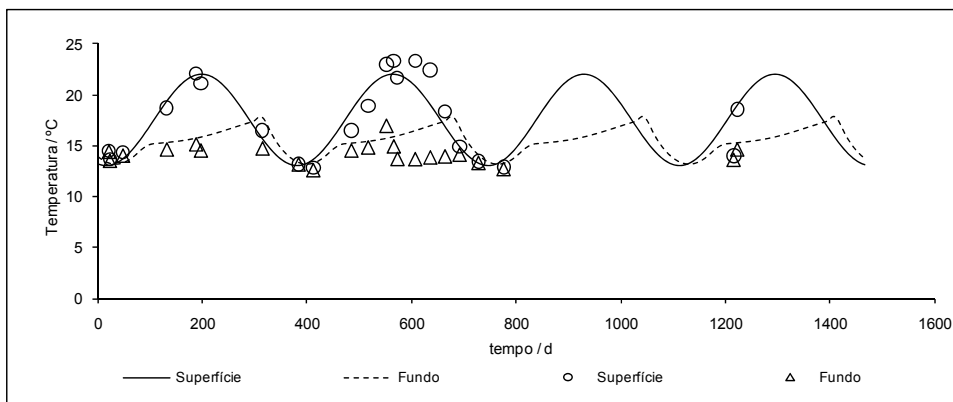


Figura 1. Comparação dos resultados do modelo e os dados de campo relativos à temperatura, após calibração do modelo hidrodinâmico.

A calibração do fitoplâncton não foi efectuada, pois iria exigir uma abordagem diferente ao modelo, quer em número de dados experimentais necessários, bem como no tempo necessário para a sua calibração. Assim, as leituras que são retiradas das presentes simulações são sempre comparativas e apenas reflectem possíveis alterações do estado do sistema.

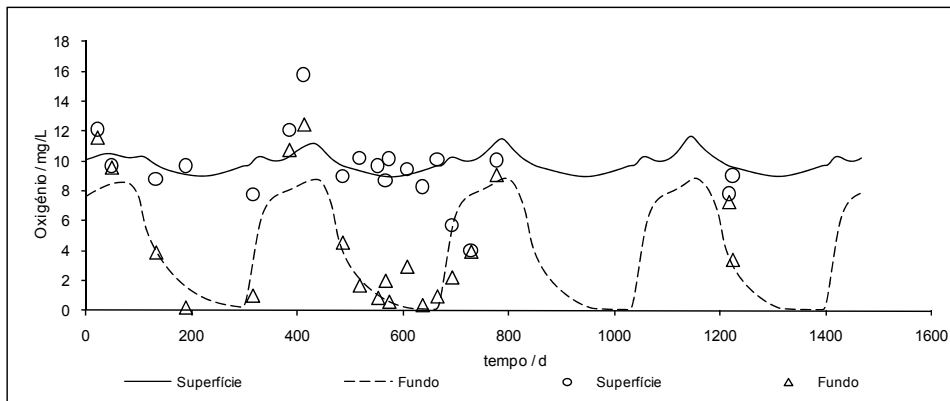


Figura 2. Resultado do O₂ simulado pelo modelo (linhas contínuas) e comparado com os dados de campo (pontos).

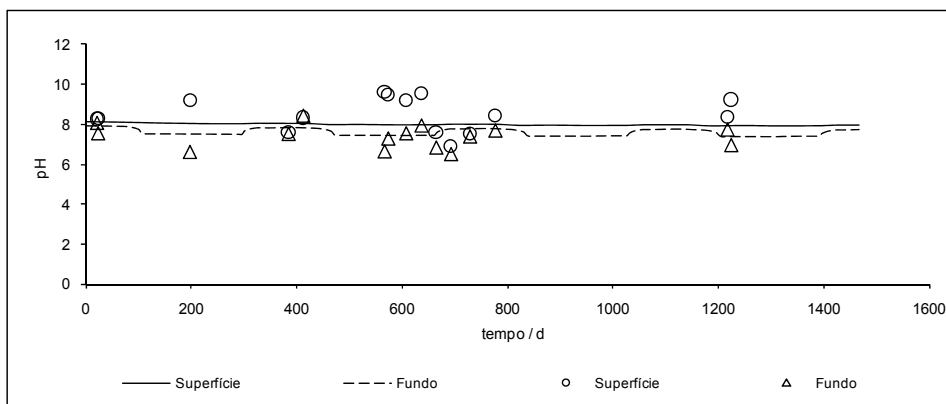


Figura 3. Resultado do pH simulado pelo modelo (linhas contínuas) e comparado com os dados de campo (pontos).

Cenários simulados

Após efectuada a calibração e feita a verificação de todos os ficheiros, foram ensaiados diversos cenários, para um espaço temporal de 10 anos. Escolheu-se o ano de 2004 como início das simulações.

O input de dióxido de carbono no lago foi simulado através da entrada do carbono inorgânico dissolvido (DIC), opção que existe neste modelo através de um caudal de água, configurado para entrar no fundo deste sistema.

Relativamente a este caudal e respectivas concentrações de carbono, consideramo-los relativamente proporcionais (1000 m³/d) quando comparados com algumas nascentes de água termal e mineral existentes na

ilha de S. Miguel. Deste modo, tivemos como propósito investigar o comportamento da água dos lagos, na eventualidade de ocorrer a entrada esporádica de fluidos de origem vulcânica e com baixa concentração dos seus elementos nativos. Deste modo, pretende-se verificar se o modelo responde à entrada de caudais com reduzidas concentrações de carbono, atendendo ao volume de água que este sistema lacustre apresenta e identificar, se possível, o tipo de alterações na qualidade da água.

O input de dióxido de carbono simulado nos diferentes cenários foi efectuado no ano de 2004, início da modelação, através da entrada de um caudal diário de 1000 m³ de água no fundo do lago, com concentrações de 500 mg/l, 1000 mg/l e 2000 mg/l de carbono inorgânico dissolvido (DIC).

Resultados e Discussão

O resultado do cenário modelado para as condições naturais do lago apresenta uma diminuição do carbono orgânico dissolvido ao longo do tempo (Figura 4).

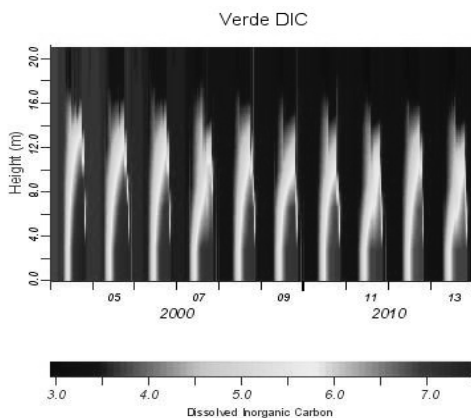


Figura 4. Resultado do comportamento do DIC na Lagoa Verde das Sete Cidades.

A diminuição do DIC ao longo dos anos, é devido ao programa de modelação considerar os lagos como sistemas fechados. Além desta condição imposta pelo modelo, que é a razão principal para que este resultado ocorra, as condições intrínsecas do lago, particularmente, o estado trófico, contribui naturalmente para o decréscimo do DIC evidenciado.

Relativamente ao ciclo anual deste elemento (DIC), como se verifica na figura 4, reflecte um comportamento coerente com os resultados verificados em campo. No período do ano mais frio e em que não se regista estratificação da coluna de água induzida pela diferença de densidade de

origem térmica, a concentração do carbono na água é homogeneizada devido à dinâmica existente neste sistema, permitindo, mais facilmente, a troca deste elemento entre a atmosfera e a superfície da água.

Na época do ano em que se regista uma subida da temperatura do ar e, naturalmente, a subida da temperatura da água do lago, ocorre o aparecimento da estratificação da coluna de água de origem térmica. Uma vez que esta estratificação impede a mistura da água entre o epilimnion e o hipolimnion, o dióxido de carbono no fundo do lago é, naturalmente, retido e a sua concentração aumenta, como patenteia o resultado apresentado pelo modelo.

O resultado da simulação relativamente à concentração e comportamento do carbono inorgânico dissolvido é congruente com o resultado deste elemento nos lagos localizados nas zonas temperadas do hemisfério norte e que reflectem alguns problemas na qualidade da água, nomeadamente, o estado de eutrofização que se regista de uma forma mais ou menos desenvolvida (Wetzel, 1993; Berner e Berner, 1996).

No entanto, os valores de DIC apresentados pelo modelo ficam aquém dos resultados obtidos nas várias amostragens efectuadas neste lago ao longo dos últimos anos.

Se compararmos estes resultados de CO₂ com os obtidos nos lagos da ilha do Pico e das Lagoas da Caldeira da Lomba e da Rasa (mínimo = 1,4 mg/L, máximo = 10 mg/L), na ilha das Flores, lagos em que o processo que controla o quimismo da água reflecte a contaminação destes sistemas por sais de origem marinha, através do transporte atmosférico (Antunes *et al.*, 2007ab, Antunes, 2008), os teores de dióxido de carbono que estes lagos apresentam em profundidade estão na mesma ordem de grandeza dos simulados pelo programa DYSREM_CAEDYM.

Uma vez que o modelo não contempla qualquer influência de origem vulcânica, nomeadamente, a concentração e dinâmica deste elemento neste sistema, depreende-se que a maior concentração de CO₂ registada no lago poderá ter origem na contaminação da água por este fenómeno natural, como sugerem os últimos estudos efectuados por Antunes (2003), Antunes e Cruz (2005), Cruz *et al.* (2006) e Antunes 2008.

Assim, é possível analisar o resultado do modelo sob duas perspectivas a designar: (1) o resultado da modelação efectuada vai ao encontro das conclusões apresentadas nos últimos estudos efectuados nestes sistemas lacustres, no sentido em que a diferença de concentração existente entre o modelo e os dados de campo reflectem a contribuição de origem vulcânica no quimismo da água; (2) os resultados das lagoas da ilha das Flores e do Pico, relativamente à concentração do CO₂ ao longo da coluna

de água, permitem sugerir que os valores de CO₂ da lagoa Verde deveriam ocorrer na ordem de grandeza dos resultados da modelação. Deste modo, é possível diferenciar estes resultados uma vez que contribuem para a validação do modelo utilizado.

O resultado da primeira simulação efectuada relativa à entrada de carbono inorgânico com a menor concentração (500 mg/l) e durante o menor período de tempo (1 mês) reflecte um ligeiro aumento do DIC no início do ano de 2004 (Figura 5). Uma vez que o incremento deste elemento acontece no mês de Janeiro, altura do ano em que os fenómenos meteorológicos são mais extremos, como já referido anteriormente, a maior intensidade do vento aliada a temperaturas mais baixas induzem uma dinâmica nestes lagos que permite uma rápida mistura do carbono na água e a sua difusão para a atmosfera. Assim, verifica-se uma rápida atenuação da entrada de carbono no lago, à qual não é indiferente o maior volume de água neste sistema lacustre.

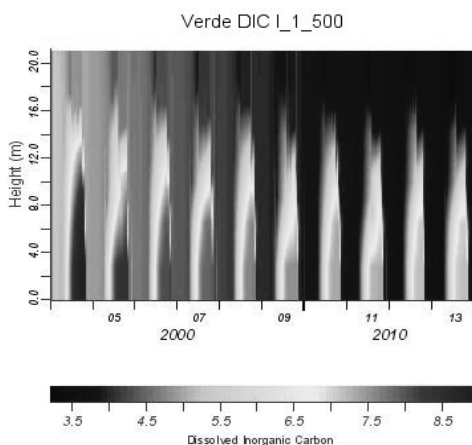


Figura 5. Resultado do input de DIC simulado no lago para o mês de Janeiro.

Relativamente à entrada de DIC durante os 184 dias de Inverno (I_6_500, I_6_2000), a configuração dos cenários altera-se (Figura 6). Como é expectável, a concentração do carbono inorgânico dissolvido aumenta consideravelmente apresentando valores 7 vezes superiores aos anteriores.

Como já discutido para os cenários anteriores relativos à lagoa Verde, é notória nestas simulações a crescente concentração do DIC. No entanto, o aspecto que se destaca de imediato na análise destes resultados radica na dispersão do carbono ao longo da coluna de água. As 3 simulações

efectuadas apresentam uma configuração semelhante, com excepção para a concentração do carbono na água, que apresenta um aumento da sua concentração, consoante a concentração de CO₂ do input. A entrada deste composto decorre entre os dias 1 de Janeiro e 30 de Junho, coincidindo com a estratificação da água deste lago, que tem início no mês de Maio. Assim, verifica-se que o DIC retido no hipolimnion durante o período de estratificação da água devido à diferença de densidade de origem térmica se acumula junto ao metalimnion, com concentrações que variam entre os 22 e 75 mg/l entre os 7 e os 11 m de profundidade, nos 3 cenários simulados.

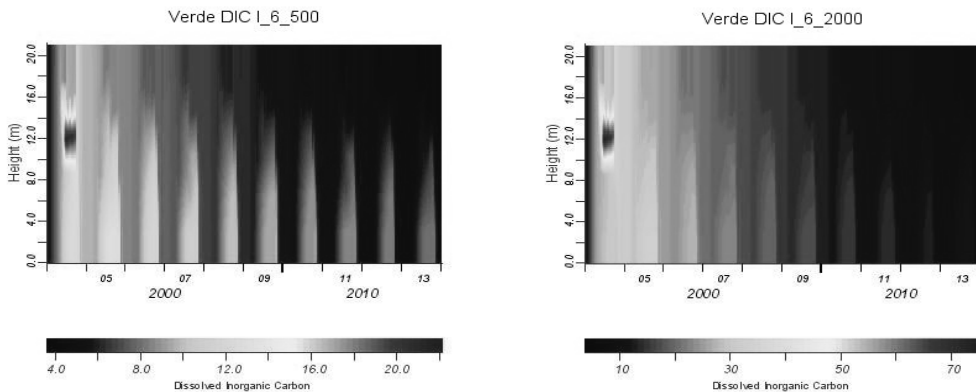


Figura 6. Resultado do input de DIC simulado, na Lagoa Verde, para os primeiros 184 dias do ano de 2004.

Após o desaparecimento da estratificação da água de origem térmica, há uma rápida diminuição da concentração do DIC e sua mistura ao longo da coluna de água. No entanto, a lagoa não recupera totalmente a concentração de carbono inicial.

As simulações efectuadas no Verão, neste lago, apresentam um resultado semelhante entre si. Como se observa na Figura 7, a concentração do DIC aumenta, consoante o aumento da concentração do carbono no input e do tempo em que decorre a entrada deste caudal nos lagos. É possível constatar o aumento significativo da concentração do carbono na simulação V_6_2000. Após o esbatimento da estratificação da água de origem térmica no ano de 2004, a concentração do DIC retido no hipolimnion rapidamente sai do lago através das trocas gasosas atmosfera/água e é notório o decréscimo substancial do carbono na água do lago a partir do ano de 2006.

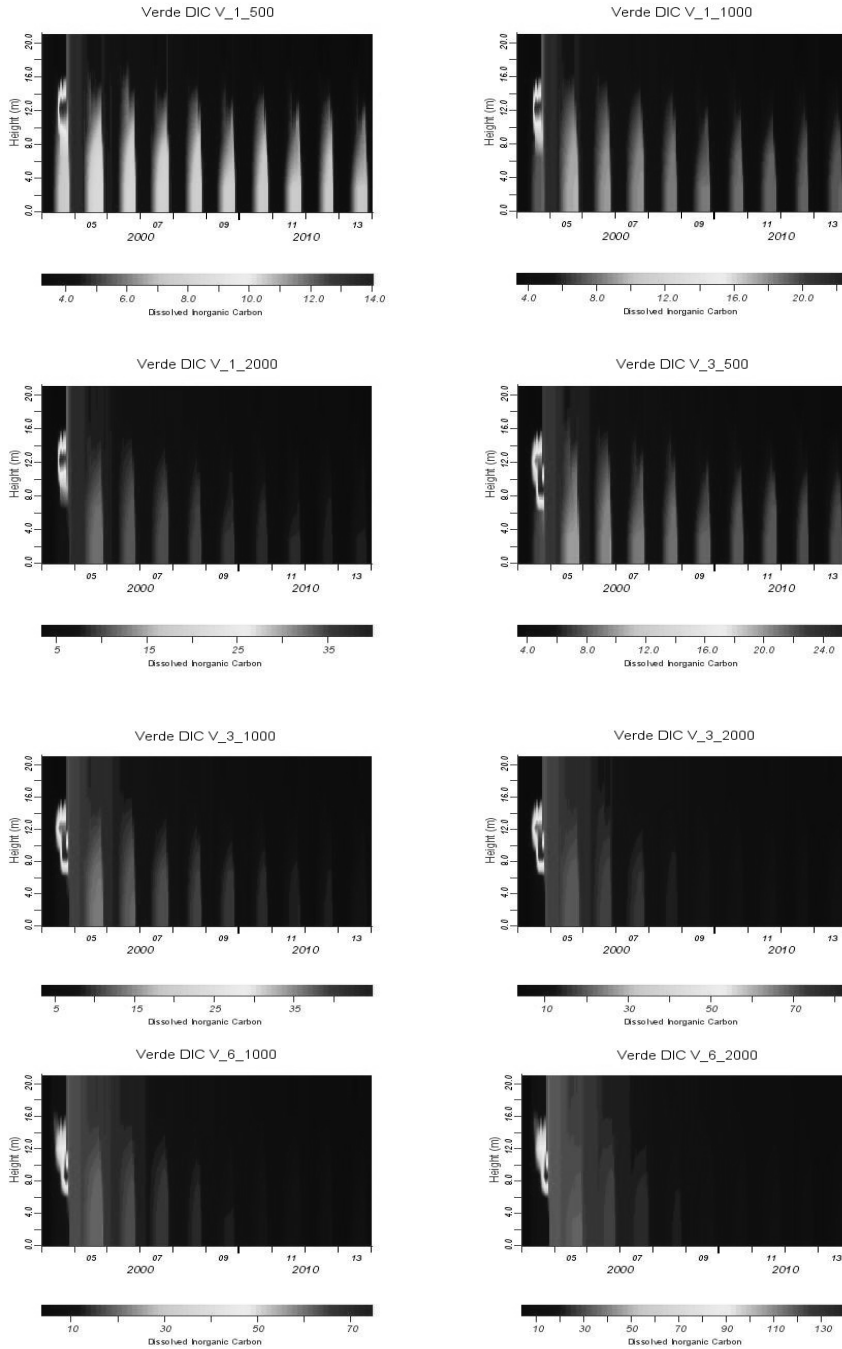


Figura 7. Resultado do input de DIC simulado, na Lagoa Verde, no período do Verão.

Conclusão

A opção pelo modelo DYREM_CAEDYM, face aos resultados obtidos, revelou-se ter sido uma escolha acertada, devido o modelo permitir desenvolver o estudo sobre a parte hidrodinâmica dos lagos.

Os cenários simulados para as condições iniciais de cada lagoa apresentam uma diminuição do carbono orgânico dissolvido ao longo dos 10 anos modelados. Esta situação ocorre devido ao programa considerar os lagos sistemas fechados. Deste modo, o modelo tende a encontrar uma situação de equilíbrio relativamente ao carbono para valores que correspondem à dinâmica de cada sistema lacustre, uma vez que os valores iniciais configurados no programa correspondem aos dados de campo.

Este resultado, associado aos estudos efectuados nos últimos anos por Antunes (2003), Antunes e Cruz (2005), Cruz *et al.*, (2006) e Antunes (2008), reforçam as conclusões desenvolvidos nestes sistemas, no sentido que a concentração do dióxido de carbono não provém unicamente dos processos biológicos que aí decorrem, mas que existe uma contribuição de origem vulcânica. Desta forma, estes resultados contribuem para a validação do modelo utilizado.

No primeiro cenário simulado, para o menor input e concentração de DIC inferior, depreende-se que o lago apresenta alterações no quimismo da água e que são mais evidentes com o aumento das diferentes entradas simuladas.

Em relação aos restantes cenários, as simulações foram efectuadas entre os meses de Abril e Setembro, altura do ano que, de uma forma geral, se regista estratificação da água dos lagos de origem térmica. Devido a parte dos inputs serem retidos nesta camada de água, os cenários apresentam outra configuração.

A acumulação do carbono inorgânico dissolvido na água no topo do hipolimnion verificado na Lagoa Verde, teoricamente, não faz sentido, ao considerarmos o hipolimnion isolado da superfície. A explicação mais plausível para compreender estes resultados prende-se com a configuração dos dados introduzidos no modelo.

Centrando a análise dos cenários simulados unicamente no ano de 2004, verifica-se que os resultados dos cenários Verde DIC_I_6_1000 apresentaram concentrações de carbono na coluna de água na ordem de grandeza das concentrações verificadas no campo. Assim, os dados sugerem que existe um contributo de 182 T/ano na Lagoa Verde. Contudo, estes

valores são meramente indicativos, uma vez que dizem respeito à entrada de carbono durante 91 e 182 dias, respectivamente.

O modelo revelou-se eficiente relativamente ao objectivo do estudo planeado à partida e demonstra uma grande valência na sua utilização. Na presença de uma série de dados meteorológicos mais robustos, o modelo revela capacidade de simular o aparecimento e o término efectivo da estratificação da água.

No entanto, o modelo é limitado no estudo da Hidrogeoquímica nestes sistemas, não sendo possível modelar o contributo de voláteis nos sistemas aquáticos ou tirar qualquer ilação relativamente aos processos de interacção água-rocha, nomeadamente na lixiviação dos metais alcalinos e alcalino-terroso e do silício que, ao entrar na água, poderia ser modelado no sentido de averiguar o seu impacte, especificamente nas diatomáceas que incorporam a sílica na sua estrutura interna.

Contudo, ressalva-se o desenvolvimento do programa no sentido de estudar unicamente a ecologia dos sistemas aquáticos. O facto de ter sido possível desenvolver este estudo prova a valência do modelo.

Deste modo, o programa DYRESM-CAEDYM apresenta potencial na aplicação e exploração na monitorização vulcânica, nomeadamente, no que diz respeito a possíveis alterações hidrogeoquímicas induzidas pelo input de fluidos de origem vulcânica, assim como a possível alteração ecológica destes sistemas devido a este fenómeno. Consequentemente, também poderá contribuir para uma melhor compreensão acerca dos sistemas vulcânicos existentes nestes locais e, possivelmente, constituirá mais uma ferramenta ao dispor da monitorização vulcânica.

Bibliografia

- Antunes, P (2003) - Lagos Vulcânicos dos Açores: Caracterização geoquímica e monitorização vulcanológica. Dissertação apresentada à Universidade dos Açores para efeito de obtenção do Grau de Mestre em Vulcanologia e Riscos Geológicos; Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 99p.
- Antunes, P., Cruz, J. V. (2005) - Estudo hidrogeoquímico em lagos vulcânicos dos Açores: perfis realizados nos lagos da ilha de São Miguel. Comunicações Geológicas; t. 92, 79-106.
- Antunes, P., Cruz, J. V., Freire, P., Coutinho, R. (2007a) - Hydrogeochemistry of volcanic lakes from Flores island (Azores, Portugal): preliminary data. Abstract Book, ISSN: 1029-7006. General Assembly 2007 - European Geosciences Union. Viena, Áustria.
- Antunes, P., Cruz, J. V., Freire, P., Coutinho, R. (2007b) - Estudo Hidrogeoquímico dos Lagos Vulcânicos da Ilha do Pico (Açores). Livro de Resumos da XV semana – VI Congresso Ibérico de Geoquímica; Trás-os-Montes, 199.
- Antunes, P. (2008) - Estudo hidrogeoquímico e vulcanológico de lagos no arquipélago dos Açores: aplicações para a mitigação de riscos naturais. Dissertação apresentada à Universidade dos Açores para efeito de obtenção do Grau de Doutor em Geologia; Universidade dos Açores: Ponta Delgada, 306p.

- Balistreri, L. S., Tempel, R. N., Stillings, L. L., Shevenell, L. A. (2006) - Modelling spatial and temporal variations in temperature and salinity during stratification and overturn in Dexter Pit Lake, Tuscarora, Nevada, USA. *Applied Geochemistry*; 21, 1184-1203.
- Burger D. F., Hamilton, D. P., Pilditch, C. A. (2008) - Modelling the relative importance of internal and external nutrient loads on water column nutrient concentrations and phytoplankton biomass in a shallow polymictic lake. *Ecological Modelling*; 211, 411-423
- Canfield, J. D., Hoyer, M. V. (1988) - Influence of nutrient enrichment and light availability on the abundance of aquatic macrophytes in Florida streams. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*; 45, 1467-1472
- Copetti, D., tartari, G., Morabito, G., Oggioni, A., Legnani, E., Imberger, J. (2006) - A biogeochemical modelo f Lake Pusiano (North Italy) and its use in the predictability of phytoplankton blooms: first preliminary results. *Journal limnology*; 65(1), 59-64.
- Cruz, J. V., Antunes, P., Amaral, C., França, Z., Nunes, J. C. (2006) - Volcanic lakes of the Azores archipelago (Portugal): Geological setting and geochemical characterization. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*; 156, 135-157.
- Gal, G., Imberger, J., Zohary, T., Antenucci, J., Anis, A., Rosenberg, T. (2003) - Simulating the thermal dynamics of Lake Kinneret. *Ecological Modelling*; 162, 69-86.
- Hamilton, D. P., Schladow, S. G. (1997) - Prediction of water quality in lakes and reservoirs. Part I – Model description. *Ecological Modelling*; 96, 91-110.
- Hornung, R. (2002) - Numerical Modelling of Stratification in Lake Constance with the 1-D hydrodynamic model DYRESM. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre; Universidade de Stuttgart, Stuttgart, 101p.
- Imberger, J., Patterson, J. C., Hebbert, B., Loh, I. (1978) - Dynamics of reservoir of medium size. *Journal of Hydraulics Division I*; 104, 725-743.
- Imberger, J., Patterson, J. C. (1990) - Physical limnology. *Adv. in Applied Mech*; 27, 303-475.
- Jørgensen, S. E. (1995) - State-of-the-art management models for lakes and reservoirs. *Lakes & Reservoirs: Research & Management* 1 (2): 79-87. <http://www.blackwell-synergy.com/doi/abs/10.1111/j.1440-1770.1995.tb00009.x>
- Martins, G., Ribeiro, D. C., Pacheco, D., Cruz, J. V., Cunha, R., Gonçalves, V., Nogueira, R., Brito, A. G. (2008) - Prospective scenarios for water quality and ecological status in Lake Sete Cidades (Portugal): The integration of mathematical modelling in decision processes, *Applied Geochemistry* (2008); 23, 2171–2181p.
- Romero, J. R., Antenucci, J. P., Imberger, J. (2004) - One and three-dimensional biogeochemical simulations of two differing reservoirs. *Ecological Modelling*; 174, 173-160.
- Schladow, S. G., Hamilton, D. P. (1997) - Prediction of water quality in lakes and reservoirs: Part II – Model calibration, sensitivity analysis and application. *Ecological Modelling*; 96, 111-123.
- Wetzel, R. G. (1993) - *Limnologia*. Fundação Calouste Gulbenkian; Lisboa, 407p.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

O papel da análise de imagem na Geologia Planetária

Teresa Barata¹; Adriane Machado¹

¹CGUC, Coimbra, PORTUGAL, mtbarata@gmail.com; adrianemachado@yahoo.com.br

Palavras-chave: Análise de imagem, Vénus, Estruturas geológicas

Resumo

Pretende-se, com este trabalho, salientar a importância da análise de imagem na detecção automática de estruturas geológicas em superfícies planetárias. Apresentam-se alguns exemplos da aplicação de algoritmos de análise de imagem baseados na morfologia matemática, para detectar de uma forma automática, algumas estruturas da superfície de Vénus.

Key-words: *Image analysis, Venus, Geological structures*

Abstract

The present work is focused on the importance of image analysis on automatic recognition of geological structures on planetary surfaces. Some examples of image analysis algorithms based on mathematical morphology to automatically detect some structures on Venus surface are shown.

Introdução

Compreender os planetas telúricos e as luas do nosso Sistema Solar é crucial para a compreender como a Terra se formou e em que direcção irá evoluir. Cada planeta telúrico tem a sua própria história e perceber a natureza e o tempo dos processos geológicos é importante para perceber o seu interior e superfície (Solomon, 2006). Este conhecimento revela-se também essencial para compreender quais as forças que criaram a Terra e que continuam a agir. Contudo, os geólogos planetários não podem actuar como geólogos de campo, tendo que recorrer à interpretação da informação obtida por sistemas de detecção remota e estabelecer comparação com os fenómenos terrestres, mais facilmente acessíveis. Por outras palavras, o estudo de estruturas geológicas de superfícies planetárias, bem como a da sua génese, está

fortemente baseado na análise de análogos terrestres, tendo por base o pressuposto que estruturas e paisagens similares terão essencialmente a mesma origem.

Nas últimas décadas, novas missões com instrumentos de alta precisão têm visitado os planetas telúricos e adquirido colecções de dados que têm que ser processados e interpretados para que se possa compreender as similaridades e discrepâncias entre planetas. Tradicionalmente a análise de superfícies planetárias baseia-se na interpretação de imagens de detecção remota, processo moroso e sujeito ao “olhar experiente” do analisador. A única excepção é a Terra, em que têm sido desenvolvidas e implementadas técnicas de processamento de imagens com aplicações em várias áreas de investigação, sendo validadas com trabalhos de campo e integradas com outros níveis de informação, recorrendo a Sistemas de Informação Geográfica. Nos últimos anos, baseados em modelos conceptuais de processamento de imagens da Terra, algumas técnicas têm sido desenvolvidas e aplicadas a imagens planetárias, para identificar e caracterizar estruturas comuns tais como terrenos poligonais (Pina *et al.*, 2010; Saraiva *et al.*, 2009), falhas e grabens (Alves *et al.*, 2008; Barata *et al.*, 2009), crateras de impacto e mantos de dejectão (Bandeira *et al.*, 2007; Barata *et al.*, 2010) e campos de dunas (Bandeira *et al.*, 2009, Saraiva *et al.*, 2004).

Análise de imagem

O desenvolvimento de técnicas computacionais permitiu a consolidação da análise de imagem como uma teoria fundamental que está interessada no aspecto espacial dos objectos em estudo, quaisquer que eles sejam (Serra, 1982). E essa teoria diz-se quantitativa não só por extrair algo que se torna acessível à medida, mas também por lidar com imagens digitais, ou seja, com imagens discretas constituídas por elementos bem identificados espectral e espacialmente. Quer isto dizer que o recurso da análise de imagem em geologia permite não só o reconhecimento automático de estruturas geológicas e a caracterização quantitativa destes fenómenos (parâmetros de forma, sinuosidade, comprimento, anisotropias, entre outros), como também gerar modelos quantitativos e integrá-los com outro tipo de informação.

São vários os métodos de análise de imagem e atendendo a que uma explicação detalhada das diferentes abordagens não se insere no âmbito deste trabalho, serão apenas referidos de uma forma sucinta. Assim, os métodos lineares são reversíveis e baseiam-se na utilização de operadores

lineares, derivando da teoria de processamento de sinal, filtragem linear (convolução), análise de Fourier. Já os métodos de análise e tratamento de dados recorrem a descritores numéricos susceptíveis de serem agrupados, a métodos estatísticos multivariados (análise em componentes principais, análise factorial de correspondências, análise grupal) de forma a estabelecer uma taxinomia de imagens. Os métodos sintácticos baseiam-se na decomposição da imagem num conjunto de primitivas com significado (discos, segmentos de recta, arcos de contorno), associando regras gramaticais e relações estruturais à sua sucessão. Por último, os métodos morfológicos derivam da teoria de morfologia matemática, introduzida por Matheron e Serra em 1964, que por sua vez se baseia, entre outras, na teoria de conjuntos, e consistem em transformações sequenciais e irreversíveis de imagem, que levam a uma individualização de estruturas filtradas sequencialmente.

Apresentam-se em seguida exemplos de análise de imagem baseada em transformações morfológicas, como objectivo detectar de uma forma automática, estruturas geológicas na superfície planetária de Vénus.

Exemplos de aplicação a Vénus.

A superfície de Vénus começou a ser sistematicamente observada e visitada na década de sessenta do século passado, quer a partir de observações terrestres, quer a partir de missões espaciais. No entanto, só em 1990, com a missão Magalhães, é que se obteve uma cobertura global do planeta, com resolução suficiente para permitir inferências geológicas. Esta missão permitiu obter imagens de radar com diferentes resoluções espaciais, para além de dados de gravimetria e altimetria.

A superfície de Vénus é jovem, com poucas crateras de impacto, composta por vastas planícies cobertas de lava, devido aos seus vulcões (alguns com caldeiras gigantescas, da ordem dos 100km de diâmetro) e montanhas deformadas por actividade geológica. As estruturas tectónicas mais abundantes em Vénus são as *wrinkle ridges*, estruturas morfológicamente complexas, lineares a sinuosas, resultantes de processos de tensão compressiva, associados a dobramentos e fracturação com encurtamento crustal. Existem ainda estruturas únicas, provavelmente devido a processos de deformação da crosta intensivos, como as *tesserae*, *coronae* e *aracnóides*.

Algoritmos baseados em transformações morfológicas têm vindo a ser desenvolvidos, de forma a reconhecer automaticamente algumas destas estruturas. As figuras seguintes Ilustram exemplos da aplicação destes

algoritmos às imagens Magalhães de Vénus. Na Figura 1 pode-se observar a imagem original, que abrange uma planície típica de Vénus, onde estão presentes *wrinkle ridges* e respectivo resultado automático da sua detecção pode ser observado na Figura 2. As direcções principais encontram-se representadas na rosa de direcções da Figura 3.

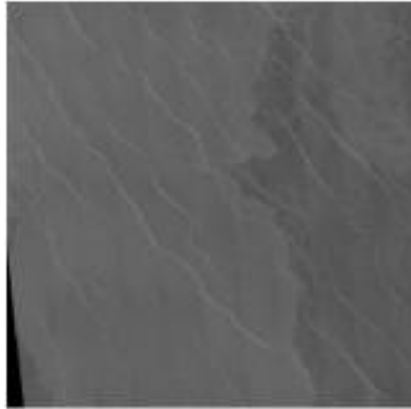


Figura 1. a) Imagem SAR da missão Magalhães de Rusalka Planitia (C1-MIDR.00N180, *framelet* 19).

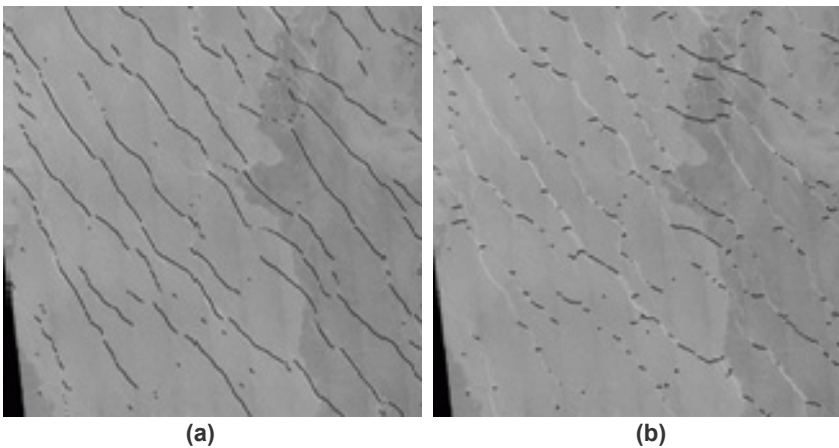


Figura 2. a) *Wrinkle ridges* nas direcção: 135°; b) *Wrinkle ridges* na direcção 0°.

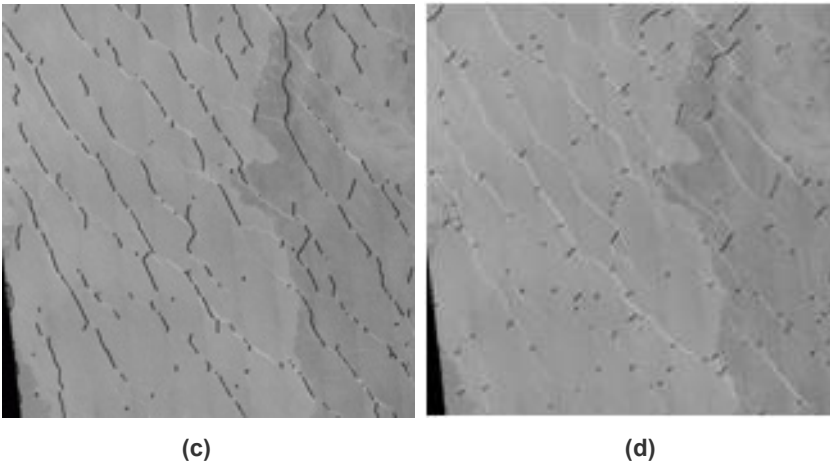


Figura 2 (cont.). c) *Wrinkle ridges* na direcção 90° e d) *Wrinkle ridges* na direcção 45°.

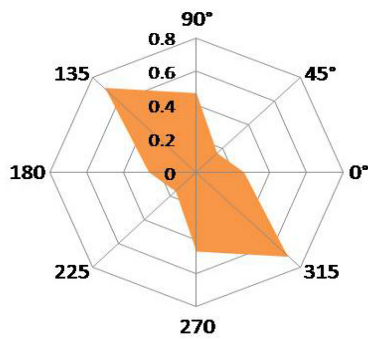


Figura 3. Rosa de direcções obtidas para a imagem de Rusalka Planitia.

Um outro exemplo de algoritmos de detecção automática está ilustrado na próxima figura (4), onde foi identificada uma cratera e os seus depósitos de ejeção.

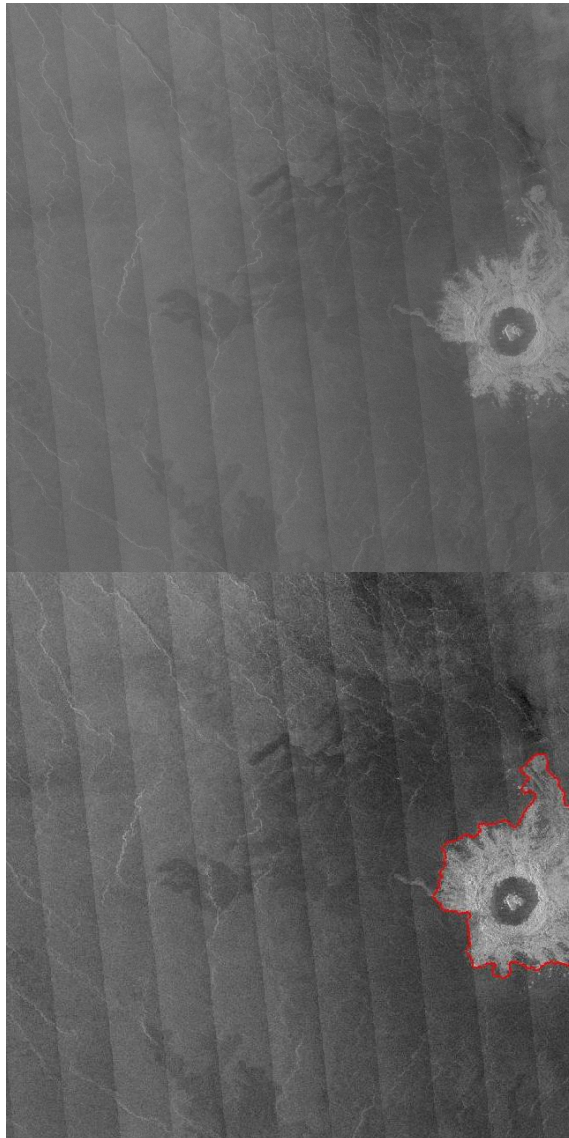


Figura 4. Imagem Magalhães (C1-MIDR.00N180, *framelet* 24) de *Atla Regio*, *Guinevere Planitia*. A imagem mostra a cratera *Fossey* com depósitos de ejeção; b) detecção automática da cratera *Fossey* e os seus depósitos de ejeção.

Por último, um exemplo da identificação automática de *tesserae* está representado na Figura 5.

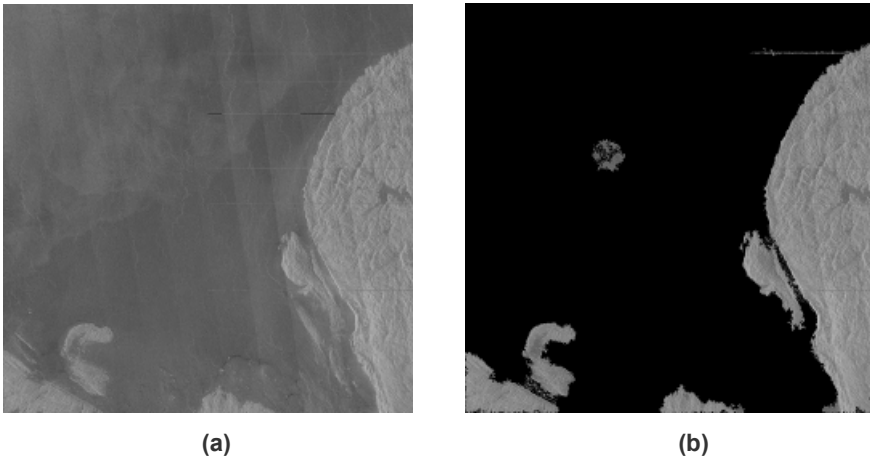


Figura 5. Imagem Magalhães C1 (a), com a identificação automática de *tesserae* (b).

Conclusão

A análise de imagem, teoria que engloba diversas abordagens e técnicas, assume um papel primordial no reconhecimento automático de estruturas geológicas de superfícies planetárias, como se pode constatar pelos exemplos apresentados. Esta teoria apresenta a grande vantagem de poder ser aplicada a qualquer imagem de detecção remota. Salienta-se ainda que o reconhecimento automático de estruturas geológicas permite quantificar as suas características, tal como efectuar de uma forma mais expedita a cartografia geológica.

Bibliografia

- Alves E. I., Barata M. T., Vaz D. A., Pereira L. C. G., Baptista A. R., Chorro M. J. (2008) - Martian Tectonics, Water and Life. Lorenzo A. Costas (eds.), Planet Mars Research Focus. Nova Science Publishers, Hauppauge NY; 44pp.
- Bandeira I., Saraiva J., Pina P. (2007) - Impact Crater Recognition on Mars based on probability volume created by template matching. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing; 45, 4008-4015.
- Bandeira I. Marques J. e Pina (2009) - Automatic delimitation of regions with aeolian features on Mars. Lunar and Planetary Science XXXX, Abs # 1025, Lunar and Planetary Institute, Houston, USA.
- Barata M. T., Alves E. I., Vaz D. (2009) - Automatic Extraction of Wrinkle Ridges in Venus Magellan Imagery. Lunar and Planetary Science XXXX, Abs #1025, Lunar and Planetary Institute, Houston, USA.
- Barata M. T., Pina P., Saraiva J., Alves E. I. (2010) - Extraction of craters and eject from Venus SAR imagery. Lunar and Planetary Science XXXXI, Abs # 1412, Lunar and Planetary Institute, Houston, USA.

- Pina P., Vieira G., Christiansen H. H., Barata M. T., Saraiva J., Bandeira L., Lira C. (2010) - Analysis of polygonal terrains on Mars based on Svalbard analogues. Lunar and Planetary Science XXXXI, Abs # 1372, Lunar and Planetary Institute, Houston, USA.
- Saraiva J., Bandeira L., Antunes J., Pina P., Barata T. (2009) - Polygonal terrains on Mars. Finisterra, XLIV, 87, 71- 80.
- Saraiva J., Pina P., Barata T. (2004) - Automatic recognition of aeolian ripples on Mars. in Lunar and Planetary Science XXXV, Abs #1621, 2 pp, CD-ROM, Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA.
- Serra J., (1982) - Image Analysis and Mathematical Morphology - Vol. I, Academic Press, London: 610 p.
- Solomon, S. C. (2006) - Tectonics on the terrestrial planets. Philadelphia Annual Meeting, paper nº 32-7.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Modelação análoga de um episódio da Geologia de Portugal

Edite Bolacha¹; Helena Moita de Deus¹; Rui Dias^{3,4}; Paulo Fonseca^{1,2}

¹LabGExp- Laboratório de Geologia Experimental do Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, PORTUGAL; ebolacha@fc.ul.pt, hagmdd@gmail.com

²Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, PORTUGAL, pefonseca@fc.ul.pt

³Departamento de Geociências e Laboratório de Investigação de Rochas Industriais e Ornamentais da Universidade de Évora, PORTUGAL.

⁴Centro de Geofísica de Évora, PORTUGAL, rdias@uevora.pt.

Palavras-chave: Modelação análoga, Geologia de Portugal, Zona Sul Portuguesa, Ensino da geologia

Resumo

A relação entre o que se observa no campo e o que se tenta reconstituir através da modelação análoga é uma tarefa antiga na construção do conhecimento geológico, que foi sendo aperfeiçoada desde há dois séculos até hoje. Por esta, e outras razões que apontamos, ela revela-se também importante como estratégia e metodologia em qualquer nível de Ensino (formal e não formal) da Geologia, permitindo reconstituir fenómenos e processos humanamente inacessíveis no Tempo e no Espaço, só inferidos a partir das estruturas e materiais geológicos. Propomos apresentar alguns (dos) resultados preliminares de experiências de modelação análoga na formação de cadeias de montanhas sob influência da subducção susceptíveis de serem utilizadas na Divulgação e no Ensino da Geologia. Estas experiências têm como finalidade a interpretação da formação e evolução, durante o Paleozóico superior, de um importante sector de uma zona paleogeográfica do território português – a Zona Sul Portuguesa. Nos trabalhos desenvolvidos testaram-se alguns parâmetros que influenciam o tipo de estruturas associadas a evolução dos prismas acrecionários, tais como o tipo de materiais, o ângulo de inclinação de parte da cadeia já formada ou a pressão litostática. A observação e compreensão das estruturas observadas no campo e a sua relação com o fenómeno a outra escala -a formação da cadeia de montanhas-, é algo que pode ser realizado por meio da modelação análoga, interrelacionando processos e estruturas que se desenvolvem ao mesmo tempo em escalas de observação distintas.

Key-words: *Analogue modelling, Geology of Portugal, South Portuguese Zone, Geology teaching*

Abstract

Establishing relations between what is observed in the field and what can be modelled, in an analogue fashion, in the laboratory, is a practice long applied in the construction of geologic knowledge. This methodology has been developed for the past two hundred years and, lately, it has evolved significantly. For this, and several other reasons, it is believed that analogue modelling could and should be used as a teaching strategy, in the field of Geology, whether it is used in a formal or informal setting. This teaching tool enhances the need to discuss time and space scales, as these issues become part of the discussion about the models limitations. Most of the time, in the field, the true dimension of these two variables can only be inferred from the geologic materials or phenomena under investigation. Early results obtained from analogue modelling of mountain formation, with subduction, are presented here. All these experiments are applicable to several school degrees, as well as in informal teaching environments. The objective behind these activities is to model the genesis and evolution, during the Upper Paleozoic, of an important sector of a portuguese paleogeographic area, called the "South Portuguese Zone". These experiments study several variables that influence the generation and evolution of an accretionary wedge, such as the nature of the materials, the angle of a pre-existing mountain range and the lithostatic pressure. Observing and understanding geological structures in the field, and establishing relations between them and the same phenomenon, at a different scale, is something that can be done through analogue modelling. This happens when connections are made between processes and structures that develop simultaneously, at distinct scales of observation.

Introdução

Saber Geologia ou Geociências, neste início de século é, não só, se algum dia foi, conhecer e classificar minerais, rochas e fósseis, mas algo muito mais exigente, essencialmente no que respeita aos Processos Geológicos. A Geologia é, hoje, uma ciência central e sintética (Frodeman, 2001), que congrega e interrelaciona as mais variadas áreas do conhecimento. Para além das múltiplas Geociências que se afirmaram e foram ramificando depois da Teoria da Tectónica de Placas, nos anos sessenta, outras áreas transversais surgiram, fruto das necessidades da Sociedade. São exemplos recentes a Geologia Forense, a Geologia Médica ou a Geoarqueologia. Hoje, equipas de geólogos de áreas distintas, publicam sistematicamente, artigos em conjunto nas revistas internacionais, com visões integradoras das Geociências. Estabeleceram-se e desenvolveram-se redes de conhecimento intra-, inter- e multidisciplinar para uma maior compreensão da dinâmica e evolução do planeta Terra. Este é abordado como megassistema constituído por diversos subsistemas, em geral, abertos, com capacidade de auto-regulação e evolução, regidos por uma multiplicidade de parâmetros que interactuam e variam ao longo do tempo.

Todavia, sectores da comunicação social e da opinião pública revelam ainda desconhecimento do funcionamento e da complexidade dos sistemas geológicos, caracterizando catástrofes naturais (*e.g.* queda de arribas no litoral algarvio ou derrocadas na ilha da Madeira) de forma linear, com relações causa-efeito simples entre um número muito limitado de variáveis (Herbert, 2006), sem uma visão, necessariamente holística. Subsiste uma visão mecânica da natureza que, tendencialmente, analisa o seu funcionamento como o dos sistemas de engenharia, necessariamente muito mais simples (Hamblin & Christiansen, 1998).

As abordagens sistémicas, evitando visões compartimentadas e muito hierarquizadas (Bolacha & Mateus, 2007), realçam as interacções entre os subsistemas terrestres, entre os diversos processos geológicos, internos e externos, entre os diversos materiais geológicos, incluindo as interacções com componente antropogénica. Por exemplo, o ciclo das rochas é frequentemente abordado nos manuais escolares pela forma tradicional, uniformitarista, em alternativa a uma correcta integração no espaço, realçando as diversas interacções, ocorridas ao longo do tempo (geológico profundo) no contexto da Tectónica de Placas. Os ciclos evolutivos de Wilson integram temporal e espacialmente o ciclo das rochas na referida Teoria global (Dias, 2007; Bolacha, 2008; Nicolas, 1999). Neste contexto, uma abordagem abrangente pode partir de um episódio da Geologia de Portugal, como a formação de montanhas por subducção e colisão dos continentes Avalónia e Ibéria (terrenos já acrecionados), durante o Paleozóico superior (Ribeiro *et al.*, 2007; 2009). Para além de realçar que as rochas/formações rochosas são o resultado directo da dinâmica dos processos geológicos complexos, evidencia que as diversas unidades, actualmente individualizadas no Mapa Geológico de Portugal, não podem ser verdadeiramente compreendidas se desligadas dos processos globais que continuamente ocorrem/ocorreram no nosso planeta.

Contudo, abordagens abrangentes, inter-, trans- ou multidisciplinares não implicam ignorar a própria essência das disciplinas e dos conteúdos (Wheelahan, 2010). Só conhecendo os seus métodos, técnicas e processos de construção do conhecimento, incluindo a sua evolução ao longo do tempo, se entendem as relações com outras áreas. A elaboração de propostas didácticas para qualquer nível de Ensino deve, assim, passar por estas duas vertentes: conteúdos e métodos de construção da Ciência. No caso da Geologia e, particularmente da Tectónica, a seguir à observação no campo, surgiu, em termos históricos, e complementarmente, a modelação análoga como apoio à compreensão dos fenómenos.

O trabalho que adiante se descreve centra-se nesta metodologia e inseriu-se no programa doutoral da primeira autora. Tem como finalidade a planificação de uma unidade didáctica cientificamente fundamentada, aplicável a diversos níveis e ambientes de aprendizagem.

A modelação análoga em Geologia

Os modelos físicos sempre tiveram uma particular importância nas Ciências e, por conseguinte, no Ensino das Ciências. Baseiam-se em teorias e em modelos conceptuais. Tal como as analogias, as imagens e a experimentação (Nersessian, 2008), ajudam os cientistas a construir conceitos e teorias, e a resolver problemas por meio de raciocínios causais. Na Divulgação científica e no Ensino, porque inevitavelmente simplificam a realidade, permitem que a Ciência chegue a quem não possui conhecimentos muito aprofundados. Mas também para os cientificamente letrados seria muito complicado, sem modelos, compreender conceitos tão abstractos como o átomo, a estrutura cristalina ou o sistema solar. Os objectos reais são, em geral, ou muito mais pequenos ou muito maiores, tornando-se essencial a aplicação de escalas para assegurar as proporções entre as grandezas do objecto e do modelo (Hubbert, 1937).

Os modelos científicos, como representações que são da realidade, sofrem modificações/evoluções ao longo do tempo. Estas modificações resultam, em parte, das alterações que vão sendo introduzidas nas teorias, como é o caso da Teoria da Tectónica de Placas. Esta teoria, que inicialmente, considerava as placas como blocos essencialmente rígidos distribuídos numa esfera, considera hoje que a formação e o arrefecimento das placas, assim como a sua subducção, originam forças que provocam a sua deriva e rotura (Anderson, 2006). As placas passaram a ser conceptualizadas como tendo um comportamento não tão rígido como na visão tradicional, encarando-se a possibilidade da deformação não estar condicionada às suas fronteiras mas acontecer também no seu interior (Ribeiro, 2002). Esta ideia de que modelos conceptuais e teorias vão sofrendo modificações ao longo do tempo não é com frequência transmitida por manuais escolares e/ou professores. Com efeito, o elevado poder que os modelos têm de ilustrar, demonstrar e explicar conteúdos científicos, pode ser afectado se não forem acompanhados de uma discussão profunda (fértil) sobre a realidade que pretendem representar, as relações dimensionais entre modelo e objecto, bem como o papel que os modelos têm tido na construção das teorias científicas.

A modelação (em geral) – planeamento e construção de modelos – é uma importante estratégia (e.g. Gilbert, 2004; Nersessian, 2008) na construção do conhecimento, quer para cientistas, quer para quem “apenas” aprende Ciência. Para estes últimos, a modelação é relevante como estratégia de aprendizagem, mas também na promoção do seu maior envolvimento. A modelação ou experimentação análoga em Geociências simula, representa e testa, parâmetros inerentes a fenómenos e processos geológicos, geralmente decorridos em unidades de espaço e de tempo de grandes dimensões. Insere-se na metodologia geológica dada a relevância de se reduzir esses fenómenos, impossíveis de serem presenciados, para escalas da dimensão humana (Bolacha, 2010). Sendo estes fenómenos normalmente inacessíveis e, apenas passíveis de reconstituição através da interpretação das transformações sofridas pelos materiais geológicos (minerais, rochas, fósseis) e da formação e evolução de estruturas (dobras, falhas, clivagem, xistosidade) e, tratando-se a analogia de uma importante base de explicação dos fenómenos, quer na investigação quer no seu ensino (Shumm, 1998; Fonseca *et al.*, 2001; Mateus, 2001; Barreiras *et al.*, 2006a; 2006b; Bolacha *et al.*, 2010), a sua compreensão será facilitada pela modelação análoga. Esta, com apoio ou não da modelação numérica, permite igualmente, fazer previsões sobre a evolução de paisagens e de processos geológicos, contemplando as consequências das intervenções antropogénicas nos sistemas naturais e possível mitigação dos riscos geológicos (Bolacha *et al.*, 2006; 2010). Permite muitas vezes perceber como um dado fenómeno evoluiu num determinado espaço geográfico, ao longo de um certo período de tempo (Bolacha, 2010).

A reconstituição dos fenómenos já decorridos exige a identificação prévia dos diversos parâmetros que os controlaram, as dimensões dos objectos envolvidos, as suas propriedades e a natureza dos materiais geológicos. A partir dos anos 80 do século XX, os modelos à escala tornaram-se numa poderosa ferramenta para o desenvolvimento e entendimento da geometria e da cinemática de estruturas tridimensionais, apesar de não simularem, ou apenas parcialmente, todos os factores que intervêm no fenómeno real (McClay & Bonora, 2001). A experimentação análoga terá, no entanto, surgido muito antes, no início do séc. XIX, “inventada” e desenvolvida por James Hall (Oreskes, 2007; Ranalli, 2001), o primeiro que terá utilizado prensas, mais tarde denominadas “caixas de areia”, utilizadas e, continuamente aperfeiçoadas até aos dias de hoje. Era necessário reconstituir estruturas observadas no campo, para testar hipóteses e estabelecer relações causa-efeito. Do século XIX até hoje, aperfeiçoaram-se mecanismos, procuraram-se e testaram-se materiais tradicionais (e.g.

areia, argila, parafina, plasticina, pós de pedra), fabricaram-se novos materiais (e.g. silicones, microsferas) para simular processos crustais, litosféricos, ou que abrangem a litosfera e a astenosfera (Schellart, 2002). Porém, as desconfianças face a esta metodologia foram persistindo, essencialmente, por duas razões: as rochas são rígidas e coesas ao contrário dos materiais análogos; os fenómenos modelados demoram milhões de anos, enquanto no laboratório demoram horas ou minutos (Hubbert, 1937; Ranalli, 2001). Torna-se essencial aproximar o mais possível a simulação da realidade, ou seja, do fenómeno e objectos reais. Tudo será mais fácil se o fenómeno em causa é visível e está a decorrer, complicando-se no caso de um fenómeno já decorrido, cujas dimensões dos objectos transformados são desconhecidas ou difíceis de estabelecer ou delimitar (Bolacha, 2010).

Apesar das limitações inerentes à modelação análoga em Geologia, a situação torna-se mais favorável quando o objectivo é a sua utilização no Ensino e na Divulgação (Ensino não formal). Com efeito, nestes casos, exige-se uma maior simplificação na abordagem dos processos geológicos, de que resulta uma menor exigência no controlo rigoroso das diversas variáveis envolvidas. O poder de visualização da evolução dos processos, inerente tanto à modelação análoga como à numérica, é uma poderosa mais-valia para a compreensão dos processos reais. Isto não justifica o abandono dos cuidados a ter na forma como os conhecimentos são transmitidos, tendo sempre em conta o nível de conhecimentos do público-alvo. Com este propósito pretende-se evitar a assumpção da ideia que a extrema complexidade dos processos geológicos simulados esteja plenamente representada na modelação análoga.

Enquadramento geológico

Perguntar “porque estão tão deformadas, por dobras e falhas, as rochas do Paleozóico superior que se observam no litoral SW de Portugal (Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina)?” pode ser um ponto de partida para uma abordagem global da História Geológica de uma região do planeta, neste caso, de um pequeno sector da Ibéria. No final do Paleozóico inferior, o Oceano *Rheic* terá entrado em subducção (Ribeiro *et al.*, 2007) levando à colisão, inicialmente das margens continentais, seguida dos sectores mais internos de vários continentes, normalmente resultantes de processos orogénicos anteriores. Do fecho do *Rheic* e dos oceanos com ele relacionados terá resultado a cadeia Varisca. O que se observa no litoral SW português corresponde aos últimos incrementos da orogenia varisca, em que

os materiais, que foram sendo sucessivamente deformados, são o resultado da erosão das zonas mais internas do orógeno.

Os mecanismos que conduzem à formação de dobramentos e falhas em cadeias orogénicas e prismas acrecionários, localizados em limites compressivos de placas, foram considerados análogos a um prisma de solo ou neve pressionado por um bulldozer (Davis *et al.*, 1983). Na realidade, os prismas acrecionários formam-se quando, sedimentos turbidíticos e alguns pelágicos se acumulam numa zona de convergência de placas, não sendo subductados, mas sujeitos a deformação. A forma geral que os prismas adquirem é a de uma cunha, forma que pressupõe o movimento do prisma como um todo, tendo como comportamento o critério de fracturação de Coulomb (*idem*). Pressionado contra uma superfície sob a acção de forças tectónicas, a cadeia deforma-se globalmente através de falhas inversas imbricadas e/ou de deformação interna (Merle, 1998). O ângulo de inclinação da sua superfície é determinado pela interacção entre a resistência ao deslizamento na base e a resistência das rochas constituintes do prisma, aumentando até que o prisma atinja a geometria crítica (Davis *et al.*, 1983). A erosão é também um importante parâmetro pois provoca a transferência do material dentro do prisma (Malavieille, 2010).

No caso do *Flysch* do Baixo Alentejo (normalmente conhecido por Culm), parte do prisma acrecionário da Zona Sul Portuguesa, a deformação foi decrescendo para Sudoeste (Ribeiro & Silva, 1983; Silva, 1989; Fonseca, 1995). Como a subducção, localizada a Norte, foi continuada no tempo, a cadeia já formada foi sendo erodida, originando outros sedimentos que, simultaneamente, foram sendo deformados. Esta deformação progressiva que se desenvolveu, acima de um descolamento basal (Ribeiro *et al.*, 1979; Ribeiro & Silva, 1983), revela-se no conjunto de estruturas espectaculares, que se observam no Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina, imbricadas para Sudoeste.

Metodologia

Os trabalhos preliminares da investigação em curso, cujos resultados aqui se revelam, tiveram como objectivo principal, a procura de materiais análogos e a testagem de diversas variáveis que determinam a evolução e deformação associada a uma cadeia de montanhas durante a colisão continental decorrente da subducção, na perspectiva da sua aplicação em Divulgação e no Ensino. As experiências em curso, com vista à caracterização mais detalhada de alguns dos factores que condicionaram a génese de algumas

das estruturas observadas no litoral SW de Portugal caem, por aquela razão, fora deste âmbito, razão por que não serão aqui abordadas.

O modelo análogo construído (Figura 1) teve por base os equipamentos descritos pela equipa de Montpellier (*e.g.* Malavieille & Trullenque, 2009) e, como fim, interpretar a progressão e evolução da cadeia Varisca na zona referida, assentando não só em argumentos científicos mas, simultaneamente, didácticos (Bolacha, 2010). Os modelos análogos de prismas acrecionários permitem interpretar zonas de instabilidade tectónica e fornecer informação adicional sobre os processos associados e as estruturas tectónicas (Malavieille, 2010). Para além de estudarem o crescimento das cadeias de montanhas associadas a zonas de subducção, podem ainda integrar processos de erosão e sedimentação, permitindo caracterizar o impacto dos processos externos na estrutura e evolução dos prismas acrecionários (*idem*).

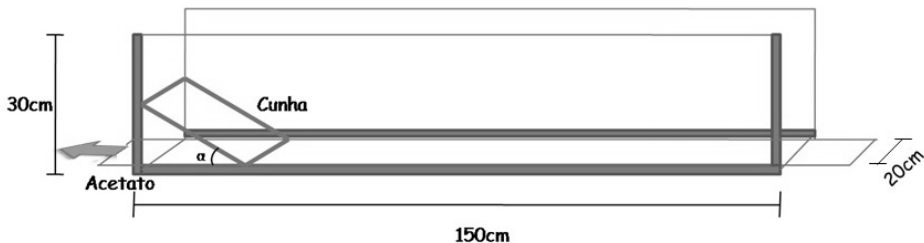


Figura 1. Esquema do modelo construído (adaptado de Bolacha, 2010).

A escala utilizada para estabelecer a dimensão do modelo foi de 1: 100 000 (*i.e.* 1cm:1 km). A cunha em acrílico, não deformável, funciona como análogo da Zona de Ossa Morena ou da zona - interna da cadeia - já formada, opção tomada em diversos estudos desta índole (*e. g.* Davis *et al.*, 1983, Malavieille & Trullenque, 2009) (figura 1). O deslocamento do acetato sob a cunha simula o processo de subducção da Zona Sul Portuguesa sob a de Ossa Morena (*e. g.* Ribeiro *et al.*, 2007), induzindo a deformação da pilha de materiais granulares colocados sobre o acetato, que serão os análogos dos metassedimentos da Zona Sul Portuguesa – Domínio do Pulo do Lobo e do Grupo do *Flysch* do Baixo Alentejo – (Ribeiro *et al.*, 1979; Tomás Oliveira *et al.*, 2006). Este processo de simulação dos processos de subducção, em modelação análoga, tem sido utilizado frequentemente por diversas equipas de cientistas (*e.g.* Davis *et al.*, 1983; MacClay *et al.*, 2004; Malavieille, 2010; Luján *et al.*, 2003).

Partiu-se do pressuposto que, apenas as rochas supracrustais sofreram na realidade deformação, uma opção que se adapta aos objectivos

estabelecidos por diversos motivos: *i*) não se pretendia simular a deformação da placa superior, isto é, da Zona de Ossa Morena; *ii*) a deformação observada nos metassedimentos da Zona Sul Portuguesa tem sido considerada do tipo “thin-skinned” (pelicular ou pele fina, em português), pressupondo a existência de um nível de descolamento em profundidade, sustentado em argumentos estruturais, geofísicos e, também pela inexistência, mesmo nos núcleos dos anticlinais principais, de formações mais antigas que o Devónico superior (*e.g.* Ribeiro *et al.*, 1979; Ribeiro & Silva, 1983; Silva, 1989); *iii*) é uma metodologia consagrada na modelação análoga de situações geológicas semelhantes às existentes no sector em estudo (*e.g.* Kukowski *et al.*, 1994; Malavieille, 2010; Luján *et al.*, 2003).

Como se pretendia simular a deformação em níveis supracrustais, utilizou-se materiais granulares em toda a coluna de sedimentos (materiais análogos). A areia é considerada um material apropriado para simular o comportamento frágil das rochas sedimentares da crosta superior (*e.g.* McClay *et al.*, 2004; Bonini *et al.*, 2000; Malavieille & Trullenque, 2009). Utilizou-se areia de várias cores para evidenciar as estruturas formadas, com grãos de elevado grau de arredondamento, diâmetro inferior a 0.25 mm e ângulo de atrito interno de 30° (referência SIFRACO_NE_34). Para aumentar o contraste visual entre os leitos a deformar, intercalou-se alguns níveis de materiais de granularidade mais fina (gesso e cimento). Esta opção justifica-se dado que as experiências desenvolvidas têm por fim a adaptação, de simulações realizadas em investigação científica, a situações de Divulgação e Ensino. Com efeito, as propriedades físicas de gesso e cimento podem não ser consideradas como análogas das propriedades das rochas da crosta superior que determinam a sua deformação. Por exemplo, o ângulo de atrito interno do gesso e do cimento, medido de forma expedita é de cerca de 45°, o limite máximo do ângulo de atrito interno das rochas sedimentares terrestres, que varia entre os 28° e 45°, quando o dos sedimentos não ultrapassa, em geral, os 30° (Atmaoui, 2005). Para processos compressivos são normalmente, utilizadas areias com ângulos de atrito por volta dos 30° (*e.g.* McClay *et al.*, 2004; Bonini *et al.*, 2000).

No que diz respeito ao deslocamento do acetato, este foi puxado lentamente à mão, assumindo-se, no parâmetro velocidade, uma escala qualitativa, da ordem de alguns centímetros por minuto no modelo, a que corresponderia uma velocidade real de alguns quilómetros por milhão de anos. Em qualquer modelo deste tipo, são menosprezados a flexura da placa e o conseqüente reajuste isostático, bem como o papel dos fluidos na deformação (*e.g.* Luján *et al.*, 2003).

Para averiguar a influência de diversos parâmetros no desenvolvimento da cadeia e estruturas associadas, realizaram-se duas experiências em que se fez variar, o ângulo de inclinação da cunha, a espessura total da multicamada, a relação entre as espessuras dos leitos de areias e pós de pedra, a compactação dos leitos e a ocorrência de erosão induzida.

Os materiais foram polvilhados sobre o acetato, em toda a extensão do modelo, camada sobre camada. Na 1ª experiência foram compactados após cada camada depositada, contrariamente à segunda experiência. Nesta, procedeu-se à erosão das camadas superiores a partir do momento em que a tracção do acetato deixou de produzir encurtamento da multicamada. O ângulo da cunha foi de 20° e a espessura total da multicamada foi de 3 cm, na 1ª experiência. Na 2ª, o ângulo da cunha foi aumentado para 30° e a espessura da multicamada para cerca de 4 cm.

Quanto à alternância dos leitos, na 1ª experiência depositaram-se seis camadas alternadas de pó de pedra (gesso e cimento) e areia, cada uma com cerca de 0,5 cm de espessura, sendo a primeira de areia azul, a segunda de gesso, a terceira de areia vermelha, a quarta de cimento, a quinta de areia azul e a última, de gesso. Na 2ª experiência, as camadas de gesso foram apenas duas e tinham uma espessura praticamente desprezável. A areia de cada camada atingiu uma espessura aproximada de 0,5 cm. Iniciou-se a deposição por duas camadas, uma de areia azul e outra vermelha, a que se seguiu uma de gesso, uma de areia vermelha, uma de areia branca, uma de areia azul. A esta seguiu-se uma de gesso, uma de areia vermelha, terminando com uma de areia azul. A multicamada ficou com uma espessura total aproximada de 4 cm.

Nas duas experiências, como referido anteriormente, o acetato foi puxado muito lentamente, à mão. Os resultados foram sendo registados regularmente, em intervalos de cerca de 10 a 20 cm de encurtamento.

Resultados

Os resultados que a seguir se descrevem foram observados e fotografados nas três dimensões do modelo, de ambos os lados e por cima. Como esta modelação pretende simular a formação de parte da Zona Sul Portuguesa, adoptou-se como orientação do modelo, a análoga do processo de subducção ocorrido. Assim estipulou-se que o sentido da cunha seria o Norte, enquanto o oposto, que representaria a zona externa da cadeia, o Sul. Por esta razão, as imagens obtidas estão referenciadas com a direcção Norte-Sul.

1ª Experiência

Iniciado o encurtamento da pilha de areias e pós, formou-se uma estrutura em anticlinal junto à cunha e falhas inversas e dobramentos com vergência para Sul, considerando o processo real e as coordenadas actuais (Figura 2.A). Formaram-se falhas nos pós, e dobramentos nas areias (Figura 2.B). À medida que novos incrementos de encurtamento foram sendo induzidos, a deformação progredia por aumento da deformação nas estruturas já formadas, com o espessamento das charneiras das dobras (areias) e, conseqüente laminação das camadas de pós, provocando ruptura nos pós, cavalgamentos e *piggy backs* à superfície (Figura 2.B). No final do encurtamento, o prisma apresentava socalcos, da zona externa para a interna (Figura 2.C). Nas zonas mais internas observava-se uma mistura de materiais, inicialmente pertencentes a distintos "andares estruturais", reveladora de uma "longa história" de deformação. A "cadeia" final apresentava homogeneidade estrutural e imbricação das estruturas para Sul (Bolacha, 2010).

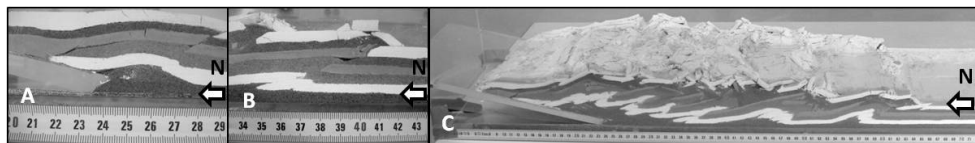


Figura 2. Primeira experiência. A - primeiro incremento com formação de anticlinal e falha. B - segundo incremento com aumento do rejeito nos cavalgamentos e formação de *piggy backs* à superfície. C - Prisma final com estruturação imbricada para Sul.

2ª Experiência

A deformação iniciou-se, de forma muito insípida, junto à cunha com uma pequena dobra, progredindo de seguida para Sul através de dobras apertadas (Figura 3.A). Nos incrementos seguintes, formaram-se “dobras em caixa” com *kinks* associados, vergentes em sentido oposto ao da deformação inicial. Estas zonas ficaram separadas por zonas menos deformadas. As dobras vergentes para Sul apresentavam maior inclinação dos seus planos axiais (Figura 3.B).

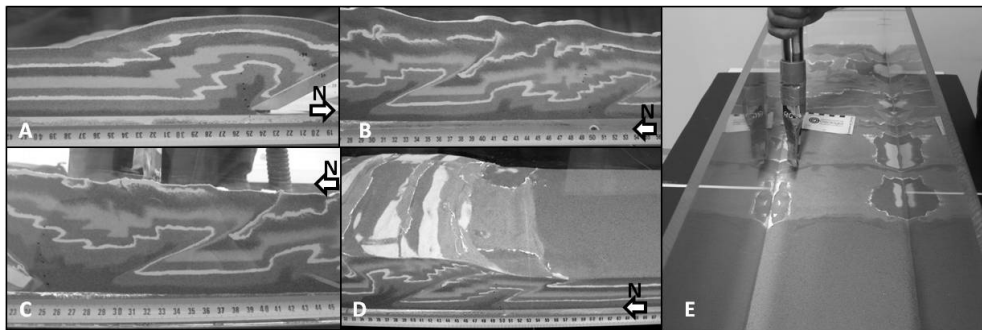


Figura 3. Segunda experiência. A – Início da deformação. B - Estádio final de deformação antes da erosão. C - Prisma erodido. D - Cavalgamentos formados após erosão e retoma do encurtamento. E- Erosão induzida.

As falhas eram visíveis apenas à superfície - ruptura superficial – com umas intersectando outras. O avanço do prisma produziu-se também por estiramento (no sentido de diminuição de espessura) das camadas, particularmente nos flancos inversos das dobras (Bolacha, 2010).

O encurtamento deu-se por terminado perto dos 50 cm (38.5%), restando uma área de cerca de 23 cm de comprimento não deformada (sensivelmente semelhante ao que acontecera na 1ª experiência). Seguiu-se a erosão induzida por aspiração (Figura 3. E), diminuindo a inclinação da superfície do prisma (Malavieille, 2010). O reinício da tracção do acetato suscitou o reatar do encurtamento, realizado principalmente à custa da ruptura dos flancos curtos, de duas grandes dobras, já laminados, levando à formação de dois carreamentos com alguma expressão à escala do modelo (Figuras 3. C e D).

Interpretação de resultados

Em comum, nas duas experiências, a evolução do prisma deu-se à custa da deformação interna – fracturação e dobramentos - até atingir uma geometria crítica, determinante para o bloqueio do encurtamento, i.e. a impossibilidade do prosseguimento da deformação à custa da tracção do acetato.

O tipo de deformação interna depende de factores como a resistência dos materiais que, por sua vez, é influenciada por características intrínsecas como as suas densidade e coesão; mas também de factores como a pressão litostática (espessura da coluna de sedimentos) e a pressão dos fluidos (negligenciada neste tipo de modelação). A coesão depende do ângulo de atrito interno das partículas, por sua vez, variável com o grau de arredondamento dos grãos, compactação e densidade dos materiais. Assim,

o tipo de estruturas formadas entre as duas experiências variou essencialmente, com os materiais utilizados – pós de pedra ou areias – a pressão litostática, influenciada pela altura da coluna e pelo grau de compactação dos materiais, bem como a inclinação da cunha. A heterogeneidade vertical de padrões estruturais, mais evidente na 2ª experiência, terá dependido da pressão litostática mas, essencialmente, da inclinação da cunha. Este parâmetro parece ser determinante para a formação de prismas mono ou bivergentes, influenciando a formação de dobras em ambos os sentidos, os cavalgamentos e retrocavalgamentos, confirmada, por exemplo, pelos resultados de Bonini *et al.* (1999). Na 1ª experiência, com uma inclinação da cunha claramente inferior ao ângulo de atrito das areias, formou-se um prisma monovergente, enquanto na 2ª experiência, com ângulo de inclinação da cunha semelhante ao do ângulo de atrito interno das areias, formou-se um prisma bivergente, com uma zona central, tipo *pop-up*, separando as duas orientações do prisma.

A erosão produzida artificialmente na 2ª experiência, terá tido o efeito de alívio litostático, facilitando o retomar do encurtamento, a ruptura e a formação de alguns cavalgamentos (Bolacha, 2010). Na realidade, processos internos e externos são simultâneos, o que torna a formação e evolução da cadeia dependente da transferência de materiais da própria cadeia, produzida por erosão e sedimentação.

Conclusões

A modelação análoga é uma metodologia que permite a compreensão e estudo de diversos processos geológicos a diversas escalas e graus de complexidade.

Os prismas produzidos e estruturas associadas, nas experiências descritas, permitiram aferir o tipo de materiais que deve ser utilizado neste tipo de modelação, para que se produzam estruturas semelhantes às observadas no campo. Confirma-se que existe um conjunto muito variado de factores que influencia os resultados e que pode ser associado e estudado em cada experiência. A interacção, entre a Tectónica (incluindo a subducção) e a Geodinâmica Externa, determina, como esperado (Graveleau & Dominguez, 2008), estruturas e relevos, ideia que deve ser transmitida a alunos de qualquer nível de ensino de modo a colocar em destaque a ideia de um planeta que vai evoluindo pelo contributo de diversos parâmetros e processos.

Por fim, o aperfeiçoamento do modelo e a testagem de outras variáveis, ou alterações nas já testadas, pode vir a dar alguns contributos

para a compreensão de diversos aspectos da formação e evolução de parte da Zona Sul Portuguesa, cujos resultados virão a ser oportunamente revelados.

Nota: Pretende-se deste modo homenagear o Professor Manuel Maria Godinho, particularmente as suas qualidades humanas, científicas e pedagógicas, que o tornaram uma referência para muitos alunos (incluindo a primeira autora deste trabalho) do Ramo Científico da Licenciatura em Geologia da Universidade de Coimbra.

Agradecimentos

Este trabalho beneficiou da bolsa de doutoramento SFRH/BD/43297/2008 atribuída pela FCT. Agradece-se à professora Conceição Freitas o espaço para o funcionamento do LabGExp.

Bibliografia

- Allègre, C. (1999) - *L'écume de la Terre*. Fayard.
- Anderson, D. L. (2006) - Plate Tectonics; the general theory: Complex Earth is simpler than you think. Geological Society of America. In Manduca, C. A. & Mogk, D. W. eds. *Earth and Mind: How Geologist Think and Learn about the Earth*: Geological Society of America. Special Paper; 413, 29-38.
- Atmaoui, N. (2005) - *Development of Pull-Apart Basins and Associated Structures By The Riedel Shear Mechanism: Insight From Scaled Clay Analogue Models*. (Tese de Doutoramento). Der Fakultät für Geowissenschaften der Ruhr-Universität Bochum.
- Barreiras, S., Silva, H., Vasconcelos, C., Fonseca, P. E. (2006a) - *Tectónica Experimental: actividades de simulación – Ponencias, conferencias y talleres del XIV Simposio sobre Enseñanza de la Geología, Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*; 14 (1), 82-85. (Barcelona, Espanha).
- Barreiras, S., Vasconcelos, C., Fonseca, P. E. (2006b) - *La Tectónica Experimental en la Enseñanza de la Geología: importancia de los diarios de clase en la reflexión-acción*. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*; 13 (2), 146-155. (Barcelona, Espanha - <http://www.aepect.org/revista/13-2.htm>).
- Bolacha, E. (2008) - *Elementos sobre Epistemologia da Geologia: uma contribuição no Ano Internacional do Planeta Terra*. *E-Terra*; 6 (2), 16 p. http://e-terra.geopor.pt/eng/index_en1.html (17-11-2010).
- Bolacha, E. (2010) - *Modelação Análoga da Zona Sul Portuguesa e Aplicações Didácticas*. Seminário de Pós-Graduação II (relatório não publicado). Departamento de Geologia da FCUL.
- Bolacha, E., Mateus, A. (2007) - *Novos curricula de Geologia no Ensino Secundário português: contributos da Associação Portuguesa de Geólogos*. *Geonovas*; 21, 75-86.
- Bolacha, E., Moita de Deus, H. A., Caranova, R., Silva, S., Costa, A. M., Vicente, J., Fonseca, P. E. (2006) - *Uma Experiência na Formação de Professores: Modelação Analógica de Fenómenos Geológicos – A Geologia no Laboratório*. In *Geonovas*; 20, 33-56.
- Bolacha, E., Moita de Deus, H., Fonseca, P. E. (2010) - *Modelação Análoga: Actividades práticas de Geologia em sala de aula*. In J. Neiva, A. Ribeiro, Victor, L.; Noronha, F. & Ramalho, M.

- (Coord.), Ciências Geológicas – Ensino e Investigação e sua História, Lisboa; Volume I, APG, 563-572.
- Bonini, M., Sokoutis, D., Talbot, C., Bocaletti, M. (1999) - Indenter growth in analogue models of Alpine-type deformation. *Tectonics*; 18 (1), 119-128.
- Bonini, M., Sokoutis, D., Mulugeta, G., Katrivanos, E. (2000) - Modelling hanging wall accommodation above rigid thrust ramps. *Journal of Structural Geology*; 22, 1165-1179.
- Davis, D., Suppe, J.; Dahlen, F. A. (1983) - Mechanics of Fold-and-Thrust Belts and Accretionary Wedges. In *Journal of Geophysical Research*; 88 (B2), 1153-1172.
- Dias, R. (2007) - Evolução, Portugal de Antes da História, Associação Centro Ciência Viva de Estremoz, Estremoz.
- Fonseca, P. E. (1995) - Estudo da Sutura Varisca no SW ibérico nas regiões de Serpa-Beja-Torrão e Alvito-Viana do Alentejo. Tese de Doutoramento, Departamento de Geologia, FCUL.
- Fonseca, P. E., Ribeiro, L. P., Caranova, R.; Filipe, P. (2001) - Experimentación analógica sobre el desarrollo de un diapiro y la deformación producida en las rocas encajantes. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*; vol. 9.3, 270-276.
- Frodeman, R. (2001) - A Epistemologia das Geociências, In: Marques, L. & Praia, J. (Eds.), *Geociências nos Currículos dos Ensinos Básico e Secundário*. Departamento de Didáctica e Tecnologia Educativa, Universidade de Aveiro, 39-57.
- Gilbert, J. (2004) - Models and Modelling: Routes to More authentic Science Education. *International Journal of Science and Mathematics Education*; 2, 115-130.
- Graveleau, F. & Dominguez, S. (2008) - Analogue modelling of the interaction between tectonics, erosion and sedimentation in foreland thrust belts. *C. R. Geoscience*; 34, 324-333.
- Hamblin, W., Christiansen, E. (1998) - *Earth's Dynamics Systems*, Prentice Hall.
- Herbert, B. (2006) - Student understanding of complex earth systems. In Manduca, C.A. & Mogk, D. W. eds. *Earth and Mind: How Geologists Think and Learn about the Earth*: Geological Society of America, Special Paper; 413, 95-104.
- Hubbert, M. K. (1937) - Theory of scale models as applied to the study of geological structures. *Bull. Geol. Soc. Am*; 48, 1459-1520.
- Luján, M., Storti, F., Balanyá, J-C., Crespo-Blanc, A., Rossetti, F. (2003) - Role of décollement material with different rheological properties in the structure of Aljibe thrust imbricate (Flysch Trough, Gibraltar Arc): an analogue modelling approach. *Journal of Structural Geology*; 25, 867-881.
- Kukowski, N., Huene, R., Malavieille, J., Lallemand, S. (1994) - Sediment accretion against a buttress beneath the Peruvian continental margin at 12 ° S as simulated with sandbox modeling. *Geol Rundsch*; 83, 822-831.
- Malavieille, J. (2010) - Impact or erosion, sedimentation, and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges: Analog models and case studies. *GSA Today*; 20(1): 4 – 10.
- Malavieille, J., Trullenque, G. (2009) - Consequences of continental subduction on forearc basin and accretionary wedge deformation in SE Taiwan: Insights from analogue modelling, *Tectonophysics*; 466, 377-394.
- Mateus, A. (2001) - Perspectivas actuais da Geologia; sua importância educativa. in *O Ensino Experimental das Ciências – (Re)pensar o Ensino das Ciências III*. Ministério da Educação, 107-128.
- McClay, K., Bonora, M. (2001) - Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *AAPG Bulletin*; 85 (2), 233–260.
- McClay, K., Whitehouse, P., Dooley, T., Richards, M. (2004) - 3D evolution of fold and thrust belts formed by oblique convergence. *Elsevier- Marine and Petroleum Geology*; 21, 857–877.
- Merle, O. (1998) - *Emplacements Mechanisms of Nappes and Thrusts Sheets*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Nersessian, N. (2008) - *Creating Scientific Concepts*. MIT Press.
- Nicolas, A. (1999) - *Les montagnes sous la mer*. Editions BRGM, Orléans.
- Oreskes, N. (2007) - Science without laws. *Model Systems, Cases, Exemplary Narratives*, In Creager, A.; Lunbeck, E.; Wise, M. N. Duke University Press. Durham, London.

- Ranalli, G. (2001) - Experimental tectonics: from Sir James Hall to the present. *Journal of Geodynamics*; 32, 65-76.
- Ribeiro, A. (2002) - *Soft Plates and Impact Tectonics*. Springer.
- Ribeiro, A., Silva, J. B. (1983) - Structure of the South Portuguese Zone, In Lemos de Sousa, J. & Oliveira, J. T. (Eds.) *The Carboniferous of Portugal*. *Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal*; 29, 83-89.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., Moitinho de Almeida, F., Carvalho, D., Monteiro, J. H. (1979) - *Introduction à la Géologie Générale du Portugal*. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Dias, R., Mateus, A., Pereira, E., Ribeiro, L., Fonseca, P., Araújo, A., Oliveira, T., Jomão, J., Chaminé, H., Coke, C., Pedro, J. (2007) - Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26, TC6009.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Fonseca, P. E., Araújo, A., Pedro, J., Mateus, A., Tassinari, C., Machado, G., Jesus, A. (2009) - Variscan Ophiolite Belts in the Ossa-Morena Zone (Southwest Iberia): geological characterization and geodynamic significance. IGCP Project 497, *Ocean Rheid Special Volume, Gondwana Research*, doi: 10.1016/j.gr.2009.09.005.
- Schellart, W. (2002) - Analogue modelling of large-scale tectonic processes: an introduction, In (Eds.) Schellart, W. e Passchier, C. W. *Analogue modelling of large-scale tectonic processes*. *Journal of Virtual Explorer*, 7. <http://virtualexplorer.com.au/article/2002/45/analogue-modelling-of-tectonic-processes> (08-10-2010).
- Shumm, S. (1998) - *To interpret the Earth: Ten Ways to be Wrong*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Silva, J. B. (1989) - *Estrutura de uma Geotransversal da Faixa Piritosa: zona do Vale do Guadiana. Estudo da Tectónica pelicular em regime de deformação não coaxial*. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa.
- Tomás Oliveira, J., Relvas, J., Pereira, Z., Matos, J., Rosa, C., Rosa, D., Munhá, J., Jorge, R., Pinto, A. (2006) - O Complexo Vulcano-Sedimentar da Faixa Piritosa: Estratigrafia, Vulcanismo, Mineralizações Associadas e Evolução Tectono-Estratigráfica no Contexto da Zona Sul Portuguesa, In Dias, R.; Araújo, A.; Terrinha, P.; Kullberg, J. C. (Eds.). *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*, Univ. Évora. Évora, 207-244.
- Wheelahan, L. (2010) - *Why Knowledge Matters in Curriculum. A social realist argument*. Routledge, New York.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

A colecção clássica de Lenoir & Forster e o ensino de Paleontologia e Antropologia na Faculdade de Filosofia da Universidade de Coimbra

Pedro Callapez^{1,2}; Maria Augusta Rocha³; Daniela Abrantes¹; Ana Santos³; Ricardo Paredes⁴; Júlio Marques¹

¹Departamento de Ciências da Terra / Museu Mineralógico e Geológico da Univ. Coimbra, PORTUGAL.

²Centro de Geofísica da Univ. Coimbra, PORTUGAL. E-mail: callapez@dct.uc.pt.

³Departamento de Ciência da Vida e CIAS – Centro de Investigação em Antropologia e Saúde da Univ. Coimbra, PORTUGAL.

⁴IMAR – CMA. Instituto do Mar, Universidade de Coimbra, PORTUGAL.

Palavras-chave: Lenoir & Forster, Colecção de fósseis, Antropologia e Paleontologia, Universidade de Coimbra

Resumo

Após a reestruturação da Faculdade de Filosofia da Universidade de Coimbra, em 1885, procedeu-se à compra de numerosas colecções e modelos didácticos, com vista a apetrechar o ensino prático e experimental das novas cadeiras. Neste contexto, o papel desempenhado pelo Prof. Bernardino Machado foi assaz relevante, ao ocupar-se da Secção de Antropologia e da nova disciplina da área. Entre as colecções didácticas então adquiridas a *comptoirs* europeus, damos conta neste estudo, da de Lenoir & Forster de Viena de Áustria, composta por 543 caixas com fósseis estratigráficos usados no ensino da história da Terra e da escala dos tempos geológicos. Esta colecção foi adquirida em 1892 e possui exemplares de excelente qualidade. É, também, bastante diversificada quanto a grupos taxonómicos, idades e jazidas, constituindo um excelente exemplo de um período em que muitos dos sítios clássicos europeus, hoje destruídos ou condicionados a recolhas, forneciam grande quantidade de fósseis para fins museológicos, educativos e de coleccionismo.

Key-words: *Lenoir & Forster, Collection of fossils, Anthropology and Palaeontology, University of Coimbra*

Abstract

After the reformation of the Faculty of Philosophy from the University of Coimbra, in 1885, were purchased many collections and didactic models to supply the practical and experimental teaching of the new disciplines, with new and more adequate materials. The role played by Prof. Bernardino Machado was very relevant within this context, when he occupied the head of the Section of Anthropology and the new discipline of the area. Among the didactic collections purchased just then to European comptoirs, the present

study reveals that of Lenoir & Forster from Vienna, which is a set of 543 boxes with stratigraphic fossils used in practical teaching of Earth history and geologic time scale. This collection purchased in 1892 has specimens of excellent quality and is highly diversified in taxonomic groups, ages and fossil sites. It is also an exceptional example of a historic period, when many of the classic sites of the European geological record that have been destroyed or restricted to field sampling in modern times, were yet fully accessible and yielded large numbers of fossil specimens to be used for museologic, educative or collectible purposes.

Introdução

As últimas décadas do século XIX significaram para Portugal um tempo de difícil adaptação à nova ordem imperialista europeia, alicerçada que estava na competição entre as grandes potências da época – Inglaterra, França e Alemanha – e num acentuado progresso científico e industrial, cujos ecos se faziam sentir de modo crescente nos meios políticos e académicos nacionais. Não obstante as primeiras reformas e tentativas de mitigar o atraso estrutural do país face a congéneres europeus remontem aos alvares do Fontismo, a sua progressão não será estranha às apreensões geradas pelo conflito com a Inglaterra e conseqüente risco de alienação de territórios ultramarinos da Coroa portuguesa, mas também face ao rearmamento crescente desses estados, que acabaria por culminar no hediondo conflito de 1914-18, para o qual o país se veria arrastado.

Perante um cenário político e socioeconómico desta natureza, a reformulação do ensino superior, politécnico, comercial e industrial, no sentido de o capacitar para a formação de mais e melhores quadros nas diversas áreas das ciências, com destaque para as aplicadas e de utilidade mais imediatista, sobreveio como uma necessidade perfeitamente natural e sentida. A reorganização de 1885 da Universidade de Coimbra enquadra-se nesta evolução de final de século, ao modernizar as antigas estruturas da Faculdade de Filosofia, algumas delas ainda arreigadas a resquícios de cunho pombalino. Não obstante, no dizer de Ferreira (1998), a Faculdade de Coimbra «*assumiu exclusivamente o ensino das ciências básicas*», num contexto europeu em que o ensino profissional se relegava para a competência de escolas profissionais.

Desta forma, ao ser modernizado o bacharelato em Filosofia Natural e autonomizadas as quatro secções do Museu de História Natural, com a criação de novas disciplinas mais consentâneas com as necessidades da época, a estruturação do ensino terá sido consideravelmente melhorada, permitindo a formação de quadros mais bem capacitados para a

modernidade do conhecimento e derradeiros progressos das ciências naturais, antropológicas e arqueológicas do país. Recorde-se que, por esta data, já se perfaziam duas décadas de trabalho infatigável na III Comissão Geológica do Reino, sob a batuta de Carlos Ribeiro, Nery Delgado e diversos outros colaboradores de reconhecida competência (Antunes, 1986). A primeira carta geológica de Portugal havia sido impressa em 1876 e o reconhecimento estratigráfico do Reino, com as suas principais formações, fósseis e idades, já fora, em grande parte efectuado. Em simultâneo, os estudos de Arqueologia e de Antropologia pré-histórica eram uma prática corrente na década de 80 do século XIX, motivando questões polémicas e apaixonantes como a do homem do Terciário, a realização de congressos internacionais em território luso e a criação de salas de exposição com acervos consideráveis (Pires, 2009). Refira-se, como exemplo marcante, o *IXe Congrès International d'Anthropologie & d'Archéologie Préhistorique*, em 1880.

Ao serem implementadas as novas cadeiras de Botânica, Zoologia, Mineralogia, Geologia e Antropologia, estas últimas, respectivamente, da responsabilidade dos professores Gonsalves Guimarães e Bernardino Machado, tornou-se necessário reapetrechar progressivamente os laboratórios práticos adstritos às respectivas secções, com recurso a novos equipamentos e colecções práticas que permitissem ao aluno uma experimentação mais efectiva dos ensinamentos teóricos em que as cátedras se fundamentavam. Na realidade, o manuseamento de espécimes e de modelos em colecções osteológicas, mineralógicas, litológicas ou paleontológicas com carácter didáctico, ainda hoje é uma prática indispensável para quem cursa o ensino liceal ou disciplinas básicas em cursos de ciências. Só desta forma é possível ao discente ultrapassar a abstracção inerente às imagens impressas nos manuais, ou expostas pelo professor no decurso da aula teórica, bem como diferentes concepções alternativas daí resultantes.

Após a reestruturação de 1885 e não olvidando a influência plausível de Bernardino Machado na tutela, a Faculdade de Filosofia promoveu a compra de diversas destas colecções didácticas a *comptoirs* europeus, naquilo que constituiu um enriquecimento considerável dos acervos de algumas secções do Museu de História Natural. Esta orientação terá continuado durante mais de duas décadas, até para além da reforma de 1911. No que concerne à Geologia, a dimensão destas colecções atinge algumas dezenas de milhar de espécimes e de modelos, repartidos entre amostras e lâminas delgadas de rochas, minerais, fósseis, modelos cristalográficos e modelos estratigráficos e tectónicos. Infelizmente, a sua utilização ao longo

de várias décadas produziu desgastes consideráveis, perdendo-se ou deteriorando-se parte dos espécimes e rótulos originais. Este percurso rico em práticas lectivas, mas nem sempre revestido do cuidado que os acervos mereceriam, redundou numa imagem presente que não reflecte na sua plenitude o que teria sido a qualidade, ou mesmo, a sumptuosidade desses acervos. Não obstante, o fim primordial a que se destinavam terá sido alcançado, ao terem contribuído de modo significativo para a formação de várias gerações de bacharéis e de licenciados pela Universidade de Coimbra.

Nas páginas seguintes daremos notícia de uma destas colecções didácticas, adquirida ao *comptoir* Lenoir & Forster de Viena de Áustria, uma das mais reputadas casas europeias do ramo na época (Figura 1). Para além da sua excelente qualidade, esta colecção sobressai dos restantes acervos contemporâneos do antigo Museu de História Natural por ser a mais bem conservada das de Paleontologia. Com efeito, dado ter sido adstrita à então Secção de Antropologia, não terá sido tão manipulada como as demais, permanecendo separada dos restantes acervos paleontológicos existentes na sua congénere de Mineralogia e Geologia. No seu todo, faculta-nos também uma visão preciosa do que seriam as colecções de âmbito escolar desta natureza comercializadas há mais de um século, quando as jazidas clássicas europeias ainda se encontravam relativamente intactas e acessíveis aos colectores da época.



Figura 1. Stand do *comptoir* Lenoir & Forster na Exposição de Filadélfia, no centenário da independência dos Estados Unidos (1876) [fonte: *Print and Picture Collection, Free Library of Philadelphia*].

Aquisição e uso da colecção na Secção de Antropologia

A colecção paleontológica com 543 espécies, animais e vegetais, adquirida a Lenoir & Forster deu entrada no Gabinete do Museu da Universidade, em Janeiro de 1892. O processo de compra foi parcialmente reconstruído através das “Folhas de despesa” do Gabinete de Antropologia da Faculdade de Filosofia. Assim, em Dezembro de 1891 foi registado o valor de 2\$205 reis para pagamento do transporte e direitos a Henry Burnay & C^a, empresa sediada em Lisboa. No mês seguinte é referida a despesa de \$290 reis a Valentim J. Rodrigues, de Coimbra, pelo transporte de dois caixotes com a colecção, desde a Estação do Caminho de Ferro desta cidade (Figura 2A). Apenas na “Folha de despesa” de Fevereiro surge a indicação da factura relativa à colecção no valor de 626 florins (Figura 2B). Ao câmbio corrente, correspondeu a 313\$000 reis, aos quais se acrescentaram 1\$565 com despesas de transferência. Dadas as alterações cambiais entre Fevereiro e Março de 1892 o custo efectivo em moeda Portuguesa sofreu novo acréscimo de 4\$240 reis. Contabilizadas as parcelas, o total dispendido na compra desta colecção foi de 321\$350 reis.

A aquisição desta colecção de fósseis integra-se num cariz de aulas teórico-práticas, tão caro a Bernardino Machado e lema do estudo de Filosofia Natural (Machado, 1904-05). Assim sendo, e complementando a preocupação constante de actualização e qualidade do ensino de Antropologia, foram adquiridos diversos materiais didácticos, como fósseis e instrumentos, entre outros (Rocha, 1995), de modo a munir o docente da 8^a cadeira do curso de Filosofia. Esta disciplina nasce a partir de dois projectos de lei apresentados pelo debutante deputado e professor Bernardino Machado, na sessão de 8 de Junho de 1883, na Câmara dos Deputados. Permitiu-se, desta forma, a criação da cadeira de *Antropologia, paleontologia humana e archeologia prehistorica* (Carta de Lei em 2 de Julho de 1885) na Faculdade de Filosofia da Universidade de Coimbra (Areia e Rocha, 1985).

Bernardino Luís Machado Guimarães (Figura 3) nasceu no Rio de Janeiro em 1851, tendo-se matriculado na Universidade de Coimbra em 1866, primeiro na Faculdade de Matemática e no ano seguinte na Faculdade de Filosofia. Da sua vasta carreira (Areia e Rocha, 1985; Rosa, 2006; Areia, 2007) referem-se alguns momentos académicos e políticos. Obteve o grau de doutor em Filosofia em 1876 e três anos depois foi nomeado lente catedrático da mesma Faculdade. Desde 1877 foi professor substituto, dando aulas de Física e de Agricultura Geral, Zootecnia, Economia Rural. Durante as legislaturas de 1890 a 1895 representou os estabelecimentos científicos superiores. Em 1898 presidiu também à Sociedade de Antropologia de

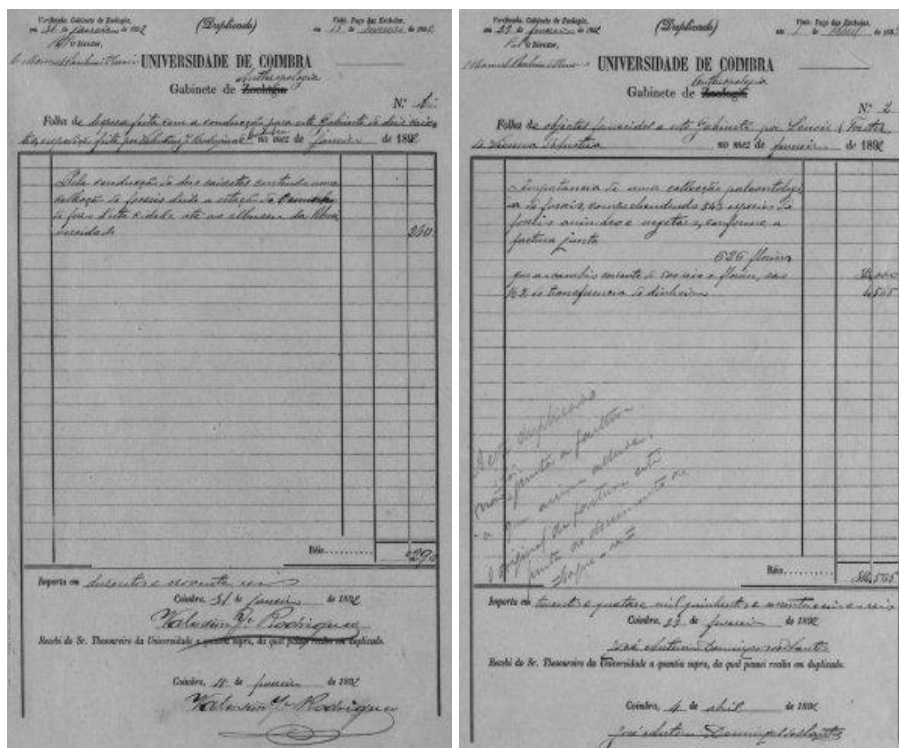


Figura 2. Folhas de despesa do Gabinete de Antropologia da Univ. Coimbra pelo transporte a Valentim J. Rodrigues (A) e pela colecção a Lenoir & Forster (B). [fonte: Arquivo do Mus. Lab. Antropológico].

Coimbra. Em 1907 pediu a exoneração de professor da Universidade, publicada em 25 de Abril. Foi eleito Presidente da República entre 1915-17 e 1925-1926, tendo sido exilado após cada um dos mandatos. Em 1929 foi eleito para o Supremo Conselho do Grau 33 da Maçonaria. Tomou desde cedo posição pública contra a ditadura e viveu exilado em Espanha e França, até 1940. Faleceu com 93 anos no Porto e o funeral em realizou-se Vila Nova de Famalicão, sob grande repressão policial. Setenta anos após a sua exoneração da Universidade recebeu postumamente a Ordem da Liberdade.



Figura 3. Bernardino Machado com os discípulos - Sidónio Pais (aluno fardado) - no curso de Antropologia de 1896-97 leccionado no Colégio de Jesus [fonte: *Arquivo do Mus. Lab. Antropológico*].

Apesar de Bernardino Machado ser o professor titular da cadeira, nem sempre a regeu (Figura 4), dada a sua intensa actividade nomeadamente como conselheiro e par do Reino (Areia e Rocha, 1985). O ensino desta nova disciplina criou um tal crédito que numerosos alunos de outras faculdades a frequentavam voluntariamente (Sueiro, 1944).

Itinerários da colecção

Esta colecção integrou durante 116 anos (de 1892 a 2008) os acervos que acompanharam a disciplina da Antropologia no périplo pelas suas diferentes instalações. De 1892 a 1911 permaneceu no Colégio de Jesus, onde estava instalada a Faculdade de Filosofia Natural; posteriormente, foi transferida para o Colégio de São Boaventura, após a reforma e a adaptação da sua bela arquitectura (Figuras 5A e B); em 1949, em consequência das obras da cidade universitária, mudou, provisoriamente, para o Colégio de S. Bento, mas o provisório tornou-se definitivo, e as instalações foram inauguradas oficialmente em Outubro de 1966 (Areia *et al.*, 1991). Em 2008, foi estabelecido um protocolo em que o Museu Antropológico cedeu, a título de depósito, a colecção de Lenoir & Forster ao Museu Mineralógico e

Geológico. Apesar de tantas “residências” a colecção regressou bem preservada ao edifício onde chegou, em 1892, vinda de Viena de Áustria.

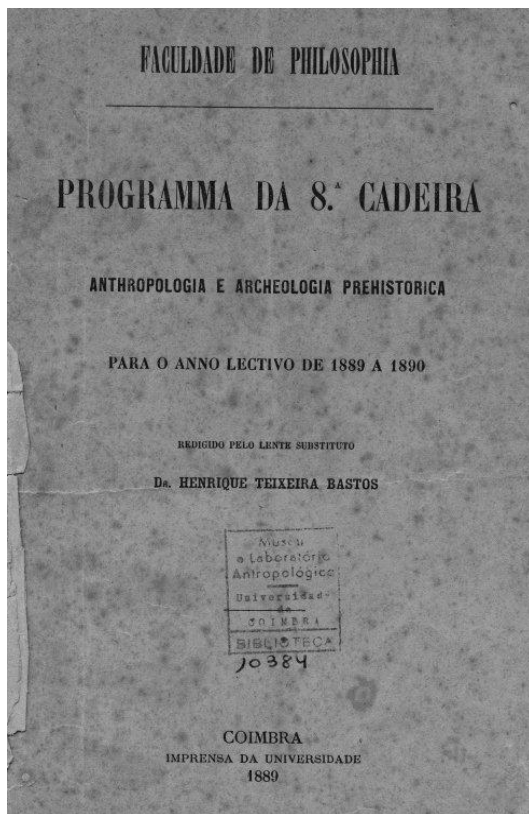


Figura 4. Frontispício do Programa da 8ª cadeira da Faculdade de Filosofia (Bastos, 1889). [fonte: Arquivo do Mus. Lab. Antropológico].

Conteúdo e significado

A colecção de Lenoir & Forster encontra-se exposta, ainda que em parte, numa das salas de exibição permanente do Museu Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, no primeiro piso do edifício do Colégio de Jesus, conservando-se o restante acervo na reserva e sendo tudo parte do espólio recém-cedido à Fundação do Museu da Ciência.

O inventário da colecção compreende 543 itens ordenados sequencialmente (Anexo 1), cada qual designando um ou mais espécimes numerados e conservados em caixas quadradas de polietileno transparente com revestimento de algodão colorido, acompanhadas do respectivo rótulo timbrado e manuscrito da casa de Viena de Áustria (Figura 6). Este acervo encontrava-se guardado, originalmente, em caixas de cartão azul, também

elas conservadas em reserva. Dos 543 itens verifica-se a falta de 14, embora devam corresponder a alguns espécimes com numeração e rótulo extraviados, que acompanham os restantes.



Figura 5. Colégio de S. Boaventura, fachada principal (A) voltada para a Rua Larga e Sala de Exposição de material (B). [fonte: Arquivo do Mus. Lab. Antropológico].

Em conjunto com a colecção de Lenoir & Forster coexistem, também, diversos fósseis com rótulos do *comptoirs* Éloffé Boubée e Émile Deyrolle (fils) de Paris. Este facto realça que as aquisições da então Secção de Antropologia se terão também alargado a casas francesas, à semelhança do que se verificou na Secção de Mineralogia e Geologia e noutras instituições portuguesas contemporâneas, ligadas ao ensino prático das ciências.

De entre vários aspectos que denotam a excelente qualidade da colecção e o elevado grau de profissionalismo e de conhecimento subjacente à sua preparação, destacamos o cuidado tido no preenchimento dos rótulos quanto à sistematização e taxonomia dos fósseis, classificados até à espécie salvo raras excepções e acompanhados do nome abreviado do Autor, ao bom gosto da época. O mesmo sucede com as indicações de jazida e de localidade, assim como com o posicionamento estratigráfico, embora a caligrafia manuscrita nem sempre seja de fácil leitura. É interessante notar que muitas destas jazidas e localidades correspondem a sítios clássicos da Geologia europeia, norte-americana e norte-africana, em muitos casos inacessíveis ou fortemente condicionados a recolhas actuais, facto que contribui para incrementar ainda mais a relevância do conjunto.

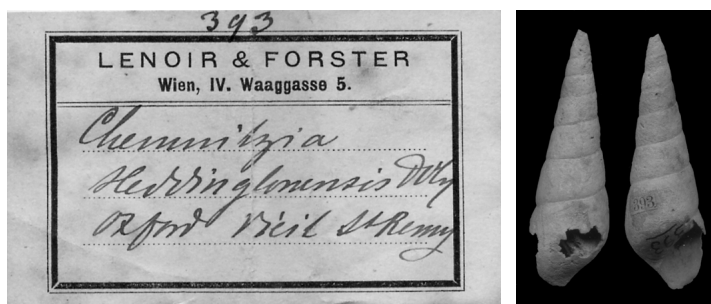


Figura 6. Rótulo e respectivo espécime da colecção didáctica de Paleontologia adquirida ao *comptoir* Lenoir & Forster de Viena de Áustria [Fonte: reserva do Mus. Miner. Geológico].

Uma apreciação da qualidade dos exemplares, tendo em conta os fins a que se destinava este tipo de colecções – de coleccionismo, científico e, sobretudo, didáctico – sugere que terá existido uma preocupação constante em evitar a inserção de moldes e de espécimes deficientemente preservados, em detrimento de conchas, tecas e outras partes esqueléticas ornamentadas que caracterizassem adequadamente os grupos taxonómicos maiores, bem como os géneros e espécies em causa. Numa acepção de coleccionismo, a maioria destes exemplares podem ser considerados como de âmbito comum. No entanto, e muito possivelmente, como parte de estratégia adoptada para tornar as colecções mais vendáveis e apetecíveis a instituições universitárias e a coleccionadores particulares, foram adicionados vários espécimes de grande qualidade, com destaque para crustáceos, peixes e outros vertebrados meso-cenozóicos. Esta estratégia ainda hoje se aplica em colecções modernas: importa mostrar ao aluno uma panorâmica das formas mais comuns e representativas do registo fóssil, mas com recurso à inclusão de

exemplares raros ou de aparência espectacular, para que este se motive e se sensibilize para a Paleontologia.

O carácter didáctico mais do que evidente e a consequente organização da colecção nesse sentido, estão bem patentes na diversidade taxonómica, temporal e geográfica do conjunto. Nesse sentido, foram representados quase todos os principais grupos de macrofósseis característicos ou de fácies do Fanerozóico, numa proporção que se aproxima da sua abundância relativa no registo fóssil (Figura 7). É interessante notar, todavia, a inexistência de exemplares de graptolites, um dos mais importantes grupos das paleofaunas do Paleozóico inferior, assim como a escassez de amostras com microfósseis e icnofósseis.

A numeração original da colecção também segue o ordenamento sistemático dos diferentes grupos representados. Tem início com fósseis vegetais, segue um modelo de organização dos principais filões de invertebrados, no sentido de uma complexidade anatómica crescente e termina com amostras de protocordados e de vertebrados.

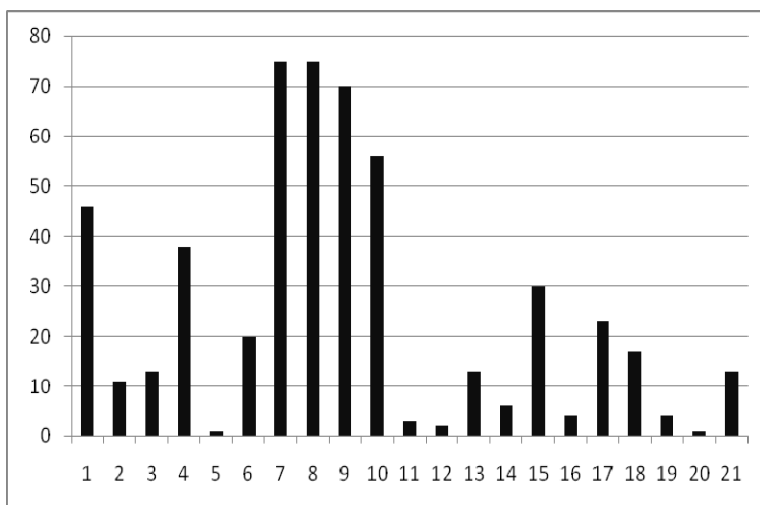


Figura 7. Abundância relativa dos grupos taxonómicos por número de registo. Em abcissas: 1-Vegetais fósseis; 2-Foraminíferos; 3-Poríferos; 4-Corais; 5-Conulários; 6-Briozoários; 7- Braquiópodes; 8 – Bivalves; 9- Gastrópodes; 10- Cefalópodes; 11- Escafópodes; 12 – Rostroconchias e tentaculites; 13 – Crinóides; 14 – Blastóides, cistóides e asterozoos; 15 – Equinóides; 16 – Anelídeos; 17- Trilobites; 18- Crustáceos; 19- Insectos; 20- Protocordados; 21- Vertebrados. Em ordenadas: número de itens.

Quanto à repartição estratigráfica e idades relativas representadas, estão presentes quase todos os períodos e épocas do Eon Fanerozóico, com excepção do Ordovícico e do Paleocénico (Figura 8). Não obstante, há que

ter em conta o carácter bastante mais tardio da definição e reconhecimento do Período Ordovícico na estratigrafia clássica europeia, pelo que a indicação de Silúrico em parte dos rótulos analisados corresponderá, na realidade, a uma idade ordovícica dos fósseis e jazidas em causa. É interessante notar, também, a prevalência de amostras com espécies de idade triássica e jurássica, facto que se poderá explicar por se estar na presença de um *comptoir* austríaco, mais vocacionado para recolhas e trocas dentro do espaço germanófilo, onde estes andares se encontram bem representados. Independentemente destas valências, parece-nos indubitável que a colecção em si providencia a um observador não especializado, uma visão bastante precisa do universo dos fósseis estratigráficos e da biodiversidade dos últimos 500 milhões de anos.

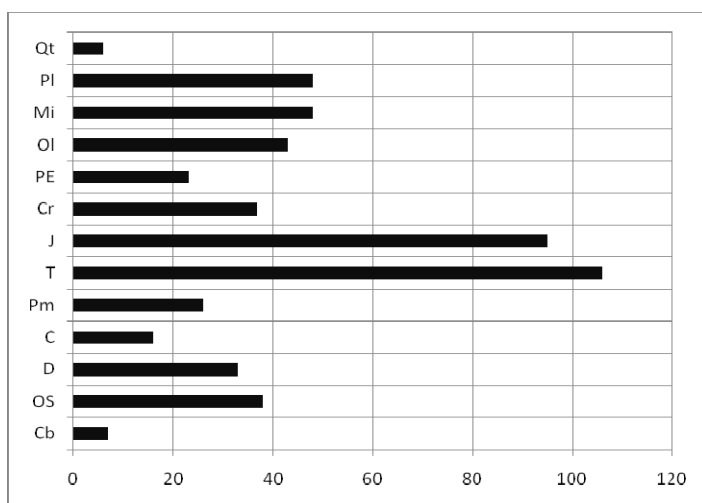


Figura 8. Representatividade relativa por número de registo dos diferentes Períodos e Épocas da escala cronoestratigráfica (Éon Fanerozóico). Cb- Câmbrico; S- Ordovícico e Silúrico; D- Devónico; C – Carbonífero; Pm- Pérmico; T- Triássico; J- Jurássico; Cr- Cretácico; PE – Paleocénico e Eocénico; Ol – Oligocénico; Mi – Miocénico; Pl – Pliocénico; Qt – Quaternário (Plistocénico e Holocénico).

Um último ponto forte da colecção em estudo reside na sua diversidade geográfica. Não obstante a maioria das amostras ser de proveniência europeia, existem outras de origem norte-americana ou norte-africana, estas últimas de provável procedência francesa (Figura 9). O número de países ou possessões representadas nos locais de recolha é de 17, sendo que mais de 50% dos espécimes provém de jazidas da Alemanha, França e Reino Unido. Seguem-se, ainda com frequência relativa considerável, a Itália, a República Checa, a Áustria, os Estados Unidos da

América e a Suécia. Em proporções bem mais reduzidas estão ainda presentes diversos países europeus, incluindo a Bélgica, a Polónia, a Suíça e a Rússia. Esta diversidade apreciável reflecte o bom conhecimento que já existia, à época, da estratigrafia europeia, sendo que a Alemanha, França e Reino Unido eram, muito naturalmente, os berços da Geohistória e, como tal, os países com maior concentração de jazidas clássicas, profusamente descritas e exploradas pelas respectivas *écoles*.

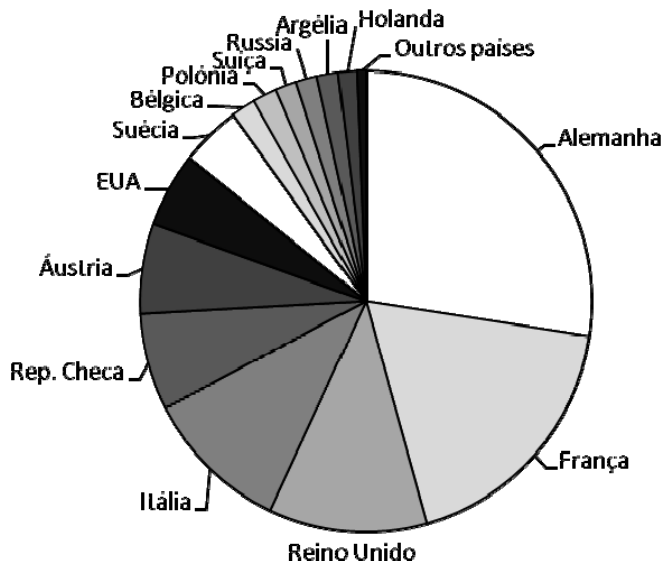


Figura 9. Representatividade relativa por número de registo dos diferentes países referentes aos locais de recolha da colecção Lenoir & Forster.

No extremo oposto é interessante constatar a ausência total de espécimes dos países ibéricos, numa época em que a Comissão Geológica de Portugal já havia dado a conhecer muito do que existe na Estratigrafia e Paleontologia portuguesas. Esta lacuna poderá ser entendida, ainda que em parte, por um completo afastamento do país dos circuitos comerciais e de coleccionismo de fósseis, ao tempo já tão em voga noutros países da Europa ocidental. Na realidade, a grande diversidade geográfica subjacente à colecção constitui um excelente testemunho da extraordinária rede de trocas a que o *comptoir* de Lenoir & Forster teria acesso, capaz de suprir estabelecimentos de ensino e colecções particulares, mas também de enriquecer os acervos dos grandes museus de História Natural da época, ao exemplo do que Mary Anning já fazia quase um século antes, quando em Portugal ainda se filosofava nas entrelinhas das épocas de Buffon e dos sistemas de Werner.

Agradecimentos: Os autores homenageiam através deste trabalho o Prof. Manuel Maria Godinho, recordando vivências e ensinamentos, assim como o contributo precioso que o Cientista infatigável deu ao progresso do conhecimento geológico. Estão, também, gratos à Dra. Aurora Deshauteurs, curadora da imagoteca da Biblioteca de Filadélfia, pela gentileza de autorizar a reprodução da imagem da Figura 1.

Bibliografia

- Antunes, M. T. (1986) - Sobre a história da paleontologia em Portugal. História e Desenvolvimento da Ciência em Portugal, vol. 2. Publicações do II centenário da Academia das Ciências de Lisboa, 773-814.
- Areia, M. L. R. (2007) - Bernardino Machado, Professor de Antropologia. In: Machado, Bernardino. Obras: Ciência (1875-1907). Ribeirão, Edições Húmus, Lda, 39-49.
- Areia, M. L. R. & Rocha, M. A. (1985) - O ensino da Antropologia. In: Cem anos de Antropologia em Coimbra 1885-1985. Coimbra, Museu e Laboratório Antropológico, 13-60.
- Areia, M. L. R.; Rocha, M. A. & Miranda, M. A. (1991) - O Museu e Laboratório Antropológico da Universidade de Coimbra. In: Universidade(s). História. Memória. Perspectivas. Actas do Congresso “História da Universidade” (no 7º Centenário da sua Fundação, 1990). Coimbra, Comissão Organizadora do Congresso “História da Universidade”, 1991, 2, 87-105.
- Bastos, H. Teixeira (1889) - Faculdade de Filosofia: Programa da 8ª cadeira Anthropologia e Archeologia Prehistorica para o anno lectivo de 1889 a 1890. Imprensa da Universidade, Coimbra, 9 p.
- Ferreira, M. R. P. (1998) - 200 anos de Mineralogia e Arte de Minas: desde a Faculdade de Filosofia (1772) até à Faculdade de Ciências e Tecnologia (1972) - FCTUC, Gráfica de Coimbra Ltda., Coimbra, 188 p.
- Fundo Documental: Universidade de Coimbra. SR: Documentos de despesa. Arquivo da Universidade de Coimbra.
- Machado, B. (1904/1905) - A Universidade e a Nação. Oração inaugural do ano lectivo 1904-1905, em 16-10-1904. Anuário da Universidade, p. XXXIV.
- Pires, N. P. (2009) - A coleção de Arqueologia do Museu Geológico. Tese de Mestrado não publicada. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 117 p.
- Rocha, M. A. (1995) - Les collections ostéologiques humaines identifiées du Musée Anthropologique de l'Université de Coimbra. Antropologia Portuguesa; 13, 7-38.
- Rosa, E. M. T. D. M. (2006) - Bernardino Machado [Fotobiografia]. Museu da Presidência da República, Lisboa, 120 p.
- Sueiro, M. A. Barbosa (1944) - Doutor Bernardino Machado (1851-1944). Imprensa Médica; ano X (9), 157-158.
- <http://libwww.library.phila.gov/CenCol/Details.cfm?ItemNo=c021205&sourceURL=cedcpubsrch9.cfm>. [em 20.11.2010]

Anexos

Anexo 1. Elenco taxonómico da colecção de Paleontologia adquirida ao *comptoir* de Lenoir & Forster.

<p>Fósseis vegetais: <i>Acer trilobatum</i>, <i>Dalbergia bella</i>, <i>Sapindus faleifolius</i>, <i>Populus mutabilis</i>, <i>Acer trilobatum</i>, <i>Salix angusta</i>, <i>Quercus elaena</i>, <i>Cinnamomum lanceolatum</i>, <i>Taxodium langsdorfii</i>, <i>Folliculites kaltennordnheimensis</i>, <i>Viburnum dakotense</i>, <i>Betulites vestii</i>, <i>Sphenolepidium kurrianum</i>, <i>Sphenopteris hartlebeni</i>, <i>Codites serpentinus</i>, <i>Fucoides bollensis</i>, <i>Nilssonia acuminata</i>, <i>Zamites disparis</i>, <i>Calamites gumbeli</i>, <i>Pterophyllum jaegeri</i>, <i>Pterophyllum pulchellum</i>, <i>Asterocarpus keriani</i>, <i>Calamites arenaceus</i>, <i>Voltzia heterophylla</i>, <i>Voltzia liebeana</i>, <i>Ullmannia frumentaria</i>, <i>Walehia piriformis</i>, <i>Psaronius cottae</i>, <i>Psaronius helmintholithus</i>, <i>Araucarioxylon saxonicum</i>, <i>Astrophyllites equidetiformis</i>, <i>Pecopteris unita</i>, <i>Annularia longifolia</i>, <i>Pecopteris villosa</i>, <i>Neuropteris hirsuta</i>, <i>Pecopteris arborescens</i>, <i>Pecopteris muricata</i>, <i>Todea lipoldi</i>, <i>Calamites approximatus</i>, <i>Neuropteris gigantea</i>, <i>Astrophyllites equiseliformis</i>, <i>Sphenopseris obtusiloba</i>, <i>Sphenopteris divariata</i>, <i>Sphenopteris fureata</i>, <i>Lonchopteris rugosa</i>, <i>Polytomella crispa</i>, <i>Lithothamnium pliocenicum</i></p>
<p>Foraminíferos: <i>Bulimia echinata</i>, <i>Quinqueloculina rugosa</i>, <i>Vaginalina legumen</i>, <i>Globulina gibba</i>, <i>Orbitoides nummulitica</i>, <i>Nummulites mammilata</i>, <i>Nummulites laevigatus</i>, <i>Siderolites calcitrapoides</i>, <i>Orbitolites socialis</i>, <i>Orbitolina concava</i>, <i>Fusulina cylindrica</i></p>
<p>Espongiários: <i>Coscinopora infundibuliformis</i>, <i>Coeloptychium decimium</i>, <i>Jereica pyriformis</i>, <i>Pachylitodia infundibuliformis</i>, <i>Stauronema carteri</i>, <i>Plocoscyphia fenestrata</i>, <i>Raphidonema faringdonense</i>, <i>Cnemidiastrum goldfussi</i>, <i>Hyalofragos patella</i>, <i>Cypellia rugosa</i>, <i>Tremadictyon reticulatum</i>, <i>Stellispongia glomerata</i>, <i>Corynella quenstedti</i></p>
<p>Corais: <i>Cariophyllia clavus</i>, <i>Flabellum avicula</i>, <i>Oculina crassoramosa</i>, <i>Trochocyathus versicostatus</i>, <i>Balanophyllia sinuata</i>, <i>Plocophyllia flabellata</i>, <i>Heliastrea lucasana</i>, <i>Phyllocoenia irradians</i>, <i>Dendrophyllia cariosa</i>, <i>Diplohelia raristella</i>, <i>Crochocyathus allonensis</i>, <i>Trochosmia cernua</i>, <i>Columnastrea seriata</i>, <i>Agathelia asperella</i>, <i>Thamnastraea procera</i>, <i>Isastraea profunda</i>, <i>Cyclolites macrostoma</i>, <i>Lophomillia cenomana</i>, <i>Cyclolites spinosa</i>, <i>Aspidiscus cristatus</i>, <i>Cyclocyathus fittoni</i>, <i>Stylina limbata</i>, <i>Montlivaltia obconicum</i>, <i>Discocyathus euclesi</i>, <i>Michelinia favosa</i>, <i>Lonsdaleia floriformis</i>, <i>Cyathophyllum helianthoides</i>, <i>Cyathophyllum quadrigeminum</i>, <i>Cystiphyllum lamellosum</i>, <i>Calceola sandalina</i>, <i>Favosites polymorpha</i>, <i>Heliolites porosa</i>, <i>Aulopora repeus</i>, <i>Actinostroma clathratum</i>, <i>Pleurodiction problematicum</i>, <i>Labechia conferta</i>, <i>Heliolites inlerstinctus</i>, <i>Halysites catenularia</i></p>
<p>Conulariídeos: <i>Conularia cristata</i></p>
<p>Briozoários: <i>Cellepora tubigera</i>, <i>Myriozoum truncatum</i>, <i>Cupularia umbellata</i>, <i>Lepralia granulifera</i>, <i>Eschara fascialis</i>, <i>Retecava clathrata</i>, <i>Periopora ligeriensis</i>, <i>Eschara sexangularis</i>, <i>Plethopora pseudotroquata</i>, <i>Sparsicavea dichotoma</i>, <i>Ceriopora polymorpha</i>, <i>Ceriopora polymorpha</i>, <i>Ceriopora radiformis</i>, <i>Acanthocladia anceps</i>, <i>Stenopora columnaris</i>, <i>Chaetetes radians</i>, <i>Monticulipora tumida</i>, <i>Monticulipora fibrosa</i>, <i>Fenestella nobilis</i>, <i>Stellipora autheloidea</i></p>
<p>Braquiópodos: <i>Terebratula ampula</i>, <i>Terebratula sinuosa</i>, <i>Terebratula grandis</i>, <i>Rhynchonella polymorpha</i>, <i>Terebratula obesa</i>, <i>Terebratulina chrysalis</i>, <i>Trigonosemus pectiniformis</i>, <i>Trigonosemus pectitum</i>, <i>Rhynchonella plicatilis</i>, <i>Crania antiqua</i>, <i>Thecidium hieroglyphicum</i>, <i>Megerlea pusulosa</i>, <i>Rhynchonella cuvieri</i>, <i>Terebratula semiglobosa</i>, <i>Terebratula Nerviensis</i>, <i>Terebratulina biauriculata</i>, <i>Terebratula sella</i>, <i>Rhynchonella depressa</i>, <i>Terebratula diphya</i>, <i>Terebratula bisufforcinata</i>, <i>Terebratula insignis</i>, <i>Waldheimia impressa</i>, <i>Rhynchonella caenuosa</i>, <i>Rhynchonella spathica</i>, <i>Megerlea pectunculoides</i>, <i>Waldheimia perovalis</i>, <i>Terebratula sphaeroidalis</i>, <i>Rhynchonella tetraedra</i>, <i>Rhynchonella mimosa</i>, <i>Terebratula subpunctata</i>, <i>Waldheimia resupinata</i>, <i>Waldheimia numismalis</i>, <i>Terebratula pyriformis</i>, <i>Terebratula gregaria</i>, <i>Athyris orycolpos</i>, <i>Koninkina leonbardi</i>, <i>Terebratula angusta</i>, <i>Waldheimia vulgaris</i>, <i>Spiriferina fragilis</i>, <i>Spirifer alata</i>, <i>Strophalosia</i></p>

<p><i>goldfussi</i>, <i>Productus horridus</i>, <i>Spirifer mosquensis</i>, <i>Athyris roysii</i>, <i>Productus pustulosus</i>, <i>Productus semireticulatus</i>, <i>Camarophoria formosa</i>, <i>Stringocephalus burtini</i>, <i>Uncites gryphus</i>, <i>Orthis strialula</i>, <i>Atrypa reticulata</i>, <i>Streplorhynchus umbraculum</i>, <i>Anoplotheca lepida</i>, <i>Retzia ferita</i>, <i>Cyrlina heteroclyta</i>, <i>Spirifer curvatus</i>, <i>Spirifer laevicosta</i>, <i>Spirifer cultrijugatus</i>, <i>Chonetes tenuicostata</i>, <i>Orthis vulvaria</i>, <i>Rensselaeria strigiceps</i>, <i>Strophomena laticosta</i>, <i>Spirifer macropterus</i>, <i>Rhynchonella livonica</i>, <i>Rhynchonella princeps</i>, <i>Pentamerus acutilobatus</i>, <i>Daya navicula</i>, <i>Strophomena euglypha</i>, <i>Leptaena depressa</i>, <i>Spirifera sulcata</i>, <i>Nucleospira pisum</i>, <i>Strioklandinia lirata</i>, <i>Orthis redrus</i>, <i>Lophonema deltoidea</i>, <i>Lingula darisi</i></p>
<p>Moluscos bivalves: <i>Pholas crispata</i>, <i>Saxicava arthica</i>, <i>Mya truncata</i>, <i>Sphaerium solidum</i>, <i>Pisidium amnicum</i>, <i>Pecten Jacobeus</i>, <i>Limopsis auritus</i>, <i>Venus senilis</i>, <i>Astarte fusca</i>, <i>Chama gryphoides</i>, <i>Mactra triangularis</i>, <i>Cytherea affinis</i>, <i>Arca diluvii</i>, <i>Lucina columbella</i>, <i>Crassatella dissita</i>, <i>Pectunculus obovatus</i>, <i>Cyprina aequalis</i>, <i>Perna soldani</i>, <i>Mytilus aquitanicus</i>, <i>Cyrena semistriata</i>, <i>Cardita planicosta</i>, <i>Cardium purulosum</i>, <i>Cytherea semisulcata</i>, <i>Corbis lamellosa</i>, <i>Ostrea bellovacina</i>, <i>Ostrea nicaisei</i>, <i>Ostrea ungulata</i>, <i>Vola quadricostata</i>, <i>Spondylus dutemplei</i>, <i>Cyrena garumnica</i>, <i>Crassatella macrodonta</i>, <i>Radiolites toucasi</i>, <i>Hippurites Toucasi</i>, <i>Hippurites cornuvaccinum</i>, <i>Ostrea hippopodium</i>, <i>Ostrea Matheroniana</i>, <i>Lima texta</i>, <i>Cyprina planata</i>, <i>Pecten acuminatus</i>, <i>Inoceramus sulcatus</i>, <i>Exogyra couloni</i>, <i>Cyrena fasciata</i>, <i>Lucina substriata</i>, <i>Cyrena nuculaeformis</i>, <i>Thracia incerta</i>, <i>Pholadomya decussata</i>, <i>Modiola sowerbyi</i>, <i>Panopaea jurassi</i>, <i>Astarte obliqua</i>, <i>Trigonia costata</i>, <i>Myoconcha liasica</i>, <i>Gryphaea arcuata</i>, <i>Lima gigantea</i>, <i>Avicula contorta</i>, <i>Daonella lomelli</i>, <i>Corbula rosthomi</i>, <i>Myophoria keffersteini</i>, <i>Avicula ?gaea</i>, <i>Megalodon carinthiacum</i>, <i>Gervillia socialis</i>, <i>Lima striata</i>, <i>Myopheria simplex</i>, <i>Avicula speluncaria</i>, <i>Gervillia ceratophaga</i>, <i>Nucula ventricosa</i>, <i>Posidonomya becheri</i>, <i>Cardiola retrostriata</i>, <i>Lucina proavia</i>, <i>Venulites concentricus</i>, <i>Pterinea lineata</i>, <i>Palaeosolen costatus</i>, <i>Valhila explanata</i>, <i>Pterinea retroflexa</i>, <i>Modiolopsis morieri</i>, <i>Corbula infundibulum</i></p>
<p>Moluscos gastrópodes: <i>Trophon clathratus</i>, <i>Buccinum nivosum</i>, <i>Lymnaea palustris</i>, <i>Hyalina cellaria</i>, <i>Murex polymorpha</i>, <i>Fusus longirostris</i>, <i>Nassa clathrata</i>, <i>Triton affine</i>, <i>Cassis saburon</i>, <i>Ranella marginata</i>, <i>Cancellaria lyrata</i>, <i>Columbella nassoides</i>, <i>Mitra scrobiculata</i>, <i>Vermetus intortus</i>, <i>Cypraea sanguinolenta</i>, <i>Ancillaria glandiformis</i>, <i>Conus fuscocingulatus</i>, <i>Turritella triplicata</i>, <i>Terebra pescata</i>, <i>Pleurotoma dimidiata</i>, <i>Cerithium bronni</i>, <i>Natica millepunctata</i>, <i>Paludina naricosa</i>, <i>Helix deflexa</i>, <i>Pleurotoma lelysii</i>, <i>Aporrhais tridactylus</i>, <i>Voluta rathieri</i>, <i>Cerithium plicatum</i>, <i>Rostellaria fissurella</i>, <i>Fusus bulbiformis</i>, <i>Voluta cytherea</i>, <i>Rostellaria columbaria</i>, <i>Cassidaria nodosa</i>, <i>Turritella imbricarária</i>, <i>Turritella coquandi</i>, <i>Actaeonella conica</i>, <i>Cerithium simonyi</i>, <i>Glauconia conoidea</i>, <i>Nerinaea gracilis</i>, <i>Pleurotomaria neptuni</i>, <i>Solarium ornatum</i>, <i>Rostellaria carinata</i>, <i>Nerinea schiosensis</i>, <i>Paludina fluviorum</i>, <i>Pteroceras oceani</i>, <i>Natica turbiniformis</i>, <i>Chemnitzia herringlonensis</i>, <i>Trochus subduplicatus</i>, <i>Pleurotomaria conoidea</i>, <i>Alaria rouboleti</i>, <i>Pleurotomaria amalthei</i>, <i>Chemnitzia aldrovandi</i>, <i>Turbo depressus</i>, <i>Chemnitzia maioroni</i>, <i>Pleurotomaria radians</i>, <i>Chemnitzia alpina</i>, <i>Holopella glacilior</i>, <i>Natica minima</i>, <i>Bellerophon sublaevis</i>, <i>Platyceras aequilateralis</i>, <i>Ampullaria helicoides</i>, <i>Euomphalus latus</i>, <i>Macrocheilus arcuatus</i>, <i>Pleurotomaria daleydensis</i>, <i>Murchisonia verneuili</i>, <i>Capulus priscus</i>, <i>Capulus hercynicus</i>, <i>Eulima spinosa</i>, <i>Platyceras cornutum</i>, <i>Euomphalus discors</i></p>
<p>Moluscos cefalópodes: <i>Baculites ovalis</i>, <i>Scaphites nodosus</i>, <i>Acanthoceras rhotomagensis</i>, <i>Scaphites aequalis</i>, <i>Turrillites costatus</i>, <i>Ammonites interruptus</i>, <i>Ammonites auritus</i>, <i>Hamites attenuatus</i>, <i>Belemnites minimus</i>, <i>Nautilus inaequalis</i>, <i>Ammonites dufrenoyi</i>, <i>Ammonites guettardi</i>, <i>Ammonites deshayesi</i>, <i>Ammonites infundibulum</i>, <i>Crioceras villiersianus</i>, <i>Belemnites dilatatus</i>, <i>Reineckia reineckiana</i>, <i>Phylloceras plychoicum</i>, <i>Perisphinctes polygyratus</i>, <i>Oppelia flexuosa</i>, <i>Aspidoceras perarmatus</i>, <i>Perisphinctes plicatilis</i>, <i>Belemnites giganteus</i>, <i>Peltoceras annularis</i>, <i>Macrocephalites macrocephalus</i>, <i>Parkinsonia parkinsoni</i>, <i>Stephanoceras braikenridgei</i>, <i>Sphaeroceras wrightii</i>, <i>Harpoceras murchisonae</i>, <i>Harpoceras opalinus</i>, <i>Belemnites papillosus</i>, <i>Ammonites nilssoni</i>, <i>Harpoceras radius</i>, <i>Harpoceras bifrons</i>, <i>Amaltheus margaritatus</i>, <i>Aegoceras pettos</i>, <i>Aegoceras raricostatus</i>, <i>Arietites conybeari</i>, <i>Arietites roliformis</i>, <i>Arcestes boeckhi</i>, <i>Arcestes</i></p>

<i>intuslabiatus</i> , <i>Joannites cymbiformis</i> , <i>Cladiscites tornatus</i> , <i>Ceratites nodosus</i> , <i>Orthoceras monoceros</i> , <i>Goniatites oweni</i> , <i>Goniatites sphaericus</i> , <i>Clymenia nudulata</i> , <i>Goniatites retrorsus</i> , <i>Goniatites intumescens</i> , <i>Gyroceras nodosum</i> , <i>Orthoceras crelnum</i> , <i>Orthoceras angulatum</i> , <i>Cyrtoceras thetidis</i> , <i>Goniatites plebeius</i> , <i>Hercoceras mirum</i>
Moluscos escafópodes: <i>Denthalium sexangulum</i> , <i>Dentalium mosae</i> , <i>Dentalium laeve</i>
Outros moluscos: <i>Conocardium arabicum</i> , <i>Tentaculites scalaris</i>
Crinóides: <i>Marsupites ornatus</i> , <i>Eugeniocrinites caryophyllata</i> , <i>Pentacrinus tuberculatus</i> , <i>Apiocrinus mespilliformis</i> , <i>Encrinus lilliformis</i> , <i>Cyathocrinus ramosus</i> , <i>Moscovicrinus multiplex</i> , <i>Batocrinus rotundus</i> , <i>Platycrinus hemisphaericus</i> , <i>Rhodocrinus crenatus</i> , <i>Symbathocrinus tabulatus</i> , <i>Cupressocrinus elongatus</i> , <i>Cyathocrinus goniodactylus</i>
Blastóides e Cistóides: <i>Pentatrematites florealis</i> , <i>Echinospaerites aurantium</i>
Asterozoos e Ofiuróides: <i>Asterias lumbricalis</i> , <i>Ophiura arenacea</i> , <i>Furcaster palaeozoicus</i> , <i>Roemeraster asperula</i>
Equinóides: <i>Eihinolampas kleinii</i> , <i>Conoclypus conoideus</i> , <i>Eohinolampas affinis</i> , <i>Cyphosoma delamarrei</i> , <i>Heterodiadema lybicum</i> , <i>Orthopsis miliaris</i> , <i>Salenia bourgeoisii</i> , <i>Holactypus serialis</i> , <i>Galerites albogalerus</i> , <i>Anachytes ovata</i> , <i>Heterolampas maresi</i> , <i>Calopygus fenestratus</i> , <i>Hemiaster fourneli</i> , <i>Micraster coranguinum</i> , <i>Echinobrissus subsetifensis</i> , <i>Epiaster meridaneus</i> , <i>Holaster subglobosus</i> , <i>Discoidea forgemolli</i> , <i>Holaster laevis</i> , <i>Echinospatangus ricordianus</i> , <i>Heteraster fissoli</i> , <i>Peltastes wrightii</i> , <i>Melaporhinus convexus</i> , <i>Cidaris coronata</i> , <i>Stomechinus bigranularis</i> , <i>Collyrites ringens</i> , <i>Clypeus albus</i> , <i>Pygaster semisulcatus</i> , <i>Eocidaris keyserlingi</i> , <i>Archaeocidaris rossica</i>
Anelídeos: <i>Serpula tuba</i> , <i>Serpula lumbricalis</i> , <i>Serpula gordialis</i> , <i>Spirorbis ammonia</i>
Trilobites: <i>Phillipsia longicornis</i> , <i>Cryphaeus punctatus</i> , <i>Phacops latifrons</i> , <i>Phacops ferdinandi</i> , <i>Cryphaeus laciniatus</i> , <i>Beyrichia bohémica</i> , <i>Bronteus umbellifer</i> , <i>Cheirurus stembergi</i> , <i>Dalmanites caudatus</i> , <i>Proetus elegantulus</i> , <i>Sphaerexochus mirus</i> , <i>Acidaspis mira</i> , <i>Lichas palmata</i> , <i>Cromus beaumonti</i> , <i>Harpes ungula</i> , <i>Dalmanites phillipsi</i> , <i>Trinucleus granatus</i> , <i>Nileus armadillo</i> , <i>Asaphus expansus</i> , <i>Asaphellus humphreyi</i> , <i>Ellipsocephalus hoffi</i> , <i>Arionellus ceticephalus</i> , <i>Agnostus nathorsti</i>
Crustáceos: <i>Beyrichia bohémica</i> , <i>Carcinus wurmlenbergicus</i> , <i>Glyphthyreus wetherelli</i> , <i>Lanthopsis leachi</i> , <i>Lanthopsis kressenbergensis</i> , <i>Hoploparia longimana</i> , <i>Meyeria vectensis</i> , <i>Penreus speciosus</i> , <i>Eryma modesti formis</i> , <i>Acanthocinus augustus</i> , <i>Eryon schuberti</i> , <i>Mecochirus longimanus</i> , <i>Eryon arctiformis</i> , <i>Balanus tintinnabulum</i> , <i>Cypris valdensis</i> , <i>Leperdilia baltica</i> , <i>Aristozoe regina</i>
Insectos: <i>Acanthocinus augustus</i> , <i>Sitona atavina</i> , Diptera [asa], <i>Stenophlebia aequalis</i>
Protocordados: <i>Monoprion priodon</i>
Vertebrados: <i>Otodus appendiculatus</i> , <i>Clupea brevissima</i> , <i>Leptolepis sprattiformis</i> , <i>Palaeoniscus freieslebenensis</i> , <i>Psammodus porosus</i> , <i>Osteolepis microlepidotus</i> , <i>Protiton petrolei</i> , [pena de ave], <i>Hyaena spelaea</i> , <i>Aceratherium (Rhinoceros) incisivum</i> , <i>Prolagus sardus</i> , <i>Oreodon culbertsoni</i> , <i>Caenotherium leptognathum</i> , <i>Palaeotherium curtum</i>
icnofósseis: <i>Spirophyton eifeliense</i> , <i>Planulites ?jameshalli</i>

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

O contributo do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra para os estudos de Paleontologia Africana

Pedro Callapez¹; Celeste Gomes²; Manuel Serrano Pinto³; Fernando Lopes²; Luís Gama Pereira²

¹Departamento de Ciências da Terra e Centro de Geofísica da Universidade de Coimbra, PORTUGAL.
E-mail: callapez@dct.uc.pt

²Departamento de Ciências da Terra e Centro de Geofísica da Universidade de Coimbra, PORTUGAL.

³Departamento de Geociências - GeobioTec da Universidade de Aveiro, PORTUGAL.

Palavras-chave: Universidade de Coimbra, Geologia Africana, Historial de pesquisas, Análise documental

Resumo

O Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, herdeiro da Secção de Mineralogia e Geologia do Museu de História Natural (1885) e, mais tarde, repartido pelas estruturas do Departamento de Ciências da Terra e do Museu Mineralógico e Geológico, desempenhou um papel algo tardio, mas mesmo assim brilhante, no estudo, ensino e divulgação da Paleontologia dos antigos territórios coloniais africanos, prestigiando a Universidade e divulgando uma revista científica própria (*Memórias e Notícias*, desde 1921). Embora existisse a intenção de nutrir o museu com amostras e espécimes africanos, pelo menos desde a década de 40 do século XIX, os acervos de minerais, rochas e fósseis só começaram a ser constituídos mais de 50 anos depois. Os estudos geológicos tiveram início com o Prof. Anselmo Ferraz de Carvalho e, mais tarde, sob a égide do Prof. Coteló Neiva (1950 em diante). Na Paleontologia de Angola, Moçambique e/ou São Tomé e Príncipe destacaram-se Gumerzindo Henriques da Silva (entre 1953 e 1972), António Ferreira Soares (entre 1959 e 1970) e Armando Moura (entre 1958 e 1976), entre outros. Na sua maioria, os grupos taxonómicos abordados por estes autores foram os moluscos bivalves, gastrópodes e cefalópodes e os equinídeos do Cretácico e Miocénico, apresentando os estudos preocupações de ordem sistemática e estratigráfica. A grande qualidade destes estudos é corroborada pelos estágios internacionais que efectuaram e pelo volume significativo de correspondência mantido com especialistas das principais instituições científicas europeias da época, ligadas à Paleontologia. No presente estudo é feita uma análise destes contributos e dos acervos deles resultantes, a par de uma recensão da bibliografia que traduz o contributo efectivo de Coimbra na época áurea para os estudos africanos, que foram as décadas de 50 a 70 do século passado.

Key-words: University of Coimbra; African Geology; History of researches; Documentary analysis

Abstract

The Mineralogical and Geological Museum and Laboratory of the University of Coimbra were a main unit of the Faculty of Sciences during the XX century. It originated from the earlier Section of Mineralogy and Geology of the Natural History Museum (1885) and was subdivided, after 1992, in both the Earth Sciences Department and the Mineralogical and Geological Museum. Side by side with many other contemporaneous activities of this structure, the research, teaching and outreach of Paleontology from the ex-Portuguese African territories was marked by a rather late, but still significant contribute that gathered reputation to the University, also with the creation of a scientific journal (Memórias e Notícias, since 1921). Although the intention to supply the Museum with African samples and specimens was noticeable at least since the 1840's, the collections of minerals, rocks and fossils began only to be assembled more than 50 years later. The geologic studies were initiated with Prof. Anselmo Ferraz de Carvalho. Some years afterwards they continued under the direction of Prof. Coteló Neiva (1950 onwards). Concerning the works of Paleontology of Angola, Mozambique and/or São Tomé and Príncipe, the emphasis goes to Gumerzindo Henriques da Silva (from 1953 to 1972), António Ferreira Soares (from 1959 to 1970) and Armando Moura (from 1958 to 1976), among others. With a few exceptions, the taxonomic groups studied by these workers were Cretaceous and Miocene bivalves, gastropods, cephalopods and echinoids. Most studies deal with systematic, taxonomic and biostratigraphic problems, and their pertinence and quality have been confirmed by a significant volume of scientific contacts with foreign institutions and specialists of Paleontology. In the present study we make a brief analysis of these works and related collections, as well as a review of the literature of the real contribution of Coimbra during the golden era of African studies that were the 1950's to 1970's of last century.

Uma perspectiva histórica

Os caminhos dos portugueses pelas sete partidas do Mundo conduziram, desde os alvares do Renascimento, a um redescobrir do misterioso continente africano, afeiçoando os seus contornos em portulanos inovadores, até ao estabelecimento definitivo da carreira da Índia. Com tamanha ambição para um povo tão pouco numeroso, cedo se viu África preterida pelas pérolas do Oriente e do Brasil, ficando-se por Moçambique (a ilha), pela Mina e por um pequeno número de outros entrepostos de reabastecimento e de socorro, enquanto a História Trágico-Marítima de Sepúlveda ia enriquecendo, pouco a pouco, os seus anais sinistros.

Criadas as lucrativas roças do Brasil e de São Tomé e declinando a luz que os Gama e os Albuquerque tão bem ergueram no firmamento, o interesse por África ressurgiu na figura do hediondo comércio de escravos,

assim se podendo, em grande parte, explicar o crescimento das zonas de influência portuguesa ao longo dos litorais de Angola e de Moçambique.

Desta forma se passaram três séculos, enfrentando a cobiça da Companhia das Índias holandesa e a acção nefasta dos corsários. Mesmo abolida a *vergonha* na metrópole e entrando em retrocesso o escravagismo, as possessões africanas da Coroa portuguesa continuaram a ser locais pouco recomendados, para onde seguiam aventureiros e degredados, balanceados entre uma perspectiva de enriquecimento fácil e a morte pelas febres ou às mãos dos indígenas.

Desta forma se explica o facto de, perante a política expansionista da Velha Albion e do neoimperialismo de França e de Bismarck, Portugal se encontrasse numa posição de considerável debilidade que a razão histórica pouco ou nada mitigou. A conferência de Berlim (1884-85) e o malogrado projecto do Mapa Cor-de-Rosa apenas contribuíram para relegar para segundo plano o ultramar português na divisão colonial do continente Africano, enfraquecendo a monarquia e abrindo caminho para o advento da República.

Não obstante o forte impacte negativo que tiveram na afirmação internacional do país, estes incidentes também acabaram por instigar as instâncias governativas nacionais para a necessidade de um acréscimo substancial do esforço de investimento em Angola e Moçambique. Iniciado, sobretudo, após o desbravar do interior pelos pombeiros e com as grandes viagens científicas de exploração de Serpa Pinto, Hermenegildo Capelo e Roberto Ivens (1869, 1877-79, 1884-85), entre outras de menor imediatismo, este esforço teve por fim: (1) a afirmação e o exercício efectivo da soberania no interior dos territórios sob administração portuguesa; (2) a expansão territorial; (3) o conhecimento geográfico e a demarcação de fronteiras; (4) o conhecimento científico nas vertentes zoológica, botânica, antropológica, etnográfica e geológica; (4) a descoberta e exploração de recursos naturais e de matérias-primas estratégicas; (5) a selecção de áreas favoráveis para produção agrícola e a fixação de colonos.

Compreende-se, deste modo, o importante papel que os inúmeros estudos e missões geológicas vieram a desempenhar nas décadas seguintes, começando pelo simples envio de amostras para as instituições metropolitanas vocacionadas para as Ciências da Terra, mas evoluindo para uma fase de apogeu, já nas décadas de 1950 e 1960, durante as quais se efectuavam extensos levantamentos cartográficos e se identificavam e exploravam jazidas de interesse mineiro. No entanto, nada foi fácil e, mesmo durante os anos duros do Estado Novo, em que o regime exacerbava o esforço da raça e o Império Colonial Português, os protagonistas dos

estudos de Geologia africana lutaram com dificuldades de vária ordem. Assim o demonstra Carrington da Costa (1943), ao traçar uma panorâmica dessa envolvência, quando o desenrolar da guerra ainda acarretava incertezas quanto à manutenção das colónias.

Os estudos de Paleontologia africana estiveram, por sua vez, quase sempre ligados aos de Estratigrafia, numa preocupação sentida de definir as grandes unidades sedimentares aflorantes nestes territórios e de proceder ao seu ordenamento relativo. Assim se entende o interessante opúsculo ilustrado de Paul Choffat (1912), editado pela Secção de Geologia da Sociedade de Geografia de Lisboa, numa perspectiva de desenvolvimento colonial: *Indicações sobre o modo de colligir amostras geológicas*.

Dentro dos domínios da geologia histórica é por demais evidente que a primazia dos estudos coloniais coube à 3^a Comissão Geológica do Reino, mais tarde Serviços Geológicos de Portugal (Brandão, 2008). Não resistimos a lembrar, também, o interessante opúsculo de José de Anchieta (1885), denominado *Traços Geológicos da África Occidental Portuguesa*, pelo seu pioneirismo e por ser o primeiro de que temos conhecimento, a ser editado *in loco* (Figura 1).

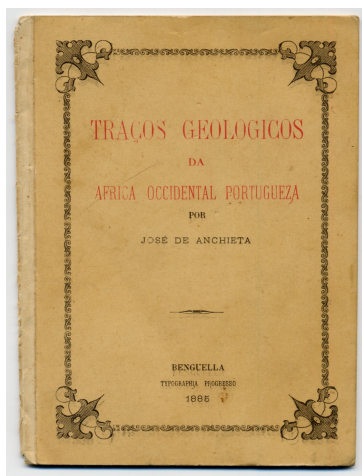


Figura 1. Frontispício do opúsculo pioneiro de José de Anchieta (1885), impresso em Benguella (col. Pedro Callapez).

De qualquer forma e até finais da Primeira República, os meios ligados aos estudos coloniais centraram-se, sobretudo, nos círculos académicos da capital, restando a Coimbra e ao Porto papéis de certo modo expectantes. Nas páginas seguintes procuraremos relevar a emergência da

Universidade de Coimbra, em particular nos estudos de Paleontologia (e Estratigrafia), mais pungentes durante o Estado Novo.

Primórdios da Geologia ultramarina no Museu de Coimbra

As colecções geológicas da Universidade de Coimbra representam um registo precioso de mais de dois séculos de ensino e investigação científica em Ciências da Terra, fruto do contributo de várias gerações docentes e investigadores das faculdades de Filosofia e de Ciências. A sua origem deve-se, em primeira instância, à reforma pombalina da universidade (1772) e à criação do gabinete de História Natural, no que constitui uma das primeiras instituições portuguesas vocacionadas para o ensino e experimentação em Mineralogia, Geognosia, Metalurgia e Arte de Minas, através de laboratórios apetrechados com modelos e colecções de amostras.

Ao cunho indelével de Domingos Vandelli (1730-1816) seguiram-se, durante mais de meio século, os contributos significativos de alguns dos lentes que lhe sucederam, com destaque para José Bonifácio, Manuel José Barjona, Paulino de Nola e Roque Fernandes Thomaz (Portugal Ferreira, 1990, 1998). Graças à sua dedicação, as colecções primitivas com origem no Museu Real da Ajuda e em acervos particulares, foram acrescentadas, sobretudo, com conjuntos numerosos de minerais e rochas de proveniências europeias diversas, mas também do Brasil, ao tempo a jóia da coroa e uma fonte permanente de novos produtos naturais.

Neste contexto, o Gabinete e, mais tarde, o Museu de História Natural de Coimbra, deve ser julgado como uma estrutura de carácter universitário, destinada a promover o conhecimento e a experiência prática de grupos restritos de alunos, em detrimento de uma abertura ao público, em geral. Assim, foi ao longo da sua longa existência, funcionando também como repositório de colecções científicas, ligadas ou não a dissertações, em que a preocupação estética era secundária perante a singularidade ou o manancial de dados inerente a cada espécime ou amostra.

Sob a designação de *petrificados* os fósseis sempre representaram um grupo de somenos importância nestes acervos anteriores ao último quartel do século XIX, não obstante a existência de alguns conjuntos de interesse museológico e/ou importância estratigráfica, enquanto demonstrativos das *idades dos terrenos*. Desta forma, quer devido à pouca vocação dos estudos académicos nesse sentido, quer por força de alguma inércia ou escassez de fundos, pouco ou nada terá sido tentado para enriquecer as colecções geológicas com espécimes portugueses ou africanos, pelo menos até à década de 40 do século XIX. Neste sentido, mais precisamente entre Janeiro

e Março de 1845, a congregação de lentes da Faculdade de Filosofia endereçou ao governo de Costa Cabral um pedido formal acompanhado de extensa missiva a D. Maria II, no sentido de que o Ministro do Reino se dignasse ordenar às autoridades das possessões ultramarinas o envio de animais vivos e preparados, «*a par de todo o tipo de outros produtos naturaes, quer orgânicos, quer inorgânicos*».

Este interesse algo súbito pela História Natural colonial ocorreu num curto intervalo de alguma estabilidade política e de um certo impasse das instituições congéneres da capital, em que as antigas colecções da Ajuda e do Museu Maynense se procuravam encaixar nos vastos espólios da Academia das Ciências de Lisboa (Antunes, 1986, 2000) e a Escola Politécnica de Lisboa titubeava após o violento incêndio de Abril de 1843. As razões que o motivaram transcendem-nos de momento, sobretudo porque ainda escasseavam nas colecções geológicas espécimes da metrópole, muitos deles a um pequeno passo dos locais de recolha. Não obstante a sua aparente pertinência e estilo tão cuidado, o pedido às instâncias régias parece não ter dado frutos, visto que o *cabralismo* se desmoronaria meses depois, vergado pela revolta da Maria da Fonte, a que se seguiu o período de forte instabilidade da guerra da Patuleia.

Fica-nos, no entanto, uma primeira prova documental sobre o interesse pela geologia colonial, o qual só se viria a efectivar após a reforma de 1885, com a reestruturação do Museu de História Natural e a permanência do lente António José Gonsalves Guimarães à frente dos destinos da então Secção de Mineralogia e Geologia. Durante as duas décadas seguintes, os espaços museológicos e os laboratórios e salas de aula a eles apensos foram dotados de vastíssimas colecções internacionais de rochas, fósseis, minerais e modelos, compradas a diversos *comptoirs* europeus, com maior incidência na famosa casa Krantz. Em paralelo, tornaram-se mais frequentes as recolhas em território continental, chegando também as primeiras amostras de proveniência colonial, das quais destacamos os grandes frascos com fosfatos de Benguela, antes expostos na Exposição Insular e Colonial Portuguesa de 1894, ou ainda parte das amostras recolhidas por Rego Lima no Namibe e na Huíla, em 1898, como espólio da expedição às Minas de Cassinga (Os materiais e notas desta expedição ao planalto angolano foram, mais tarde, revistos por Francisco Pereira de Sousa, em 1911) (Figura 2).

Não obstante este esforço, verificou-se alguma marginalização da Universidade de Coimbra em relação às suas congéneres olisiponenses, não sabemos se casual, se forçada pelo dinamismo apreciável da Comissão Geológica, entronizada que estava com os sucessivos ministérios, com a

Academia das Ciências e com a recém-criada Sociedade de Geografia. Brandão (2008, 2009, 2010a, 2010b) dá-nos uma excelente panorâmica desta actividade profícua e dos espólios daí resultantes, parte dos quais serviram para algumas das primeiras publicações de Paleontologia africana (Choffat, 1886, 1886-87; Choffat & Loriol, 1888; Loriol, 1888; Choffat & Gomes, 1898; Priem, 1907).

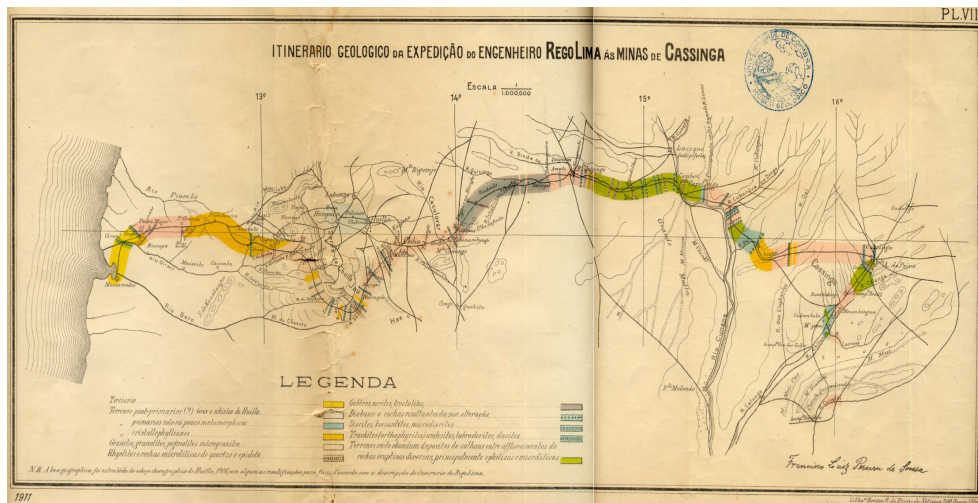


Figura 2. Itinerário da expedição de Rego Lima entre Namibe e as minas de Cassinga (1898) (segundo Sousa, 1911).

Os estudos e colecções de Paleontologia africana

Com o advento da República e a reforma de 1911 assistiu-se à criação da Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra, a par das Universidades de Lisboa e do Porto e do Instituto Superior Técnico. Nesta nova ordem e já findado o sacrificio português na Grande Guerra, consumado em prol da conservação dos antigos territórios africanos, surgiu o Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico enquanto unidade anexa da Faculdade de Ciências, sob direcção de Anselmo Ferraz de Carvalho (Portugal Ferreira, 1998).

Herdeira dos acervos de Mineralogia e Geologia do século XIX, a nova estrutura cedo foi sendo renovada e engrandecida com colecções portuguesas, incluindo importantes conjuntos de fósseis cedidos pelos Serviços Geológicos de Portugal (1925). Em simultâneo com a projecção de novos estudos no arquipélago da Madeira, iniciados por José Custódio de Moraes, o acervo colonial foi consideravelmente aumentado graças a novas

ofertas, incluindo colecções de amostras de Júlio Henriques e da expedição de Baeta Neves à Lunda (1918-26) e numerosos fósseis recolhidos pela Missão Geológica de Angola, os quais terão sido cedidos, em 1927, por António de Sousa Torres, antigo aluno de Coimbra.

Foi, de igual modo, em 1921, que se iniciou a publicação do periódico *Memórias e Notícias*, no qual surgiu o primeiro de muitos estudos dedicados a temas coloniais, versando a Geologia e Paleontologia de Angola, São Tomé e Príncipe e Moçambique (Carvalho, 1921).

Após a instauração do Estado Novo, a política da tutela enveredou no sentido de exacerbar os valores da pátria, da raça e da família, projectando o país como sendo uma nação enraizada nos cinco continentes, através das suas possessões e do imenso peso histórico. Sob a égide do denominado Império Colonial Português, sobretudo a partir da Exposição Colonial do Porto (1934), foram fomentadas as explorações e os estudos ultramarinos, com certa ênfase nos de Geologia e Paleontologia, por serem susceptíveis de conduzir à descoberta e aproveitamento de novas riquezas minerais. Este espírito está bem presente em Vicente (1932), através de palestra publicada nas *Memórias e Notícias* (Callapez *et al.*, 2008).

Verificou-se, desta forma, a adaptação do meio universitário a um estado de índole colonial, em que o interesse pelos territórios africanos passava, necessariamente, por quatro pontos: (1) afirmação de soberania e expansão territorial; (2) fixação de colonos e fundação de colonatos; (3) aproveitamento da mão-de-obra local; (4) exploração dos recursos agrícolas e naturais para benefício da metrópole. No Museu e Laboratório Mineralógico de Coimbra foi o tempo da criação da Galeria Ultramarina, vasta ala onde se foram expondo as colecções de amostras africanas e que teve o seu apogeu nas décadas de 50 e 60 do século XX, até que ventos de mudança se fizeram sentir (Figuras 3 e 4).

Consumada a sua nomeação como catedrático de Geologia, em 1949, deve-se sobretudo ao dinamismo de João Manuel Cotelo Neiva o excelente período de expansão porque passaram as Ciências da Terra em Coimbra. Os estudos de Paleontologia africana devem ser interpretados neste contexto, enquanto parte de um movimento mais amplo que abrangeu diversas outras áreas da Geologia e muitos outros professores, investigadores e alunos, entre os quais Manuel Maria Godinho (1963). Neste sentido, a Universidade de Coimbra acompanhou plenamente a necessidade sentida e o rumo adoptado pela Junta de Investigações do Ultramar e por outras instituições portuguesas ligadas à pesquisa científica, no intuito de incrementarem exponencialmente os estudos sobre ciências geológicas e biológicas em território africano.

Na vertente da Paleontologia foi publicado, em 1953, um primeiro estudo da autoria de Gumerzindo Henriques da Silva, sobre a fauna fóssil de Inhaminga, em Sofala, Moçambique. Finalizada a licenciatura em Ciências Geológicas pela Universidade de Coimbra e após interregno de dois anos nas Minas do Pejão, Henriques da Silva ingressou no lugar de Naturalista do Museu e Laboratório Mineralógico, em Maio de 1955. Desde essa data e mesmo após a sua ida, cerca de 1965, como *Técnico de Energia Nuclear e Electrónica* (!) para os Estudos Gerais Universitários de Moçambique, foi autor de variados trabalhos sobre Paleontologia de São Tomé e Príncipe, Angola e Moçambique, a que acrescem diversas contribuições sobre a fauna quaternária de Porto Santo (Henriques da Silva, 1956, 1958a, 1958b, 1960, 1961a, 1961b, 1961c, 1962a, 1962b, 1962c, 1962d, 1963a, 1963b, 1963c, 1965, 1966a, 1966b, 1967, 1972; Henriques da Silva & Ferreira Soares, 1962; Henriques da Silva *et al.*, 1967).



Figura 3. Panorâmica da Galeria Ultramarina do Museu de Coimbra nos anos 30/40 do século XX. Notem-se as vitrinas das janelas ainda por colocar e os modelos em relevo de São Tomé (fonte: acervo documental do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra).

Em 1955 e 1957 surgiram, também, os trabalhos de Miguel Montenegro de Andrade - ao tempo Assistente do Museu e Laboratório -

versando o Miocénico do Farol das Lagostas e uma panorâmica dos estudos de Paleontologia de Angola.

Foi precisamente no mesmo período que Gaspar Soares de Carvalho, também ele Assistente e Doutorado pela Universidade de Coimbra, com dissertação sobre a Estratigrafia e Sedimentologia da base do Mesozóico português (1946), se deslocou para Angola, com o intuito de chefiar uma brigada dos Serviços de Geologia e Minas encarregada de proceder ao levantamento geológico da orla sedimentar do Namibe (fins de 1955 a inícios de 1958). Deste estudo de campo exaustivo resultaram numerosos trabalhos, dos quais uma parte consiste em relatórios inéditos e outros ainda, encerram uma componente significativa de Paleontologia estratigráfica (Carvalho, 1960, 1961, 1967a, 1967b). Destes, a monografia de 1961 sobre a Geologia do Deserto de Moçamedes, elaborada no âmbito de uma dissertação para a obtenção do grau de Prof. Agregado da Universidade do Porto, constitui ainda hoje um dos grandes contributos para o conhecimento da geologia sedimentar dos países africanos de língua portuguesa.

Ao correr de um núcleo de Paleontologia ultramarina que, pouco a pouco, se ia constituindo em Coimbra, o ainda aluno de licenciatura António Ferreira Soares iniciou os seus estudos nesta área através da análise de colecções de fósseis da sua região natal (Ferreira Soares, 1958, 1959). Estes materiais de idade albiano-turoniana haviam sido cedidos por Mascarenhas Neto, dos Serviços de Geologia e Minas de Angola, com excepção de alguns espécimes de *Tympanotus* e de *Arca*, provenientes de jazida quaternária encontrada na quinta de família (Rocha *et al.*, 2008). A partir de 1960, já Assistente, encarregou-se do estudo de novas colecções do Miocénico e do Cretácico de Angola (Ferreira Soares, 1961a, 1961b, 1962, 1963a, 1963b, 1965), entretanto cedidas pelos mesmos serviços, até que os trabalhos de tese o redireccionaram temporariamente para as formações cretácicas do Baixo Mondego. Mais tarde, já doutorado, permaneceu durante dois anos na Universidade de Lourenço Marques, onde voltou a colaborar com Gumerzindo em novos estudos sobre o Cretácico de Maputo (Ferreira Soares & Henriques da Silva, 1969, 1970).



Figura 4. Panorâmica da Galeria Ultramarina do Museu de Coimbra nos anos 50 do século XX. Notem-se as vitrinas das janelas já colocadas, mais modelos em relevo e, na parede de fundo, a carta de África com as possessões portuguesas (fonte: acervo documental do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra).

Nos estudos de Paleontologia ultramarina com o cunho de Coimbra também é fundamental mencionar Armando Moura, aluno do Museu e Laboratório onde deixou, entre outros, um primeiro estudo sobre equinídeos portugueses (Moura, 1958). Embora não tenha ingressado nos quadros da instituição e tenha desenvolvido a sua actividade científica em Moçambique, sempre manteve contactos com os colegas do Museu. Deixou diversos trabalhos sobre Malacologia e Paleontologia (Moura, 1961, 1963, 1964, 1966, 1970, 1972, 1976), antes do seu regresso à metrópole e ligação à Universidade de Aveiro.

Conclusões

Como testemunho indelével e herança histórica de mais de meio século, durante o qual o Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico de Coimbra participou activamente no desbravar do conhecimento geológico de Angola, Moçambique e São Tomé e Príncipe, ficou-nos um acervo considerável de colecções de amostras, das quais uma parte significativa

consiste em fósseis de idade cretácica, miocénica e quaternária, enviados por elementos dos serviços geológicos coloniais para a metrópole. Embora conservado no espólio do extinto Museu de História Natural e aguardando a consumação do Museu da Ciência, este acervo ainda se encontra em parte por estudar e, ainda mais, por divulgar e expor, no sentido em que uma fracção importante da nossa história não se absorva nas espirais irreversíveis do passado.

A par de todas estas colecções fica a memória dos intervenientes, quase todos ainda entre nós e capazes de enriquecerem o registo histórico com as suas vivências e relatos inéditos. Como precioso elemento de pesquisa, fundamental para o retomar dos estudos geológicos nestes países e para o acalantar da cooperação que hoje já se verifica, existe também um significativo registo bibliográfico de obras de Paleontologia com a chancela de Coimbra, totalizando cerca de meia centena de títulos.

Estamos certos que a breve disponibilização destas obras em formato digital, assim como a recuperação dos espécimes e dos materiais-tipo das espécies de Angola e de Moçambique, novas para a Ciência, constituirão o melhor dos reconhecimentos da geração presente ao esforço de busca pelo conhecimento destes antigos colaboradores da Universidade de Coimbra.

Dedicatória: Os autores dedicam este trabalho ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho pela sua enorme dedicação à investigação e ao ensino das Geociências.

Notas e agradecimentos: Trabalho publicado no âmbito do projecto FCT HC/0119/2009 (História da Ciência na Universidade de Coimbra (1547-1933)).

Bibliografia

- Anchieta, J. (1885) - Traços geológicos da África Occidental Portuguesa. Typographia Progresso, Benguella, 12p.
- Antunes, M.T. (1986) - Sobre a história da Paleontologia em Portugal. *In*: História e desenvolvimento da Ciência em Portugal, vol. II. Academia das Ciências de Lisboa, Lisboa, 773-814.
- Antunes, M.T. (2000) - Paleontologia e Portugal. Colóquio/Ciências. Publ. Fundação Calouste Gulbenkian; 25, 54-75.
- Brandão, J.M. (2008) - “Missão Geológica de Angola”: contextos e emergência. Memórias e Notícias; n.s.; 3, 285-292.
- Brandão, J.M. (2009) - O "Museu colonial" das Comissões Geológicas. Emergência e memória científica. Actas do XXIX encontro da Associação Portuguesa de História Económica e Social

- Memória social, patrimónios e identidades. Fac. Letras da Univ. Porto, 13-14 Novembro, 2009.
- Brandão, J.M. (2010a) - O acervo colonial das “Comissões Geológicas” de Portugal (1857-1918). Nota preliminar. In: J.M. Brandão; P.M. Callapez; O. Mateus & P. Castro (Eds.) – Geocollections: mission and management. Centro de História e Filosofia da Ciência da Universidade de Évora & Museu Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, Coimbra - Capítulo 12, 113-120.
- Brandão, J.M. (2010b) - O “Museu de Geologia Colonial” das Comissões Geológicas de Portugal: contexto e memória. *Revista Brasileira de História da Ciência*; 3 (2), Jul.–Dez. Rio de Janeiro.
- Callapez, P.M., Marques, J.F., Matias, C. (2008) - Os estudos de Paleontologia ultramarina na Universidade de Coimbra e os fósseis do litoral de Benguela (Angola). *Memórias e Notícias*; n.s.; 3, 301-308.
- Carrington da Costa, J., (1943) - Problemas Geológicos Coloniais. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*; 2, 1-26.
- Carvalho, A.F. (1921) - Estudo Microscópico de rochas da Ilha de São Tomé. *Memórias e Notícias*; 1, 9-25.
- Carvalho, G.S. (1960) - Estudo sobre os depósitos cretácicos do litoral de Angola. *Boletim dos Serviços de Geologia e Minas de Angola*; 1, 37-46.
- Carvalho, G.S. (1961) - Geologia do deserto de Moçâmedes (Angola): uma contribuição para o conhecimento dos problemas da orla sedimentar de Moçâmedes. *Memórias da Junta de Investigações do Ultramar*; sér. II, 26, 227 p.
- Carvalho, G.S. (1967a) - Uma síntese dos conhecimentos sobre o Cretácico da orla sedimentar de Moçâmedes (Angola). *Garcia de Orta*; 15, 225-248.
- Carvalho, G.S. (1967b) - A cronoestratigrafia do Cretácico da orla sedimentar de Moçâmedes (Angola) e a análise de uma crítica. *Lemos Ed., Porto*, 44 p.
- Choffat, P.L. (1886) - Sobre os terrenos sedimentares das províncias de África e considerações sobre a geologia deste continente. *Jornal do commercio*, nº 9926 de 31 de Dezembro, Lisboa.
- Choffat, P.L. (1912) - Elementos para a resolução dos problemas coloniais. Parecer da Secção de Geologia. A) Explorações parcelares – nº2. Indicações sobre o modo de colligir amostras geológicas. Ed. Sociedade de Geographia de Lisboa. Typographia da Cooperativa Militar, Lisboa, 12 p.
- Choffat, P.L. (1886-1887) - Note préliminaire sur des fossiles recueillis par m. Lourenço Malheiro dans la province d’Angola. *Bol. Soc. Geol. France*; 3ème ser. 15, 154-157.
- Choffat, P.L. & Gomes, J.P. (1898) - Échantillons de roches recueillis entre Benguela et Catoco. *Com. Dir. Trab. Geol. Port.*; 3, 239-243.
- Choffat, P.L., Loriol, P. de (1888) - Matériaux pour l’étude stratigraphique et paléontologique de la province d’Angola. *Mem. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève*; 30, 97-1145.
- Ferreira, Cor. V. (1932) - A política colonial portuguesa em Angola. *Memórias e Notícias*; 7, 5-73.
- Ferreira Soares, A. (1958) - Sobre alguns fósseis da região de entre Lobito e Catumbela (Angola). *Memórias e Notícias*; 46, 11-22.
- Ferreira Soares, A. (1959) - Contribuição para o estudo da fauna fóssil da região de entre Lobito e Catumbela (Angola). *Garcia de Orta*; 7, 1-20.
- Ferreira Soares, A. (1961a) - Lamelibrânquios do Cretácico da região de Benguela-Cuio (Angola). *Boletim do Serviço Geológico e Mineiro de Angola*; 4, 1-62.
- Ferreira Soares, A. (1961b) - Nouvelle espèce de *Chlamys* du Miocène de la région de Luanda (Angola). *Memórias e Notícias*; 51, 1-6.
- Ferreira Soares, A. (1962) - Nota sobre alguns lamelibrânquios e gastrópodes do Miocénico de Luanda (Angola). *Memórias e Notícias*, 53, 31-35.
- Ferreira Soares, A. (1963a) - Paleontologia de Angola – I. Sobre os lamelibrânquios cretácicos da região de Benguela-Cuio. *Memórias e Notícias*; 55, 1-25.

- Ferreira Soares, A. (1963b) - Paleontologia de Angola – III. Alguns lamelibrânquios cretácicos da região de entre o posto de S. Nicolau e a Mulola da Caniço a Sul do Chapéu Armado. *Memórias e Notícias*; 56, 35-40.
- Ferreira Soares, A. (1965) - Contribuição para o estudo dos lamelibrânquios cretácicos da região de Moçamedes. *Boletim do Serviço Geológico e Mineiro de Angola*; 11, 1-34.
- Ferreira Soares, A., Henriques da Silva, G. (1969) - Sobre a ocorrência do Senoniano na margem esquerda do Rio Maputo (região de Madubula). *Revista de Ciências Geológicas*; série A; 2, 1-7.
- Ferreira Soares, A., Henriques da Silva, G. (1970) - Contribuição para o estudo da geologia do Maputo: estratigrafia e paleontologia da região de Madubula e suas relações com áreas vizinhas. *Revista de Ciências Geológicas*; série A; 3, 1-85.
- Godinho, M.M. (1963) - Tapiolite de Cavala, Alto-Ligonha, Moçambique: nota prévia. *Memórias e Notícias*; 56, 41-44.
- Henriques da Silva, G. (1953) - Fauna fóssil de Inhaminga. *Memórias e Notícias*; 34, 1-12.
- Henriques da Silva, G. (1956) - La faune Miocène de l'Île du Prince. *Memórias e Notícias*; 42, 29-51.
- Henriques da Silva, G. (1958a) - Nota sobre a microfauna do Miocénico marinho da Ilha do Príncipe. *Memórias e Notícias*; 45, 56-59.
- Henriques da Silva, G. (1958b) - Contribuição para o conhecimento da microfauna do Miocénico marinho da Ilha do Príncipe. *Garcia de Orta*; 6, 507-510.
- Henriques da Silva, G. (1960) - Contribuição para o conhecimento da paleontologia da região entre Moçamedes e Porto Alexandre, Angola. *Garcia de Orta*; 8, 371-384.
- Henriques da Silva, G. (1961a) - Alguns fósseis da região de entre Moçamedes e Porto Alexandre. *Memórias e Notícias*; 51, 9-17.
- Henriques da Silva, G. (1961b) - Ammonite nouvelle du Campanien de la Barra do Dande. *Memórias e Notícias*; 51, 19-23.
- Henriques da Silva, G. (1961c) - Sobre a fauna ictiológica do Farol das Lagostas (Luanda, Angola). *Memórias e Notícias*; 52, 75-84.
- Henriques da Silva, G. (1962a) - Ammonites du Crétacé inférieur du Maputo (Catuane, Mozambique). *Memórias e Notícias*; 53, 1-25.
- Henriques da Silva, G. (1962b) - Amonites do Cretacico inferior do Rio Maputo (Catuane - Moçambique). *Boletim dos Serviços de Geologia e Minas de Moçambique*; 29, 1-30.
- Henriques da Silva, G. (1962c) - Fósseis do Miocénico de Luanda (Angola). *Assoc. Port. para o Progresso das Ciências. Actas do XXVI Congresso Luso-Espanhol (Porto, 22-26 de Junho de 1962)*, secções II e IV, 3 p.
- Henriques da Silva, G. (1962d) - Contribuição para o conhecimento do aptiano do distrito de Lourenço Marques (Moçambique). *Assoc. Port. para o Progresso das Ciências. Actas do XXVI Congresso Luso-Espanhol (Porto, 22-26 de Junho de 1962)*, secções II e IV, 4 p.
- Henriques da Silva, G. (1963a) - O género *Anacorax* no Cretácico superior de Angola. *Memórias e Notícias*; 55, 25-41.
- Henriques da Silva, G. (1963b) - Paleontologia de Angola – II. Sobre os lamelibrânquios do Cretácico da região Carunjamba – Salinas – S. Nicolau. *Memórias e Notícias*; 56, 27-34.
- Henriques da Silva, G. (1963c) - Lamelibrânquios do Cretácico da região Carunjamba – Salinas, S. Nicolau (Angola). *Boletim do Serviço Geológico e Mineiro de Angola*; 8, 1-67.
- Henriques da Silva, G. (1965) - Contribuição para um catálogo dos lamelibrânquios fósseis do Cretácico de Moçambique. *Revista dos Estudos Gerais Universitários de Moçambique*, série VI - Ciências Geológicas; 2, 1-42.
- Henriques da Silva, G. (1966a) - Sobre a ocorrência do Jurássico marinho no Norte de Moçambique. *Revista dos Estudos Gerais Universitários de Moçambique*, série II - Ciências Geológicas; 3, 61-68.
- Henriques da Silva, G. (1966b) - Contribuição para um catálogo dos gastrópodes fósseis do Cretácico de Moçambique. *Revista dos Estudos Gerais Universitários de Moçambique*, série VI - Ciências Geológicas; 3, 77-97.

- Henriques da Silva, G. (1967) - Fósseis do Miocénico marinho das plantações Santiago (Magude). Revista dos Estudos Gerais Universitários de Moçambique, série VI - Ciências Geológicas; 4, 1-21.
- Henriques da Silva, G. (1972) - Notas sobre paleontologia moçambicana. I - Pinna robinaldina d'Orbigny do Cretácico Inferior de Moçambique. Revista de Ciências Geológicas; série A, 5, 56-59.
- Henriques da Silva, G., Ferreira Soares, A. (1962) - Contribuição para o conhecimento da fauna miocénica de S. Pedro da Barra e do Farol das Lagostas (Luanda, Angola). Garcia de Orta; 9, 721-736.
- Henriques da Silva, G., Barreto, L.S., Carvalho, L.H.B. (1967) - Dadoxylon micoli seward do Karroo de Tete. Revista dos Estudos Gerais Universitários de Moçambique, série VI - Ciências Geológicas; 4, 37-59.
- Loriol, P. de (1888) - Note sur la géologie de la province d'Angola. Arch. Sci. Phy. et Nat., Janvier, 3ème ser.; 19, 67.
- Malheiro, L. (1881) - Explorações geológicas e mineiras nas colónias portuguesas. Conferência na Sociedade de Geografia de Lisboa, 26 p.
- Montenegro de Andrade, M., Montenegro de Andrade, J. (1955) - A propósito de um corte geológico no Farol das Lagostas (Luanda, Angola). Memórias e Notícias; 39, 36-42.
- Montenegro de Andrade, M., Montenegro de Andrade, J. (1957) - Estado actual dos conhecimentos sobre a paleontologia de Angola até fins de 1955. Anais da Junta de Investigações do Ultramar; 12, 5-21.
- Moura, A.R. (1958) - Alguns equinídeos regulares fósseis da Costa d'Arnes. Memórias e Notícias; 45, 61-72.
- Moura, A.R. (1961) - Contribuição para o conhecimento dos foraminíferos das praias levantadas de S. Tomé e Príncipe. Garcia de Orta; 9, 751-758.
- Moura, A.R. (1963) - Cinco espécies novas de diatomáceas subfósseis para Moçambique. Boletim da Sociedade Broteriana; 37, 147-159.
- Moura, A.R. (1964) - Contribuição para o conhecimento dos Diatomitos do Sul do Save (Moçambique). Bol. Serv. Geol. Min. Moçambique, 32, 7-45.
- Moura, A.R. (1965) - Foraminíferos da Ilha da Inhaca. Revista dos Estudos Gerais Universitários de Moçambique; série II, 2, 1-74.
- Moura, A.R. (1966) - Gastrópodes dos recifes corais elevados de Messonta e Matibane (Moçambique). Revista dos Estudos Gerais Universitários de Moçambique; série II, 3, 1-55.
- Moura, A.R. (1968) - Moluscos dos grés costeiros da ilha da Inhaca. Revista de Ciências Biológicas; série A, 1, 16-52.
- Moura, A.R. (1970) - Contribuição para o conhecimento da fauna subfóssil do Mucoque (Vilanculos). Revista de Ciências Biológicas; série A 3, 55-95.
- Moura, A.R. (1972) - Contribuição para o conhecimento dos moluscos subfósseis do Relanzapo (Nacala, Moçambique). Revista de Ciências Biológicas; série A, 5, 9-66.
- Moura, A.R. (1976) - Contribuição para o conhecimento da fauna malacológica subfóssil de Bartolomeu Dias (Inhassoro-Moçambique). Memórias do Instituto de Investigação Científica de Moçambique, série A - Ciências Geográficas e Geológicas; 42-87.
- Portugal Ferreira, M.R. (1990) - O Museu de História Natural da Universidade de Coimbra (Secção de Mineralogia e Geologia) desde a Reforma Pombalina (1772) até à República (1910). Memórias e Notícias; 110, 53-76.
- Portugal Ferreira, M.R. (1998) - 200 anos de Mineralogia e Arte de Minas: desde a Faculdade de Filosofia (1772) até à Faculdade de Ciências e Tecnologia (1972). FCTUC, Gráfica de Coimbra Ltda., Coimbra, 188 p.
- Priem, F. (1907) - Poissons tertiaires des possessions africaines du Portugal. Com. Com. Serv. Geol. Port.; 7, 74 -79.
- Rocha, R.B., Callapez, P.M., Marques, J.F. (2008) - A Paleontologia na obra de António Ferreira Soares. In: Callapez, P.M.; Rocha, R.B.; Cunha L.; Marques, J.F. & Dinis, P.M. (Eds.) - A

- Terra Conflitos e Ordem. Livro de Homenagem ao Professor António Ferreira Soares, pp. 7-16. Ed. M.M.G.U.C., Coimbra, XXII + 478 p.
- Sousa, F.P. (1911) - Alguns trechos do relatório do Engenheiro Rego Lima sobre a sua missão ás minas de Cassinga. Typographia do Commercio, Lisboa, 247 p.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

O trabalho de campo no Ensino da Geologia. Um estudo com alunos do 7º ano de escolaridade

Gina Correia¹; Celeste Gomes²

¹Departamento de Ciências da Terra Universidade de Coimbra, Escola EB 2,3/S Dr. José Leite de Vasconcelos, Tarouca, PORTUGAL, gina_maria@sapo.pt

²Centro de Geofísica, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL, romualdo@dct.uc.pt

Palavras-chave: Ensino da Geologia, Trabalho de campo, Modelo de Orion

Resumo

As orientações curriculares, bem como a necessidade de recorrer a estratégias motivadoras para o ensino de temas de Geologia, têm vindo a fomentar as actividades exteriores à sala de aula, no ensino básico e secundário. O diagnóstico relativamente a estas actividades foi efectuado e as vantagens foram superiores aos constrangimentos. Neste estudo apresenta-se uma aula de campo elaborada para alunos do 7.º ano de escolaridade, na disciplina de Ciências Naturais, realizada no final do ano lectivo 2009/2010, numa escola do Norte de Portugal. A organização do trabalho de campo seguiu as orientações do modelo de Orion e revelou-se uma estratégia motivadora para o desenvolvimento de competências.

Key-words: *Geology Education, Fieldwork, Orion model*

Abstract:

Curriculum guidelines as well as the need for motivational strategies in teaching themes of Geology have led to the promotion/increase of activities outside the classroom, both in elementary as well as in secondary levels of education. The conclusions have been drawn and the benefits associated to these activities surpass any drawbacks. In this paper, we present a field class designed for 7th year Science students, which was held at the end of the 2009/2010 school year, by a school in the north of Portugal. The organization of the field work followed the guidelines of the model of Orion and proved to be a motivational strategy for the development of competences.

Introdução

Para o ensino e a aprendizagem de temas de Geologia, os currículos apelam para a necessidade de complementar as actividades em contexto de sala de

aula com o desenvolvimento de trabalho prático (TP). Este terá de ir além do trabalho laboratorial ou de outros trabalhos práticos desenvolvidos habitualmente em ambiente interior à Escola e sair para o exterior com as designadas aulas de campo.

A reorganização curricular, tanto do ensino básico como do secundário, tem destacado a relevância do trabalho de campo (TC) no ensino da Geologia, recorrendo a uma maior relação escola-meio envolvente. Del Cármen e Pedrinaci (1997) consideram que, no processo de ensino, se deverá explorar o meio que rodeia o aluno, permitindo-lhe que efectue as suas primeiras interpretações e que aprenda a apreciá-lo através da sua observação. Orion (2001) defende um processo de aprendizagem que deveria iniciar-se com uma fase de “*construção de sentido*”, a ser conduzida, por exemplo, num ambiente de exterior.

Neste contexto, familiarizar o aluno com o espaço envolvente e, ao mesmo tempo, promover aprendizagens sobre a Geologia da região poderão constituir uma mais-valia e um incentivo para a compreensão de processos e objectos leccionados em contexto de sala de aula. A disciplina de Ciências Naturais para o 7.º ano de escolaridade inclui conteúdos que visam, maioritariamente, o ensino da Geologia. O objectivo principal deste trabalho é apresentar uma aula de campo planificada para alunos do 7º ano de escolaridade, seguindo as orientações do modelo de Orion (1989), enquanto estratégia motivadora para o ensino da Geologia.

O Trabalho de Campo e o Ensino e Aprendizagem em Geologia

Os currículos das disciplinas de Geologia apontam a necessidade de desenvolver TP como complemento ao ensino mais teórico. O TP, segundo Hodson (1988), inclui o trabalho de laboratório (TL) e o TC, com componentes experimentais ou não, ou seja, incorpora todas as actividades nas quais os discentes envolvem simultaneamente o domínio psicomotor, cognitivo e afectivo. O mesmo autor define TL como aquele que se realiza num laboratório ou numa sala de aula normal, utilizando materiais de laboratório. O TC surge como o que envolve actividades exteriores à sala de aula (Orion, 2001), estando incluídas as aulas de campo, as visitas a museus, a jardins zoológicos e botânicos, etc. Na mesma linha de pensamento, Dourado (2001, p. 14) afirma que “*o critério principal para assumir uma actividade como laboratorial ou de campo diz respeito ao local onde a mesma se desenvolve*”. Por último, o trabalho experimental (TE) pode decorrer em qualquer espaço físico, ou seja pode ser laboratorial ou de

campo, desde que envolva o controlo e a manipulação de variáveis (Hodson, 1988).

Contudo, as práticas de ensino adoptadas durante grande parte do século XX não atribuíam ao TP a importância necessária para que fosse aplicado nas várias áreas curriculares e nos diferentes níveis de escolaridade. Também a formação inicial de professores não incentivava para a necessidade deste tipo de ensino e as condições físicas das escolas surgiam igualmente como barreira à sua realização. Se o trabalho de laboratório e/ou experimental faziam parte das práticas de alguns professores mais audaciosos, o mesmo não acontecia com o TC, sendo este o mais negligenciado. A título de exemplo, entre 1930 e 1980, foram descritos apenas 43 estudos empíricos envolvendo trabalho exterior à sala de aula, comparando, na sua maioria, “viagens de campo” com outros métodos de ensino (Mason, 1980). Ainda hoje, muitos docentes confundem as aulas de campo com as visitas de estudo comuns.

Com o desenvolvimento, em especial nas últimas décadas do Séc. XX, dos modelos de ensino ditos construtivistas, o TP ganhou novo alento. Em Portugal, surgiram, nos currículos do ensino secundário, as disciplinas de Técnicas Laboratoriais de Biologia e de Geologia que serviam de suporte às disciplinas teóricas. Contudo, nas disciplinas de Técnicas, o TC foi uma vez mais relegado para segundo plano, sendo as aulas fundamentalmente de carácter laboratorial e/ou experimental. No entanto, a vertente prática no ensino das ciências, nomeadamente da Geologia, não deve ser exclusivamente laboratorial. A complexidade dos processos geológicos, nos quais se destacam as escalas, de tempo e espaço, torna impossível, muitas vezes, a sua reprodução num laboratório. Assim, importa mostrar aos alunos a importância do TC, como complementar ao TL e à aprendizagem mais teórica, com o objectivo final de promover uma compreensão efectiva dos processos geológicos e dos seus resultados (Ruivo *et al.*, 1995).

No mesmo sentido, mais recentemente, o programa de Biologia e Geologia, resultado da última reforma para o ensino secundário, refere, num apelo directo ao recurso ao TC como estratégia didáctica a privilegiar neste nível de ensino, que “*no caso específico da Geologia um dos aspectos que, em termos metodológicos, mais importa destacar é o das designadas actividades de campo.*” (Silva *et al.*, 2001 p. 12).

Porém, leccionar num ambiente exterior ao contexto da sala de aula requer uma preparação adequada, pois “*the outdoors is a very complicated learning environment, since it includes a large number of stimuli, which can easily distract students from meaningful learning.*” (Orion, 2001 p. 270). Deste modo, todas as aulas de campo deverão ter uma preparação correcta e

definição dos objectivos e competências a atingir pelos discentes, de forma a modificar a ideia de que uma aula de campo possa ser um simples passeio pelo campo.

Trabalho de Campo como Estratégia Didáctica

Embora o valor e as vantagens do TC para o ensino da Geologia tenham sido reconhecidas, esta valorização não se tem reflectido nas actividades escolares (Orion, 1993). Das vantagens apresentadas por diversos autores, Orion e Hofstein (1991) referem estudos nos quais, os alunos participantes em actividades de TC apresentam maiores capacidades de observação, memorização e de lembrar factos. Também Orion (1993) afirma que as experiências directas com os processos e objectos concretos ajudam à construção de conceitos, favorecendo também a sua memorização. Para Leite e Santos (2004 p. 1), “*O trabalho de campo apela ao cruzamento das diferentes ciências para a compreensão da realidade, estimula a tomada de iniciativa e a tomada de decisão. Introduce rupturas no rime-rime organizativo das instituições educativas abrindo alternativas*”. Marques e Praia (2009) defendem que esta estratégia promove um envolvimento mais efectivo no processo de aprendizagem e no trabalho cooperativo entre alunos e melhora a relação destes com o professor.

O TC ocorre usualmente no final da leccionação de um determinado conteúdo, considerando-se uma recompensa para os alunos (Orion, 1989, 1993 e 2001). Outras vezes, ocorre unicamente como suporte do TL, sendo utilizado apenas para recolha de materiais para análise no laboratório (Dourado, 2001).

As razões apontadas, pelos professores, para a não realização de aulas de campo são diversas. Orion (2001) justifica a situação assegurando que existem conflitos de interesses entre as necessidades educativas e dificuldades administrativas ou pessoais. As dificuldades de ordem financeira, os condicionalismos legais, nomeadamente, a responsabilidade civil para com os alunos, ou a rigidez dos horários das escolas, apresentam-se como obstáculos administrativos com que os docentes têm de lidar quando pretendem preparar e implementar uma aula de campo. O mesmo autor refere, como dificuldades pessoais, a falta de confiança que os professores têm em leccionar no espaço exterior à sala de aula, apreensão que se deve, por vezes, ao facto de nunca terem aprendido a ensinar em ambientes de exterior.

Organizar uma Aula de Campo

As aulas de campo são uma das actividades mais complexas e dispendiosas do sistema de ensino. Por isso, torna-se importante obter bons resultados educacionais para justificar o investimento (Orion e Hofstein, 1994).

As actividades de TC deverão ser contextualizadas e integradas nos currículos. Este tipo de trabalho deverá ser introduzido cedo no processo de ensino e aprendizagem sem ser, no entanto, uma das primeiras actividades (Orion, 1989, 1993 e 2001). Seguindo esta linha de pensamento, este autor sugere um modelo prático de integração das actividades de aprendizagem em espaços de interior e de exterior, atribuindo ao professor a tarefa de fazer com que estas actividades se complementem. Assim, o TL ou outras actividades práticas que possam ocorrer na sala de aula poderão complementar as actividades de TC. No mesmo sentido, a preparação de uma “saída de campo” implica a planificação de actividades características do campo, no entanto, também deverão ser perspectivadas outras actividades que posteriormente poderão ser desenvolvidas no laboratório (Dourado, 2001).

O modelo proposto por Orion (1989) consiste numa representação em espiral de três fases/etapas devidamente identificadas: a fase de preparação; a aula de campo; e a fase de síntese. Cada uma destas decorre num momento concreto e em sequência para que a fase anterior funcione como uma ponte para a fase posterior, com o objectivo final de rentabilizar o mais possível a aula de campo. Neste modelo há uma progressão gradual do conhecimento, de um nível mais concreto para um mais abstracto.

A fase de preparação, cujo papel principal é orientar os alunos para a aula de campo, decorre no espaço da sala de aula ou de laboratório, onde são trabalhadas componentes correspondentes ao conhecimento concreto. Esta torna-se importante, na medida em que minimiza o efeito negativo do designado “*novelty space*” (espaço novidade), na construção de conhecimentos novos, facilitando uma aprendizagem significativa durante a actividade de exterior (Orion, 1989, 1993 e 2001). A capacidade de aprendizagem dos alunos no campo é influenciada, tanto pelos seus conhecimentos prévios, como pelas experiências anteriores (Orion et al., 1986). A estes, Orion e Hofstein (1994) adicionam aspectos como os contactos anteriores com a área de estudo e as atitudes face aos conteúdos a estudar durante a aula de campo e à aula propriamente dita. Estas características agrupam-se em três factores que definem o “espaço novidade” de uma aula de campo: os factores psicológicos; geográficos; e cognitivos (Orion, 1993) (Figura 1).

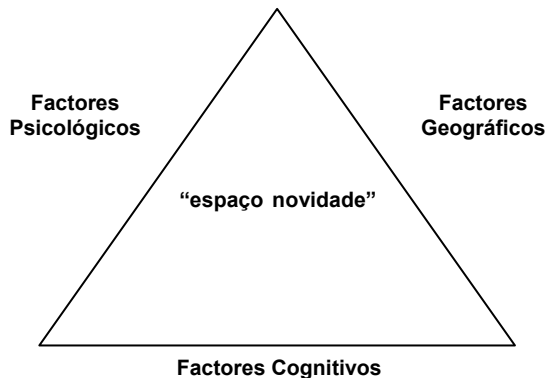


Figura 1. Representação esquemática dos factores que definem o "espaço novidade" (adaptado de Orion, 1993).

Segue-se a aula de campo, que constitui a fase mais importante deste modelo e que decorre num ambiente de exterior. Nesta fase, os alunos irão interagir directamente com os objectos e processos em estudo, avançando para um nível mais elevado de conhecimento. Por último, surge a fase de síntese, na qual se trabalham os conceitos mais complexos relativos aos conhecimentos mais abstractos (Orion, 1993). Esta fase processa-se novamente no espaço de interior, corresponde a uma sinopse do trabalho realizado, podendo envolver o estudo de amostras e outros materiais obtidos na aula de campo, palestras, discussões e apresentação de diapositivos, entre outras actividades.

Planificação de um Trabalho de Campo na Serra de Santa Helena - Tarouca

Na planificação do trabalho de campo foram seguidas as indicações propostas nas orientações curriculares e no modelo de Orion. Os alunos, num total de 16, pertenciam a uma turma do 7.º ano de escolaridade do ensino regular e as aulas decorreram no final do 3º período, no âmbito da disciplina de Ciências Naturais, para sistematização de conceitos leccionados durante o ano lectivo. A avaliação da actividade foi efectuada com base no registo, em grelhas de observação de aula, e nas respostas dos alunos às questões apresentadas no guia de campo, para as diferentes paragens.

Desenvolvimento

O modelo de desenvolvimento e implementação de aulas de campo assenta numa complementarização entre actividades de interior, laboratoriais, experimentais ou não, e actividades de exterior (Orion, 1993). Este modelo baseia-se em conclusões de estudos anteriores, bem como em critérios de natureza administrativa, docente, curricular e educacional.

Planificação

1. Organização hierárquica dos conceitos curriculares partindo, sempre que possível, do mais concreto para o mais abstracto.

Foram seleccionados os conteúdos e conceitos, definido o calendário em que estes deveriam ser estudados, durante o período de tempo em que decorreu a actividade, incluindo a preparação e a síntese, e os objectivos.

2. Selecção da área de estudo para a aula de campo.

Foi seleccionada a Serra de Santa Helena, no concelho de Tarouca, pelas potencialidades geológico-didácticas e pela proximidade geográfica da Escola.

3. Reconhecimento e definição do percurso (Figura 2).

Foi feito um reconhecimento *in situ* para definir o percurso, recorrendo à Carta Geológica de Lamego (14-A), à escala 1/50 000 (Teixeira *et al.*, 1969) e ao mapa do site *Google Earth*.

4. Adequação dos conceitos curriculares às várias paragens.

Foram seleccionados, para cada paragem, os conceitos específicos e as questões a incluir no guia de campo do aluno.

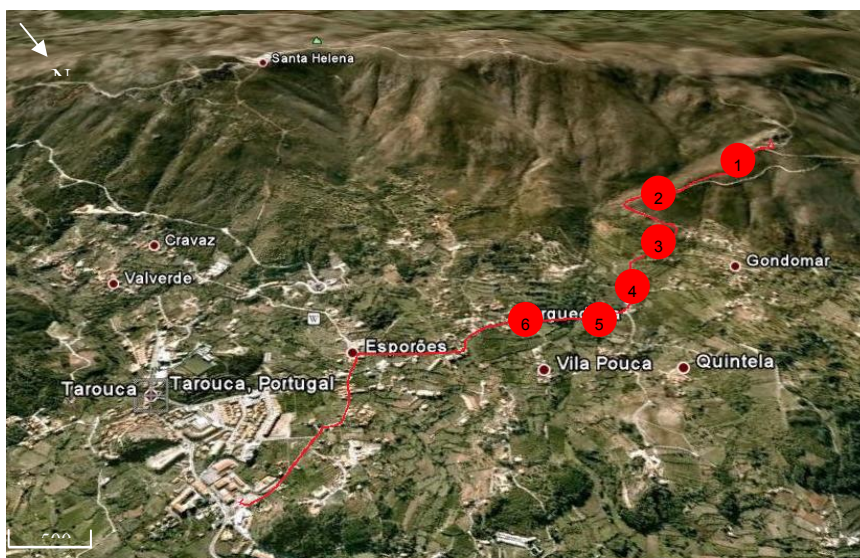


Figura 2. Itinerário seleccionado.

5. Organização do roteiro.

Foi definido o percurso e seleccionados os seis locais de paragem intercalados por um período aproximado de 15 min entre eles. O itinerário foi integralmente definido em vias de acesso alcatroadas ou em terra batida, facilitando o acesso e minimizando os riscos de acidente. Esta opção foi viabilizada, pois cumpria os objectivos previamente definidos para a aula de campo e os aspectos geológicos eram de fácil observação.

6. Selecção e construção de materiais de apoio para o professor e alunos.

Foi construído um guia de campo do aluno, pela professora, que serviu de orientação e de suporte ao trabalho realizado na aula de campo.

Fase de preparação

Esta fase iniciou-se com a definição dos objectivos e a selecção criteriosa da área de estudo. O percurso foi definido com seis paragens de modo a incluir os conceitos curriculares a leccionar. Depois de planificado o roteiro e de uma primeira visita a todo o percurso foi construído o Guia de Campo com as tarefas a concretizar.

A seguir efectuou-se a análise prévia do percurso, com os discentes, acompanhada da iniciação à leitura e análise da Carta Geológica de Lamego (Teixeira *et al.*, 1969), da identificação do percurso no site do Google Earth e da observação de fotografias, obtidas durante o trabalho de campo realizado previamente pela professora. Este conjunto de acções teve como objectivo familiarizar o aluno com o espaço da aula de campo e minimizar o “*novelty space*”.

Na fase de preparação foram dadas indicações sobre: as regras a adoptar, os princípios éticos de actuação do geólogo no campo, as medidas de segurança, o vestuário a usar durante a aula de campo e os materiais necessários (máquina fotográfica, sacos de plástico, jornais velhos, etiquetas autocolantes e marcador para fazer fotos e amostrar as litologias observadas).

Aula de campo

Os objectivos definidos para a aula de campo foram os seguintes: 1) observar e interpretar a geomorfologia geral da Serra de Santa Helena; 2) identificar e interpretar estruturas tectónicas; 3) identificar diferentes tipos de rochas em afloramento; 4) recolher amostras de mão de rochas

magmáticas e metamórficas; e 5) consolidar e aplicar aprendizagens realizadas ao longo do 7º ano de escolaridade.

Em cada paragem, os alunos foram confrontados com exemplos leccionados anteriormente, em contexto de sala de aula, e tiveram de observar, interpretar e responder às questões colocadas no guia de campo (Figura 3). A classificação obtida nas respostas a este guia foi considerada na avaliação final da disciplina.

LOCAL DE OBSERVAÇÃO 3: Zona de contacto entre quartzitos e granitos

Conceitos importantes:

Diáclases – Fracturas, apenas com abertura, nas rochas.

Granito – Rocha magmática plutónica (intrusiva) formada a partir de solidificação do magma em profundidade. Compõe-se de dois minerais essenciais, quartzo e feldspato potássico e de minerais acessórios, sendo as micas brancas e pretas os mais frequentes.

Quartzito – Rocha metamórfica, compacta e dura. É constituída por mais de 80% de grãos de quartzo recristalizados.

Aspectos a observar:

- Contacto entre quartzitos e granitos;
- Diáclases;
- Arenização das rochas;
- Arenização das rochas.

Q5: **Identifique** as rochas que observa em afloramento: _____

Q6: **Identifique** e observe diáclases no afloramento. Porque se formam as diáclases?

Q7: **Identifique** o processo de alteração do granito: _____

Figura 3. Página 5 do guia de campo.

Fase de síntese

Após a aula de campo, procedeu-se à catalogação e identificação das amostras colhidas, recorrendo a uma análise macroscópica e comparando-as com amostras de mão existentes no laboratório. Posteriormente, foi efectuada uma análise final da actividade. Sem, Os discentes não identificaram qualquer constrangimento e foram unânimes em afirmar que foi muito positivo conhecer a ‘sua’ Serra noutra perspectiva. Sem excepção, esta foi a primeira aula de campo que estes alunos tiveram ao longo do seu percurso escolar, embora a maioria destes jovens habite nas imediações da Serra de Santa Helena e a visite com frequência, ainda não tinham tido a

oportunidade de verificar “*aquilo que aprendemos na sala de aula também se pode ver na nossa Serra*”.

Avaliação

Esta actividade foi avaliada na vertente das aprendizagens e do desenvolvimento de competências (conhecimentos, capacidades e atitudes), pelo guia de campo, e pela observação de aula, com o preenchimento, pela docente, de uma grelha construída para o efeito.

O guia de campo incluía um conjunto de catorze questões distribuídas pelos seis locais de observação. Na análise aos resultados, salienta-se que 15 alunos (93,4%) responderam a todas as questões e 11 alunos (68,8%) obtiveram como menção Satisfaz Bem na avaliação global do guia de campo (Tabela 1).

Tabela 1. Resultados da avaliação dos Guias de Campo.

Alunos Nº	Resposta a todas as questões	“Não Satisfaz” ≥ 20% e < 50%	“Satisfaz” ≥ 50% e < 70%	“Satisfaz Bem” ≥ 70% e < 90%	“Excelente” ≥ 90%
	Nº (%)	Nº (%)	Nº (%)	Nº (%)	Nº (%)
16	15 (93,4)	0 (0,0)	5 (31,2)	11 (68,8)	0 (0,0)

Estes resultados podem considerar-se importantes, atendendo a que esta era uma turma com aproveitamento global mediano, tendo, na conclusão do ano lectivo, 4 alunos obtido, na avaliação final da disciplina de Ciências Naturais, o nível 2 (avaliação global anual de ≥ 20% e <50%) e apenas 4 o nível 4 (avaliação global anual de ≥ 70% e <90%).

Os parâmetros avaliados, com a grelha de observação da aula de campo (Tabela 2), registam uma classificação positiva. Salienta-se, nas atitudes, o “Interesse/atenção” e o “Respeito pelo meio envolvente” nas quais 11 alunos registam a menção Satisfaz Bem. Assinala-se ainda, a dificuldade revelada por 5 alunos na utilização de escala para incluir nas fotografias, em especial nas fotografias de pormenor, bem como em conseguir identificar correctamente *in situ* o local da paragem (4 alunos), situação que se pode dever a dificuldades em perceber a importância da escala e ler e interpretar mapas.

Tabela 2. Resultados obtidos com a grelha de observação.

	A	B	C	D	E	F	G
Menção	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
Não Satisfaz	0	4	5	0	3	0	0
Satisfaz	3	8	7	6	9	5	5
Satisfaz Bem	13	4	4	10	4	11	11

A - Faz-se acompanhar do material necessário; B - Identifica o local de paragem; C - Usa escala para fotografar; D - Recolhe as amostras de mão adequadamente; E - Mostra rigor na linguagem; F - Mostra Interesse/atenção; G - Respeita o meio envolvente; N - Número de alunos.

Conclusão

As vantagens das aulas de campo foram, mais uma vez, realçadas, embora esta aula tenha sido realizada no final do ano lectivo. As conclusões não devem ser generalizadas mas são importantes para o desenvolvimento de trabalhos futuros com objectivos semelhantes. Apesar de não serem ainda práticas muito comuns, as aulas de campo começam a ocupar um espaço nas estratégias dos docentes como actividades capazes de motivar os alunos para o interesse e estudo da Geologia.

A avaliação global mostra que esta actividade foi desenvolvida com sucesso e que o interesse e a disponibilidade manifestados foram bons indicadores da motivação dos alunos. Esta decorreu durante o período da aula de Ciências Naturais e sem o recurso a quaisquer encargos financeiros. Salientam-se estes factos, pois os maiores constrangimentos, associados à realização de aulas de campo, são os encargos financeiros e a dificuldade/impossibilidade em ocupar tempos lectivos de outras áreas curriculares. Neste contexto, realça-se: a importância em realizar aulas de campo numa área próxima da Escola, ultrapassando desta forma os encargos financeiros e o tempo ocupado; a importância e motivação que os discentes mostraram durante o estudo de exemplos da Geologia que lhes são próximos.

Realçam-se ainda as vantagens do recurso à planificação seguindo as orientações propostas por Orion, pois conhecer o roteiro e as paragens minimizou o impacto inicial do aluno ao contactar pela primeira vez com os locais a observar, numa perspectiva de aula de campo. O recurso a este modelo também proporcionou aos alunos um papel mais activo na

aprendizagem, numa perspectiva construtivista, contribuindo para o desenvolvimento da sua autonomia.

Por fim, destaca-se a importância da observação *in situ* de exemplos da Geologia, porque podem ilustrar aqueles que foram estudados na sala de aula e facilitar a interpretação das grandezas físicas envolvidas nos processos geológicos.

Dedicatória: As autoras dedicam este estudo ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho, associando-se à Homenagem ao Homem, ao Geólogo e ao Professor.

Bibliografia

- Del Cármen, L., Pedrinaci, E. (1997) - El uso del entorno y el trabajo de campo. *In* Carmen L. (Coord.). La Enseñanza y el aprendizaje de las ciencias de la naturaleza en la educación secundaria. Barcelona, I.C.E. Universitat Barcelona e Editorial Horsori, 133-154.
- Dourado, L. (2001) - Trabalho Prático (TP), Trabalho Laboratorial (TL), Trabalho de Campo (TC) e Trabalho Experimental (TE) no Ensino das Ciências – contributo para a clarificação de termos. *In* Veríssimo, A.; Pedrosa, M.; Ribeiro, R.. Ensino Experimental das Ciências. (Re)pensar o Ensino das Ciências. Departamento do Ensino Secundário, Ministério da Educação. Lisboa, 13-18.
- Google Earth, (2008) - <http://earth.google.com> (consultado em Maio/2010).
- Hodson, D. (1988) - Experiments in science and science teaching. *Educational philosophy and theory*; 20 (2), 53-66.
- Leite, E., Santos, M.R, (2004) - Nos Trilhos da Área-Projecto. Col. Desenvolvimento Curricular. Instituto de Inovação Curricular. IIE – Biblioteca Digital.
- Marques, L., Praia, J. (2009) - Educação em Ciência: actividades exteriores à sala de aula. *Terra Didática*; 5 (1), 10-26 <http://www.ige.unicamp.br/terra didatica/> (acedido em Novembro de 2010).
- Mason, J.L. (1980) - Annotated bibliography of field trip research. *School, Science and Mathematics*; 80 (2), 155-166.
- Orion, N. (1989) - Development of a High-School Geology Course Based on Field Trips. *Journal of Geological Education*; 37. 13-17.
- Orion, N. (1993) - A Model for the Development and Implementation of Field Trips as an Integral Part of the Science Curriculum. *School Science and Mathematics*; 93 (6), 325-331.
- Orion, N. (2001) - Earth science education: from theory to practice – implementation of new teaching strategies in different learning environments. *In* Marques, L. & Praia, J. (Coord.). *Geociências nos Currículos dos Ensinos Básico e Secundário*. Aveiro: Universidade de Aveiro; 261-282.
- Orion, N., Hofstein, A. (1991) - The Measurement of Students' Attitudes Towards Scientific Field Trips. *Science Education*; 75 (5), 513-523.
- Orion, N., Hofstein, A. (1994) - Factors that Influence Learning during a Scientific Field Trip in a Natural Environment. *Journal of Research in Science Teaching*; 31 (10), 1097-1119.
- Orion, N., Hofstein, A., Mazor, E. (1986) - A field based high school geology course: Igneous and metamorphic terrains, an Israeli experience. *Geology Teaching*; 11, 16-20.
- Ruivo, L., Guimarães, P., Patrão, I., Dantas, J., Dourado, L. (1995) - *Trabalhos Práticos de Geologia - bloco I*. Edições ASA, Porto, 219-222.

- Silva, C.P., Amador, F., Baptista, J.F.P., Valente, R.A., Mendes, D., Rebelo, D., Pinheiro, E. (2001) - Programa de Biologia e Geologia 10º ano. Departamento do Ensino Secundário, Ministério da Educação. Lisboa; 97p.
- Teixeira, C., Medeiros, A.C., Fernandes, A.P. (1969) - Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000, Notícia Explicativa Folha 14-A Lamego; Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos de Portugal.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

A utilização de simulações computacionais como ferramenta de apoio à prospecção geofísica com técnicas sísmicas

Luís Godinho¹

¹Departamento de Eng. Civil, Universidade de Coimbra, PORTUGAL, lgodinho@dec.uc.pt

Palavras-chave: Prospecção geofísica, Modelação; Sísmica; Métodos sem-malha

Resumo

Diferentes técnicas têm sido utilizadas com sucesso na prospecção geofísica de recursos naturais. Entre estas, as técnicas sísmicas têm-se revelado de grande utilidade no apoio à prospecção petrolífera, revelando-se eficazes na identificação de estruturas geológicas enterradas, essencial na previsão da localização de potenciais reservatórios petrolíferos em profundidade. Estas técnicas baseiam-se, fundamentalmente, na interpretação de sismogramas obtidos *in-situ*, registados num conjunto de geofones (ou hidrofones, no caso da prospecção em ambientes marítimos) devido à actuação de uma fonte sísmica. No entanto, embora a interpretação mais básica destes sismogramas forneça já informação importante sobre as estruturas existentes no local, para tirar o máximo proveito das informações recolhidas é essencial a utilização de técnicas de simulação computacional que permitam a validação e a correcção destas interpretações. Assim, o papel dos métodos numéricos aplicados à simulação da propagação de ondas acústicas e sísmicas em estruturas geológicas complexas revela-se fundamental, podendo estes constituir uma ferramenta de optimização da exploração geofísica. No presente trabalho pretende-se ilustrar a aplicação de técnicas numéricas de simulação, nomeadamente baseadas em Métodos sem Malha, no apoio à exploração sísmica de terrenos e na geração de imagens das estruturas existentes no sub-solo. Será apresentada uma breve formulação matemática das técnicas tratadas, seguindo-se um exemplo de aplicação, versando sobretudo o problema directo (simulação da propagação), mas ilustrando também os resultados que se podem obter recorrendo a técnicas de inversão.

Key-words: *Meshless methods; Geophysical exploration; Complex media*

Abstract

Different techniques have been used with different degrees of success in geophysical prospection of natural resources. Among those techniques, seismic methods have proved to be useful in oil prospection, allowing the accurate identification of buried structures which is essential in this task. Those methods are based, mainly, on the interpretation of seismogram acquires near the surface, at a set of geophones (or hydrophones in oceanic environments) generated by a seismic source. Although the basic interpretation of those

seismograms can, itself, provide valuable information about the existing buried structures, more sophisticated methods can greatly help to extract the maximum information from those data sets. Among those methods, numerical simulation plays a determinant role. Thus, the application of numerical techniques to simulate acoustic and elastic wave propagation in complex structures is a topic of interest for seismic exploration, which became over the last years crucial in practical applications. In this work, the application of numerical methods to simulate the propagation of acoustic waves in realistic geological scenarios is illustrated. For that purpose, a meshless formulation is presented and applied to simulate the propagation of waves in a realistic, complex model, designated as Marmousi model. The presented example aims at illustrating the application of the technique to solve the direct problem, although a preliminary result concerning the inverse (imaging) problem is also shown.

Introdução

As técnicas de prospecção geofísica são, hoje em dia, uma ferramenta essencial na identificação da estrutura geológica de terrenos, permitindo a obtenção de informação relevante sobre a variação das suas características em profundidade. Nas últimas décadas, estas técnicas têm vindo a ser progressivamente desenvolvidas e aperfeiçoadas, de forma a permitir a obtenção de informação cada vez mais detalhada sobre estas estruturas.

É comum admitir-se que estas técnicas se dividem em dois grandes grupos, inserindo-se num deles as que fazem uso dos campos gerados pela própria Terra (sejam eles eléctricos, electromagnéticos ou gravíticos) e os que requerem a introdução de energia nos terrenos recorrendo a uma ou mais fontes artificiais. Do ponto de vista prático, no primeiro grupo de técnicas avalia-se a variação dos referidos campos naturais, correlacionando-a com a presença de eventuais depósitos de recursos com potencial interesse económico; a sua principal vantagem é a de permitirem uma avaliação das características geológicas dos terrenos a maiores profundidades. No caso das técnicas que recorrem à introdução de energia com recurso a uma fonte externa, estas fontes são utilizadas para gerar localmente um campo eléctrico ou electromagnético cuja interacção com o terreno permita inferir a localização de eventuais estruturas enterradas. A grande vantagem deste tipo de técnicas consiste na maior resolução e detalhe que permitem obter, fruto de uma maior concentração de energia na zona a analisar. Neste grupo inserem-se ainda aquelas que são, talvez, as técnicas mais utilizadas no âmbito da prospecção de recursos naturais, baseadas na avaliação da propagação de ondas sísmicas e acústicas. Neste tipo de técnicas, as velocidades de propagação e os trajectos percorridos

pelos diferentes tipos de ondas são analisadas e mapeadas em profundidade, permitindo identificar a presença e localização de estruturas reflectoras existentes em profundidade.

Diversos trabalhos de referência têm analisado a aplicabilidade, o rigor e as potencialidades de cada uma das técnicas, como os trabalhos de Keary *et al.* (2002) ou de Gadallah *et al.* (2008).

O objectivo último das técnicas de prospecção geofísica é, tal como já foi referido, a obtenção de imagens que permitam perceber, de forma concisa, a real configuração de maciços subterrâneos. Para esse efeito, a interpretação dos sismogramas obtidos pela aplicação de técnicas sísmicas torna-se essencial, em particular a correcta interpretação da posição dos impulsos reflectidos em interfaces subterrâneas registados em geofones ou hidrofones colocados à superfície. Um dos processos mais usados no apoio a esta interpretação é o da migração de dados sísmicos, apoiada em técnicas numéricas mais ou menos complexas. Neste processo, o objectivo é localizar o conjunto de pontos abaixo da superfície que produzem as reflexões registadas nos receptores superficiais, procurando ainda estimar a ordem de grandeza dos coeficientes de reflexão das superfícies que lhes correspondem.

A interpretação dos dados recolhidos usando muitas das técnicas de campo usadas na prospecção geofísica beneficia largamente do apoio adicional de ferramentas numéricas de maior ou de menor complexidade. No caso das técnicas sísmicas e acústicas, é comum o recurso a modelos numéricos de propagação de ondas para permitir uma correcta interpretação dos dados de campo. Neste domínio, as ferramentas de simulação baseadas em diferenças-finitas, em elementos finitos ou em métodos sem-malha têm vindo a ser desenvolvidas por vários investigadores. Referem-se, a título de exemplo, os trabalhos de Boore (1972), Souza *et al.* (2004), de Hulbert *et al.* (1990), de Bayliss *et al.* (1986) ou de Komatitsch *et al.* (1999) no que respeita aos métodos de elementos e diferenças finitas, e as formulações sem malha, baseadas no *Element Free Galerkin Method*, propostas por Jia *et al.* (2005, 2006).

De todos os métodos numéricos referidos, os métodos sem-malha são, seguramente, os que se encontram ainda numa fase de menor maturidade, e aos quais os investigadores têm vindo progressivamente a dedicar maior atenção. Apesar de menos desenvolvidas, estas técnicas apresentam-se muito promissoras, desde logo pelo facto de permitirem um menor esforço na definição dos modelos a simular, uma vez que, em geral, não requerem informação relativa a conectividade entre nós ou elementos. No presente trabalho pretende ilustrar-se a aplicação de uma técnica sem malha à

simulação da propagação de ondas acústicas em meios complexos, procurando evidenciar-se a sua aplicabilidade a configurações reais. Para tal, apresenta-se neste texto uma técnica numérica sem-malha baseada na utilização de *funções de base radial* (RBFs) para a resolução da equação de propagação de ondas acústicas no domínio espaço-tempo. Apresenta-se, em primeiro lugar, a formulação matemática da técnica proposta, seguindo-se, depois, um exemplo de aplicação no qual se ilustra a aplicabilidade desta técnica a configurações complexas.

Formulação matemática

Para formular o problema geral de propagação de ondas num meio heterogéneo, que constitui a base das técnicas sísmicas de prospecção, considere-se um domínio generico onde a velocidade de propagação, $v(\mathbf{x})$, e a densidade, $\rho(\mathbf{x})$, são dependentes do ponto do domínio considerado. Nestas circunstâncias, considerando adicionalmente que apenas se propagam ondas de compressão (caso acústico), e na ausência de amortecimento, a equação escalar de propagação de ondas pode ser escrita como

$$\rho(\mathbf{x})\nabla\left(\frac{1}{\rho(\mathbf{x})}\nabla p(\mathbf{x},t)\right)=\frac{1}{v(\mathbf{x})^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}p(\mathbf{x},t) \quad (1a)$$

onde $p(\mathbf{x},t)$ representa a grandeza avaliada no ponto \mathbf{x} (que no caso acústico usualmente se considera como pressão) e no instante t . Se for considerada a simplificação adicional de um meio com velocidade constant, que não conduz a alterações nos tempos de percurso das ondas, esta equação pode ser escrita da forma simplificada

$$\nabla^2 p(\mathbf{x},t)=\frac{1}{v(\mathbf{x})^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}p(\mathbf{x},t). \quad (1b)$$

Esta equação de propagação estabelece a interdependência entre as derivadas temporais e espaciais da grandeza p , e tem que ser satisfeita em todos os pontos do domínio de propagação a analisar. Nos limites do domínio de análise torna-se ainda necessário impor as condições de fronteira adequadas, que podem corresponder à imposição de um determinado valor de p ($p(\mathbf{x},t)=p_b$), da sua derivada espacial numa dada direcção

($\frac{\partial}{\partial n}p(\mathbf{x},t)=f_b$), ou de uma relação entre estas grandezas e a derivada

temporal de p . Este ultimo caso é particularmente útil quando se pretende impor uma condição de fronteira absorvente, como a condição de Engquist-Majda de primeira ordem, dada por

$$\frac{\partial}{\partial t} p(\mathbf{x}, t) = \pm v(\mathbf{x}) \frac{\partial}{\partial n} p(\mathbf{x}, t) \quad (2.2)$$

onde \hat{n} representa a direcção normal à fronteira no ponto de interesse.

Tal como referido na introdução deste trabalho, os métodos explícitos são, em muitos casos, preferidos para a resolução da equação (1b) por permitirem, com facilidade, o tratamento de problemas de grande dimensão. O uso destes métodos implica que, *a priori*, se conheçam as quantidades $p(\mathbf{x}, t)$ para $t \leq t_i$, e que, por isso, possam ser usadas para estimar a mesma grandeza em $t = t_{i+1}$. Considerando a estratégia clássica de marcha no tempo recorrendo a diferenças finitas centradas, com um incremento temporal Δt , pode escrever-se

$$\nabla^2 p(\mathbf{x}, t_i) = \frac{1}{v(\mathbf{x})^2} \left[\frac{p(\mathbf{x}, t_{i-1}) - 2p(\mathbf{x}, t_i) + p(\mathbf{x}, t_{i+1})}{\Delta t^2} \right]. \quad (3)$$

Nesta equação, o operador $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ depende unicamente das derivadas espaciais de p no instante t_i , para o qual a distribuição de p é já conhecida em todo o domínio. Assim, torna-se possível aproximar este operador usando diferentes metodologias. Destas as mais usadas, e simultaneamente mais simples, correspondem a aproximações de diferenças-finitas espaciais de diferentes ordens, como as de segunda ou de quarta ordens. Considerando, por exemplo, uma aproximação espacial de segunda ordem para este operador diferencial, pode escrever-se:

$$\nabla^2 p(\mathbf{x}_{x,y}, t_i) = \left[\frac{p(\mathbf{x}_{x-\Delta x, y}, t_i) + p(\mathbf{x}_{x+\Delta x, y}, t_i) - 4p(\mathbf{x}_{x,y}, t_i) + p(\mathbf{x}_{x, y-\Delta y}, t_i) + p(\mathbf{x}_{x, y+\Delta y}, t_i)}{h^2} \right] \quad (4)$$

Note-se, no entanto, que esta equação apenas é válida quando se considera que o meio de propagação é discretizado com recurso a uma grelha regular de pontos, igualmente espaçados de h segundo as duas direcções ortogonais, sendo a generalização para outras configurações de pontos bastante complexa do ponto de vista da implementação computacional.

Alguns autores têm proposto procedimentos alternativos para a resolução deste problema na presença de discretizações genéricas, não regulares, do domínio, recorrendo a estratégias como o método dos elementos finitos ou a métodos sem malha (p.ex. Jia *et al.* (2006)).

Recentemente, Godinho *et al.* (2010) propuseram uma estratégia numérica baseada num método sem malha para permitir esta análise sobre distribuições genéricas, eventualmente não regulares, de pontos. Nesta técnica, os autores usam uma representação do campo de pressões $p(\mathbf{x}, t_i)$, no instante t_i , baseada numa combinação linear de funções de base radial (*Radial Basis Functions – RBFs*), centradas em N_n pontos do domínio situados apenas na vizinhança do ponto em análise, e para o qual se pretende estimar o operador diferencial. Assim, o campo de pressões pode ser escrito como

$$p(\mathbf{x}, t_i) = \sum_{j=1}^{N_n} \varphi_j(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}) A_j \quad (5)$$

em que \mathbf{x}_j representa o ponto central da RBF j . Dado que a quantidade $p(\mathbf{x}, t_i)$ é conhecida para todos os pontos do domínio, torna-se possível estabelecer um sistema de N_n equações a N_n incógnitas que permite a determinação dos factores de amplitude das funções (A_j).

É importante notar que a aplicação de RBFs implica a definição de um domínio de suporte, do qual depende o número de pontos N_n a considerar em (5). Caso o domínio de suporte seja muito alargado, o sistema de equações associado torna-se de grande dimensão; adicionalmente, usando as funções de base radial mais comuns, como as funções MQ (multiquádricas), o sistema torna-se totalmente preenchido, e o método exige recursos computacionais elevados, tornando-se quase impossível a sua utilização. No entanto, tendo em consideração que o objectivo da utilização desta

estratégia é a estimativa do operador $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ (em pontos internos),

ou de derivadas de primeira ordem da pressão (nos pontos da fronteira), uma aproximação local pode tornar-se adequada e proporcionar uma correcta reprodução do campo de pressões em torno de cada ponto de análise. Assim, se considerarmos um domínio de suporte mais limitado, em redor do ponto k , incluindo apenas um número reduzido de pontos vizinhos, N_n torna-se pequeno e o sistema passa a ser bastante compacto, ainda que totalmente preenchido. Apesar de compacto, este subdomínio localizado em torno do ponto de análise pode apresentar uma qualquer forma, não sendo requisito do método que os pontos que o integram se situem sobre uma grelha ortogonal. No entanto, em muitas aplicações práticas, pode ser conveniente

a utilização desse tipo de configurações; apresentam-se, por isso, na Figura 1 exemplos dos pontos de interpolação que se obtêm nesse caso, considerando que o subdomínio apresenta uma forma circular com raios h , $2h$ ou $3h$, em que h representa o espaçamento entre pontos em qualquer das direcções ortogonais.

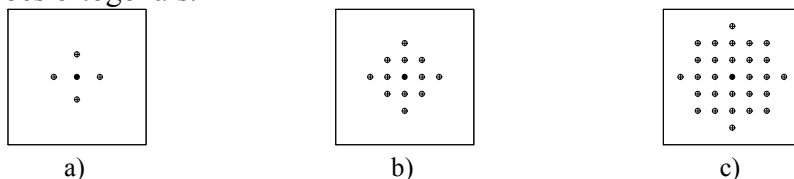


Figura 1. Subdomínio local de interpolação em torno do ponto de análise quando se usam: a) 5 pontos (raio de h); b) 13 pontos (raio de $2h$); c) 29 pontos (raio de $3h$).

Dos diferentes tipos de RBFs que podem ser usados, as do tipo MQ são, provavelmente, as mais utilizadas, assumindo a forma

$$\varphi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sqrt{r^2 + c^2}, \text{ com } r = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}, \text{ para } \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \in \Omega_k,$$

onde Ω_k é o domínio local de análise em torno de \mathbf{x}_k , e c é o parâmetro livre (ou parâmetro de forma) da função MQ. Este parâmetro pode afectar grandemente o rigor da aproximação pretendida, e a sua selecção criteriosa ainda é um problema em estudo por muitos investigadores. (veja-se, por exemplo, os trabalhos de Kansa e Hon (2000), Sarra e Sturgill (2009), ou Cheng *et al.* (2003)). Devido à dificuldade em encontrar um valor óptimo para este parâmetro, outras funções, como as da família r^{2n+1} , têm também sido testadas.

Para o caso específico da propagação de ondas em sistemas acústicos, Godinho *et al.* (2010) propuseram uma estratégia que permite estimar um valor adequado para o parâmetro livre da função MQ, tendo em consideração alguns pressupostos aplicáveis a esse tipo de problema. Assim, supondo que a onda que se propaga no sistema apresenta a configuração de um pulso de Ricker (dada, no domínio do tempo, pela função $p(\tau) = (1 - 2\tau^2)e^{-\tau^2}$, com $\tau = (t - t_s)/t_0$, sendo t_s o tempo para o qual ocorre o valor de pico e $f_0 = 1/\pi t_0$ a frequência característica do pulso), estes autores concluíram que um valor adequado para c será o que melhor permite reproduzir as segundas derivadas deste pulso quando ele é aplicado espacialmente em torno do ponto de análise. Para o caso de malhas regulares, e para a situação em que o raio que define o subdomínio é $2h$, os autores concluíram que o parâmetro c pode ser estimado a partir da curva apresentada na Figura 2.

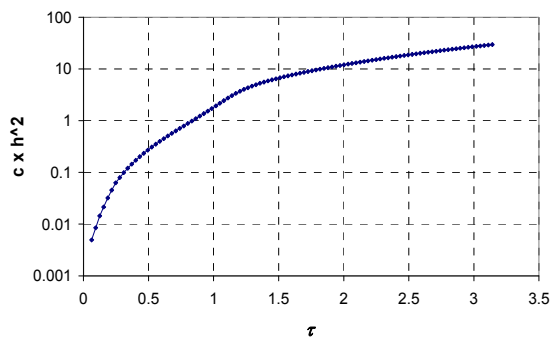


Figura 2. Curva que traduz o valor de c para malhas regulares com espaçamento h , sendo $\tau = f_0 h / v_0$.

Aplicação a um sistema geológico complexo – o modelo de Marmousi

Para ilustrar as potencialidades dos modelos matemáticos referidos na secção anterior, procedeu-se à sua aplicação para a simulação da propagação de ondas geradas por uma fonte de pressão na presença de um sistema geológico complexo. Para este efeito, considere-se a configuração tratada em Versteeg (1994), designada usualmente por modelo de Marmousi. Trata-se de um modelo que representa um ambiente marinho e que reproduz uma zona específica da Bacia de Cuanza, em Angola.

Do ponto de vista geológico, a formação desta estrutura pode separar-se em duas fases distintas. Numa primeira fase ocorreram fenómenos de sedimentação predominantemente de margas e carbonatos. Seguiu-se uma fase em que estes depósitos foram ligeiramente dobrados e erodidos, gerando uma superfície final aproximadamente plana. Numa segunda fase ocorreu um conjunto de fenómenos de evaporação, dando origem a um depósito de sal sobre a superfície plana referida. Nesta sequência, depositaram-se, também, argilas margosas ricas em matérias orgânicas. Seguiu-se então a deposição de sedimentos argilo-arenosos, em camadas espessas, cuja pressão originou o deslizamento lateral do depósito de sal subjacente. Neste processo de deslizamento do sal originaram-se falhas geológicas que poderão ter estado activas durante um período prolongado, gerando uma descontinuidade entre os estratos das camadas superiores. A Figura 3 apresenta uma representação esquemática deste modelo, ilustrando as velocidades de propagação das ondas de compressão associadas a cada uma das camadas. Assim, no modelo de Marmousi, a camada superior corresponde à água do mar, com uma velocidade de propagação de cerca de 1500 m/s. Abaixo da água, sucedem-se diferentes camadas com

características distintas, representando estratos mais ou menos rígidos. A uma profundidade entre 2 km e 3 km surge a camada de sal, material muito rígido e onde se atingem velocidades de propagação das ondas de compressão de cerca de 5500 m/s.

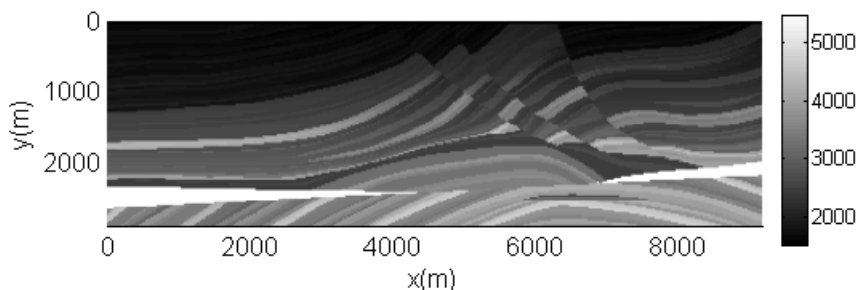


Figura 3. Distribuição de velocidades de propagação das ondas de compressão no modelo de Marmousi.

Do ponto de vista geofísico, esta estrutura geológica apresenta uma enorme complexidade, sendo expectáveis padrões de propagação de ondas de difícil interpretação. No caso de se considerarem modelos de simulação de ondas elásticas, essa complexidade é ainda maior. Por esse motivo, grande parte das análises encontradas na literatura fazem uso de modelos de propagação de ondas acústicas, por serem de mais simples interpretação, mantendo, ainda assim, muitas das características fundamentais dos fenómenos físicos registados in-situ. No presente trabalho aplica-se o método sem-malha descrito na secção anterior para simular a propagação de ondas acústicas no referido modelo. Para esse efeito, o modelo original foi reamostrado numa grelha de pontos distribuídos de forma regular no espaço, com espaçamento de 12 m nas duas direcções ortogonais, totalizando 221540 pontos. Todos os resultados aqui apresentados foram obtidos recorrendo a marcha no domínio do tempo com intervalos de 0.5 ms.

Na Figura 4 apresentam-se três “snapshots” que representam a pressão acústica calculada pelo modelo proposto em três momentos distintos, após disparo de uma fonte localizada em $x=2928$ m e $y=72$ m.

No instante inicial, $t=0.5$ s, o padrão de propagação apresenta ainda um conjunto reduzido de frentes de onda, uma vez que, até este instante, a propagação se deu essencialmente na água e nas camadas sedimentares mais superficiais. Assim, torna-se claramente identificável a onda incidente, seguida de uma frente de onda com a fase invertida, correspondente a uma primeira reflexão ocorrida na superfície livre. À medida que o tempo

avança, a energia propaga-se afastando-se do ponto fonte. Nesse processo, atinge as restantes camadas do modelo, onde se geram novas reflexões. O padrão torna-se, por isso, mais complexo, e para $t=1.0s$ registam-se

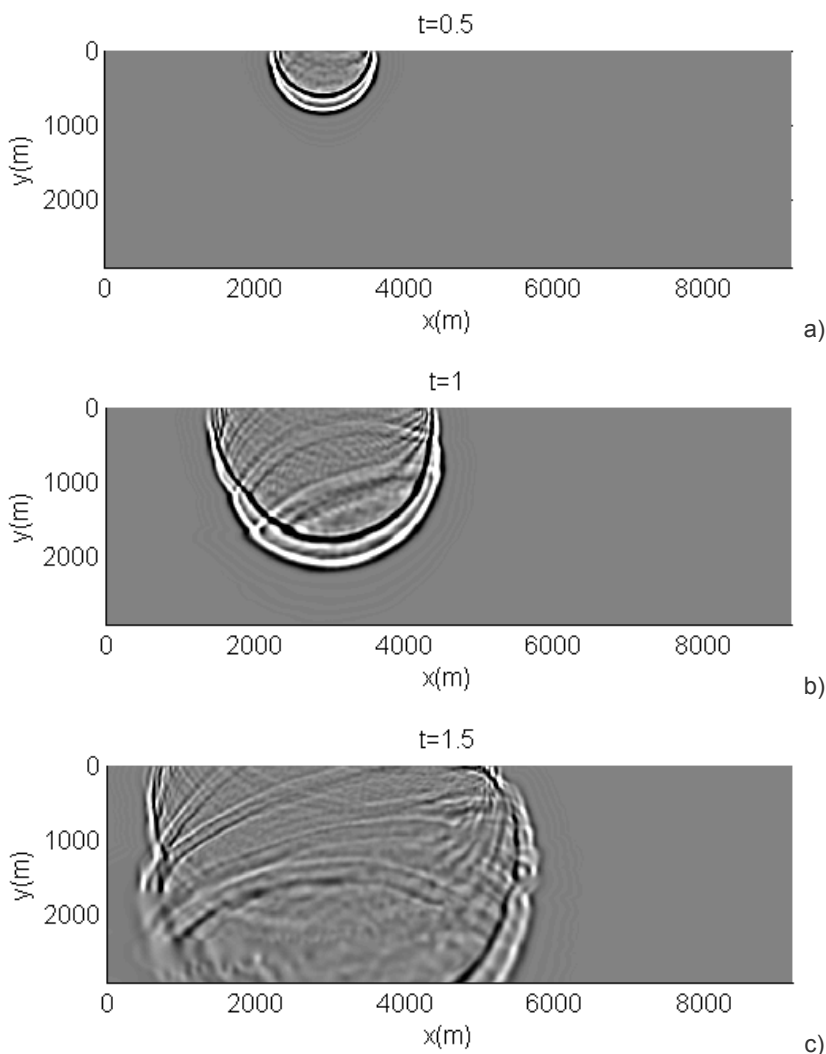


Figura 4. “Snapshots” da propagação de ondas no modelo acústico.

claramente frentes de onda adicionais originadas em reflexões da energia incidente em interfaces de maior contraste. Note-se, na mesma imagem, que

a forma inicialmente circular da frente de onda incidente vai progressivamente dando lugar a uma geometria mais complexa, situação que é gerada pela existência de velocidades de propagação distintas nas diferentes camadas do modelo. Para $t=1.5s$ a energia atingiu já a profundidade máxima do modelo, e o padrão de propagação integra agora um elevado número de frentes de onda. O efeito da presença de uma camada rígida (sal) torna-se agora evidente, levando a que ocorra uma grande atenuação da energia que se propaga a camadas situadas a maiores profundidades. É, no entanto, interessante verificar que, na zona central do modelo, a descontinuidade das camadas de sal permite que a onda incidente atinja as camadas inferiores (sob o sal) com maior amplitude.

A análise até aqui apresentada pretendeu, apenas, ilustrar a aplicabilidade do método numérico proposto ao estudo da propagação de ondas em meios de grande complexidade. Do ponto de vista da prospecção geofísica, o maior interesse está, no entanto, na obtenção de imagens em profundidade que permitam, a partir de uma estimativa inicial, obter informações relativas à possível localização e dimensão de reservatórios de recursos fósseis (nomeadamente petróleo). Para o efeito, é comum juntar aos modelos de propagação, como o que aqui se apresentou, métodos de migração sísmica, que permitam a obtenção de imagens fidedignas das estruturas enterradas. Na Figura 6 ilustra-se o resultado da aplicação de uma técnica de migração de dados sísmicos, a “*RTM - reverse time migration*” (migração reversa no tempo), em conjunto com o modelo de propagação proposto ao modelo geológico de Marmousi. Para a aplicação desta metodologia, consideraram-se várias posições de fonte distintas, espaçadas entre si de 100 m, todas elas a 72 m de profundidade, e realizou-se o cálculo dos sismogramas sintéticos em receptores localizados junto da superfície. O processo de migração foi efectuado através do empilhamento das imagens obtidas após migração (“empilhamento pós-migração”), não tendo, no entanto, sido aplicados nenhuns mecanismos de aperfeiçoamento da imagem ou de processamento adicional. A imagem assim obtida (Figura 5) revela, ainda assim, o aspecto geral do modelo de Marmousi, sendo claramente identificáveis as várias camadas que o compõem. É interessante notar que, na zona central, entre as duas estruturas de sal, se observa a presença de uma pequena zona mais escura, que corresponde a um reservatório enterrado (que pode também ser claramente identificado no modelo inicial da Figura 3).

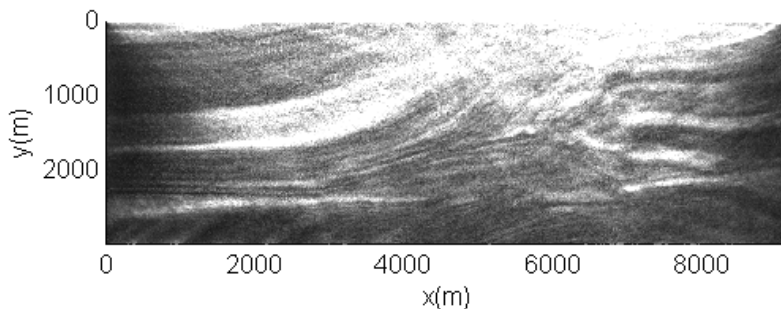


Figura 5. Imagem em profundidade obtida por migração (RTM) de sismogramas sintéticos.

Conclusões

No presente trabalho apresentou-se a formulação matemática de um método sem malha que permite a simulação da propagação de ondas acústicas em sistemas geológicos complexos. Ilustrou-se, adicionalmente, a sua aplicação a um dos casos de teste mais divulgados na área da exploração petrolífera, o modelo de Marmousi, mostrando que o método proposto é facilmente aplicável a problemas de elevada complexidade. Para além dos casos apresentados neste trabalho, torna-se importante referir que, por se tratar de uma técnica sem-malha, a formulação proposta pode apresentar vantagens significativas em relação a outras técnicas, nomeadamente por permitir a adopção de distribuições não regulares de pontos (ao contrário das técnicas clássicas de diferenças-finitas), e por não necessitar de informação sobre conectividades entre elementos (ao contrário do método dos elementos-finitos), vantagens que podem facilitar a criação de modelos complexos incluindo, por exemplo, fronteiras irregulares.

Bibliografia

- Bayliss, A., Jordan, K.E., Lemesurier, B.J., Turkel, E. (1986) - A fourth-order accurate finite-difference scheme for the computation of elastic waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 76(4), 1115-1132.
- Boore, D. (1972) - Finite-difference methods for seismic waves. *Methods in computational physics* (Ed. B. Bolt); 11, 1-37, New York.
- Cheng, A. H.-D., Golberg, M.A., Kansa, E.J., Zangit, G. (2003) - Exponential convergence and h-c Multiquadric collocation method for partial differential equations. *Numer. Meth. Partial Diff. Eq.*; 19, 571-594.
- Gadallah, M. R., Fisher, R. (2009) - *Exploration Geophysics*. Springer-Verlag.
- Godinho, L., Dors, C., Soares Jr., D., Amado-Mendes, P. (2010) - "A Local Radial Basis Function Interpolation Model to Simulate Time-Domain Acoustic Wave Propagation". *The Tenth*

- International Conference on Computational Structures Technology, Valencia, Espanha, Setembro de 2010.
- Hulbert, G., Hughes, T. (1990) - Space-Time finite Element Methods for Second-order Hyperbolic Equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*; 84, 327-348.
- Jia, X. Hu, T. (2006) - Element-free precise integration method and its applications in seismic modelling and imaging, *Geophys. J. Int.*; 166, 349-372.
- Jia, X. Hu, T., Wang, R. (2005) - A Meshless Method for Acoustic and Elastic Modeling, *Appl. Geophys.*; 2, 1-6.
- Kansa, E., Hon, Y.C. (2000) - Circumventing the ill-conditioning problem with multiquadric radial basis functions: Applications to elliptic partial differential equations. *Comput. Math. Appl.*; 39, 123-137.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2002) - *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science.
- Komatitsch, D., Tromp, J. (1999) - Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. *Geophysical Journal International*; 139 (3), 806–822.
- Sarra, S.A., Sturgill, D. (2009) - A random variable shape parameter strategy for radial basis function approximation methods. *Eng. Anal. Boundary Elem.*; 33, 1239-1245.
- Souza, L. A., Carrer, J., Martins, C. (2004) - A Fourth Order Finite Difference Method Applied to Elastodynamics: Finite Element and Boundary Element Formulations. *Structural Engineering and Mechanics*; 17, 735-749.
- Versteeg, R. (1994) - The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set. *The Leading Edge*; 927-936.

(Página deixada propositadamente em branco)

Avaliação de projectos mineiros: abordagens clássicas e opções reais

Pedro Godinho¹

¹Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, PORTUGAL, pgodinho@fe.uc.pt

Palavras-chave: Avaliação de projectos mineiros, Opções reais

Resumo

Os projectos mineiros são caracterizados pela existência de risco, bem como pela possibilidade de os gestores empreenderem acções que permitam tirar partido, ou minimizar o impacto negativo, de acontecimentos incertos. A teoria financeira tem vindo a mostrar que os métodos clássicos não são adequados à avaliação de projectos com estas características. Para estes projectos foram desenvolvidos modelos baseados na avaliação de opções financeiras, geralmente designados por modelos de opções reais. Neste artigo apresenta-se uma perspectiva geral sobre a aplicação de análise de opções reais a projectos de exploração mineira. Começam por se apresentar algumas fragilidades dos métodos clássicos de avaliação. Ilustra-se a lógica subjacente a modelos de opções reais, e apresenta-se o modelo clássico de aplicação de análise de opções reais a projectos mineiros.

Key-words: *Valuation of mining projects, Real options*

Abstract

Mining projects are characterized both by the existence of risk and by the possibility of managers undertaking actions that maximize the positive impacts of random events, or minimize their negative consequences. Financial theory shows that classical methods are not suitable to evaluate such projects. For such cases, some models were developed based on results from the evaluation of financial options: the real options models. This paper presents a general view on the application of real options analysis to mining projects. Some problems of the classical evaluation methods are discussed, and the logic underlying real options analysis is presented. The classical model that applies real options analysis to a mining project is also presented

Introdução

Num texto em que fazia uma retrospectiva sobre os principais temas relativos a economia dos minerais tratados pela revista *Resources Policy* entre os anos de 1989 e 2006, Eggert (2008) apresentava os temas da

procura de metais e minerais, da transição económica, do desenvolvimento sustentável e da ligação entre recursos minerais e crescimento económico. Depois de referir estes quatro temas, Eggert notava que existia um quinto tema que se desenvolvera de forma discreta mas sustentada: aquilo que o autor designava por “avaliação de opções” ou, mais concretamente, a utilização, na avaliação de activos reais (*e.g.*, projectos de investimento ou depósitos minerais subterrâneos), de métodos originalmente desenvolvidos para avaliação de opções financeiras. Esta forma de avaliação de activos reais é geralmente designada por Análise de Opções Reais (AOR), e procura colmatar diversas insuficiências das abordagens clássicas. O presente trabalho irá apresentar uma breve perspectiva sobre estas insuficiências, e sobre a forma como a AOR as procura contornar.

O artigo encontra-se estruturado da forma que agora se descreve. No Capítulo 2 procede-se a uma breve apresentação da abordagem clássica à avaliação de projectos, fazendo-se ainda referência à sua aplicação no sector mineiro. O Capítulo 3 procura dar uma ideia do tipo de modelos utilizados em AOR, através de um exemplo simples. O Capítulo 4 procede a uma breve apresentação do modelo de Brennan e Schwartz (1985), que constitui a principal referência na aplicação de AOR a projectos de exploração mineira. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta algumas notas finais.

A Abordagem Clássica de Avaliação

Várias medidas têm vindo a ser propostas para a avaliação de projectos de investimento (ver, por exemplo, Remer e Nieto, 1995a e 1995b, ou Godinho *et al.*, 2003). De todas essas medidas, o Valor Actual Líquido (VAL) é considerado, de forma quase unânime, a teoricamente mais fundamentada (ver, por exemplo, Brealey e Myers, 2000). O VAL representa o valor de mercado líquido de um projecto, ou a contribuição líquida de um projecto para o valor da empresa, medindo, assim, a forma como este contribui para aquele que deve ser o objectivo dos gestores: a maximização do valor.

O VAL é simplesmente a soma dos fluxos monetários gerados pelo projecto, actualizados para o momento inicial. Esta medida pode assim ser definida como

$$\text{VAL} = \sum_{t=0}^T \frac{F_t}{(1+r)^t}, \quad (2.1)$$

em que T é o tempo de vida do projecto, F_t é o fluxo de caixa esperado para o ano t , isto é, a diferença entre os fluxos de entrada (recebimentos) e os de saída (pagamentos) gerados pelo projecto nesse ano, e r é o custo do capital

do projecto. O custo do capital representa a taxa de rentabilidade exigida ao projecto, devendo ter em consideração o valor temporal do dinheiro e o risco do investimento.

Em aplicações práticas, o VAL é geralmente calculado tendo em consideração fluxos de caixa correspondentes a períodos discretos, tal como definido em (2.1). No entanto algumas vezes, especialmente em modelos teóricos, é conveniente considerar os fluxos de caixa em tempo contínuo. Nesse caso o VAL pode ser escrito como

$$\text{VAL} = \int_0^T F_t \cdot e^{-\lambda t} dt, \quad (2.2)$$

em que T é o tempo de vida do projecto, F_t é o fluxo de caixa esperado para o instante t , e λ é o custo do capital com capitalização contínua (relacionado com r por $\lambda = \ln(1+r)$).

Como se percebe das expressões (2.1) e (2.2), o custo do capital tem uma grande influência nos valores obtidos. O custo do capital deve ser idêntico à rentabilidade esperada de investimentos de risco idêntico disponíveis nos mercados de capitais, podendo a sua estimação revestir-se de alguma complexidade. Alguns autores recomendam a utilização de um modelo de equilíbrio do mercado de capitais para o cálculo do custo do capital (e.g. Brealey e Myers, 2000), sendo frequentemente utilizado o modelo de avaliação dos activos financeiros (geralmente identificado pelo acrónimo CAPM, do inglês *Capital Asset Pricing Model*). Neste modelo, assume-se que os investidores apresentam aversão ao risco, e que utilizam os mercados de capitais para diminuir, tanto quanto possível, o risco da sua carteira de investimentos. Esta minimização do risco é obtida através da posse de carteiras diversificadas. O modelo considera assim que o risco de um investimento se divide em duas parcelas: o risco específico, que pode ser eliminado por diversificação da carteira de investimentos, e o risco sistemático, que não pode ser anulado. Uma vez que os investidores podem diversificar as suas carteiras recorrendo ao mercado de capitais, apenas o risco sistemático deve ser relevante, e apenas este deve ser tomado em consideração na avaliação dos investimentos. O CAPM mede este risco através de um parâmetro designado por β , definido como:

$$\beta = \frac{\text{cov}(r, r_m)}{\text{var}(r_m)}, \quad (2.3)$$

em que r é a taxa de rentabilidade do investimento e r_m é a taxa de rentabilidade da carteira de mercado (uma carteira representativa do

mercado como um todo). O CAPM estabelece que, em equilíbrio, a rentabilidade do valor de mercado de um investimento deve obedecer a:

$$E(r) = r_f + \beta \cdot (E(r_m) - r_f), \quad (2.4)$$

em que r_f é a taxa de juro sem risco e $E(\cdot)$ é o operador de valor esperado. O custo do capital a usar na avaliação de um projecto de investimento deve ser, assim, o valor da taxa de rentabilidade esperada fornecida pela expressão (2.4). A principal dificuldade existente na utilização desta expressão para calcular o custo do capital reside na estimação do parâmetro β ou, mais concretamente, no numerador da expressão de cálculo (2.3), uma vez que os projectos de investimento não são directamente transaccionados no mercado de capitais. Para fazer face a esta dificuldade, alguns autores recomendam a utilização de *proxies* baseadas nos betas de activos com características semelhantes às do projecto, transaccionados no mercado de capitais (*e.g.* Brealey e Myers, 2000).

Vários estudos mostram que o VAL é actualmente utilizado pela generalidade das grandes empresas dos países desenvolvidos (*e.g.*, Graham e Harvey, 2001, Brounen *et al.*, 2004 e Truong *et al.*, 2008). Existem também indicações sobre a utilização do VAL pela generalidade das empresas de exploração mineira (Moyen *et al.*, 1996, Humphreys, 1996, Truong *et al.*, 2008).

Moyen *et al.* (1996) reportam a utilização, por empresas do sector mineiro, de um custo do capital de 15% na avaliação de projectos de investimento, valor esse que é aumentado quando existe risco político significativo, e diminuído quando existe competição pela aquisição de propriedades. Os autores notam que grande parte do risco dos projectos de exploração mineira é específico, pelo que estes projectos geralmente não justificam um custo do capital elevado. Com efeito, os valores estimados pelos autores, com recurso ao CAPM, para os Estados Unidos da América (EUA) e Canadá, variam entre 5% a 11%, estando assim bastante abaixo dos valores usados pelas empresas. Estes autores referem ainda que a maioria das empresas calcula o valor esperado dos fluxos de caixa tendo em conta uma estimativa de preço de longo prazo do preço do metal extraído, e referem, como exemplo, que o preço considerado para o cobre era geralmente de \$1.00 por libra (uma libra de cobre equivale a cerca de 453.6 gramas). Esta prática também poderá distorcer a avaliação dos projectos de investimento, em alturas em que existam desvios importantes entre os preços de mercado e os seus valores esperados no longo prazo.

Davis (2002) reporta a utilização de custos do capital entre 14% e 19% para projectos de exploração mineira, notando que estes valores estão

muito acima dos obtidos utilizando o CAPM. Davis e Moyen *et al.* (1996) notam que estes valores inflacionados do custo do capital podem ser explicados por divergências entre os interesses dos accionistas e os dos gestores. Com efeito, embora os accionistas das empresas da indústria extractiva possam diversificar os seus investimentos, sendo assim indiferentes ao risco específico, os gestores e trabalhadores das empresas não têm a mesma possibilidade de diversificação. Assim, como são os gestores a tomar as decisões, estes incorporam nelas um prémio de risco que tem também em conta o risco específico, usando assim um custo do capital superior àquele que seria do interesse dos accionistas.

Samis *et al.* (2006) referem que é também prática de algumas empresas de extracção mineira a identificação das diferentes fontes de risco (e.g., preços dos recursos geológicos, risco geológico, risco político) e a adição, ao custo do capital, de um prémio de risco relativo a cada uma destas fontes, prémio esse que é definido pela intuição dos gestores. Os autores notam a falta de sustentação teórica de um tal método, criticando ainda o facto de alguns projectos envolvendo investimentos muito avultados serem analisados com base em VALs calculados com recurso a um custo do capital “ubíquo” de 15%.

Para além de eventuais problemas relacionados com um possível enviesamento na estimação, o VAL, tal como é classicamente aplicado, apresenta outras fragilidades. Uma destas fragilidades concerne a possibilidade de empreender acções correctivas como resposta aos acontecimentos que possam afectar o projecto, por exemplo, como resposta à variação dos preços dos *inputs* ou dos *outputs* do projecto. Esta flexibilidade operacional não é, geralmente, tida em consideração na aplicação clássica do VAL, na qual é usual considerar um cenário estático que não tem em conta a gestão do projecto. A presença de flexibilidade operacional influencia, de forma clara, os valores dos fluxos de caixa esperados, podendo ser aí incorporada com o auxílio de ferramentas como as árvores de decisão (Magee, 1964). No entanto, a existência desta flexibilidade altera o risco do projecto, e deve assim influenciar também o custo do capital, sendo o ajustamento deste parâmetro bastante mais problemático. Brealey e Myers (2000) notam que, na presença de flexibilidade operacional, pode não existir um custo do capital constante apropriado ao projecto. No mesmo sentido, Jacoby e Laughton (1992) notam que a utilização de um custo do capital fixo pressupõe que as condições futuras sejam conhecidas e estacionárias. Com efeito, Samis *et al.* (2006) mostram que, mesmo na ausência de flexibilidade operacional, há projectos para os quais não existe um custo do capital correcto,

apresentando como exemplo um projecto estilizado de exploração de uma mina.

Estes problemas de aplicação e fragilidades do VAL calculado através da soma dos fluxos de caixa actualizados (tal como definido em (2.1) e (2.2)) justificam que este subavaliou empresas e projectos da indústria mineira. Em 1989, Nesbitt Research¹ calculou o VAL de empresas de extracção de ouro dos EUA e Canadá, concluindo que as cotações destas no mercado de capitais eram cerca de 43% superiores ao VAL assim obtido. Como nota Davis (1996), a não incorporação da flexibilidade operacional no cálculo do VAL poderá justificar, em parte, esta diferença. No mesmo sentido, Davis (2002) indica que as acções de empresas da indústria extractiva apresentavam uma rentabilidade anual média de 7%, um valor muito abaixo da rentabilidade mínima de 15% que estas empresas exigem aos seus investimentos. Uma justificação possível proposta pelo autor era que os detentores de acções destas empresas reconheciam que o risco destas era bastante mais baixo do que o implícito no custo de capital de 15%, e assim avaliavam as empresas de uma forma que lhes exigia uma rentabilidade esperada mais baixa.

No próximo capítulo iremos apresentar o tipo de modelos de avaliação que permitem evitar as dificuldades associadas à aplicação clássica do VAL.

A Análise de Opções Reais: Exemplo de Aplicação

Nas últimas três décadas foram desenvolvidos vários modelos que utilizam, na avaliação de projectos de investimento, métodos e técnicas que seguem uma lógica semelhante à usada na avaliação de opções financeiras. A utilização deste tipo de modelos é geralmente designada por Análise de Opções Reais (AOR).

Estes modelos permitem resolver, de forma teoricamente sustentada, as fragilidades apontadas ao cálculo do VAL como soma dos fluxos de caixa actualizados. Embora vários autores façam a separação entre VAL e valor do projecto de acordo com a AOR, na verdade ambos pretendem medir o mesmo valor: a contribuição líquida do projecto para o valor da empresa. A AOR permite, isso sim, estimar este valor de forma consistente com a teoria financeira nas situações em que a aplicação clássica do VAL não conduz a resultados sustentados. A AOR permite ainda determinar, de forma simultânea à avaliação do investimento, a melhor estratégia para a sua gestão – por exemplo, determinar em que situações este deve ser iniciado,

¹ Nesbitt Research (1989), Gold Asset Valuation, Toronto, Ontario, *vide* Davis(1996).

abandonado, expandido, contraído, suspenso, retomado, etc. No presente capítulo iremos dar uma ideia da lógica subjacente a este tipo de modelos, com recurso a um exemplo simples, baseado em Godinho (2003).

Considere-se uma empresa que tem um contrato que lhe concede o direito de exploração, por um ano, de uma mina de onde é possível extrair 500 toneladas de um dado metal. O contrato de exploração pode ser prolongado por um ano mediante um pagamento adicional de 12 000 euros. A decisão sobre o prolongamento ou não do prazo deve ser tomada agora e, em caso de prolongamento, o montante de 12 000 euros deve ser pago imediatamente. A empresa contrata a extracção, processamento e refinação do metal a uma outra empresa, que entregará as 500 toneladas de metal no prazo de um ano, com um custo de 450 000 euros no primeiro ano, ou 486 000 euros no segundo (valores a pagar no início do ano em que é feita a extracção). O metal é actualmente transaccionado por 1000 euros/tonelada, e em cada um dos próximos dois anos existe uma probabilidade de 50% de o seu preço aumentar 20%, e uma probabilidade de 50% de diminuir 10%. Vai assumir-se que não existem benefícios nem custos decorrentes da posse do metal², que o custo dos contratos de extracção, processamento e refinação não está sujeito a incerteza, que o metal será vendido um ano após o início da extracção e que a taxa de juro sem risco é de 8%. Para simplificar o modelo, vão ainda ignorar-se os impostos.

Comece por se analisar a possibilidade de iniciar imediatamente a extracção. Uma vez que o fluxo de caixa futuro é proporcional ao preço do metal, o risco do projecto é idêntico ao risco do preço do metal. Como não existem benefícios nem custos decorrentes da posse do metal, o custo do capital a utilizar deve ser idêntico à taxa de variação esperada do preço deste:

$$r = 50\% \cdot 20\% + 50\% \cdot (-10\%) = 5\%$$

O VAL será, assim:

$$\text{VAL} = F_0 + \frac{F_1}{1+r} = -450\,000 + \frac{50\% \cdot 500 \cdot 900 + 50\% \cdot 500 \cdot 1200}{1.05} = 50\,000 \text{ €}$$

² Geralmente existem benefícios e/ou custos que decorrem da posse dos metais e não são extensivos aos detentores de contratos que garantem a entrega futura destes. Estes benefícios são medidos por uma *convenience yield*. Neste caso está a assumir-se uma *convenience yield* nula, para simplificar o exemplo. Seria possível, alternativamente, tornar o exemplo mais realista definindo a dinâmica dos preços em termos de preços definidos pelos contratos para entrega futura, mas tal iria tornar mais complexa a sua formulação.

Pode confirmar-se este valor de uma outra forma. Não existindo benefícios nem custos decorrentes da posse do metal, iniciar o projecto proporciona os mesmos fluxos de caixa futuros que são obtidos através da compra imediata de 500 toneladas do metal. Desta forma o projecto, depois de iniciado (isto é, depois de pagos os custos de extracção, processamento e refinação), deverá valer o mesmo que a posse de 500 toneladas do metal, isto é, $500 \cdot 1000 = 500\,000$ €. Isto é assim porque duas estratégias que proporcionem os mesmos fluxos de caixa futuros devem apresentar o mesmo valor de mercado. Tendo em conta o investimento necessário para iniciar o projecto, o seu valor de mercado líquido deverá ser:

$$\text{VAL} = -450\,000 + 500\,000 = 50\,000 \text{ €}.$$

Neste caso, o VAL, tal como definido pela expressão (2.1), permite calcular correctamente o valor de mercado do projecto. Isto deve-se ao facto de, neste caso, ser possível encontrar um activo transaccionado em mercado com risco idêntico ao do projecto (o metal). Assim, o custo do capital do projecto deve ser igual à taxa de rentabilidade esperada deste activo.

Considere-se agora o adiamento do projecto por um ano. No final desse ano pode determinar-se se deve ou não iniciar-se a extracção, tendo em conta o preço que o metal apresente. Esta flexibilidade de iniciar ou não o projecto de acordo com a evolução do preço leva a que o risco do projecto não seja idêntico ao risco do preço do metal, deixando de existir um custo do capital que se possa obter directamente a partir de informação do mercado. Por forma a determinar o VAL do projecto em caso de adiamento, vai tentar replicar-se os fluxos de caixa futuros a partir de transacções no mercado.

Dentro de um ano não será possível adiar mais o início da extracção, sendo necessário decidir se se inicia esta ou se se abandona o projecto. Represente-se por VAL_1 o VAL que o projecto terá dentro de um ano, no caso de este ter sido adiado. É imediato constatar que, independentemente da evolução do preço do metal, o projecto terá $\text{VAL}_1 = 0$ € se for abandonado.

Se, dentro de um ano, se decidir iniciar a extracção, então VAL_1 irá depender do preço que o metal tiver nessa altura. Neste caso, dentro de um ano, os fluxos de caixa futuros do projecto serão idênticos aos obtidos através da aquisição de 500 toneladas do metal para venda um ano depois. VAL_1 será a diferença entre o preço de 500 toneladas do metal e o custo a pagar pela extracção, processamento e refinação do metal. Se, no primeiro ano, tiver ocorrido uma subida do preço do metal:

$$\text{VAL}_1 = 500 \cdot 1200 - 486\,000 = 114\,000 \text{ €}.$$

Se, por outro lado, no primeiro ano tiver ocorrido uma descida do preço do metal:

$$VAL_1 = 500 \cdot 900 - 486\,000 = -36\,000 \text{ €}.$$

Como o abandono do projecto garante $VAL_1 = 0 \text{ €}$, constata-se que, se o projecto tiver sido adiado, deve iniciar-se a extracção no caso de ocorrer uma subida do preço do metal e abandonar-se o projecto no caso de ocorrer uma descida. Com esta estratégia, o adiamento do projecto torna este equivalente a obter, dentro de um ano, um valor de 114 000 € no caso de subida do preço do metal, e de 0 € no caso de descida. Para encontrar o valor de mercado actual destes dois possíveis valores futuros, vamos determinar uma forma de os replicar através de investimento imediato no metal e do pedido de um empréstimo a um ano (que, por não apresentar risco, se assume remunerado à taxa de juro sem risco). Seja Q o número de toneladas do metal a adquirir, e B o montante do empréstimo contraído. Se P_1 for o preço de uma tonelada do metal dentro de um ano, o valor da carteira constituída pela aquisição do metal e pelo empréstimo será de $P_1 \cdot Q - 1.08 \cdot B$. Como queremos replicar os dois valores futuros de 114 000 € e 0 €, no caso de subida e descida do preço do metal (respectivamente), podemos determinar Q e B a partir do seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} 1\,200 \cdot Q - 1.08 \cdot B = 114\,000 \\ 900 \cdot Q - 1.08 \cdot B = 0 \end{cases}$$

A resolução deste sistema permite obter os valores $Q = 380 \text{ ton.}$ e $B = 316\,667 \text{ €}$. Assim, o adiamento do projecto permite obter os mesmos valores futuros conseguidos através da aquisição de 380 toneladas do metal em conjunto com o pedido de um empréstimo de 316 667 €. A carteira formada por estes dois elementos tem, hoje, um valor de $1\,000 \cdot Q - B = 1\,000 \cdot 380 - 316\,667 = 63\,333 \text{ €}$, pelo que deverá ser este o valor actual do projecto. Recorde-se que, para adiar o projecto, é necessário efectuar um pagamento imediato de 12 000 €. Tendo este pagamento em consideração, obtém-se

$$VAL = -12\,000 + 63\,333 = 51\,333 \text{ €}$$

Deverá ser este o valor de mercado do projecto em caso de adiamento. Sendo este valor superior ao valor de início imediato do projecto (que é $VAL = 50\,000 \text{ €}$, como calculado anteriormente), conclui-se que a estratégia óptima é adiar o projecto e iniciar a extracção dentro de um ano, no caso de subida do preço do metal, ou desistir desta no caso de descida. Note-se, por curiosidade, que se se tivesse optado por usar um custo do capital de 5% para avaliar o projecto em caso de adiamento (o mesmo custo do capital usado na situação de início imediato), com base nos fluxos de caixa

esperados, se obteria um VAL de 42 286 €. Concluir-se-ia erradamente que o projecto deveria ser imediatamente iniciado.

Procurou-se, com este modelo, apresentar de forma simples alguma da lógica subjacente à AOR. É particularmente importante a ideia de replicar os valores futuros dos projectos através de carteiras de activos transaccionados em mercados competitivos. O valor actual destas carteiras deverá ser igual ao valor actual do projecto.

O pressuposto de existirem apenas duas variações possíveis do preço do metal em cada ano é particularmente irrealista. Note-se, no entanto, que se permitirmos apenas estas duas variações em cada período de tempo, mas diminuirmos a duração deste período, tal permite-nos fazer aproximar a distribuição anual dos preços do metal de uma distribuição contínua e manter, simultaneamente, a mesma lógica de avaliação usada neste exemplo (lógica essa que seria agora aplicada a mais períodos de tempo, de menor duração). Assim, estes modelos de tempo discreto podem ser usados como aproximação de modelos em tempo contínuo. Existem também modelos que consideram directamente tempo contínuo. É esse o caso do modelo de Brennan e Schwartz (1985), que se apresenta no próximo capítulo.

O Modelo de Brennan e Schwartz

A principal referência relativa à utilização de AOR para avaliação de projectos de exploração mineira é o modelo de Brennan e Schwartz (1985). Muitos trabalhos posteriores estendem este modelo considerando diferentes processos para o preço dos recursos geológicos, extração de múltiplos recursos, diferentes abordagens de avaliação ou diferentes opções disponíveis para a gestão, mas não se afastam significativamente da estrutura do problema que lhe está subjacente. Neste capítulo, ir-se-á proceder a uma apresentação das principais características deste modelo.

Brennan e Schwartz consideram um projecto de exploração de uma mina de onde se irá extrair um único recurso geológico. Este recurso tem características homogéneas e o seu preço à vista é determinado em mercado concorrencial, seguindo um processo com a forma:

$$dS = \mu \cdot S \cdot dt + \sigma \cdot S \cdot dz, \quad (4.1)$$

em que dt é uma variação infinitesimal do tempo, dz é o incremento de um processo de Wiener padrão, apresentando uma distribuição normal com média nula e variância dt ³, S é o preço do recurso geológico, μ é o

³ Para mais detalhes sobre as características dos processos de Wiener ver, por exemplo, Dixit e Pyndick (1994).

parâmetro *drift* que representa a tendência de evolução do preço do recurso, podendo ser estocástico, e σ é o parâmetro da volatilidade deste preço.

Brennan e Schwartz consideram que o processo de variação do preço dos recursos incorpora uma *convenience yield* que reflecte os benefícios e custos da sua detenção física. Os autores descrevem esta *convenience yield* como o fluxo de serviços que advêm ao proprietário do recurso, mas não ao detentor de um contrato que permita o recebimento futuro do recurso (por exemplo, a possibilidade de obter lucro em situações de falta temporária do recurso, ou de beneficiar de diferenças de preço entre diferentes locais). Os autores assumem que a *convenience yield*, $C(S,t)$, é função do preço do recurso (S) e do tempo (t).

Brennan e Schwartz assumem que a quantidade do recurso que é possível extrair da mina é conhecida, e representada por Q . A taxa de produção da mina, quando está em funcionamento, é $q \in [\underline{q}, \bar{q}]$; $\bar{q} \geq \underline{q} > 0$, podendo ser alterada, sem custos, dentro deste intervalo. A taxa de produção pode ser reduzida abaixo do valor \underline{q} através do encerramento temporário da mina (caso em que fica $q = 0$), mas quer o encerramento temporário quer a reabertura da mina implicam custos. Uma mina que permaneça temporariamente encerrada obriga a empresa a incorrer num custo fixo de manutenção por unidade de tempo. A empresa pode também abandonar a mina, deixando assim de incorrer em custos de manutenção, mas perdendo a opção de a reabrir.

Desta forma, Brennan e Schwartz consideram que a mina pode estar em três estados: em funcionamento, temporariamente encerrada ou abandonada. Nos dois primeiros estados a empresa tem a opção, em qualquer altura, de seleccionar um estado diferente. No último estado, deixa de haver a possibilidade de fazer seja o que for. Sempre que a mina esteja em funcionamento, é necessário escolher uma taxa de produção $q \in [\underline{q}, \bar{q}]$. A política óptima de gestão da mina é definida por uma função $q(S, Q, t)$, que define a taxa de produção a utilizar quando a mina está em funcionamento, e por três limiares: $S_0(Q, t)$, $S_1(Q, t)$ e $S_2(Q, t)$. $S_0(Q, t)$ é o preço do recurso abaixo do qual a mina é abandonada, quando se encontra temporariamente encerrada; $S_1(Q, t)$ é o preço do recurso abaixo do qual a mina é temporariamente encerrada ou abandonada, quando se encontra em funcionamento; $S_2(Q, t)$ é o preço do recurso acima do qual a mina é

colocada em funcionamento, quando se encontra temporariamente encerrada.

Por forma a determinar o valor do projecto de exploração da mina e a política óptima de gestão, Brennan e Schwartz começam por determinar a relação entre o preço à vista do recurso e o preço de um contrato para entrega futura deste mesmo recurso. Para tal, constroem uma carteira sem risco composta pelo recurso e por contratos futuros sobre este. Não tendo esta carteira risco, ela deve permitir obter uma rentabilidade idêntica à taxa de juro sem risco. Desta forma, e tendo em conta que, na maturidade, o preço do contrato futuro deve ser idêntico ao preço à vista do recurso, os autores obtêm a relação entre o preço do contrato futuro e o preço à vista.

A determinação do valor da mina segue uma lógica semelhante. Os autores definem uma carteira sem risco formada pela mina e por contratos futuros sobre o recurso extraído e, considerando que esta carteira deve ter uma rentabilidade idêntica à taxa de juro sem risco, os autores definem equações diferenciais para o valor da mina quando esta se encontra em funcionamento e quando se encontra temporariamente encerrada. Os autores definem oito condições de fronteira: duas relativas ao facto de uma mina com uma quantidade nula do recurso ter valor nulo; três *value matching conditions* que indicam que, quando o preço do recurso tem um valor igual ao de um dos limiares, a empresa deve ser indiferente entre mudar o estado da mina ou mantê-lo; três *high-contact conditions* que indicam que, quando o preço do recurso tem um valor igual ao de um dos limiares, a derivada do seu valor deve ser idêntica para os dois estados separados por esse limiar (ver, por exemplo, Dixit e Pyndick, 1994, Capítulo 4, relativamente à necessidade de verificarem as *value matching conditions* e as *high-contact conditions* na solução óptima). Desta forma, os autores obtêm um modelo formado por 10 expressões que permite determinar o valor da mina mas que, no caso geral, não admite solução analítica de forma fechada⁴.

Brennan e Schwartz apresentam ainda a análise de um caso particular que permite obter solução analítica de forma fechada. As simplificações necessárias incluem considerar que a mina contém uma quantidade infinita do recurso geológico, assumir que $q = \bar{q}$ e considerar custos nulos de manter a mina temporariamente encerrada.

⁴ Por motivos de economia de espaço, o modelo completo não será aqui apresentado, mas pode ser consultado em Brennan e Schwartz (1985, p. 144).

Notas Finais

No presente artigo apresentou-se uma perspectiva sobre a aplicação de modelos de opções reais à avaliação de projectos de exploração mineira. Estes modelos têm maior consistência teórica do que as abordagens clássicas, conduzindo expectavelmente a resultados que melhor reflectem o verdadeiro valor do projecto, e permitindo ainda determinar a estratégia mais apropriada para a sua gestão.

O maior rigor dos modelos de opções reais, e o facto de permitirem a obtenção de uma estratégia de gestão do projecto, têm o custo de uma maior complexidade analítica. Pode assim colocar-se a questão de saber se os benefícios justificam este custo. Humphreys (1996) apresenta a perspectiva da RTZ Ltd. (actual Rio Tinto PLC) sobre esta questão, notando que a flexibilidade operacional terá valor especialmente em projectos marginais, isto é, projectos em que as margens de lucro sejam reduzidas. O autor nota ainda que, no caso da empresa em questão, a generalidade dos projectos apresentam custos fixos elevados e margens de lucro elevadas, pelo que seria necessário descidas muito significativas do preço dos recursos para se poder justificar o encerramento, ainda que temporário. O autor indica ainda que a empresa usava a avaliação de opções especialmente num contexto estratégico, por forma a obrigar os gestores a analisarem de forma sistemática os diferentes cenários de gestão possíveis relativamente ao projecto.

Vários autores têm analisado a importância do valor da flexibilidade operacional no valor total dos projectos. Moyen *et al.* (1996) analisam o valor da flexibilidade operacional de encerrar e reabrir uma mina, num modelo calibrado com dados relativos a minas de cobre de empresas Canadianas. No caso base dos autores, considerando uma mina que actualmente não se encontra em funcionamento e um custo do capital de 5%, a flexibilidade operacional representa uma média de 24% do valor da oportunidade de investimento. Tendo por base diferentes estudos relativos a metais diversos, Davis (1996) conclui que a flexibilidade operacional representa uma média de cerca de 8% do valor de um projecto já desenvolvido, e cerca de 41% do valor de um projecto ainda não iniciado. Considerando valores típicos das minas de cobre Canadianas, e assumindo incerteza nos custos e no preço do cobre, Slade (2001) conclui que a flexibilidade operacional pode representar 8% a 42% do valor de uma mina em funcionamento, consoante o tipo de processos usados para representar a incerteza. Analisando as minas de ouro Australianas com base no modelo de Brennan e Schwartz (1985), Colwell *et al.* (2003) concluem que a opção de encerramento representa uma média de cerca de 2% do valor das minas, mas

este valor apresenta diferenças muito importantes de mina para mina. Assim, os resultados de diferentes estudos são muito diversos. No entanto, tendo em conta a dimensão dos valores envolvidos na exploração de uma mina, a flexibilidade operacional pode ter um valor significativo. Reforçando esta conclusão, é de notar que os estudos publicados analisam apenas algumas fontes de risco e flexibilidade operacional: em modelos mais globais, é de esperar que os valores obtidos possam ser mais elevados.

Moel e Tufano (2002) notam que um número significativo de minas em condições operacionais e com reservas remanescentes são encerradas por razões económicas. Assim, as empresas usam a flexibilidade operacional na gestão de projectos mineiros. É assim importante que os modelos de avaliação considerem esta flexibilidade operacional, quer para garantir que os valores obtidos sejam tão rigorosos quanto possível, quer para um correcto apoio às decisões de gestão do projecto mineiro.

Bibliografia

- Brealey, R.A., S.C. Myers (2000) - Principles of Corporate Finance, 6ª edição. McGraw Hill/Irwin.
- Brennan, M.J. e E.S. Schwartz (1985) - Evaluating Natural Resource Investments. *Journal of Business*; 58 (2), 135-157.
- Brounen, D., A. De Jong, K. Koedijk (2004) - Corporate Finance in Europe: Confronting Theory with Practice. *Financial Management*; 33 (4), 71-101.
- Colwell, D., T. Henker, J. Ho, K. Fong (2003) - Real Option Valuation of Australian Gold Mines and Mining Companies. *The Journal of Alternative Investments*; 6 (1), 23-38.
- Davis, G.A. (1996) - Option Premiums in Mineral Asset Pricing: Are They Important, *Land Economics*; 72 (2), 167-186.
- Davis, G.A. (2002) - Economic methods of valuing mineral assets. Proceedings of the Fifth Joint Business Valuation Conference of the Canadian Institute of Chartered Business Valuators and the American Society of Appraisers.
- Dixit, A.K., Pindyck, R.S. (1994) - Investment under Uncertainty. Princeton University Press, New Jersey.
- Eggert, R.G. (2008) - Trends in Mineral Economics: Editorial Retrospective, 1989-2006. *Resources Policy*; 33 (1), 1-3.
- Godinho, P.C. (2003) - Árvores de Decisão Bicritério em Análise de Projectos. Tese de Doutoramento, Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra.
- Godinho, P.C., Afonso, A.R., Costa, J.P. (2003) - On the Use of Multiple Financial Methods in the Evaluation and Selection of Investment Projects. *Investigação Operacional*; 24 (1), 1-20.
- Graham, J., Harvey, C. (2001) - The Theory and Practice of Corporate Finance: Evidence from the Field. *Journal of Financial Economics*; 60 (2-3), 187-243.
- Humphreys, D. (1996) - New Approaches to Valuation: A Mining Company Perspective. *Resources Policy*; 22 (1-2), 75-77.
- Jacoby, H.D., Laughton, D.G. (1992) - Project Evaluation: A Practical Asset Pricing Method. *The Energy Journal*; 13 (2), 19-47.
- Magee, S (1964) - How to Use Decision Trees in Capital Investment. *Harvard Business Review*; 42, 79-96.
- Moel, A., Tufano, P. (2002) -When Are Real Options Exercised? An Empirical Study of Mine Closings. *The Review of Financial Studies*; 15 (1), 35-64.

- Moyen, N., Slade, M., Uppal, R. (1996) - Valuing Risk and Flexibility: A Comparison of Methods. *Resources Policy*; 22 (1-2), 63-74.
- Remer, D.S., Nieto, A.P. (1995a) - A Compendium and Comparison of 25 Project Evaluation Techniques. Part 1: Net Present Value and Rate of Return Methods. *International Journal of Production Economics*; 42 (1), 79-96.
- Remer, D.S., Nieto, A.P. (1995b) - A Compendium and Comparison of 25 Project Evaluation Techniques. Part 2: Ratio, Payback and Accounting Methods. *International Journal of Production Economics*; 42 (2), 101-129.
- Samis, M., Davis, G.A., Laughton, D.G., Poulin, R. (2006) - Valuing Uncertain Asset Cash Flows when There Are No Options: A Real Options Approach. *Resources Policy*; 30 (4), 285-298.
- Slade, M.E. (2001) - Valuing Managerial Flexibility: An Application of Real-Option Theory to Mining Investments. *Journal of Environmental Economics and Management*; 41 (2), 193-233.
- Truong, G., Partington, G., Peat, M. (2008) - Cost of Capital Estimation & Capital Budgeting Practice in Australia. *Australian Journal of Management*; 33 (1), 95-121.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Modelos financeiros de projectos mineiros: incorporação do risco e abordagens de avaliação

Pedro Godinho¹

¹Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, PORTUGAL, pgodinho@fe.uc.pt

Palavras-chave: Avaliação de projectos mineiros, Opções reais

Resumo

Uma avaliação financeira realista de um projecto mineiro requer a correcta incorporação do risco, e a consideração da estratégia de gestão a ser seguida. Os modelos de opções reais permitem incorporar, de forma teoricamente sustentada, o risco e a flexibilidade operacional na avaliação financeira dos projectos, permitindo ainda obter a estratégia óptima de gestão do projecto. No presente artigo apresenta-se uma perspectiva geral sobre a incorporação do risco em modelos financeiros de projectos mineiros. Uma vez que o risco e a flexibilidade operacional conduzem geralmente a uma maior complexidade analítica, é também importante perceber como é possível formalizar estes modelos e obter as correspondentes soluções. Assim, apresentam-se também as principais abordagens de avaliação de modelos financeiros de projectos mineiros.

Key-words: *Valuation of mining projects, Real options*

Abstract

The proper valuation of a mining project must take into account both the project risk and the management strategy that will be followed. Real options analysis allows a theoretically sound incorporation of risk and operational flexibility in the financial evaluation of investment projects, also providing the optimal strategy for the management of the project. This paper presents a general view on the incorporation of risk in financial models of mining projects. Since accounting for risk and operational flexibility leads to greater model complexity, it is important to understand how such models may be built, and how the solutions may be calculated. Therefore, the most important valuation approaches are also presented.

Introdução

O risco é uma componente importante dos projectos mineiros. Na presença de risco, os gestores podem tomar decisões que respondam à ocorrência de

acontecimentos incertos. Estas decisões podem permitir minorar as consequências de desenvolvimentos negativos (*e.g.*, a suspensão temporária das operações caso ocorra uma descida significativa nos preços dos recursos extraídos) ou majorar os benefícios de desenvolvimentos positivos (*e.g.*, a exploração de novas reservas com no caso de subida dos preços dos recursos geológicos).

Na presença de risco e da possibilidade de tomar decisões contingentes a acontecimentos incertos, as abordagens clássicas, que pressupõem uma gestão passiva, não permitem uma avaliação financeira realista dos projectos de investimento. Para estas situações foram desenvolvidos modelos de Análise de Opções Reais (AOR) que permitem a incorporação do risco e da flexibilidade operacional na avaliação dos projectos. Estes modelos determinam simultaneamente o valor do projecto e a estratégia óptima para a sua gestão, sendo assim a obtenção de soluções mais complexa do que nos modelos clássicos. Neste artigo procura-se dar uma perspectiva geral sobre as formas utilizadas para incorporar o risco em modelos de opções reais aplicados a projectos mineiros, e sobre as abordagens de avaliação destes modelos

O artigo encontra-se estruturado da seguinte forma. Depois desta introdução, o capítulo 2 discute a incorporação de diferentes riscos em modelos de AOR de projectos mineiros. No Capítulo 3 irão apresentar-se as principais abordagens de avaliação utilizadas para obter soluções óptimas para estes modelos. Finalmente, o Capítulo 4 apresenta os comentários finais.

Modelação do Risco nos Projectos Mineiros

O risco, e a forma de reagir perante diferentes eventos aleatórios, podem influenciar significativamente o valor dos projectos de investimento. Os modelos financeiros tendem a enfatizar o risco do preço dos *outputs*, ou seja, o risco relativo ao preço de venda dos produtos do projecto. No caso de projectos mineiros, o risco relativo aos custos de operação e os riscos geológico e técnico, relativos à dimensão e características da mina a explorar, revestem-se também de grande importância. Finalmente, também o risco político pode ser relevante nalguns investimentos mineiros.

O Risco do Preço dos Recursos Geológicos

Considera-se geralmente que o trabalho de Tourinho (1979) constitui a primeira aplicação de AOR a projectos de extracção de recursos naturais.

Tourinho considera a exploração de petróleo, e modela a evolução do preço deste (S) como um Movimento Browniano Geométrico (MBG):

$$dS = \mu \cdot S \cdot dt + \sigma \cdot S \cdot dz, \quad (2.1)$$

em que dt é uma variação infinitesimal do tempo, dz é o incremento de um processo de Wiener padrão, seguindo uma distribuição normal com média nula e variância dt ¹, dS é a variação instantânea do preço do petróleo, μ é o parâmetro *drift* que representa a tendência média de evolução do preço, e σ é o parâmetro da volatilidade deste preço. Tourinho assume que a variação média do preço, μ , corresponde exactamente à taxa de rentabilidade de investimentos com risco idêntico transaccionados em mercados de capitais competitivos. Este pressuposto constitui uma importante fragilidade do modelo de Tourinho (ver, por exemplo, Adkins e Paxson, 2008). Com efeito, é hoje aceite que o processo de variação do preço deste tipo de recursos incorpora uma *convenience yield* que reflecte os benefícios e custos da sua detenção física. Brennan e Schwartz (1985) descrevem esta *convenience yield* como o fluxo de serviços que advêm ao proprietário do recurso físico, mas não ao detentor de um contrato que permita o recebimento futuro do recurso (por exemplo, a possibilidade de obter lucro em situações de falta temporária do recurso, ou de beneficiar de diferenças de preço entre diferentes locais).

A *convenience yield* é modelada de forma diversa por diferentes autores. Brennan e Schwartz (1985), num artigo seminal de aplicação de AOR à avaliação de uma exploração mineira, modelam o processo de evolução do preço do recurso geológico de forma semelhante a ,

(2.1), mas assumem que a *convenience yield* é uma função do preço e admitem que μ possa ser estocástico. Por forma a obterem um modelo analiticamente tratável, estes autores assumem nalguns casos que a *convenience yield* é uma proporção constante do preço do recurso. Este modelo de variação de preços, em que o preço do recurso segue um processo semelhante a , (2.1) com *convenience yield* proporcional ao preço, é seguido por vários outros autores na modelação de preços de metais, especialmente no caso de metais preciosos. Moyen *et al.* (1996), Cortazar e Casassus (1999) e Cortazar *et al.* (2001) usam um tal processo para modelar o preço do cobre; Kelly (1998), Colwell *et al.* (2003), Abdel Sabour e Poulin (2006), Costa Lima e Suslick (2006) e Dimitrakopoulos e Abdel Sabour (2007) usam-no para o ouro; Shafiee *et al.*

¹ Para mais detalhes sobre os processos de Wiener ver, por exemplo, Dixit e Pyndick (1994).

(2009) usam-no para o zinco; Abdel Sabour e Poulin usam-no igualmente para a prata e paládio.

Schwartz (1997) propõe um modelo de preços em que existe reversão à média, isto é, em que os preços oscilam aleatoriamente mas tendem a retornar a um valor médio de longo prazo. Schwartz nota que por vezes o preço à vista de um recurso é tão incerto que se torna preferível usar, como aproximação, o preço do contrato futuro com maturidade mais próxima. Schwartz estima modelos para os preços do petróleo, cobre e ouro, usando filtros de Kalman – uma metodologia que permite estimar os modelos assumindo que os preços à vista dos recursos não são directamente observados, e considerando apenas os preços de contratos para entrega futura e a sua relação com os preços à vista. Schwartz encontra reversão à média estatisticamente significativa nos preços do petróleo e cobre, não a encontrando no preço do ouro. Num outro estudo, também Slade (2001) encontra reversão à média no processo de variação dos preços do cobre. Estes resultados têm levado vários autores a usar processos MBG para modelar a evolução dos preços de metais preciosos, e processos com reversão à média para modelar os preços de metais não preciosos.

O processo de preços com reversão à média, considerado por Schwartz (1997), assume que o preço médio de longo prazo, a *convenience yield*, a volatilidade, a taxa de juro sem risco e a velocidade de reversão são determinísticas. Este processo é denominado processo de Ornstein-Uhlenbeck geométrico, podendo definir-se como:

$$dS = \eta \cdot (\ln(\bar{S}) - \ln(S)) \cdot S \cdot dt + \sigma \cdot S \cdot dz, \quad (2.2)$$

em que S é o preço cuja evolução se está a modelar, η é velocidade de reversão à média, \bar{S} é o preço médio de longo prazo, e σ é a volatilidade do preço. Este processo é adoptado por vários autores: Cortazar e Casassus (1998), Sagi (1998), Slade (2001), Abdel Sabour e Poulin (2006) e Caldentey *et al.* (2007) usam este tipo de processo para o preço do cobre; Abdel Sabour e Poulin usam-no igualmente para os preços do níquel, cobalto e platina.

Gibson e Schwartz (1989) estudam o comportamento do preço do petróleo, concluindo que a *convenience yield* deste recurso segue um processo de reversão à média. Baseados neste resultado, Gibson e Schwartz (1990) propõem um modelo de evolução do preço baseado numa *convenience yield* estocástica com reversão à média. Brennan (1991) também usa um modelo com *convenience yield* estocástica, semelhante ao de Gibson e Schwartz, estimando-o para os preços de vários recursos, incluindo quatro metais: ouro, prata, platina e cobre. O autor compara os

resultados do modelo com os resultados de modelos que assumem que a *convenience yield* é função do preço à vista dos metais (incluindo o modelo usado por Brennan e Schwartz, 1985, em que esta representa uma proporção constante do preço do metal). Brennan conclui que, se se excluir em período em que existiu uma forte influência de uma intervenção especulativa atípica no mercado da prata², o modelo em que a *convenience yield* é uma proporção constante do preço do metal obtém bons resultados na descrição do processo de evolução dos preços dos metais preciosos; já o modelo de reversão à média da *convenience yield* se mostra bastante mais ajustado à descrição do processo de evolução dos preços do cobre. Um modelo deste tipo, em que a *convenience yield* apresenta reversão à média, é usado por Moel e Tufano (1999) para modelar a dinâmica conjunta dos preços do cobre e zinco, incorporando-se ainda uma correlação constante entre os preços destes metais. Também Tsekrekos *et al.* (2003) recorrem a um modelo deste tipo para o preço do cobre.

Cortazar e Schwartz (2003) propõem um modelo em que o retorno de longo prazo do preço dos recursos e a *convenience yield* seguem um processo de reversão à média, e aplicam-no ao preço do petróleo. Cortazar *et al.* (2008) utilizam este modelo para os preços do cobre, no contexto da avaliação de uma mina. Outros modelos da evolução dos preços de recursos têm vindo a ser propostos, mas a sua aplicação em modelos de avaliação ainda não tem uma expressão muito forte. Estes incluem Casassus e Collin-Dufresne (2005) e Trolle e Schwartz (2009), entre outros.

No caso de o recurso geológico estar cotado numa divisa diferente da usada no país de origem da empresa que empreende o projecto, o risco de taxa de câmbio torna-se uma componente relevante do risco do preço do recurso. Numa tal situação, para além do processo de variação do preço do recurso, será ainda necessário definir um processo para a variação da taxa de câmbio. É isso que é feito por Dimitrakopoulos e Sabour (2007), que consideram a extracção de ouro numa mina Australiana, estando o metal cotado em dólares dos Americanos. Os autores usam um MBG para modelar a variação do preço do ouro, em dólares Americanos, e um processo de reversão à média para a taxa de câmbio entre o dólar Australiano e o dólar Americano.

² Mais concretamente, a intervenção dos irmãos Hunt. Apesar da posição dos irmãos Hunt ter tido o seu colapso no final de Março de 1980, Brennan considerou que a perturbação do mercado que estes causaram se estendeu para além desta data, considerando atípico (e removendo da amostra) o período que vai de Setembro de 1979 até Maio de 1981.

O Risco Associado aos Custos de Operação

Os custos de operação têm grande importância para a rentabilidade dos projectos mineiros, podendo o risco relativo a estes custos estar ou não relacionado com incerteza sobre algumas características da mina a explorar. Neste trabalho, o risco nos custos que está associado a incerteza sobre características da mina será considerado risco técnico, e analisado em conjunto com o risco geológico na Secção 2.3. A presente secção tratará do risco associado aos custos de operação que não tem relação directa com as características da mina.

A generalidade dos autores assume que o risco associado aos custos de operação de uma mina é muito inferior ao risco do preço dos recursos extraídos, ignorando o primeiro tipo de risco. Desta forma, grande parte dos trabalhos publicados assume que os custos de exploração são conhecidos com certeza. Existem, no entanto, alguns autores que modelam explicitamente o risco associado aos custos. Esta modelação é efectuada definindo um processo de variação do custo, de forma semelhante ao que se passa com o risco do preço dos recursos extraídos. Um exemplo da utilização desta abordagem é Slade (2001). A autora utiliza dados reais para estimar o custo de operação de minas de cobre canadianas, concluindo que o custo apresenta reversão à média. A autora parte de um modelo que considera que o custo pode estar correlacionado com o preço do metal (cobre), mas não encontra indícios de correlação nos dados, usando por isso um coeficiente de correlação nulo. Costa Lima e Suslick (2006) modelam os custos de operação de uma mina de ouro como um processo MBG correlacionado com o processo do preço do ouro. Moyen *et al.* (1996) não consideram directamente os custos de operação, mas sugerem que estes podem ser incluídos substituindo o preço do metal pela margem unitária, isto é, a diferença entre o preço unitário e o custo unitário. Note-se que para tal é necessário que esta diferença siga um processo idêntico ao usado para o preço do metal, que no caso destes autores é um MBG.

O Risco Geológico e Técnico

O risco geológico pode influenciar o valor dos investimentos em minas quer na fase de exploração quer na fase de prospecção. A generalidade dos modelos considera que a prospecção já foi concluída, e por isso o risco relevante é apenas o relativo à fase de exploração. Muitas vezes, as características da mina a explorar não são conhecidas *a priori*, e destas dependerá não só a quantidade de metal que pode ser extraído, mas também os custos de operação – falar-se-á, neste último caso, em risco técnico, e este estará geralmente associado aos mesmos factores que definem o risco

geológico. Estes dois tipos de risco, técnico e geológico, influenciam decisivamente a rentabilidade da exploração mineira mas, tal como ocorre com o risco relativo aos custos de operação, são frequentemente ignorados. Assume-se, geralmente, que a quantidade de metal a extrair é conhecida com certeza *a priori*, e que os custos não dependem de características da mina sujeitas a incerteza. Existem, no entanto, alguns autores que incorporam o risco geológico e técnico nos modelos.

Martzoukos (2000) modela o risco na fase de prospecção através de um processo de salto. O autor considera que a empresa tem a oportunidade de empreender actividades de prospecção, cada uma delas com um custo definido, e que destas resultam saltos no valor esperado do projecto, decorrentes de nova informação sobre a dimensão e/ou qualidade das reservas.

Ao analisar a fase de exploração da mina, alguns autores modelam directamente as características geológicas e técnicas recorrendo a distribuições de probabilidades. Este é o caso de Moel e Tufano (1999), que definem três cenários para as características da mina, especificando para cada um deles a quantidade total de mineral, a quantidade de cada metal obtida anualmente e os custos anuais de operação. A cada um dos cenários é atribuída uma probabilidade, considerando-se assim que esta distribuição discreta de probabilidades sobre os cenários representa o risco geológico do investimento. Dimitrakopoulos *et al.* (2002) e Dimitrakopoulos e Abdel Sabour (2007) utilizam uma técnica, designada por “simulação condicional”, que permite quantificar a incerteza e variabilidade espacial de variáveis geológicas, tais como a quantidade de mineral e teor de metal, com base na informação geológica disponível.

Outros autores definem um processo estocástico para as características geológicas da mina, geralmente considerando apenas as reservas. É este o caso de Slade (2001). A autora modela as reservas remanescentes em minas de cobre através de um processo estocástico com uma componente determinística que tem em conta o minério extraído e os valores desfasados dos custos de operação e preços do cobre. Slade justifica a utilização deste processo pela definição de reservas como depósitos de minerais que são economicamente viáveis aos preços e custos actuais, pelo que estes preços e custos podem alterar a dimensão das reservas. A componente estocástica é justificada pela aquisição de nova informação sobre o depósito de mineral à medida que o tempo passa. Ao estimar os parâmetros do processo a partir de dados de minas e cobre Canadianas, a autora conclui que os custos de operação e preços desfasados não apresentam significância estatística,

optando assim por um processo com variância constante e independente dos preços do cobre e dos custos de operação.

Num modelo que considera a prospecção e exploração de uma mina, Cortazar *et al.* (2001) consideram que a prospecção se divide em várias fases, caracterizadas por probabilidades de sucesso e insucesso. Cada uma das fases apresenta um custo e, caso alguma tenha insucesso, o projecto é terminado (o insucesso representa a inexistência de reservas economicamente viáveis). Os autores consideram que, no caso de sucesso em todas as fases de prospecção, a mina pode ter diferentes características. Estas são definidas por um conjunto representativo de tipos de mina, cada um destes com uma determinada probabilidade de ocorrência. Cada tipo de mina é caracterizado por um conjunto de parâmetros: reservas totais, tempo e custo necessários para o desenvolvimento (isto é, para preparar a mina para o início da extracção), ritmo de extracção e custos associados à extracção e ao encerramento temporário da mina.

O Risco Político

A exploração mineira pode estar sujeita a riscos decorrentes de alterações das condições políticas, como por exemplo o risco de expropriação. Este risco poderá ser significativo nalguns países, e pouco relevante noutros. A generalidade dos autores que considera projectos mineiros não tem em conta este risco, mas a sua inclusão pode ser importante, especialmente quando a exploração é feita por empresas multinacionais e as minas são localizadas em países politicamente instáveis.

Mahajan (1990) e Schwartz e Trolle (2010) modelam a expropriação como uma decisão racional por parte do governo do país onde o projecto é empreendido. O governo detém uma opção de expropriação que pode exercer a qualquer momento, e fá-lo-á se tal vier a ser óptimo. Quando o governo exerce essa opção, a empresa perde o projecto, podendo vir a receber uma compensação. Para determinar quando é que é óptimo para o governo proceder à expropriação, é necessário conhecer os custos que esta apresenta, nomeadamente “custos reputacionais” e custos esperados de eventuais medidas de retaliação por outros países. Outros autores modelam os impactes do risco político como acontecimentos aleatórios exógenos ao projecto. Feils e Şabac (2000) propõem um modelo que tem em conta o risco de expropriação e outros riscos associados ao país em que é feito o investimento. A utilização deste modelo requer a definição de uma probabilidade de expropriação e de uma taxa esperada de variação dos fluxos de caixa devido a outros riscos políticos. A dificuldade em estimar os

parâmetros necessários torna problemática a aplicação destes modelos a projectos concretos.

Cortazar *et al.* (2001) consideram o risco de expropriação de uma mina, assumindo que esta corresponde à perda total do investimento, sem compensação, para a empresa que o empreende, e que a sua probabilidade se mantém constante. A incorporação deste risco no valor do projecto requer a definição da probabilidade de expropriação por unidade de tempo, baseando-se na utilização de processos de Poisson para modelar acontecimentos passíveis de provocar saltos no valor de um projecto (ver, por exemplo, Dixit e Pindyck, 1994, ponto 5B do capítulo 3). Usando uma filosofia semelhante, Clark (1997) modela acontecimentos políticos que podem causar uma redução do valor do projecto através de um processo de Poisson. Clark e Tunaru (2003; 2008) estendem esta abordagem a múltiplas fontes de risco político. Estas abordagens apresentam grande flexibilidade, mas a dificuldade de especificar de forma razoável os parâmetros necessários torna a sua aplicação difícil.

Abordagens de Avaliação

Nos modelos de AOR, os autores procuram muitas vezes obter soluções analíticas de forma fechada, que possam ser aplicadas a todas as situações que se enquadrem nos pressupostos considerados. No entanto, os modelos mais realistas exigem, frequentemente, pressupostos complexos que não permitem obter uma solução com estas características, obrigando à utilização de métodos aproximativos. Neste capítulo apresentam-se as principais abordagens utilizadas para definir modelos de AOR de projectos mineiros, e para obter as respectivas soluções.

Equações Diferenciais com Solução Analítica de Forma Fechada

Os modelos de opções reais são muitas vezes definidos por forma a obter equações diferenciais com condições de fronteira que possam conduzir a soluções analíticas de forma fechada. Num artigo seminal de aplicação de AOR à avaliação de uma mina de cobre, Brennan e Schwartz (1985) obtêm solução analítica de forma fechada apenas para o caso particular em que a quantidade de cobre existente na mina é infinita. Dixit e Pyndick (1994, capítulo 7) apresentam um modelo com muitas semelhanças com o de Brennan e Schwartz e, para obterem solução analítica de forma fechada, assumem também que a mina pode ser explorada a um ritmo constante para sempre (ignorando que as reservas existentes são limitadas). Quando se consideram problemas em que as reservas do recurso a extrair são limitadas

não é, geralmente, possível obter soluções com forma fechada, a não ser com significativas simplificações adicionais. Costa Lima e Suslick (2006) obtêm uma solução de forma fechada para o valor de uma mina de ouro, mas consideram apenas a flexibilidade operacional relativa ao momento de iniciar o investimento, bem como um processo simplificado de variação do valor do projecto.

Equações Diferenciais com Solução Numérica

Nos modelos de opções reais de projectos mineiros, é geralmente impossível obter soluções de forma fechada quando se considera que a quantidade de metal que pode ser extraída é finita. Neste caso, o modelo é por vezes formalizado através de equações diferenciais, mas a solução destas é obtida por métodos numéricos. O método numérico mais usado para resolver as equações diferenciais é o das diferenças finitas. Neste método, as derivadas são aproximadas, em cada ponto, por diferenças finitas de valores. (ver, por exemplo, Trigeorgis, 1996, capítulo 10).

A determinação das equações diferenciais que definem o valor do projecto, e sua resolução pelo método das diferenças finitas, proporcionam uma importante flexibilidade na modelação. Davis (1998) usa este método para avaliar o projecto de exploração de uma mina de um metal precioso com alguns parâmetros que variam ao longo da vida deste (*e.g.* a volatilidade do projecto). Cortazar e Casassus (1999), Cortazar *et al.* (2001) e Colwell *et al.* (2003) utilizam também o método das diferenças finitas para obter soluções numéricas para modelos de avaliação de projectos mineiros formulados com recurso a equações diferenciais.

Lattices

As árvores de decisão, e estruturas que nelas se baseiam, têm vindo a ser frequentemente aplicadas a projectos de investimento. Em AOR são muito usadas estruturas designadas por *lattices*, que se podem considerar árvores em que existe recombinação de caminhos: isto é, em que podem existir vários caminhos diferentes entre a origem e um dado nodo. A Figura 1 apresenta um exemplo do tipo de *lattice* mais simples, a *lattice* binomial, em que cada nodo tem dois descendentes. Outras estruturas, em que cada nodo tem mais do que dois descendentes, têm também vindo a ser propostas (*e.g.* Boyle *et al.*, 1989).

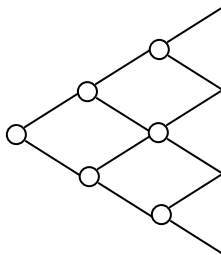


Figura 1. Estrutura de uma *lattice* binomial com três intervalos de tempo

As *lattices* modelam directamente o processo de variação das variáveis de estado de que depende o valor do projecto. Desta forma, as *lattices* permitem efectuar, de forma simples a ligação entre os estados do projecto e os correspondentes valores e decisões óptimas. Tal torna a sua utilização intuitiva, o que constitui um importante benefício da sua utilização.

No caso de projectos de exploração mineira, a variável de estado relevante é usualmente o preço do recurso a extrair³. Os níveis da *lattice* correspondem a sucessivos momentos no tempo e, dentro em cada nível, os diferentes nodos correspondem aos possíveis preços que se estão a considerar para esse momento. Atendendo a que tipicamente os preços variam em tempo contínuo e podem assumir uma gama de valores mais vasta do que a considerada pelas *lattices*, estas correspondem a uma aproximação do processo de preços. Esta aproximação deve ser feita de forma a que o processo considerado na *lattice* se aproxime o mais possível do verdadeiro processo de variação dos preços. Algumas formas de efectuar esta aproximação podem encontrar-se em Cox *et al.* (1979) ou Trigeorgis (1991).

Quando existe recombinação de caminhos, o crescimento do número de nodos das *lattices* é tipicamente polinomial com o número de níveis destas (linear no caso de *lattices* que apenas considerem uma variável de estado). No entanto, diversos processos de variação das variáveis de estado não permitem a recombinação de caminhos – este é o caso de processos em que a volatilidade não é constante (nem é possível uma transformação que a torne constante). Nesta situação, as *lattices* transformam-se em árvores, e o número de nodos cresce exponencialmente com o número de níveis

³ Nalgumas circunstâncias pode ser preferível a utilização, como variável de estado, do valor do projecto na ausência de flexibilidade operacional (*e.g.* Davis, 1998).

considerado. Em tais casos, pode não ser praticável a utilização de um número de níveis suficientemente elevado para permitir uma boa aproximação ao processo de variação do valor das variáveis de estado, sendo preferível utilizar outras abordagens.

Uma *lattice* corresponde sempre a uma árvore de decisão. As diferenças principais entre as duas estruturas correspondem a algumas simplificações da representação que tornam a *lattice* menos complexa: a não representação dos nodos de decisão e a recombinação dos nodos. Assim, em cada nodo da *lattice* está subjacente a escolha de uma acção válida para o projecto em causa: por exemplo, se o projecto ainda não tiver sido iniciado, as acções válidas poderão ser “Iniciar” e “Não iniciar”; se estiver em operação, poderão ser “Manter em operação”, “Suspende” e “Abandonar”. Estas acções contribuem também para definir o estado do projecto, tendo implicações nas escolhas óptimas a fazer no futuro, e mesmo nas acções disponíveis no futuro (por exemplo, não se pode manter em operação um projecto que já foi abandonado).

A avaliação das *lattices* segue os princípios da programação dinâmica, processando-se de forma semelhante à avaliação de árvores de decisão. Começa por se definir, para o último nível, qual a decisão óptima para cada possível estado do projecto; os valores óptimos do último nível são usados para determinar as decisões óptimas do penúltimo nível, e assim sucessivamente até se determinar a decisão óptima no primeiro nível, e o correspondente valor.

Diversos autores aplicam *lattices* à avaliação de projectos mineiros. Moyen *et al.* (1996), Hall e Nichols (2007), Kelly (1998) e Shaffiee *et al.* (2009) recorrem a *lattices* binomiais para avaliar minas de cobre (nos dois primeiros casos), ouro (no terceiro) e zinco (no último), usando como variáveis de estado o preço dos respectivos metais. Kamrad e Ernst (2001) usam uma *lattice* binomial como base de avaliação de um modelo em que o ritmo de extracção de metal de uma mina pode ser ajustado ao longo do tempo; a variável de estado utilizada é o preço do metal. Davis (1998) utiliza uma *lattice* binomial para avaliar uma reserva de um metal precioso, usando como variável de estado o valor do projecto na ausência de flexibilidade operacional. Slade (2001) utiliza *lattices* com 3 variáveis de estado – preço, custo e reservas remanescentes – para avaliar minas de cobre. A autora define, para cada variável de estado, um processo de evolução binomial. Uma vez que a volatilidade estimada para o preço do cobre e custo de exploração não são constantes, a autora recorre a uma transformação das variáveis que conduz a um parâmetro da volatilidade constante.

Outras estruturas conceptualmente semelhantes têm vindo a ser usadas por outros autores. Martzoukos (2000) utiliza estruturas semelhantes a *lattices* mas com formato rectangular, em vez de triangular. Nestas estruturas, o autor modela o valor potencial das receitas anuais do projecto durante o período de prospecção de uma mina. Estas estruturas correspondem a uma “expansão” de uma *lattice*, necessária devido ao facto de o autor assumir que a informação recolhida nas actividades de prospecção pode provocar saltos no valor das receitas esperadas do projecto.

Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo é uma técnica muito usada em análise de investimentos. Numa simulação de Monte Carlo é gerado, de forma aleatória, um grande número de caminhos relativos à evolução das variáveis de estado estocásticas relevantes. Em cada momento, os valores de cada variável dependem de amostras de distribuições aleatórias, dos valores anteriores da variável e/ou dos valores contemporâneos ou anteriores das restantes variáveis.

Quando apenas é necessário considerar decisões no final dos projectos, a utilização desta técnica é simples: as variáveis são simuladas até ao final do projecto, são aí definidas as decisões óptimas em cada caminho, e o valor do projecto com essas decisões óptimas é actualizado para o momento de análise. É este o procedimento seguido por Moel e Tufano (1999), para avaliação de uma mina de cobre e zinco. Os autores efectuem a simulação de um período de exploração em que se irá estimar a dimensão das reservas, e consideram apenas a decisão de iniciar ou não o projecto no final deste período. Simulando a evolução dos preços dos metais até ao final do período, os autores obtêm as decisões óptimas para cada cenário da dimensão das reservas, conseguindo desta forma avaliar o projecto.

Esta lógica não se adequa de forma simples a activos, financeiros ou reais, cujo valor dependa das decisões a tomar ao longo da vida destes, como é o caso de projectos em que possam ser tomadas decisões ao longo do tempo. Com efeito, o valor destes activos depende das decisões óptimas, mas as consequências das decisões tomadas em cada período dependem de decisões futuras. Assim, não é possível determinar quais são as decisões óptimas no momento em que os valores das variáveis estão a ser gerados no processo de simulação.

Apesar desta dificuldade em aplicar simulação de Monte Carlo à avaliação de projectos de investimento, há características desta técnica que a tornam particularmente atractiva. Uma destas características é a flexibilidade, permitindo a utilização de processos estocásticos complexos

para a evolução das variáveis de estado. Outra é o facto de permitir evitar a “maldição da dimensionalidade” (*curse of dimensionality*): a complexidade da aplicação de métodos numéricos baseados em *lattices* ou de resolução de equações diferenciais cresce muito rapidamente com o número de variáveis de estado (geralmente é exponencial neste número de variáveis de estado); já a complexidade da simulação de Monte Carlo aumenta, tipicamente, de forma linear com o número de variáveis de estado, permitindo a resolução de problemas em que o número destas variáveis é elevado. Assim, têm vindo a ser propostas várias adaptações que permitem usar simulação de Monte Carlo para avaliar activos cujo valor depende de decisões que podem ser tomadas em vários períodos.

Longstaff e Schwartz (2001) propuseram um método, designado por *Least-Squares Monte Carlo* (LSMC), aplicável quando podem ser tomadas decisões durante todo o tempo de vida dos activos em avaliação. Neste método, começam por se simular os valores das variáveis de estado estocásticas para todo o tempo de vida dos activos. No último período de vida do activo não existem mais decisões posteriores, pelo que é possível determinar as decisões óptimas, e o valor do activo, em cada caminho e para cada possível estado em que este se encontre. No penúltimo período de vida do activo, é ajustado um modelo econométrico que permite, para cada possível estado e decisão, escrever o valor do activo como função das variáveis de estado. Este modelo é construído com base nos valores do último período (neste momento já determinados), e a sua aplicação permite determinar o valor esperado do activo em cada caminho, para cada estado e para cada possível decisão. Desta forma é possível determinar as decisões óptimas em cada caminho, bem como o correspondente valor do activo. Este procedimento vai sendo sucessivamente aplicado aos períodos anteriores, até se atingir o período inicial de avaliação. Assim determina-se não só o valor do activo, mas as regras óptimas relativas às decisões a tomar.

Este método tem vindo a ser usado na avaliação de projectos mineiros. Tsekrekos *et al.* (2003), Abdel Sabour e Poulin (2006) e Cortazar *et al.* (2008) usam LSMC para avaliar uma mina de cobre, assumindo diferentes processos para a variação do preço do metal. Abdel Sabour e Poulin aplicam ainda LSMC a um segundo caso de avaliação de uma mina de onde são extraídos múltiplos metais: ouro, prata, paládio, níquel, cobre, cobalto e platina. Dimitrakopoulos e Abdel Sabour (2007) utilizam LSMC para avaliar uma mina de ouro na Austrália, considerando incerteza no preço do ouro e nas taxas de câmbio, bem como incerteza geológica.

Nota Final

As últimas três décadas viram aparecer uma extensa literatura sobre a incorporação do risco e flexibilidade operacional na avaliação de projectos de investimento: os modelos de opções reais. Devido às características dos projectos mineiros, o risco e a flexibilidade de gestão desempenham nestes um papel importante, e muitos modelos foram desenvolvidos para estes projectos. Neste artigo procurou dar-se conta das principais formas de incorporação de risco que têm vindo a ser consideradas em modelos financeiros de projectos mineiros, bem como das abordagens seguidas para formalizar e obter soluções para estes modelos.

Bibliografia

- Abdel Sabour, S.A., Poulin R. (2006) -Valuing Real Capital Investments using the Least Squares Monte Carlo Method. *The Engineering Economist*; 51 (2), 141-160.
- Adkins, R., Paxson, D. (2008) - The Tourinho Model: Neglected Nugget or Receding Relic. *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Real Options: Theory meets Practice*, Rio de Janeiro, Brasil, 9-12 de Julho de 2008.
- Boyle, P.P., Evnine, J., Gibbs, S. (1989) - Numerical Evaluation of Multivariate Contingent Claims. *The Review of Financial Studies*; 2 (2), 241-250.
- Brennan, M.J. (1991) - The Price of Convenience and the Valuation of Commodity Contingent Claims *in* Lund, D. e Oksendal, B. (eds.), *Stochastic Models and Option Values - Applications to Resources, Environment and Investment Problems*, Elsevier, Amsterdam, 33-71.
- Brennan, M.J., Schwartz, E.S. (1985) - Evaluating Natural Resource Investments. *Journal of Business*; 58 (2), 135-157.
- Casassus, J., Collin-Dufresne, P. (2005) - Stochastic Convenience Yield Implied from Commodity Futures and Interest Rates. *Journal of Finance*; 60 (5), 2283-2331.
- Caldentey R., Epstein, R., Sauré, D. (2007) *Optimal Exploitation of a Nonrenewable Resource*. Working paper, Stern School, New York University.
- Clark. E. (1997) - Valuing Political Risk. *Journal of International Money and Finance*; 16 (3), 477-490.
- Clark. E., Tunaru, R. (2003) - Quantification of Political Risk with Multiple Dependent Sources. *Journal of Economics and Finance*; 27 (1), 125-135.
- Clark. E., Tunaru, R. (2008) - Modelling Stochastic Political Risk for Capital Budgeting: Currency Crises. *Banque et Marchés*; 95, 45-56.
- Colwell, D., Henker, T., Ho, J., Fong, K.. (2003) - Real Option Valuation of Australian Gold Mines and Mining Companies. *The Journal of Alternative Investments*; 6 (1), 23-38.
- Cortazar, G., Casassus, J. (1998) - Optimal Timing of a Mine Expansion: Implementing a Real Options Model. *The Quarterly Review of Economics and Finance*; 38 (3), 755-769.
- Cortazar, G., Casassus, J. (1999) - A Compound Option Model for Evaluating Multi Stage Natural Resource Investments *in* M. Brennan e L. Trigeorgis (eds.), *Project Flexibility, Agency, and Competition*, Oxford University Press, New York, 205-223.
- Cortazar, G., Schwartz, E.S. (2003) - Implementing a Stochastic Model for Oil Futures Prices. *Energy Economics*; 25 (3), 215-238.
- Cortazar, G., Schwartz, E.S., Casassus, J. (2001) - Optimal Exploration Investments under Price and Geological-Technical Uncertainty: A Real Options Model. *R&D Management*; 31 (2), 181-189.

- Cortazar, G., Gravet, M., Urzua, J. (2008) - The Valuation of Multidimensional American Real Options using the LSM Simulation Method. *Computers and Operations Research*; 35 (1), 113-129.
- Costa Lima, G., Suslick, S. (2006) - Estimating the Volatility of Mining Projects Considering Price and Operating Cost Uncertainties. *Resources Policy*; 31 (2), 86-94.
- Cox, J.C., Ross, S.A., Rubinstein, M. (1979) - Option Pricing: A Simplified Approach. *Journal of Financial Economics*; 7 (3), 229-263.
- Davis, G.A. (1998) - Estimating Volatility and Dividend Yield when Valuing Real Options to Invest or Abandon. *The Quarterly Review of Economics and Finance*; 38 (3), 725-754.
- Dimitrakopoulos, R.G., Farrel, C.T., Godoy, M. (2002) - Moving Forward from Traditional Optimization. *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy (Section A: Min. Technol.)*; 111, A82-A88.
- Dimitrakopoulos, R.G., Abdel Sabour, S.A. (2007) - Evaluating Mine Plans under Uncertainty: Can the Real Options Make a Difference?. *Resources Policy*; 32 (3), 116-125.
- Dixit, A.K., Pindyck, R.S. (1994) - *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press, New Jersey.
- Feils, D., Şabac, F. (2000) - The Impact of Political Risk on the Foreign Direct Investment Decision: A Capital Budgeting Analysis". *The Engineering Economist*; 45 (2), 129-143.
- Gibson, R., Schwartz, E.S. (1989) - Valuation of Long Term Oil Linked Assets. Anderson Graduate School of Management, UCLA, Working Paper, #6-89.
- Gibson, R., Schwartz, E.S. (1990) - Stochastic Convenience Yield and the Pricing of Oil Contingent Claims. *Journal of Finance*; 45 (3), 959-976.
- Hall, J., Nicholls, S. (2007) - Valuation of Mining Projects Using Option Pricing Techniques. *JASSA*; 4, 22-29.
- Kamrad, B., Ernst, R. (2001) - An Economic Model for Evaluating Mining and Manufacturing Ventures with Output Yield Uncertainty. *Operations Research*; 49 (5), 690-699.
- Kelly, S. (1998) - A Binomial Lattice Approach for Valuing a Mining Property IPO". *The Quarterly Review of Economics and Finance*; 38 (3), 693-709.
- Longstaff, F.A., Schwartz, E.S. (2001) - Valuing American Options by Simulation: A Simple Least Squares Approach". *The Review of Financial Studies*; 14 (1), 113-147.
- Mahajan, A. (1990) - Pricing Expropriation Risk. *Financial Management*; 19 (4), 77-86.
- Martzoukos, S.H. (2000) - Real Options with Random Controls and the Value of Learning. *Annals of Operations Research*; 99 (1), 305-323.
- Moel, A., Tufano, P. (1999) - Bidding for the Antamina Mine: Valuation and Incentives in a Real Options Context *in* M. Brennan e L. Trigeorgis (eds.), *Project Flexibility, Agency, and Competition*, Oxford University Press, New York; 128-150.
- Moyen, N., Slade, M., Uppal, R. (1996) -Valuing Risk and Flexibility: A Comparison of Methods. *Resources Policy*; 22 (1-2), 63-74.
- Sagi, J.S. (1998) - The Interaction Between Quality Control and Production. SSRN Working Paper Series; disponível em <http://ssrn.com/abstract=113769> (consultado em 30 de Setembro de 2010).
- Schwartz, E.S. (1997) - The Stochastic Behavior of Commodity Prices: Implications for Valuation and Hedging. *Journal of Finance*; 52 (3), 923-973.
- Schwartz, E.S., Trolle, A.B. (2010) - Pricing Expropriation Risk in Natural Resource Contracts: A Real Options Approach *in* W. Hogan e F. Sturzenegger (eds.), *The Natural Resources Trap: Private Investment Without Public Commitment*, MIT Press; 263-288.
- Shafiee, S., Topal, E., Nehring, M. (2009) - Adjusted Real Option Valuation to Maximise Mining Project Value – A Case Study using Century Mine. *Proceedings of the Project Evaluation Conference, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, 21-22 de Abril 2009*.
- Slade, M.E. (2001) - Valuing Managerial Flexibility: An Application of Real-Option Theory to Mining Investments. *Journal of Environmental Economics and Management*; 41 (2), 193-233.

- Tourinho, O. A. F. (1979) - The Valuation of Reserves of Natural Resources: An Option Pricing Approach. PhD Dissertation, University of California, Berkeley.
- Trigeorgis, L. (1991) - A Log-Transformed Binomial Numerical Analysis Method for Valuing Complex Multi-Option Investments. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*; 26 (3), 309-326.
- Trigeorgis, L. (1996) - *Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Trolle, A.B., Schwartz, E.S. (2009) - Unspanned Stochastic Volatility and the Pricing of Commodity Derivatives. *The Review of Financial Studies*; 22 (11): 4423-4461.
- Tsekrekos, A.E, Shackleton, M.B., Wojakowski, R. (2003) - Evaluating Natural Resource Investments Using Least-Squares Monte Carlo Simulation Approach". *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Real Options: Theory meets Practice, Washington D.C., 10-12 de Julho 2003*.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Modelos de anisotropia da susceptibilidade magnética *versus* modelação de processos geológicos

Celeste Gomes¹; Helena Sant’Ovaia²

¹Centro de Geofísica, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL
romualdo@dct.uc.pt

²DGAOT e Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, PORTUGAL
hsantov@fc.up.pt

Palavras-chave: Modelos, Anisotropia da Susceptibilidade Magnética, Processos geológicos

Resumo

O objectivo principal deste estudo consistiu em apresentar as noções essenciais do significado de modelo, dos modelos da Susceptibilidade Magnética e da Anisotropia da Susceptibilidade Magnética (ASM) e mostrar a possibilidade do desenvolvimento de modelos científicos, também ditos consensuais, para a interpretação de maciços graníticos da Geologia de Portugal. Os modelos com base nos dados da ASM, analisados neste estudo, contribuíram para uma compreensão diferente dos subsistemas estudados e têm ainda o mérito de constituírem *teaching models*, para exemplos da Geologia de Portugal.

Key-words: *Models, Anisotropy of magnetic susceptibility, Geological processes*

Abstract

The main goal of this study was to present the essential concepts of a model, of the models of Magnetic Susceptibility and Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) and to show the possibility of developing scientific models for the interpretation of granitic massifs of the Geology of Portugal. The models based on AMS data analyzed in this study contributed to a different understanding of the subsystems studied and are important “teaching models” for examples of the Geology of Portugal.

Introdução

A modelação é um processo importante na resolução de problemas de investigação em Ciência e, em particular, em Geologia. É igualmente importante no ensino e aprendizagem de temas e subtemas de Geologia.

A palavra modelo pode ser entendida com significados diferentes. Em linguagem científica, a palavra apresenta também significados diversos. Neste estudo, assumimos o termo modelo, no sentido de Gilbert e Boulter (2000) e de Prins *et al.*, (2008), como uma representação estruturada, incluindo elementos simbólicos, das características essenciais de uma ideia, um objecto, um processo, um subsistema, ou um sistema. O termo modelação significa construção, avaliação e/ou revisão de um modelo em resposta a um problema específico (Gobert e Buckley, 2000; Prins *et al.*, 2008). As representações dos modelos poderão ser pictóricas (mapas, gráficos, esquemas, desenhos) ou linguísticas.

Assim, podemos escrever sobre modelos da susceptibilidade magnética (SM), da Anisotropia da Susceptibilidade Magnética (ASM) e da obtenção de dados de ASM e sobre modelos que traduzem a interpretação destes dados em casos de aplicação a processos e objectos geológicos. Os primeiros resultam da evolução do conhecimento e, actualmente, podemos encontrar descrições e exemplos em manuais (*e.g.* Tarling e Hrouda, 1993), em dissertações académicas (*e.g.* Sant'Ovaia, 2000) e em artigos. Por sua vez, existem equipamentos comerciais com software específico e que permitem aplicar modelos estabelecidos e obter os dados necessários para a criação doutros que descrevem e traduzem os processos geológicos e o resultado destes processos. Estes últimos são habitualmente modelos expressos, por exemplo, sob a forma de mapas, gráficos ou esquemas, podendo também ser matemáticos, e consensuais em especial se, quando antes de publicados, forem revistos e aceites por membros da comunidade científica.

O objectivo principal deste estudo consistiu em apresentar as noções essenciais de modelo, dos modelos da SM e da ASM e mostrar a possibilidade do desenvolvimento de modelos científicos expressos, também ditos consensuais, para a interpretação de maciços graníticos da Geologia de Portugal, tendo por base colecções de dados de SM e ASM.

Modelos da Susceptibilidade Magnética

A SM, K , define-se como a capacidade que um mineral ou uma rocha têm em se magnetizar na presença de um campo magnético e traduz-se pela relação matemática: $M=KH$, em que M representa a magnetização e H o campo aplicado. No Sistema Internacional, a SM, por volume, é uma grandeza adimensional.

A susceptibilidade absoluta da amostra é dada pela fórmula $K_{LF} = kd + Kp + Kaf + Kf$ que traduz a soma das diferentes respostas da amostra

(diamagnética, paramagnética, antiferromagnética e ferromagnética) (e.g. Borradaile, Henry, 1997).

Modelos da Anisotropia da Susceptibilidade Magnética

A ASM numa amostra de rocha, como em qualquer corpo anisotrópico, traduz-se por um tensor de 2ª ordem representado por um elipsóide cujos eixos principais, $K_{max} \geq K_{int} \geq K_{min}$, são determinados, em orientação e magnitude, pelas contribuições dos minerais individuais. Um conjunto de grãos minerais numa rocha gera uma ASM, que combina o alinhamento estatístico dos seus eixos e/ou direcções de fácil magnetização (Stacey e Banerjee, 1974; O'Reilly, 1984).

A ASM, para cada amostra de rocha, é o modelo que representa a variação da susceptibilidade magnética, em função da direcção. Combina, assim, a contribuição dos *fabric*s magnéticos de todos os minerais presentes na rocha, que podem ser ferromagnéticos *s.l.* (ferromagnéticos *s.s.*, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos), paramagnéticos e diamagnéticos, e é controlada pela sua orientação cristalográfica, associada à composição mineralógica da rocha e à forma do *fabric* de cada grão, para além de considerar a distribuição e o tamanho de microfracturas presentes. Assim, cada mineral e cada rocha possuem ASM distintas (Borradaile, 2001; Parés e Pluijm, 2002).

A configuração espacial e geométrica dos minerais de uma rocha pode ser traduzida através dos estudos da AMS e é, normalmente, determinada a partir de medidas de susceptibilidade em campo fraco (< 1 mT). O modelo que melhor representa a variação da susceptibilidade com a direcção é um elipsóide de susceptibilidade magnética (Figura 1) (Tarling e Hrouda, 1993; Pares e Pluijm, 2002).

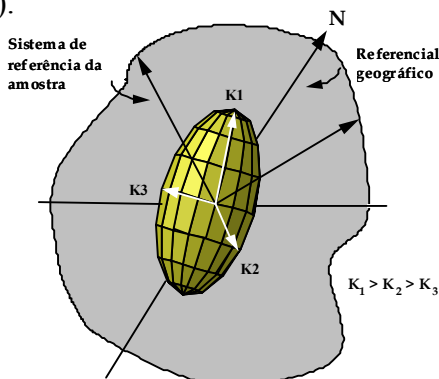


Figura 1. Modelo de elipsóide de susceptibilidade magnética.

Os três eixos ortogonais do elipsóide representam a SM segundo 3 direcções correspondentes aos eixos máximo, intermédio e mínimo, descritos, respectivamente, por K_1 (ou K_{\max}), K_2 (ou K_{int}) e K_3 (ou K_{\min}), em que a intensidade de magnetização maior é induzida ao longo do eixo maior, K_1 , e a intensidade mais fraca ao longo do eixo menor, K_3 (Tarling e Hrouda, 1993; Pares e Pluijm, 2002). Muitas vezes considera-se que as orientações dos eixos da ASM apresentam uma correlação directa com as direcções das tensões principais (e.g. Hrouda, 1982; Borradaile e Henry, 1997; Pares e Pluijm, 2002).

Os valores dos eixos de susceptibilidade descrevem o elipsóide da SM (Figura 2). Assim, se $K_1 \approx K_2 \approx K_3$, a forma geométrica será uma esfera e a susceptibilidade uma propriedade isotrópica. Se $K_1 > K_2$ e $K_2 \approx K_3$, estes dois eixos distribuir-se-ão na mesma direcção, criando um *fabric* linear, e o elipsóide é prolato (em forma de charuto). Se $K_1 \approx K_2$ e $K_2 > K_3$, os primeiros distribuem-se num plano, criando um *fabric* foliado, e o elipsóide é oblato (achatado, com uma forma discoidal). Finalmente, se $K_1 > K_2 > K_3$, o elipsóide é plano-linear (Winkler *et al.*, 1997; Butler, 1992; Borradaile, 2001).

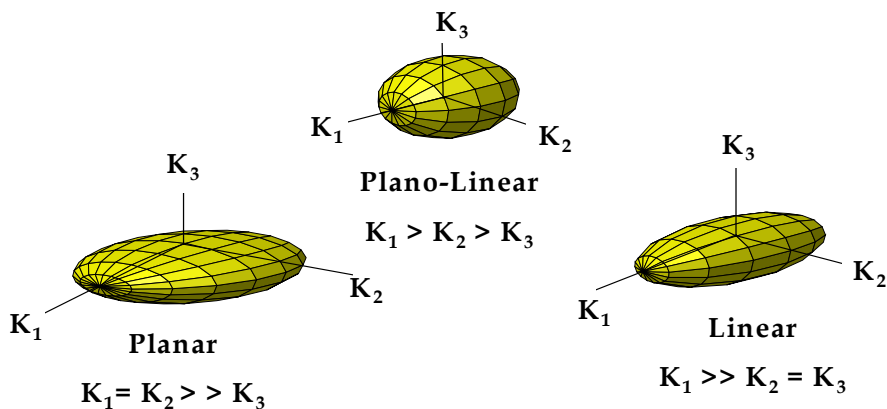


Figura 2. Modelos de elipsóides de ASM.

Metodologia

A metodologia usada na realização deste estudo consistiu na: 1) selecção de trabalhos de investigação sobre modelos e modelação; 2) selecção de

trabalhos sobre ASM e suas aplicações na modelagem de processos e objectos geológicos, especialmente, casos de aplicação em unidades da Geologia de Portugal; 3) na análise de representações e modelos para um entendimento da SM e da ASM aplicados em maciços graníticos da Geologia de Portugal.

Os trabalhos de investigação sobre modelos e modelagem são desenvolvidos, habitualmente, numa perspectiva do ensino, da aprendizagem e da construção de conhecimentos. Contudo, os modelos para o ensino e para a aprendizagem (*teaching models and learning models*) são construídos a partir dos modelos científicos e consensuais criados, revistos e aceites pelos investigadores. A importância dos modelos, apesar de serem sempre incompletos, consiste, neste caso, em permitir um melhor entendimento das representações obtidas a partir da interpretação de conjuntos de dados, medidos em equipamentos laboratoriais específicos, balanças de susceptibilidade ou susceptibilímetros. Neste contexto, são importantes os modelos mentais de todos os intervenientes. “*Norman’s (1983) distinguishes not only the learners’ mental models but also the scientist’s and designer’s conceptual models of the system, as well as the researchers’ conceptualization of the learner’s mental models.*” (Buckley *et al.*, 2004, p. 24).

Os trabalhos de ASM são muito específicos e com interesse para uma comunidade científica restrita. Contudo, podem também constituir recursos para o ensino e a aprendizagem nos domínios referidos acima e que se adequam ao ensino universitário. Para este estudo, seleccionámos, como foi dito, trabalhos de índole geral e outros desenvolvidos em unidades da Geologia de Portugal.

Modelos a Partir dos Dados da ASM

Os estudos da ASM, ou *fabric* magnético, em aplicações quantitativas e semi quantitativas passaram a ter grande divulgação, especialmente, desde Tarling e Hrouda (1993), embora existam muitos trabalhos anteriores, como se pode perceber através da leitura da obra citada. Como exemplo histórico, refere-se que John W. Graham, em 1954, escreveu um artigo intitulado “*Magnetic anisotropy: an unexploited petrofabric element.*” (Tarling e Hrouda, 1993)

Os estudos de ASM são efectuados com objectivos diversos e permitem dar resposta a questões de investigação em áreas distintas como o estudo das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, os seus processos de formação e de deformação. Possibilitam, ainda, num sentido mais amplo,

responder a questões de Paleogeografia e de Tectónica. “*Anisotropy of low field magnetic susceptibility (AMS) is a versatile petrofabric tool. For magnetite, AMS primarily defines grain-shape anisotropy; for other minerals, AMS expresses crystallographic control on magnetic properties. Thus, we may infer the orientation-distribution of a dominant mineral from the AMS of a rock. AMS principal directions can record current directions from sediment, flow-directions from magma, finite-strain directions from tectonized rocks and stress-directions from low-strain, low-temperature, neotectonic environments. AMS measurements may reveal some aspects of the strain-path, where carefully selected*” (Borradaile e Henry, 1997, 1).

Modelos para o Estudo de Maciços Graníticos

Estes modelos, embora não possam ser considerados simples, são sempre simplificações dos sistemas e/ou subsistemas geológicos. Não são simples nem de fácil construção porque resultam de trabalhos: 1) de revisão da bibliografia; 2) de campo e amostragem; 3) laboratoriais de preparação de amostras; 4) de utilização de equipamentos específicos para obtenção dos dados; 5) da interpretação dos resultados; e 6) da criação dos modelos. Os modelos são construídos não só com base nos resultados, mas também em modelos prévios das áreas estudadas (por exemplo, cartas geológicas), e doutros para casos similares e traduzem as representações mentais dos seus autores (Johnson-Laird, 1983; Norman, 1983, *in* Buckley *et al.*, 2004). Para todas estas etapas existem modelos estabelecidos e que devem ser seguidos adequadamente. Por exemplo, a amostragem deve ser feita segundo uma malha regular, as amostras devem ser devidamente orientadas e as subamostras a medir, por local de amostragem devem ser, pelo menos, 8. Cada amostra deve ser medida pelo menos em 3 posições distintas mutuamente perpendiculares.

Neste estudo usámos os modelos desenvolvidos com rochas de maciços graníticos de Portugal (Martins *et al.*, 2009; Sant’Ovaia, 2000, Sant’Ovaia *et al.*, 2000, Sant’Ovaia *et al.*, 2008, Sant’Ovaia *et al.*, 2010) que traduzem a interpretação dos dados da SM, da ASM e acrescentam às cartas geológicas representações da foliação e da lineação magnéticas calculadas para os maciços estudados. Estes dados permitiram ainda, em conjunto com outros de gravimetria, construir modelos para a geometria e as formas dos corpos ígneos e para a localização das suas “raízes” para os granitos de Vila Pouca de Aguiar e de Águas Frias - Chaves (Martins *et al.* 2009; Sant’Ovaia, 2000, Sant’Ovaia *et al.*, 2000).

Os valores da SM nos granitos do plutão de Vila Pouca de Aguiar são fracos e estão compreendidos entre 40,0 e $220,0 \times 10^{-6}$ SI. A distribuição espacial das curvas de isovalores de susceptibilidade revela que há uma zonação magnética normal, concêntrica. O mapa estrutural das lineações magnéticas mostra que estas estão organizadas segundo duas direcções principais, uma aproximadamente N-S e a outra NW-SE. As direcções das foliações magnéticas são, dum modo geral, paralelas ao alongamento do plutão de Vila Pouca de Aguiar, isto é, apresentam a direcção NNE-SSW (Martins *et al.*, 2009; Sant’Ovaia, 2000, Sant’Ovaia *et al.*, 2000).

No plutonito de Água Frias, a SM apresenta um valor médio de $80,7 \times 10^{-6}$ SI. Os valores de anisotropia paramagnética são sempre inferiores a 2,0%, com um valor médio de 1,6%. As foliações magnéticas tendem a ser paralelas ao contorno do plutão, apresentando uma direcção média de E-W e inclinando cerca de 30° para o exterior do plutão. As lineações magnéticas são, na sua maioria, sub-horizontais e com direcção média em torno de WNW-ESE (Martins *et al.*, 2009).

A modelação da anomalia residual gravimétrica de cada um dos plutões mostrou que as respectivas geometrias apresentadas são bastante diferentes (Martins *et al.* 2009). A geometria global do plutão de Vila Pouca de Aguiar, com a sua extremidade sul laminar, espessura inferior a 1 km em 2/3 da sua área, e a parte central mais espessa, com uma profundidade média de 2 a 3 km e com uma estrutura de domo, sugere a forma de um lacólito. Foi possível distinguir três zonas de alimentação cuja profundidade não ultrapassa os 6 km. Estas zonas de alimentação encontram-se alinhadas ao longo do sistema Penacova-Régua-Verin desenhando um alinhamento em Y.

A modelação dos dados gravimétricos do plutonito de Água Frias mostra uma forma geométrica próxima dos “*wedge-shaped plutons*” e um enraizamento profundo que atinge cerca de 10 km segundo um alinhamento subparalelo à falha de Penacova-Régua-Verin. A maior depressão localiza-se no centro do plutonito sugerindo a existência de uma conduta profunda de alimentação do magma granítico. A estruturação magmática dos dois plutões é semelhante, como indica o *fabric* magnético em torno de direcções NNE-SSW e WNW-ESSE sugerindo direcções de estiramento magmático compatível com as direcções tardi-variscas. A inversão dos dados gravimétricos é compatível com a presença de zonas de alimentação alinhadas segundo a Falha Penacova-Régua-Verin. Esta zona de alimentação comum não implica, no entanto, geometrias iguais para os dois plutões, o que mostra que embora alimentados por condutas localizadas ao

longo do mesmo acidente, terão aproveitado sectores da falha com características de profundidade/geometria diferentes que terão condicionado a maior espessura do plutónio de Águas Frias - Chaves (Martins *et al.*, 2009).

Para o Complexo Granítico de Castelo Branco, os resultados da SM, da ASM, petrográficos e de inclusões fluidas permitiram construir um modelo para a sua instalação (Sant’Ovaia *et al.*, 2008, Dória *et al.*, 2010). Os estudos ASM realizados no complexo granítico de Castelo Branco revelaram que a SM caracteriza bem a diferença entre fácies central e periféricas e relaciona-se com a maior abundância de biotite e a presença de cordierite nas fácies periféricas. A maior anisotropia magnética das fácies periféricas sugere um maior estiramento co-magmático no bordo do maciço. A orientação das foliações magnéticas NNW-SSE paralelas às estruturas regionais indica que a instalação destes granitos decorreu num período tarditectónico. Por outro lado, estas foliações desenvolveram-se numa fase magmática a tardimagmática como atestam as microestruturas e os valores da anisotropia magnética (Sant’Ovaia *et al.*, 2008).

Para os granitos da Serra da Estrela, Mangualde, Castro Daire e Trancoso, para além dos modelos, à escala, da foliação e da lineação magnéticas e da caracterização magnética das rochas, foram construídos modelos que explicam, sem esquecer as variáveis espaço e tempo, a intrusão dos próprios corpos graníticos, bem como as componentes de deformação associadas (Sant’Ovaia *et al.*, 2010).

Os granitos tardi- D3 variscos, da Serra da Estrela, Mangualde, Castro Daire e Guarda representam o volume mais importante de granitos do Centro de Portugal. Duas direcções principais de lineações magnéticas, N150E e N20E, consideradas como lineações de estiramento foram obtidas, indicando que a instalação destes granitóides foi controlada tectonicamente. Sant’Ovaia *et al.* (2010) desenvolveram um modelo para a instalação destes granitos que envolve três fases.

A primeira fase foi despoletada pelo movimento de desligamentos direitos de direcção N150. A abertura ao longo destas falhas promoveu o começo da instalação dos granitos da zona Cota – Seia.

A segunda fase terá correspondido ao crescimento dos granitos anteriormente instalados e ao começo da instalação dos plutões circulares de Castro Daire e da Estrela. Foi também nesta fase que os granitos da Guarda se instalaram possivelmente ao longo de aberturas relacionadas com desligamentos esquerdos de direcção N20 que podem ser consideradas como conjugadas das falhas N150.

A terceira fase foi caracterizada pelo crescimento dos plutões graníticos, de forma mais ou menos independente da tectónica regional, segundo várias direcções ou, por outras palavras, o final da instalação seria forçado, isto é, inteiramente relacionado com a pressão magmática.

Conclusões

Neste trabalho pretendemos mostrar como a partir dos modelos da SM e da ASM se desenvolvem estudos aplicados a rochas graníticas, permitindo não só a construção de outros modelos para a instalação dos maciços mas também para a sua forma, estrutura e zonas de alimentação. Os processos de deformação são igualmente traduzidos através dos referidos modelos. Ficou igualmente expresso a importância da inclusão de dados obtidos por outros métodos como, por exemplo, o gravimético.

Nestes como noutros trabalhos de investigação, são igualmente importantes os modelos cartográficos estabelecidos para os locais a estudar como outros modelos construídos para situações geológicas similares. Os modelos científicos constroem-se partindo do conhecimento acumulado e, conseqüentemente, tendo como suporte modelos existentes. Contudo, a sua evolução e a construção de modelos novos para os maciços graníticos deve muito, no caso em análise, à realização de mais trabalhos de campo, de laboratório e de interpretação de dados.

Estamos certos que os modelos com base nos dados da ASM, apresentados neste estudo, contribuiram para uma compreensão diferente dos subsistemas estudados. Estes modelos têm ainda o mérito de constituírem *teaching models*, exemplos da Geologia de Portugal, para o ensino da Geologia Estrutural e Tectónica.

Dedicatória: As autoras dedicam este estudo ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho, associando-se à Homenagem ao Homem, ao Geólogo e ao Professor.

Bibliografia

- Borradaile, G. J. (2001) - Magnetic fabrics and petrofabrics; their orientation distributions and anisotropies. *Journal of Structural Geology*; 23, 1581–1596.
- Borradaile, G.J., Henry, B. (1997) - Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Science Reviews*; 42 (1-2), 49-93.
- Buckley, B.C., Gobert, J.D., Kindfield, A.C.H., Horwitz, P., Tinker, R.F., Gerlits, B., Wilensky, U., Dede, C., Willett, J. (2004) - Model-Based Teaching and Learning With BioLogicaTM: What

- Do They Learn? How Do They Learn? How Do We Know? *Journal of Science Education and Technology*; 13 (1), 23-41.
- Butler, R (1992) - *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Blackwell Scientific Publications, 319 p.
- Dória, A., Morais, P., Santos, M., Gomes, C.R., Sant’ovaia, H., Noronha, F. (2010) -. Estudo da microfracturação do maciço granítico de Castelo Branco através dos Planos de Inclusões Fluidas. VIII Congresso Nacional de Geologia. *Revista Electrónica de Ciências da Terra, e – Terra*; 11 (21), 4p.
- Gobert, J. D., Buckley, B. C. (2000) - Introduction to model based teaching and learning in science education. *International Journal of Science Education*; 22, 891–894.
- Gilbert, J. K., Boulter C. J. (2000) - *Developing models in science education*. Dordrecht, Kluwer, 386 p.
- Hrouda, F. (1982) - Magnetic anisotropy of rocks and its application in Geology and geophysics. *Geophysical Surveys*; 5, 37-82.
- Johnson-Laird, P.N. (1983) - *Mental Models*. Cambridge University Press.
- Martins, H.C.B., Sant’Ovaia, H., Noronha, F. (2009) - Genesis and emplacement of felsic Variscan plutons within a deep crustal lineation, the Penacova-Régua-Verín fault: an integrated geophysics and geochemical study (NW Iberian Peninsula). *Lithos*; 111 (3-4), 142-155.
- O’Reilly, W. (1984) - *Rock and Mineral Magnetism*. Chapman and Hall, 220 p.
- Parés, J.M., Pluijm, B.A. (2002) - Evaluating magnetic lineations (AMS) in deformed rocks. *Tectonophysics*; 350, 283- 298.
- Prins, G.T., Bulte, A.M.W., Van Driel, J.L., Pilot, A. (2008) - Selection of Authentic Modeling Practices as Contexts for Chemistry Education” *International Journal of Science Education*; 30(14), 1867-1890.
- Sant’Ovaia, H. (2000) - O Maciço granítico pós-tectónico de Vila Pouca de Aguiar. Estudo petroestrutural e mecanismo de instalação. Tese de Doutoramento. Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Laboratoire des Mécanismes de Transfer en Géologie, Université Paul Sabatier, Toulouse III; 314 pp.
- Sant’Ovaia, H., Bouchez, J.L., Noronha, F., Leblanc, D., Vignerresse, J.L. (2000) - Composite-laccolith emplacement of the post-tectonic Vila Pouca de Aguiar granite pluton (northern Portugal): a combined AMS and gravity study. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*; 91, 123-137.
- Sant’Ovaia, H., Gomes, C.R., Rocha, A.L. (2008) - Parâmetros magnéticos das rochas do Complexo Granítico de Castelo Branco, Portugal Central. In: Callapez, P.M.; Rocha, R.B.; Cunha L.; Marques, J.F., Dinis, P.M. (Eds.) - *A Terra Conflitos e Ordem*. Livro de Homenagem ao Professor António Ferreira Soares, pp. 265-272. Ed. M.M.G.U.C., Coimbra, XXII + 478 p.
- Sant’Ovaia, H., Olivier, P., Ferreira, N., Noronha, F., Leblanc, D. (2010) - Magmatic structures and kinematics emplacement of the Variscan granites from Central Portugal (Serra da Estrela and Castro Daire areas). *Journal of Structural Geology*; 32 (10), 1450-1465.
- Stacey, F.D., Banerjee, S.K. (1974) - The physical principles of rock magnetism. *Earth Planetary and Science Letters*; 4, 451–455.
- Tarling, D.H., Hrouda, F. (1993) - *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman and Hall, 217 p.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Geologia estrutural da Península Fildes, Ilha Rei George, Antárctida

Adriane Machado¹; Teresa Barata¹; Farid Chemale Jr.²; André Canale³; Ivo Karmman⁴

¹Centro de Geofísica da Universidade de Coimbra, PORTUGAL, adrianemachado@ci.uc.pt; mtbarata@gmail.com

²Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, BRASIL, farid.chemale@ufs.br

³Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, BRASIL

⁴Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, BRASIL

Palavras-chave: Tectónica extensional, Subducção, Ilhas Shetland do Sul

Resumo

A tectónica dominante na Península Fildes é de carácter extensional, com geração de falhas normais e transcorrentes em regime rúptil. Em geral, as estruturas primárias como o fluxo de lava e acamamento sedimentar, afloram com orientação horizontal a subhorizontal, levemente basculadas, evidenciando a fraca deformação na região durante o processo de subducção entre as placas Phoenix/Drake-Antárctida. Os sistemas principais de falhas e fracturas são de direcção E-W com mergulhos subverticais a verticais e, secundariamente N-S e N20° - 45°E, com mergulhos normalmente elevados.

Key-words: *Extensional tectonic, Subduction, South Shetland Islands*

Abstract

The dominant tectonic in Fildes Peninsula is extensional showing the formation of normal and transcurrent (strike-slip) faults in a ruptile regime. The primary structures such as lava flows and sedimentary bedding, which are lightly basculated, show mostly horizontal to subhorizontal orientation. This suggests a weak deformation in the area during the subduction process among the Phoenix/Drake-Antarctica plates. The major fault and fracture systems are E-W oriented close to 90° dip and secondarily N-S and N20° - 45°E oriented with regular steep dips.

Introdução

A Península Fildes localiza-se no sudoeste da Ilha Rei George (62°13'S, 58°54'W), sendo a maior ilha do Arquipélago Shetland do Sul, Antárctida (Figura 1). A formação do arquipélago é o resultado da actividade

magmática gerada pelo processo de subducção entre as placas Phoenix/Drake-Antártida (Figura 1) durante o Meso-Cenozóico num ambiente de arco-de-ilhas (Smellie *et al.*, 1984; Cande *et al.*, 2000). No final do Terciário, o arquipélago passou por um processo extensional regional, tendo originado o Estreito de Bransfield (Figura 1).

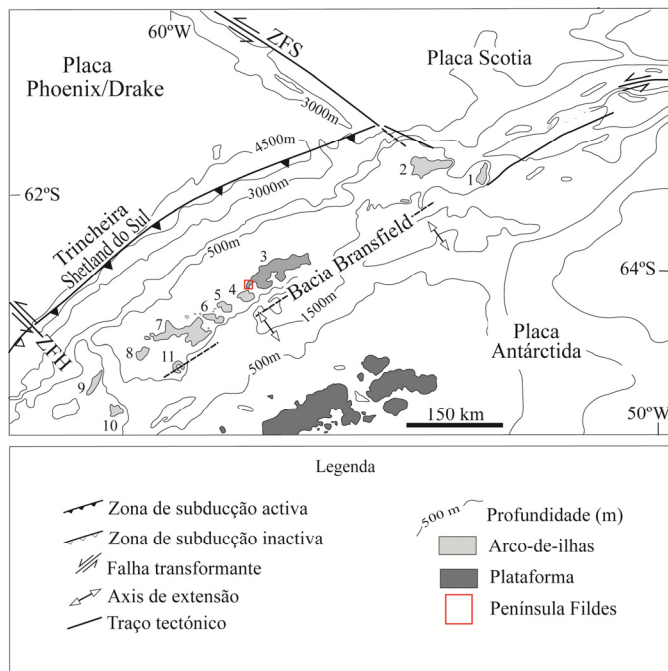


Figura 1. Contexto tectónico das Ilhas Shetland do Sul. (1) Ilha Clarence; (2) Ilha Elefante; (3) Ilha Rei George; (4) Ilha Nelson; (5) Ilha Robert; (6) Ilha Greenwich; (7) Ilha Livingston; (8) Ilha Snow; (9) Ilha Smith; (10) Ilha Low e (11) Ilha Deception (Lawver *et al.*, 1996).

O levantamento da geologia estrutural evidenciou que a Península Fildes apresenta como estruturas primárias principais o bandado ígneo (estrutura de fluxo) e a estratificação sedimentar plano-paralela, que em geral, são bem visíveis nos afloramentos. As maiorias das estruturas primárias estão subhorizontais e, eventualmente, observam-se blocos com mergulhos maiores que 30° , impedindo muitas vezes de estabelecer a continuidade entre os blocos.

Em termos estruturais identificam-se sistemas de lineamentos com orientação N-S, N30-40E e WNW-ESSE, visualizados frequentemente nos afloramentos. Estas estruturas apresentam indicadores cinemáticos de

movimento normal e direccional, e são acompanhadas por um conjunto de sistemas de fracturas e falhas, de tamanho métrico a centimétrico.

Os trabalhos de campo permitiram reconhecer diferentes conjuntos de fracturas e falhas, gerados num ambiente rúptil. Localmente, identificaram-se micro-dobras centimétricas em rochas epiclásticas.

Metodologia

O tratamento dos dados estruturais da Península Fildes compreendeu medidas de atitudes de fracturas, classificadas como simples e preenchidas, e subdivididas em pequenas (1 a 5 m), médias (5 a 10 m) e grandes (> 10 m). A observação dos dados planares permitiu o reconhecimento dos principais padrões da deformação rúptil, detectados nas rochas vulcânicas e vulcanoclásticas da Península Fildes.

Os dados estruturais foram interpretados através da projecção em estereogramas, com os pólos dos planos de fracturas acompanhados pelas atitudes dos planos nas suas máximas concentrações. Os estereogramas foram obtidos utilizando-se os programas *GELI*, *Monitor* e *StereoNet*. Para o tratamento dos dados utilizaram-se combinações entre os diversos tipos de fracturas, com o objetivo de obter informações referentes aos padrões de direcção e mergulho. Em geral, foram utilizados diagramas com o mínimo de 50 medidas planares, preferencialmente de um mesmo afloramento; caso contrário, optou-se por utilizar agrupamento de áreas contíguas.

Resultados e discussão

A feição planar mais evidente na Península Fildes é a estratificação primária, como o bandado dado pelo fluxo de lava e estratificação plano-paralela nas rochas epiclásticas. As estruturas secundárias da Península Fildes são falhas normais e transcorrentes, bem como sistemas de fracturas com mergulhos subverticais, todos formados em ambiente rúptil. Por outro lado, observa-se em campo, que as camadas de lavas intercaladas com vulcanoclásticas formam blocos com a continuidade da estratificação original visível. No entanto, entre estes blocos não é possível acompanhar a continuidade das camadas guias. Assim, pressupõe-se que elas estejam basculadas.

Em geral, podem-se diferenciar como sistemas de falhas principais (lineamentos), todos aqueles com atitude E-W, N-S e N30-40E. No afloramento, as estruturas E-W com mergulho subvertical (fracturas não preenchidas) e E-W/69 a 066-075/subvertical (fracturas preenchidas) são as

modas mais frequentes. A análise individual dos tipos de fracturas também indica o domínio de estruturas com orientação N-S e E-W, subordinadamente às NE.

A cinemática dos falhamentos N-S e E-W foi identificada através de estrias (Figura 2a), de estruturas anastomosadas (Figura 2b) e pelo deslocamento da estratificação primária. Muitas das estruturas com mesma orientação espacial apresentam movimentos ora normal, ora direccional. Tal facto pode ser explicado por movimentos distintos associados a dois eventos tectónicos, como por exemplo, um associado ao processo de subducção meso-cenozóica e outro, ao processo de rifte do Estreito de Bransfield.

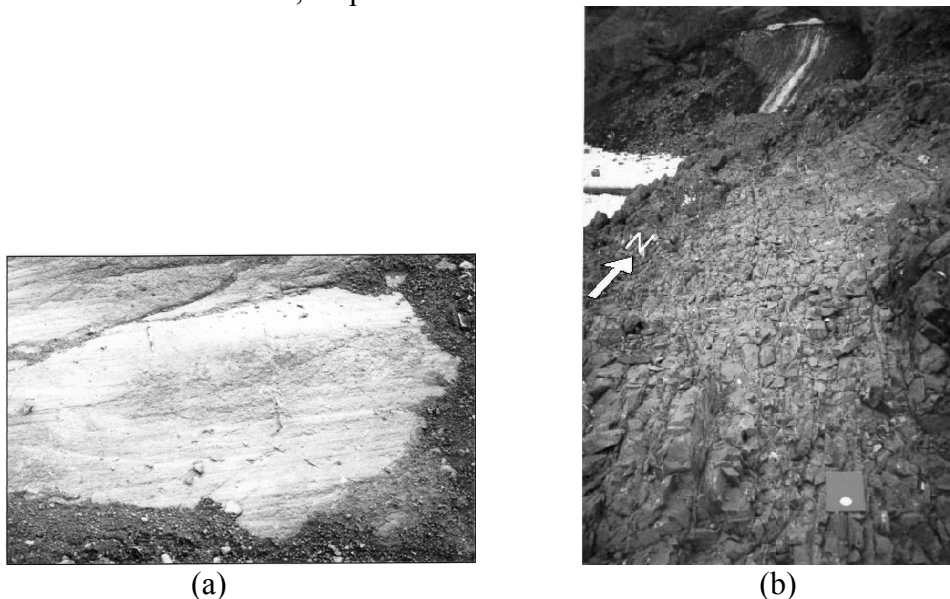


Figura 2. a) Estrias horizontais relacionadas a uma falha transcorrente; b) Sistema de falhas transcorrentes com orientação NW e estrutura anastomosada (Machado, 1997).

No presente trabalho não foi possível diferenciar cronologicamente os eventos tectónicos, devido às rochas da Península Fildes apresentarem idades quase exclusivamente do Terciário Inferior, enquanto que as deformações ocorreram entre o Terciário Inferior e Quaternário, todas em regime rúptil. Não se identificaram minerais gerados durante as deformações para datá-los. Por outro lado, o acervo de estruturas primárias e secundárias estudados, sugere que o tipo de deformação dominante no Terciário Inferior foi extensional. Tal facto baseia-se em estudos tectónicos de bacias extensionais (riftes intracontinentais e margens passivas) em que as estruturas identificadas são muito semelhantes às aqui descritas.

Durante o trabalho não foram encontradas estruturas tectónicas indicativas de processo compressional, como é usualmente descrito para as regiões formadas em ambiente de arco-de-ilhas (Condie, 1989), como dobras e falhas ligadas a processos de empurrões. Deve-se ressaltar que muitos autores descrevem a presença de estruturas tectónicas associadas a processos de compressão ou inversão estratigráfica para outras áreas da Ilha Rei George (Barton, 1965).

Nos últimos anos tem-se discutido muito sobre os tipos de estruturas tectónicas presentes em arcos-de-ilhas, quer ao nível de superfície (com base nos trabalhos de campo), como em subsuperfície (com base a secções sísmicas). Vários autores chegaram à conclusão que a maioria dos modelos de arcos-de-ilhas incorpora a idéia errónea de que as placas oceânicas subductantes escorregam em direção a uma placa fixa (ou bloco fixo), o que levaria então, à geração de estruturas nitidamente compressionais. No entanto, tem-se observado que as estruturas dominantes em arcos-de-ilhas modernos como Java, Japão, Aleutas, entre outros, são nitidamente extensionais. Constatou-se então que o regime tectónico comum em placas convergentes, com formação de arco-de-ilhas, é o extensional, já que a região de *fore arc*, onde as rochas deveriam estar invertidas por tectónica de empurrão e dobramento, desliza por cima da placa oceânica, que mergulha mais ingrememente (Hamilton, 1995). Assim, a região de *fore arc* não permanece fixa em relação ao movimento da placa subductante, mas sim, movimenta-se sobre esta com dominância de tectonismo extensional na primeira.

Ainda que este trabalho não seja conclusivo para a Ilha Rei George e mesmo para as Ilhas Shetland do Sul, deve-se investigar qual o tipo de regime que gerou as estruturas descritas como compressionais, mencionadas por outros autores noutras áreas da Ilha Rei George e demais ilhas do arquipélago. Deve-se avaliar qual a importância da tectónica compressional durante a formação do arco-de-ilhas Shetland do Sul no decorrer do Terciário.

Conclusão

As falhas na Península Fildes apresentam indicadores cinemáticos de movimentos normais e transcorrentes, todos gerados em ambiente rúptil. Os dados estruturais definem padrões de lineamentos megascópicos E-W, N-S e N30-40E, enquanto que nos afloramentos dominam as fracturas preenchidas de direção E-W com mergulho subvertical e fracturas não preenchidas, segundo a orientação E-W/69 e N66-75E/subvertical.

A tectónica vigente durante o Terciário Inferior, época em que as rochas vulcânicas da Península Fildes se formaram, foi de carácter extensional. Não há registo, na área de estudo, de estruturas secundárias formadas em regime compressional (empurrão). O processo de extensão a que foi submetida à região das Ilhas Shetland do Sul no final do Cenozóico, gerou o Estreito de Bransfield, contribuindo para que estruturas extensionais e direccionais tenham sido reactivadas.

Bibliografia

- Barton, C.M. (1965) - The geology of South Shetland Islands. III. The stratigraphy of King George Island. British Antarctic Survey, Scientific Reports, London; 44, 33 pp.
- Cande, S.R., Stock, J.M., Müller, R.D., Ishihara, T. (2000) - Cenozoic motion between East and West Antarctica. *Nature*; 404, 145-150.
- Condie, K.C. (1989) - Plate tectonics and crustal evolution. Pergamon, New York, 3^a ed.
- Hamilton, W.B. (1995) - Subduction systems and magmatism. John L. Smellie (ed.), *Volcanism Associated with Extension at Consuming Plate Margins*, Geological Society Special Publication; 81, 3-28.
- Lawver, A.L., Sloan, B.J., Barker, D.H.N., Ghidella, M., Von Herzen, R.P., Keller, R.A., Klinkhammer, G.P., Chin, C.S. (1996) - Distributed, Active Extension in Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: Evidence from Multibeam Bathymetry. *GSA Today*; 6(11), 1-5.
- Machado, A. (1997) - Petrologia, Geoquímica e Geologia Estrutural da Península Fildes. Ilha Rei George, Antártica. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Smellie, J.L.; Pankhurst, R.; Thomson, M.R.A.; Davies, R. (1984) - The geology of the South Shetland Islands: Stratigraphy, geochemistry and evolution. British Antarctic Survey Scientific Reports, 87.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

A detecção remota como suporte à caracterização morfo-estrutural do bordo ocidental do planalto da Huíla (SW de Angola)

Horácio Mpengo¹; Fernando Lopes²; Alcides Pereira³; Vasco Manuel Mantas³

¹Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, Portugal e UPRA, ANGOLA. E-mail: mpengoh@yahoo.com.br

²Centro de Geofísica, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL; fcarlos@dct.uc.pt.

³IMAR, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL.

Palavras-chave: Angola, Planalto da Huíla, Detecção remota, Caracterização morfo-estrutural

Resumo

Efectuou-se o reconhecimento das principais características morfo-estruturais do bordo ocidental do planalto da Huíla, em Angola, utilizando técnicas de Detecção Remota. Para o efeito recorreu-se a dados altimétricos do sensor Aster, criando um modelo digital de terreno da área em estudo, sobre o qual foram aplicadas técnicas de transformação da imagem (como técnicas de realce, alteração do contraste, e aplicação dos filtros), e técnicas de exploração (como as composições coloridas RGB). A interpretação das imagens de satélite assim tratadas foi feita de forma visual e digital, recorrendo, sempre que possível, ao apoio da cartografia geológica disponível à escala 1:1000000. Foram identificados e caracterizados aspectos morfológicos e sistemas de lineamentos principais com orientações N50°W-N60°W, N60°E, N-S, cuja presença no terreno foi confirmada por reconhecimento de campo em vários locais do planalto. O resultado deste estudo tem importantes implicações quer do ponto de vista da cartografia geológica e das interpretações tectónicas regionais, quer no âmbito das políticas de ordenamento do território, em áreas como a hidrogeologia ou a estabilidade de taludes.

Key-words: Angola; Huila Plateau; Remote sensing; Morphostructural analysis

Abstract

The goal of this work is to recognize the main morpho-structural features of the western edge of the Huíla plateau (Angola) using Remote Sensing techniques. For this purpose a digital elevation model (DEM) of the area was build, based on altimetric data acquired from the Aster sensor, on which image processing techniques (such as enhanced techniques, contrast change and filtering) were applied; the use of other exploitation

techniques, such as RGB color compositions was also tested. The interpretation of the processed satellite images was made by visual and digital means and the results were compared with the available geological mapping (scale 1: 1 000 000). Morphological aspects and the main lineaments systems striking N50°W-N60°W, N60°E, N-S were identified and characterized and, in some cases, confirmed by field work. This study has important implications from the point of view of geological mapping and regional tectonics as well as in land use planning or other areas such as hydrogeology or geotechnics.

Introdução

As imagens de satélite, obtidas e tratadas com a mais variada tecnologia, têm permitido pôr em evidência aspectos geomorfológicos e alinhamentos tectónicos susceptíveis de interpretações diversas. A partir do estudo pormenorizado de sectores relativamente localizados da superfície terrestre, é possível reconhecerem-se e avaliarem-se aspectos estruturais, em particular os padrões de fracturação, e fazerem-se interpretações tectono-estruturais e cinemáticas para domínios mais amplos, tanto continentais (e.g. Lopes *et al.*, 2007; Ayday & Gümüşlüoğlu, 2008; Baruah & Hazarika, 2008) como oceânicos (e.g. Pereira *et al.*, 2008, 2009). Estas novas metodologias permitem ultrapassar os elevados custos e a morosidade associada às técnicas clássicas de reconhecimento geológico. Permitem também a aquisição de informação sobre a regiões inóspitas e/ou de acesso físico difícil, como é o caso de muitas regiões do continente africano. O presente trabalho tem como objectivos o reconhecimento dos principais sistemas de alinhamentos estruturais do bordo ocidental do Planalto da Huíla (Lubango - Angola) e a definição das suas principais características morfo-estruturais como complemento à cartografia estrutural, através da interpretação de dados digitais de detecção remota espacial, adquiridos pelo sensor (ETM+) do satélite Landsat, e pelo sensor (Aster) do satélite Terra.

Enquadramento geomorfológico e geológico

O bordo ocidental do planalto da Huíla está localizado na região centro-sul de Angola, e estende-se de Tchongorói, Província de Benguela, a norte, até Oncôncua, Província do Cunene, a sul, entre as latitudes 13° 30' S e 16° 45' S; e as longitudes 13°00' E e 14° 30' E (Figura 1).

Geomorfologicamente, a superfície do bordo ocidental do planalto da Huíla distribui-se por duas unidades (Marques, 1977): *i*) a unidade I, o Planalto Antigo, que abrange a metade meridional do bordo, representada por uma superfície aplanada tectonicamente soerguida; *ii*) a unidade II, a

Cadeia Marginal de Montanhas, que abrange a metade setentrional do bordo, representada por relevos de desnível muito acentuado. As altitudes oscilam entre os 1000 m (Oncôncua) e os 2330 m (Planalto da Humpata). Para oeste, estas unidades passam abruptamente à unidade III, a Zona de Transição, que se estende paralela ao Atlântico, representada por uma sucessão de patamares aplanados. Esta passagem traduz-se no terreno por um apreciável degrau de erosão, que em algumas zonas apresenta o aspecto de uma verdadeira escarpa, com mais de 1000 m de altura, muito recortada, por vezes revestida de rocha nua (Figura 2a). A intensa fracturação que aí se observa, facilita a acção erosiva e favorece o desprendimento de blocos e as acumulações de sopé. É comum a formação de fendas e canhões, alguns deles profundamente incisos na parede do maciço e de grande impacto visual, como é o caso da Fenda da Tundavala (Serra da Chela; Figura 2b).

Geologicamente, o bordo ocidental do planalto da Huíla está integrado no chamado Bloco Angolano do Cratão Proterozóico do Congo (*e.g.* Deior *et al.*, 2008), cujo interior se manteve estável após os ciclos orogénicos Limpopo-Liberiano (c.2680 M.a a c.2820 M.a) e Eburneano e /ou Tádiliano (c.2100 M.a a c.2000 M.a), mas cujas zonas periféricas foram reactivadas e remobilizadas durante os ciclos orogénicos Maiombiano (1300±200 M.a), Kibarino (1300±100 M.a) e Pan-Africano (±975 M.a ±550 M.a) (*e.g.* Carvalho, 1983, 1993; Ferreira da Silva, 2009).

De acordo com Matias (1980) e Carvalho (1983, 1993), ao longo do bordo ocidental do planalto da Huíla afloram, de norte para sul, as seguintes unidades (Figura 1): 1. Granitos porfiroblásticos eburneanos (unidade $P_C\gamma 1$); 2. Granitos biotíticos, granodioritos e dioritos eburneanos (unidade $P_C\gamma$); 3. Granitos e gneisses eburneanos (unidade $P_C\gamma 4$); 4. Quartzitos da Chela, pan-africanos (unidade P_ACh); 5. Calcários da Leba-Tchamalindi, pan-africanos (unidade P_{AL}); 6. Complexo Gabro-anortosítico, limpopo-liberiano (unidade $P_C\beta-P_C\phi$); 7. Granitos Vermelhos do Sudoeste, kibarianos (unidade $P_B\gamma 1$); 8. Noritos e Doleritos, pan-africanos (unidade $P_{A\Delta\gamma}$); 9. Dioritos e Granodioritos do Sudoeste, limpopo-liberianos (unidade P_{Δ}). Esta grande variedade litológica aflorante tem implicações nos distintos recortes do bordo.

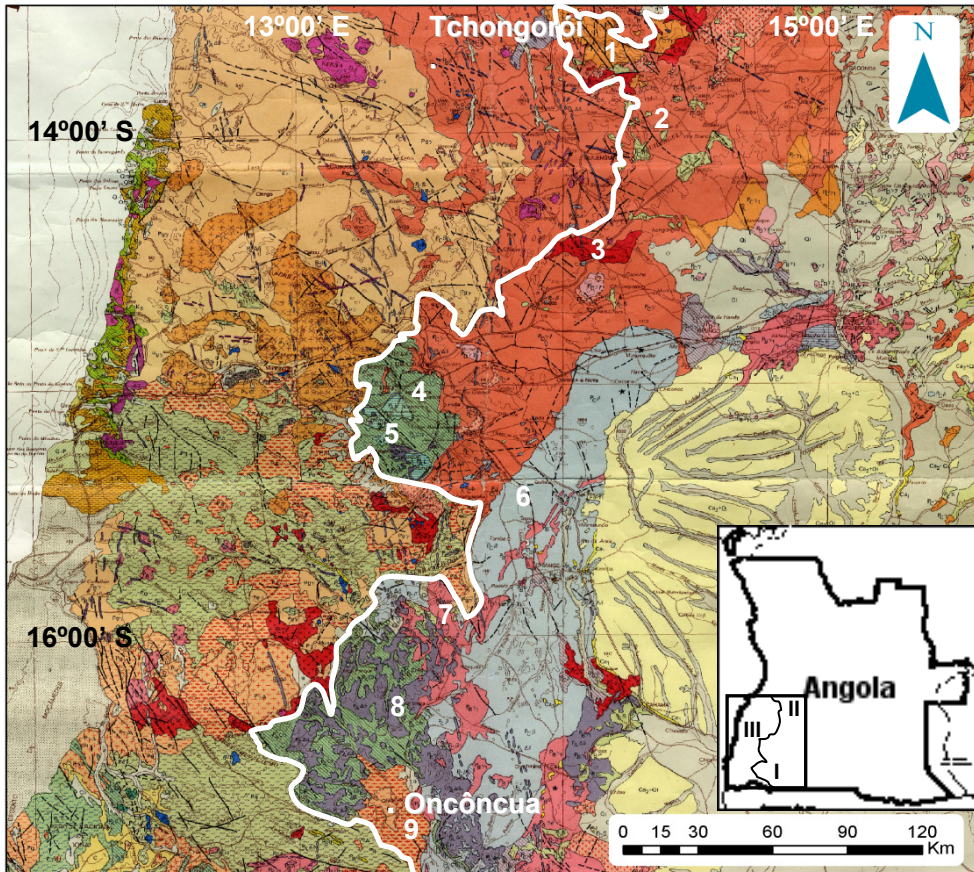


Figura 1. Extracto da folha 3 da carta geológica de Angola à escala 1:1000000 (Matias, 1980), com a localização geográfica do bordo ocidental do planalto da Huila (contorno a branco) e as diferentes litologias que o constituem. 1. Granitos porfiroblásticos eburneanos; 2. Granitos biotíticos, granodioritos e dioritos eburneanos; 3. Granitos e gneisses eburneanos; 4. Quartzitos da Chela, pan-africanos; 5. Calcários da Leba-Tchamalindi, pan-africanos; 6. Complexo Gabro-anortositico, limpopo-liberiano; 7. Granitos Vermelhos do Sudoeste, kibarianos; 8. Noritos e Doleritos, pan-africanos; 9. Dioritos e Granodioritos do Sudoeste, limpopo-liberianos. Unidades geomorfológicas: I. Planalto Antigo; II. Cadeia Marginal de Montanhas; III. Zona de Transição.

Metodologia

Neste estudo foram utilizadas imagens obtidas pelo sensor ETM+, do satélite Landsat 7, e do sensor Aster, incluído no satélite Terra. As imagens do satélite Landsat-7, num total de 8, correspondem ao path 181 e 182 e row

070 e 071 e foram obtidas em duas estações diferentes: época de chuva (23 de Fevereiro de 2000 e 24 de Fevereiro de 2003) e época seca (de 17 de Setembro de 2002 a 24 de Setembro de 2002). Todos os dados radiométricos foram adquiridos através do sistema Glovis da USGS. Todas as imagens foram convenientemente georreferenciadas no mesmo sistema de projecção (UTM) e *datum* WGS-84.

Como a área estudo se dispunha por 4 imagens, foi necessário proceder à criação do respectivo mosaico. Após esta fase, ao mosaico obtido foram aplicadas técnicas de realce para equilibrar as diferenças na tonalidade entre as diferentes imagens que o compõem e ainda técnicas de alteração do contraste. Foram aplicados diferentes filtros do tipo direccional com o propósito de evidenciar direcções preferenciais dos lineamentos estruturais. Obtiveram-se ainda composições coloridas diversas do tipo RGB, com suporte nas imagens da época seca e da época das chuvas.

Com base nos dados altimétricos obtidos através do sensor Aster (produto Meti-Nasa) correspondentes a 4 secções de 1° de longitude e 1° de latitude, foi elaborado o modelo digital de terreno (MDT), com uma resolução espacial de 30 metros e precisão compreendida entre os 7 e 14 metros. Ao MDT foram aplicadas técnicas de filtragem, na base de filtros direccionais, para realçar os lineamentos estruturais responsáveis pelos principais aspectos geomorfológicos da região. Os vectores correspondentes aos lineamentos interpretados foram traçados em ambiente ERMapper 7.1 e posteriormente transferidos para ambiente SIG (ArcGis 9.2). Todas as manipulações dos dados radiométricos foram efectuadas com base no programa informático ErMapper 7.1. Para validação da cartografia elaborada e obtenção de dados de pormenor, foi efectuado reconhecimento de terreno em Abril de 2010.



Figura 2a. A imponente da escarpa do bordo ocidental do Planalto da Huíla.



Figura 2b. A vertiginosa Fenda da Tundavala.

Caracterização morfo-estrutural

Da análise morfo-estrutural ao bordo ocidental do planalto da Huíla, com base no modelo digital de terreno, foi possível interpretar os seguintes sistemas de lineamentos dominantes (Figuras 3-6):

-Sistema $N50^{\circ}W-N60^{\circ}W$ – é o sistema mais penetrativo e predominante ao longo do bordo ocidental do planalto, onde o recorta em facetas com a mesma orientação, materializadas em fendas e canhões. Estes lineamentos constituem verdadeiros corredores que se prolongam para noroeste, através da peneplanície, traduzindo falhas profundas de soco, ou zonas de falha, ao longo das quais se implantaram, por vezes, rochas doleríticas. Na zona central do bordo, é possível reconhecer nos taludes da Estrada da Leba e da estrada de acesso à Tundavala, zonas de falha com esta orientação, onde as rochas aparecem profundamente cataclasadas e milonitizadas. Por outro lado, um dos sistemas de diáclases que predomina em afloramentos de quartzito no planalto da Humpata possui, também, esta orientação. As falhas deste sistema terão actuado como normais durante a fase de rifte do Cretácico inferior.

-Sistema N60°E – é o segundo sistema mais predominante. No sector central os lineamentos formam corredores que se prolongam para sudoeste, através da peneplanície onde controlam a orientação e a forma sigmoidal do relevo. Traduz-se por falhas profundas do soco que terão actuado como zonas de transferência durante a fase de rifte do Cretácico inferior (Hudec & Jackson, 2004). Parece favorecer a implantação de filões doleríticos.

-Sistema N-S - identificado sobretudo nas regiões central e nordeste do bordo, onde controla a orientação do relevo. Ao longo de alguns destes lineamentos instalam, por vezes, soleiras e filões doleríticos.

-Sistema N10°W- N20°W – é sobretudo identificado nas regiões central e sudoeste do bordo, onde controla a orientação do relevo. Em alguns locais, lineamentos com esta direcção estão intruídos por soleiras e filões doleríticos.

Menos expressivos são os sistemas N20°E e E-W que se identificam um pouco por todo o bordo, mas que, localmente, podem ter impacto importante na geomorfologia. Por exemplo, na extremidade nordeste destaca-se o sistema de lineamentos arqueados de orientação E-W a N30°W, bastante penetrativo, responsável pela forma em esporão do bordo do planalto. Faz parte da faixa de dobramentos e carreamentos pan-africanos da periferia do cratão (*e.g.* Mauririv, 1993). Na extremidade sudoeste é ainda de realçar o sistema ENE-WSW que intersecta obliquamente os sistemas anteriores.

Os sistemas N50°W-N60°W e N60°E definem as principais características morfo-estruturais do bordo ocidental do Planalto da Huíla, e controlam o traçado facetado da sua escarpa. O próprio relevo do interior do planalto é, por vezes, condicionado por estas direcções estruturais, onde vales profundos e cristas em forma de sigmoides em “S” e “Z” aparecem dispostos em “escadaria”. Conjugando os lineamentos com o modelo digital de terreno e a geologia da região, é possível concluir que as estruturas principais se comportam como grandes corredores de deformação, indicando uma complexa evolução tectónica. O profundo enraizamento crustal de alguns dos lineamentos estruturais destes corredores pode ser evidenciado pela instalação, no seu seio, de filões e soleiras doleríticas.

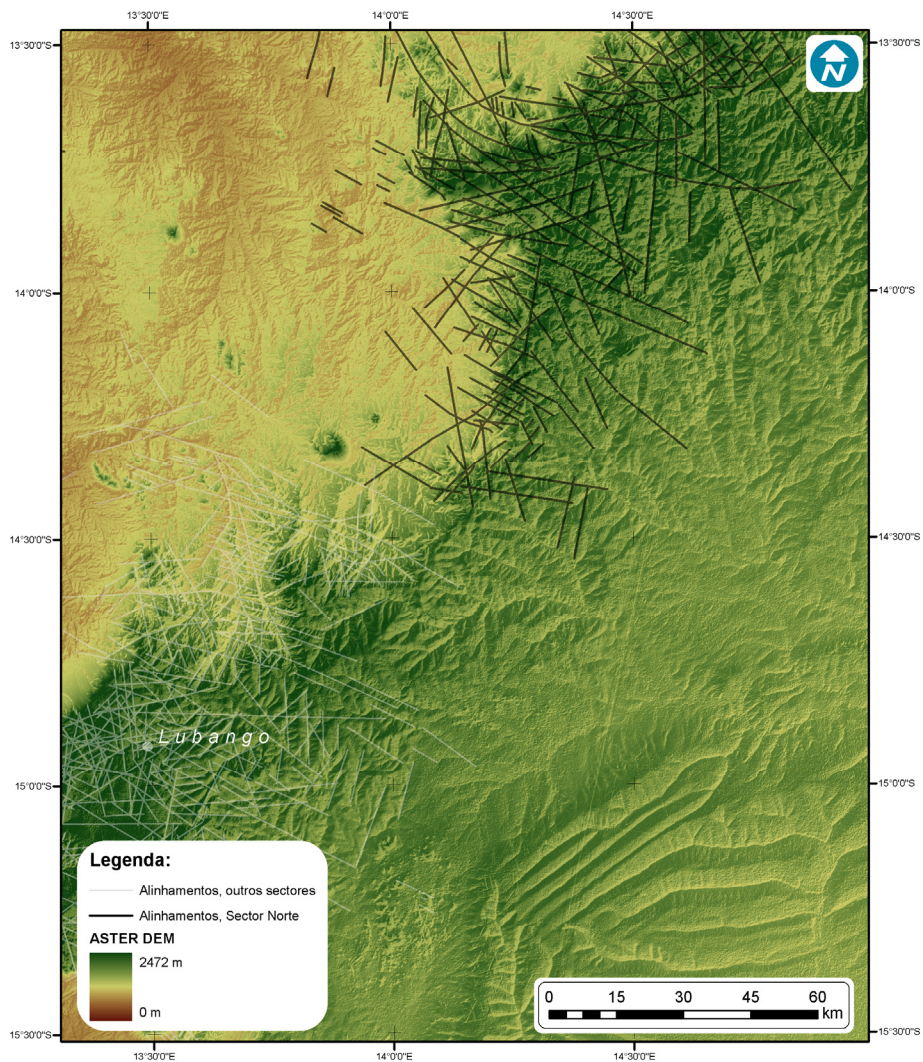


Figura 3. Modelo digital do terreno do sector setentrional da área estudada, com os principais lineamentos identificados no bordo do planalto.

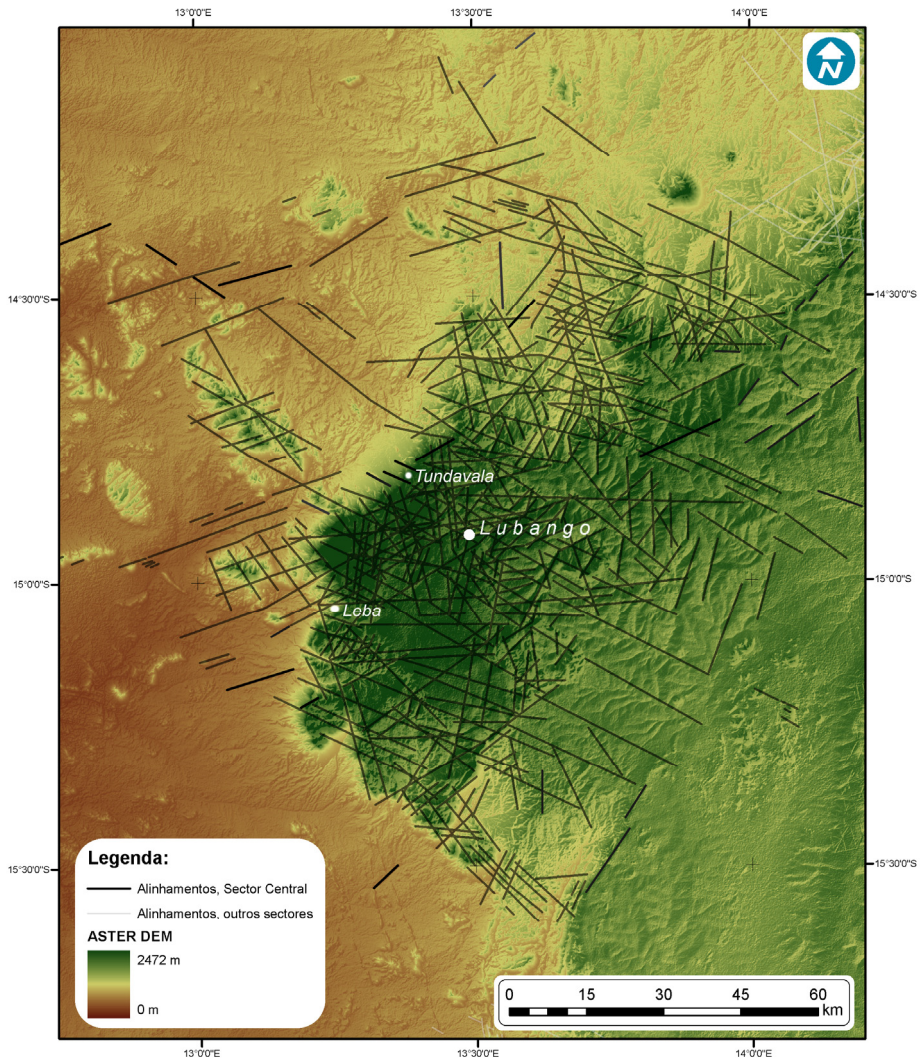


Figura 4. Modelo digital do terreno do sector central da área estudada, com os principais lineamentos identificados no bordo do planalto.

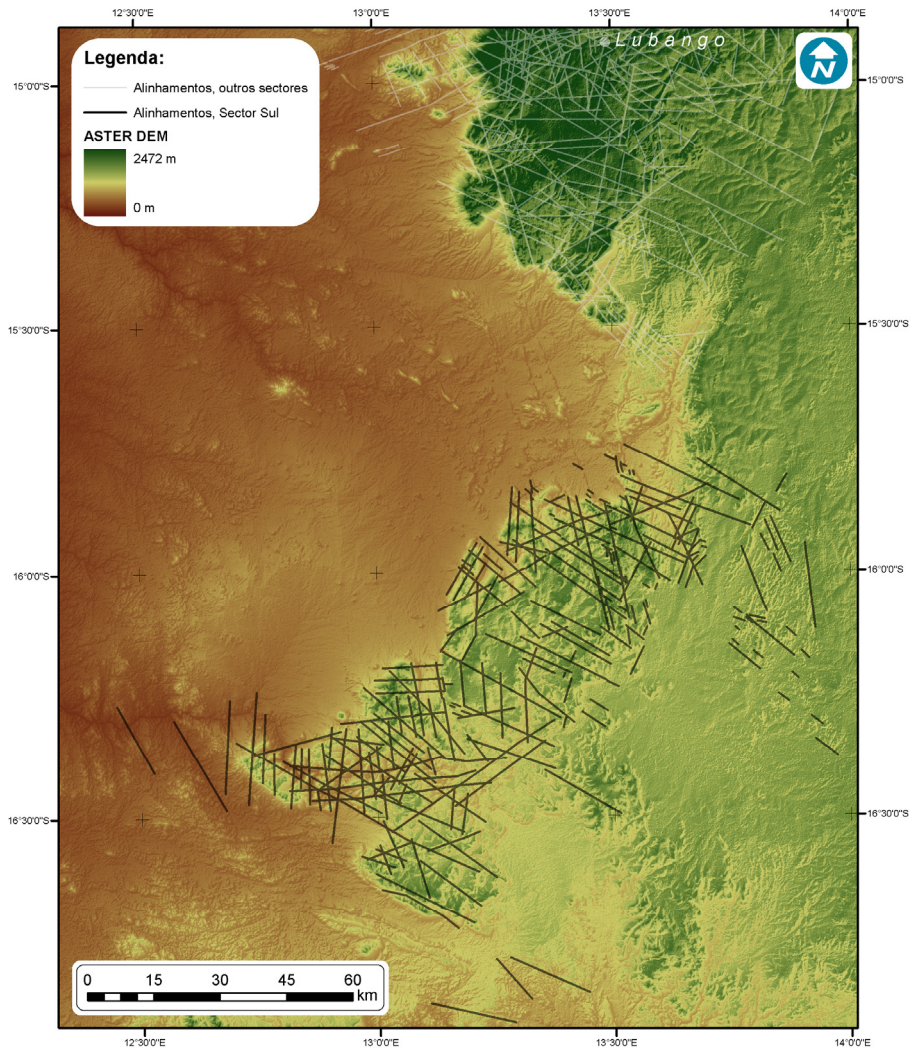


Figura 5. Modelo digital do terreno do sector meridional da área estudada, com os principais lineamentos identificados no bordo do planalto.

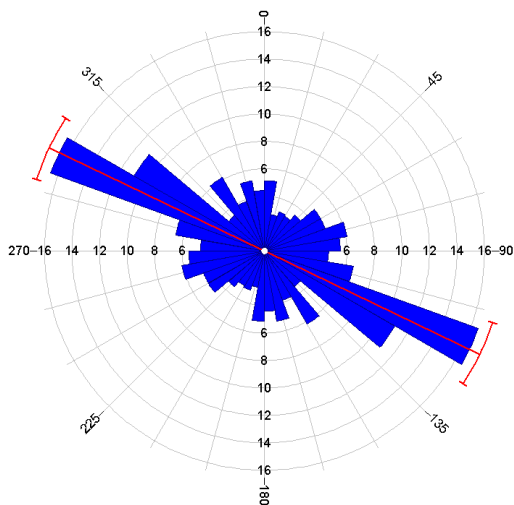


Figura 6. Diagrama de rosetas de toda a área de estudo, indicando a orientação dos lineamentos predominantes no bordo do planalto.

Considerações finais

O presente estudo permitiu pôr em evidência aspectos da morfologia do bordo ocidental do planalto da Huíla e a identificação e caracterização dos diversos sistemas de lineamentos estruturais que nele se cruzam e que se materializam em falhas, fendas e fracturas. Os resultados obtidos têm importantes implicações no âmbito da cartografia regional e das interpretações tectono-estruturais, ao permitirem aferir e complementar em detalhe a cartografia geológica existente, nomeadamente no que respeita ao padrão de fracturação do bordo ocidental do planalto da Huíla. Os grandes sistemas de lineamentos estruturais (N50°W-N60°W, N-S, N60°E) tornam-se mais evidentes e são, de igual modo, destacadas orientações (N10°W-20°W; N20°E; E-W) secundárias, o que constitui uma mais-valia para as interpretações tectono-estruturais regionais. Reconhece-se a grande importância dos alinhamentos N60°E e N50°W-N60°W que terão actuado, respectivamente, como falhas de transferência e falhas normais durante a fase de rifte do Cretácico inferior e terão sido responsáveis pelo traçado recortado em facetas poligonais do bordo ocidental do planalto da Huíla (Figura 7).

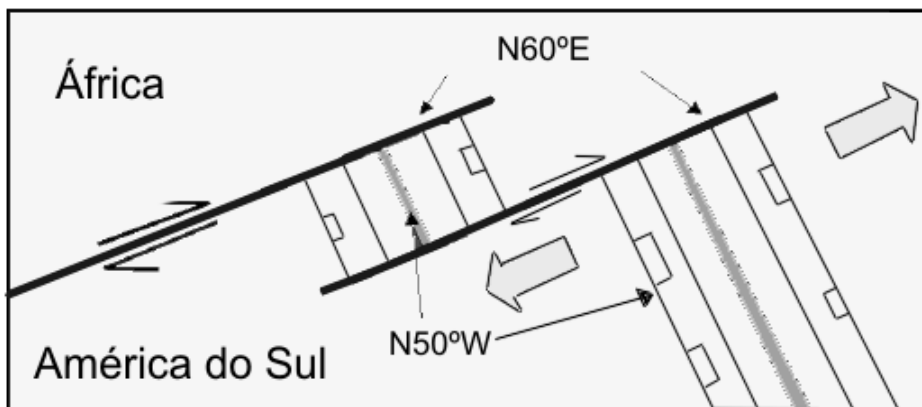


Figura 7. Modelo para o funcionamento dos sistemas N60°E e N50°W durante a fase de rifte do Cretácico inferior.

Este estudo traz também mais-valias no âmbito das políticas de ordenamento do território, com aplicação: *i*) à hidrogeologia, na medida em que o padrão de fracturas influencia a rede de drenagem (dendrítica a rectangular) e a localização dos locais de recarga dos aquíferos existentes no planalto da Huíla. A informação obtida com este estudo será importante para o estabelecimento dos perímetros de protecção das zonas de recarga; *ii*) aos problemas da estabilidade de taludes: as redes viárias que ligam o planalto às zonas baixas atravessam o bordo do planalto. A estabilidade dos seus taludes depende, para além do declive destes, do grau de fracturação e alteração das suas rochas constituintes, aliados às condições climáticas. São frequentes os movimentos de massas, sobretudo a queda de blocos, com conseqüente interrupção das comunicações viárias. De igual modo, ao longo de algumas encostas, sobranceiros às escarpas, onde o coberto vegetal é escasso, é comum encontrarem-se pequenos povoados, que vivem sob a ameaça dos movimentos de massa. O reconhecimento do padrão de fracturação poderá contribuir para a minimização dos riscos associados a estes fenómenos.

Para trabalhos a realizar futuramente, sugere-se o prolongamento deste estudo quer à zona interior do planalto da Huíla, quer à peneplanície adjacente a ocidente deste, o que permitirá adquirir uma maior percepção da dimensão e da continuidade lateral destes sistemas de lineamentos e da sua real importância na morfo-estrutura e na evolução geodinâmica desta região.

Nota: o presente trabalho integra-se no âmbito de uma dissertação de Mestrado em Geociências da FCTUC, no ramo de especialização de Ambiente e Ordenamento do Território.

Bibliografia

- Ayday, C., Gümüşlüoğlu, E. (2008) - Detection and interpretation of geological linear features on the satellite images by using gradient filtering and principal component analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVII (B8), Beijing, 1207-1210.
- Carvalho, H. (1983)- Notice explicative préliminaire sur la géologie d'Angola. Instituto de Investigação Tropical, Sér. Géol. Lisboa; 6, 15-30.
- Carvalho, H. (1993) - The Precambrian of SW Angola and NW Namíbia. *Com. Inst. Inv. Cient. Tropical*, Lisboa; 4, 38p.
- Baruah, S. & Hazarika, D. (2008) - A GIS based tectonic map of northeastern India. *Current Science*; 95, 176-177.
- Deilor, C., Theveniaut, H., Cage, M., Pato, D., Lafon, J.-M., Bialkowski, A., Rooig, J.-Y., Neto, A., Cavongo, M. & Sergeev, S. (2008) - New insights into the Precambrian geology of Angola: basis for an updated lithochronological framework at 1:2000000 scale. *22nd Colloquium of African geology. Hammamet –Tunisia*, 52-53.
- Ferreira da Silva, A. (2009) - A geologia da República de Angola desde o Paleoarcaico ao Paleozóico Inferior. *Boletim de Minas*; 44, 99-162.
- Hudec, M. R. & Jackson, M.P.A. (2004) - Regional restoration across the Kuanza Basin, Angola: salt tectonics triggered by repeated uplift of metastable passive margin. *AAPG Bulletin*; 88, 971-990
- Lopes, F.C., Pereira, A. & Vicente, A. (2007) - Recognizing salt-structures on the basis of geophysical and remote sensing data: the case of Monte Real salt-structure (onshore West-Central Portugal). *Proceedings Book. IEEE, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July Barcelona, Spain*, 23-27.
- Marques, M.M. (1977) - Esboço das unidades geomorfológicas de Angola (2ª aproximação), *Inst. Inv. Cient. Tropical, Garcia de Orta, Sér. Geol.*, Lisboa, 2, 41-43.
- Matias, D.N. (1980) - Carta Geológica de Angola à escala 1:1000000 (folha 3). Instituto Geográfico Cadastral.
- Maurirv, J.C., 1993. The Pan-African west-Congo belt: Links with eastern Brazil and geodynamical reconstruction. *International Geology Review*; 35, 436-452.
- Pereira, L.C., Andrade, A.A.S., Gomes, C. R., Lopes, F.C. & Azevedo, J.M. (2008) - Análise Geométrica e cinemática de alinhamentos tectónicos no Atlântico nordeste. *Comunicações Geológicas*; 95, 51-59.
- Pereira, L.C., Lopes, F.C. & Gomes, C. R. (2009) - Alinhamentos tectono-estruturais na Margem Sudoeste Ibérica - um modelo interpretativo. Livro de resumos. 6º Simpósio sobre a Margem Ibérica Atlântica. Oviedo. 1-5 Dezembro, 25-28.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

O Estado da Arte do ensino significativo da geologia: A teoria epistemológica da Educação Profissionalizante associada à Geodiversidade

Magnólia Nascimento¹; Pedro Douglas Silva²; Cassiano Louzada³; Elizângela Tonelli⁴

¹Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus de Fortaleza, BRASIL.

²Pós – Graduando pela Universidade de Coimbra (UC), em Engenharia Geológica e de Minas, Departamento de Ciências da Terra. / (pedrosalguod@ig.com.br).

^{3,4}Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES), Campus de Cachoeiro de Itapemirim – ES, Brasil.

Palavras-chave: PROEJA – FIC, Qualificação profissional, Geociências, Ensino de geologia

Resumo

No modelo atual de sociedade capitalista e de auto-sustentabilidade, as geociências desenvolvem imponente importância, principalmente no tocante aos recursos / reservas minerais e aos bens energéticos não renováveis, tais como o hidrocarboneto. Não obstante, esta ciência está intrinsecamente relacionada ao progresso humano, estando assim, associada à construção de barragens, túneis, rodovias, dentre outros, além de ser parâmetro para monitoramento ambiental e hidrogeológico nas interdisciplinaridades inerentes ao tema. O PROEJA-FIC é um programa de ensino de requalificação profissional que foi desenvolvido paulatinamente em parcerias com os Institutos Federais de ensino brasileiros. Sendo assim, o presente trabalho procura apresentar a experiência do projeto em questão no Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES), Campus Cachoeiro de Itapemirim. As práticas de ensino – aprendizagem se basearam na geologia interativa, procurando atingir o interesse do aluno e o despertar desse indivíduo as observações naturais, usando como ferramentas, aulas expositivas e participativas de “Noções de Geologia”, além do uso de material didático – pedagógico apropriados, com utilização de apostila de linguagem acessível, de conhecimentos básicos em geociências, confeccionada pelos autores e professores em questão, especificamente para esta empreitada. Contudo, passados um semestre de atividades pertinentes ao Proeja, houve um aproveitamento total dos egressos, sendo assim, estes alunos cidadãos, não apresentaram problemas com o conteúdo programático de geologia e, portanto, se motivaram com o curso técnico em Pedreira.

Key-words: PROEJA - FIC; Professional qualification; Geosciences; Teaching geology

Abstract

In the current model of capitalist society and self-sustainability, the geosciences develop impressive importance, especially in terms of resources / mineral reserves and non-renewable energy goods, such as hydrocarbon. Nevertheless, this science is intrinsically related to human progress and are therefore associated with the construction of dams, tunnels, highways, among others, besides being a parameter for monitoring environmental and hydrogeological interdisciplinarity inherent in the subject. The PROEJA-FIC is an educational program of retraining that was gradually developed in partnership with the Federal Institutes of Brazilian education. Therefore, this paper attempts to present the experience of the project in question at the Federal Institute of Science and Technology of the Espírito Santo (IFES), Campus Cachoeiro de Itapemirim. Teaching practices - learning is based on interactive geology, striving to achieve the student's interest and the awakening of the individual natural observations, such as using tools, lectures and participatory "Notions of Geology, and the use of material fertility rate - the appropriate pedagogical, using a book of accessible language, basic knowledge in earth sciences, made by authors and teachers in question, specifically for this task. However, after a semester of activities pertaining to Proeja, there was a total utilization of the graduates, so these students as citizens, had no problems with the syllabus of geology and thus were motivated with the technical school in Quarry.

Introdução

O Programa Nacional de Integração da Educação Profissional com a Educação Básica na Modalidade de Educação de Jovens e Adultos – PROEJA, teve origem no Decreto nº 5.478, de 24/06/2005, encontra-se destinada a proporcionar formação profissional no curso técnico em auxiliar de Pedreira, ofertado desde o primeiro semestre do ano letivo de 2010, pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) – Campus de Cachoeiro de Itapemirim, com escolarização simultânea numa escola da rede pública de ensino. Este Proeja, é uma formação inicial e continuada com ensino fundamental (5ª a 8ª série ou 6º a 9º ano), para aqueles que já concluíram a primeira fase do ensino fundamental e, em paralelo, há uma educação profissional técnica, no caso, em auxiliar de pedreira.

O presente trabalho faz um estudo de caso da educação profissionalizante de jovens e adultos na escola técnica Federal do Espírito Santo, destinados a alunos do curso de auxiliar de pedreira, vinculados a mineração, no qual, em demasia, será abordado o perfil do aluno egresso e sua evolução / aperfeiçoamento como aluno e ser humano e quais as

mudanças e desafios enfrentados pelos docentes para adaptar o currículo e as aulas teóricas / práticas a esta nova perspectiva.

Em virtude de Cachoeiro de Itapemirim, constituir um Arranjo Produtivo Local de Base Mineral (*APL Mineral*) basicamente representada por abundância de mármore e granitos e, portanto, geodisponibilidade de carbonatos e parte dos trabalhadores não apresentarem qualificação adequada para trabalhar nesse setor extrativo, fez-se necessário e justificável a implementação do Instituto tecnológico em questão, visando qualificar e requalificar jovens em potencial para este mercado, até em razão dos avanços científicos e tecnológicos exigirem cada vez mais trabalhadores aptos a desenvolverem diversas atividades, em simultâneo e como resposta a essas demandas houve a criação do Proeja-Fic para mineração, curso técnico em mineração e o curso superior em engenharia de minas na supracitada instituição de ensino. Entende-se como direito de todos os cidadãos brasileiros o acesso à educação pública, gratuita e de qualidade. Porém, nem sempre esse direito foi concedido à população. Analisando o percurso da educação profissional brasileira, percebe-se que desde o período colonial já existiam práticas educacionais, apesar de serem, de caráter informal e restritos aos engenhos. Porém, posteriormente, surgiram os colégios e as residências dos Jesuítas que passaram a desenvolver a formação profissional (escolas / oficinas), e os ofícios estariam ligados as atividades de carpintaria, de ferraria, de construção de edifícios, embarcações, de pintura, etc. (Silva, *et al.* 2010).

Com a transferência da Corte Portuguesa para o Brasil em 1808, foi criado um sistema educacional que tinha a finalidade de substituir a lacuna deixada pela expulsão dos Jesuítas do Brasil. Neste período são fundadas instituições de ensino superior, que tinham por finalidade a qualificação de pessoas para o Exército e na Administração do Estado. A educação profissional estava dividida em associações civis e estatais. Em 1824 é promulgada a primeira Constituição Brasileira, no qual propunha uma — educação primária gratuita para todos os cidadãos — situação esta, que não veio a se confirmar na prática, em razão desta modalidade atender apenas a elite dominante a época. (adaptado de Sousa, 2009).

Entre 1840 e 1856, são fundadas as casas de educandos artífices, adotando o modelo de aprendizagem de ofícios, surgindo assim, neste período os liceus. Com a implantação da Primeira República a educação profissional ganha um novo perfil, em virtude da adoção de redes escolares, pertencentes aos governos estaduais e federais. Portanto, só com a Constituição de 1934 foi consolidada o dever do Estado em relação ao

ensino primário, integral, gratuito e de frequência obrigatória, extensiva, inclusive, aos adultos (artigo 150), neste momento se legitima a separação entre o trabalho manual e do intelectual, ensino secundário destinado somente as elites e ensino médio profissionalizante para as classes menos favorecidas. (adaptado de Sousa, 2009).

Durante a década de 1940, o Estado começou a cogitar a educação de jovens e adultos. A luz desse cenário houve o estabelecimento do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), do SENAC (Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial) e do SENAR (Serviço Nacional de Aprendizagem Rural).

A Lei nº 5692/71 trouxe a regulamentação do EJA, e protagonizou uma reforma no ensino médio e fundamental, que instituiu a profissionalização compulsória para o ensino secundário, estabelecendo, formalmente, a equiparação entre o curso secundário e os cursos técnicos. Em 1972 dois documentos - Política para o Ensino Supletivo e o Parecer nº 699/72- estabeleciam a doutrina do Ensino Supletivo.

O Decreto Federal nº. 2.208/97 regulamentou a educação profissional, que no Art. 3º, compreende os seguintes níveis:

I - Básico: destinado à qualificação, requalificação e reprofissionalização de trabalhadores, independente de escolaridade prévia;

II – Técnico: destinado à proporcionar habilitação profissional a alunos matriculados ou egressos do ensino médio, devendo ser ministrado na forma estabelecida por este Decreto;

III – Tecnológico: correspondente a cursos de nível superior na área tecnológica, destinados à egressos do ensino médio e técnico.

Os princípios com que se baseiam-se o Proeja-Fic, extraído de (PROEJA. 2006, p.27-28), são os descritos sucintamente abaixo:

I - trata da inclusão de jovens e adultos que não tiveram oportunidade de concluírem a educação básica em sua faixa etária regular, na qual os sistemas educacionais firmam um compromisso de integrá-los a rede, porém primando pela qualidade e assegurando sua permanência nas unidades escolares;

II - consiste na inserção orgânica da modalidade EJA integrada à educação profissional nos sistemas educacionais públicos;

III - ampliação do direito à educação básica, pela universalização do ensino médio; IV- o trabalho como princípio educativo;

V - a pesquisa como fundamento de formação;

VI - condições gerenciais, de gênero, de relações étnico-raciais como fundantes da formação humana e dos modos como se produzem as identidades sociais.

Objetivos gerais

O objeto desse estudo é apresentar a vivência de dois geólogos profissionais com alunos do EJA, enfatizando as aplicações, valorações e o desempenho didático – pedagógico alcançado, bem como, as relações sociais essenciais ao ensino – aprendizagem, neste específico estudo de caso.

Objetivos específicos

Procurando atingir o interesse do aluno e o despertar desse indivíduo as observações naturais, foco do estudo geológico, a fim de melhor prepará-lo para a compreensão de uma ciência investigativa e integrada acima de tudo com as demais, tais como, os estudos sociais (história e geografia) e as ciências (biologia, química e física), destinando-se a inserí-los no universo da sala-de-aula integrada com o ensino profissionalizante, buscando sempre tratar de assuntos cotidianos e aplicáveis a multidisciplinaridade exigida e praticada. Tendo em vista, esta possibilidade de integração social, científica e tecnológica entre uma escola pública municipal e uma pública federal de ensino profissionalizante, ambos localizados no município de Cachoeiro de Itapemirim, as práticas pedagógicas utilizadas para esta acção educativa significante baseiam-se em:

Aulas práticas e expositivas de Noções de Geologia para o Curso Técnico em Auxiliar de Pedreira, assumindo esta disciplina, como um estudo básico dos principais conceitos referentes as geociências, tais como, minerais e rochas (ígneas, sedimentares e metamórficas), partindo-se do pressuposto de uma ciência geológica participativa e integrativa.

Como alternativas para a disseminação do saber geológico, houve formulações de globos terrestres com as camadas / zonas / extratos da Terra (em núcleo interno, externo, manto inferior, transicional e superior associado com as crostas) em isopor (maquete) e outras ferramentas de auxílio didático.

Uso de minerais (de coleção) e rochas do Laboratório de Mineralogia do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia, propiciando aulas práticas, tornando as aulas mais acessíveis, agradáveis e interessantes, ministrando-se

aulas geodivertidas, a fim de instigar a curiosidade para despertar a observação, base para a metodologia científica.

Metodologia de Trabalho

As práticas de ensino - aprendizagem adotadas se basearam na geologia interativa, buscando sempre a participação dos alunos e o envolvimento dos mesmos com as ferramentas geológicas (minerais, rochas e fósseis). Contudo, visando melhorar o alcance e o envolvimento dos alunos do EJA com a geologia e a fim de propiciar de fato uma metodologia de ensino participativa, os docentes em questão, confeccionaram uma apostila de linguagem acessível, de conhecimentos básicos em geociências, e acima de tudo, conectada com o público-alvo, ou seja, destinada exclusivamente a este curso em específico. Sendo assim, esta apostila almeja apresentar os conteúdos simplificados e básicos pertinentes a noções de geologia geral destinados ao Programa Nacional de Integração da Educação Profissional com a Educação Básica na Modalidade de Educação de Jovens e Adultos – PROEJA - FIC, abordando os conhecimentos essenciais a evolução e compreensão das geociências, de modo elegante e abrangente. A atual proposta e maior pretensão acerca desta empreitada seria a confecção de material didático-pedagógico na busca de melhor assimilação destes conhecimentos aos alunos do EJA, propiciando um processo de ensino – aprendizagem de modo prazeroso e significativo, tanto para o corpo discente, quanto para o docente, servindo de estímulo e referência a esta formação inicial continuada (FIC).

Contudo, ressalta-se que a necessidade da elaboração deste material de consulta escolar objetiva-se na reunião e organização dos conteúdos da referida disciplina, apresentando os assuntos em notas de aula, visto que há um grande acúmulo de material bibliográfico que esta disciplina oferece, com a maioria em língua inglesa ou livros técnicos – científicos de uso universitário. Todavia, os materiais e métodos utilizados, além dos já citados, foram os descritos abaixo:

Sensibilização acadêmica, através, inicialmente de um programa de requalificação profissional docente, procurando prevenir futuros infortúnios. Sendo assim, houve um curso para qualificação dos recursos humanos do Instituto de 180h de duração intitulado “Curso de Formação Continuada de Técnicos e Docentes para o Proeja-FIC, realizado de agosto a dezembro de 2009, destinado a criação de competências e habilidades necessárias para a qualidade do programa.

Integração epistemológica, de conteúdos, de metodologias e de prática educativas, tendo como resultado uma interligação teórico-prática, entre o saber e o saber fazer.

Identificação dos possíveis alunos a ingressarem na instituição, lhes conferindo e diagnosticando valores, tais como, problemas sócio-econômicos, deficiências áudio – visuais, a fim de dispor de meios para efetuar uma completa análise de riscos, ou seja, evitar e minimizar desconfortos e evasão escolar.

Formulação de um inventário focado na quantificação dos dados dos alunos, percebendo assim, as características referentes aos discentes a serem controladas, as que deviam ser verificadas, os critérios de aceitação, frequência e as devidas responsabilidades técnicas pertinentes ao corpo docente.

Problemática e Justificativa

A perspectiva de alunos que buscassem o EJA como uma alternativa de retorno aos estudos, em razão da oferta de 20 vagas oferecidas pela rede federal sempre foi considerável. Isso, em demasia, da ocorrência, no Brasil de desigualdades sociais bastante acentuadas que não foram minimizadas ao longo do desenvolvimento aparente do país. Sendo assim, e considerando que estas desigualdades sócio-culturais-econômicas só se agravaram e progrediram ao longo das últimas décadas, muitos jovens foram obrigados a deixarem os estudos para entrar no mercado de trabalho, para ajudar a sustentar suas respectivas famílias. Sendo assim, o Projeja-Fic, atualmente, apresenta um caráter de humanizar a educação procurando preparar o sujeito tanto para o mercado de trabalho como para vida. Construindo uma visão crítica da sociedade em que ele pertence, formando cidadãos.

Este programa enraíza consigo diversas problemáticas pertinentes ao ensino e aprendizagem discente e a partir de qualificação profissional e pedagógica para o corpo docente, este prezado trabalho procura apresentar o sucesso deste programa na referida instituição de ensino. Curiosamente, explicar geologia para analfabetos funcionais iniciou-se de modo bastante peculiar, em virtude da mistura de emoções pertinentes ao momento, afinal era medo associado com êxtase. O medo decorria do fato do inusitado, que era lecionar geologia para quem não havia ainda nem completado a 5ª série do ensino fundamental (antigo ginásio), ou seja, como fazê-los entender um conhecimento sempre tão restrito? A geociência sempre se caracterizou como sendo um conhecimento específico do ramo científico, sendo assim,

de graduação (nível superior) ou técnico (pós ou integrado ao ensino médio), por exigir, aliás, pré-exigir conhecimentos acerca de outras disciplinas, tais como, química, física, biologia, geografia e matemática. Por outro lado, havia, em contrapartida, a êxtase em ilimitar o conhecimento, tendo em vista, que a geologia nos dias atuais, encontra-se totalmente inserida no dia-a-dia da população como nunca esteve. Portanto, o maior desafio, além da qualificação do corpo docente para esta empreitada, se deu na motivação desses alunos e na inserção dos mesmos dentro das ciências da Terra, a partir sempre, da participação coletiva, da divisão da disciplina em dois e três professores, tornando-se assim dinâmica e atrativa, visando sempre, mostrar a esse aluno, as diversas interpretações dos processos geológicos. Entretanto, vale ressaltar, que a participação e o interesse desses alunos pela disciplina de noções de geologia foi crescendo constantemente ao longo dos dois semestres em que a referida disciplina foi trabalhada e, a cada aula, seus desempenhos, criatividade, interpretação, crítica, assimilação e conhecimentos progrediram de forma considerável, conforme será apresentada e discutida nos resultados. (adaptado de Nascimento & Silva, 2010).

Discussões e Resultados

Analisando o perfil dos alunos da EJA verificou-se como clientela primordial, os sujeitos marginalizados do sistema, ou seja, as pessoas que não tiveram oportunidades de estudarem na época certa, e que, para se enquadrarem ao mundo do trabalho têm que aumentar seu grau de estudos para sair da situação de exclusão em que vivem (Figura 1).



Figura 1. Aula do Proeja-FIC.

Inicialmente, pressupunha-se na preparação ou requalificação dos docentes para o Proeja-Fic que o público do EJA se trataria, primordialmente, de alunos de idade mais avançada e de grande inserção como trabalhadores que já tivessem inseridos no mercado mineiro. Entretanto, constatou-se a partir de fevereiro de 2010, quando iniciado a primeira, e única turma de Proeja – Fic na mineração, exatamente o contrário. Houve uma forte discrepância de idade, variando dos 18 aos 60 anos, estado civil, portanto em razão da variação de idades, solteiros e casados, relações sociais, apresentando alunos filho de presidiários e que por ventura até se tornaram tal ao longo do curso e basicamente representadas por donas de casas, em busca de qualificação e aprendizagem, reforçando o dito popular: “antes tarde do que nunca”. Assim, sendo, esses egressos, não apresentaram muitos problemas em relação ao conteúdo de geociências, até porque a intenção desse curso nunca foi formar futuros geólogos e sim qualificar mão- de – obra apta a mineração. Então, seguindo a temática de aulas interativas, atingiu-se o previsto, ao passo que, os alunos se motivaram com o curso e o retorno pode ser atestado abaixo:

Conclui-se, portanto, que dos 19 alunos regularmente matriculados nesta disciplina, 12 discentes foram devidamente aprovados representando 63% de aprovações e 7 foram reprovados representando 37%. Todavia, este resultado nos sugere um aproveitamento total dos egressos, visto que, os alunos que por ventura não atingiram a média, já haviam abandonado o curso por motivos particulares, que incluem, muitas vezes, o fator tempo e cansaço, ao passo que, o curso é noturno, e a maioria, trabalha o dia inteiro e às vezes perdem a motivação de estudarem de segunda a sexta-feira.

Desejando avaliar o ensino – aprendizagem, que relataria o corpo discente x docente, fez-se necessário a confecção de um Plano de Controle, que pode ser entendido como um formulário de registro de verificação do ensino e aprendizagem. Portanto, seria um impresso detentor das características que se desejava controlar, das características a verificar, dos critérios de aceitação, das frequências, das responsabilidades técnicas e do formulário desses registros.

Conclusão

Ao passo que o semestre evoluía, houve uma transformação de pensamentos e valores perceptíveis a ambos as partes: docentes e discentes, ou seja, esta experiência de ministrar “Noções de Geologia Geral para um público alvo, neste caso, em específico, de PROEJA – FIC, iniciou-se de forma

desacreditada e por fim, a troca de experiências, diga-se de passagem, de conhecimentos, o inter-relacionamento aluno cidadão e professores despertou um profundo sentimento de realização, em razão do empenho mútuo em acertar, ou pelo menos, oferecer o melhor em prol de um projeto particular, o deles em avançar nos estudos, aprender, conhecer, entender e o nosso em saber conquistá-los, motivá-los, orientá-los, e por fim ensiná-los. Baseando-se nestes fatos e comentários, há de se afirmar que o PROEJA FIC é muito mais do que entrar numa sala de aula, ir rumo ao quadro e escrever ou ligar um projetor (*Data Show*), pois o primeiro passo é conquistá-los como ser humano, despertá-los ao novo, motivá-los a novas experiências para assim consigamos ensiná-los o proposto.

Bibliografia

- BRASIL. Ministério da Educação. Decreto 5.478 de 24 de junho de 2005 que institui, no âmbito das instituições federais de educação tecnológica, o Programa de Integração da Educação Profissional ao Ensino Médio na Modalidade de Educação de Jovens e Adultos – PROEJA.
- BRASIL. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica. Programa de integração da educação profissional ao ensino médio na modalidade de educação de jovens e adultos PROEJA. 2006
- BRASIL. Decreto n. 5.154, de 23 de julho de 2004. Regulamenta o § 2º do artigo 36 e os arts. 39 a 41 da Lei n. 9.394, de 20 de dezembro de 1996, que estabelece as diretrizes e bases da educação nacional, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 jul. 2004.
- BRASIL. Ministério da Educação. Saberes da Terra: Programa Nacional de Educação de Jovens e Adultos Integrada com Qualificação Social e Profissional para Agricultores (as) Familiares. Brasília. MEC, Out. 2005.
- MEC. Programa de integração da educação profissional ao ensino médio na modalidade de educação de jovens e adultos. PROEJA.2006
- Nascimento, M. B. ; Silva, P. D. (2010) - Apostila de Noções de Geologia para o Proeja – FIC. Instituto Federal do Espírito Santo (IFES). Brasil, 89p.
- Silva, P. D., Nascimento, M. B., Wandermurem, C. E. R. (2010) - O conhecimento geológico como uma das ferramentas construtoras das competências e habilidades necessárias a formação do cidadão e sua consciência ambiental. Artigo completo publicado nos Anais do II Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves – RS, 8p.
- Sousa, C. C. C. (2009) - Educação de Jovens e Adultos e qualificação profissional para alunos trabalhadores da indústria de mineração. Dissertação *Lato Sensu*. Instituto Federal de Educação Tecnológica de Goiás & Universidade de Goiás, Goiânia, 59p.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Os Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS/HDR) – um desafio para o século XXI

Luís Neves¹; Alcides Pereira¹; José Matos Dias¹

¹IMAR, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Portugal

Palavras-chave: Geotermia, EGS, HDR, Portugal

Resumo

A Geotermia constitui uma fonte renovável de energia, não carecendo da intermitência de outras alternativas aos combustíveis fósseis, como a energia solar, eólica ou hídrica. É utilizada desde há um século para produção de electricidade em contextos geológicos favoráveis, inseridos em regiões de vulcanismo activo e muito elevado fluxo térmico, como é o caso dos Açores. Apresenta igualmente campos de aplicação em franco desenvolvimento no domínio da climatização, individual ou colectiva. Desenvolvimentos tecnológicos recentes tornaram viável, através dos Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS/HDR), a recuperação do calor interno da Terra em regiões não vulcânicas, através da constituição de reservatórios geotérmicos a 4-5 km de profundidade, sendo requisito para o efeito a ocorrência de temperaturas mínimas de 200°C às profundidades referidas. Não obstante o território nacional apresentar indicadores favoráveis à implementação deste tipo de tecnologia, as grandes lacunas ainda existentes no conhecimento geológico do subsolo tornam mais oneroso e arriscado para as empresas o investimento nesta tecnologia emergente comparativamente a outros países estrangeiros.

Keywords: Geothermal energy, EGS, HDR, Portugal

Abstract

The internal heat of the Earth is a renewable source of energy not affected by the intermittency of other alternatives to fossil fuels like solar, eolic and hydroelectric power. It has been used to produce electricity in the last one hundred years, typically in areas of very high heat flow with active volcanism, like the Azores. Heat pumps for domestic climatization and direct district heating are also fast growing areas of application of geothermal energy. Recent technological developments allowed to extend electricity production to areas without active volcanism, where minimum temperatures of 200°C can be achieved at a depth of 4-5 km, through Engineered Geothermal Systems (formerly HDR – Hot Dry Rock). Portugal presents some favourable geological indications to this type of technology, however important gaps in the knowledge of the deep structure of the crust presents and increased economic risk for companies interested to invest.

Introdução

O desenvolvimento mundial sustentado da produção de energia eléctrica a partir de diversas fontes renováveis é uma resultante do aumento vertiginoso do custo dos combustíveis fósseis (temporariamente interrompido pela crise económica mundial iniciada em 2008), de uma forte pressão ambiental decorrente da libertação de gases com efeito de estufa e do previsível esgotamento, a médio prazo, destes recursos geológicos não renováveis. Segundo dados da Agência Internacional de Energia prevê-se que, até 2030, o crescimento da procura de energia eléctrica cresça 120% no sector residencial, 100% nos serviços e 85% na indústria. O consumo mundial total de energia eléctrica será de 1436 MTep em 2010 (17% de toda a energia consumida) e de 2263 MTep em 2030 (20% de toda a energia consumida). A previsível electricificação do parque automóvel mundial, ainda em fase embrionária, poderá contribuir para um crescimento mais acelerado do consumo mundial de energia eléctrica.

Actualmente, a produção de energia eléctrica está geralmente associada às grandes centrais de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), centrais hídricas e nucleares. No que se refere à utilização mundial de recursos renováveis a liderança vai para os recursos hídricos (90%). No entanto a Agência Internacional de Energia prevê que, em 2030, se verifique uma descida nesta última componente para 70%. Esta diminuição resultará do aumento percentual da obtenção de energia eléctrica a partir de outras fontes renováveis (a biomassa de 7% para 10%, a eólica de 2% para 15%, a geotermia de 2% para 3%, a fotovoltaica de menos de 1% para 2% e a energia dos oceanos de inexpressiva para *ca.* 1%).

Visando a redução da dependência dos combustíveis fósseis, a Comissão Europeia delineou um plano estratégico até 2010, e nesse plano perspectivou que as fontes de energia renovável duplicassem o seu contributo de 6 para 12% do consumo energético total, visando uma redução de 15% das emissões dos gases com efeito de estufa relativamente a 1990. Em 2010, a Comissão Europeia adoptou um novo plano estratégico, perspectivando, agora, até 2020, o desenvolvimento de: a) novas tecnologias para redes inteligentes e armazenamento de energia; b) uma investigação na segunda geração de biocombustíveis; c) parcerias para cidades inteligentes, visando a redução de consumos em áreas urbanas. Os objectivos quantificados são os de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 20%, incrementar a quota das energias renováveis para 20% e alcançar 20% de melhorias de eficiência no uso da energia.

A Geotermia – conceitos gerais

Geotermia é a designação usada para as ciências e técnicas que estudam e exploram o calor da Terra. As tecnologias geotérmicas que pretendem explorar o calor da terra têm um largo campo de desenvolvimento, atendendo a que 99% da massa do planeta se encontra a uma temperatura superior a 1000°C e apenas uma ínfima proporção se situa abaixo de 100°C.

São diversas as aplicações da geotermia, que, por convenção, se dividem entre as de alta e de baixa entalpia. A geotermia de alta entalpia implica a existência de fluidos a temperatura elevada, geralmente superior a 150°C, e propicia a produção de energia eléctrica; não obstante, o desenvolvimento tecnológico das centrais binárias já permite a produção de energia eléctrica a temperaturas inferiores a 150°C, ainda que com eficiência reduzida. A geotermia de baixa entalpia é orientada para a climatização, podendo distinguir-se como variante os aproveitamentos directos do calor e a utilização do subsolo como meio de permuta térmica (bombas de calor geotérmicas).

Nos últimos anos, o segmento das bombas de calor geotérmicas tem apresentado um notável crescimento, na climatização de edifícios. Neste tipo de aproveitamento tira-se partido da estabilidade térmica do subsolo pois a partir de 1-2 metros de profundidade (e até algumas dezenas de metros) a temperatura permanece relativamente estável durante todo o ano, não sofrendo as fortes amplitudes térmicas sazonais que afectam a atmosfera. Este facto permite realizar, com vantagem, no Verão, a extracção de calor do interior das habitações e sua dissipação no subsolo, e no Inverno a captura de calor a partir do subsolo e a sua introdução nas habitações. A eficiência do processo é muito superior relativamente aos sistemas convencionais de ar condicionado, dada a estabilidade térmica do meio permutador que permite uma significativa redução da factura energética para o mesmo nível de conforto. Esta técnica implica a colocação de tubagens no subsolo, dispostas na horizontal, caso exista espaço suficiente em torno do edifício ou, quando tal espaço seja inexistente, na vertical, através de vários furos com profundidade de algumas dezenas de metros. No interior das tubagens circula um fluido que concretiza a permuta térmica com o subsolo. O comprimento total das tubagens de permutação deve ser dimensionado de acordo com o rendimento obtido, rendimento que depende das características geológicas do terreno e da potência pretendida. Os rendimentos médios rondam os 50 W por metro, podendo ascender a 70-80 W em condições geológicas favoráveis. A distribuição do calor/frio deverá ser realizada através de pisos/paredes radiantes, o que implica a colocação do sistema de raíz na fase de construção dos edifícios, ou por ocasião de

profundas remodelações. Nestas condições, o custo do kWh no ciclo de vida é inferior ao apresentado pela generalidade das soluções existentes baseadas em combustíveis fósseis (gás, diesel) ou em soluções puramente eléctricas. A utilização mundial das bombas de calor geotérmicas sextuplicou na última década, prosseguindo em acelerado crescimento. Um caso exemplar de aplicação é o terminal E do aeroporto de Zurique, com 2100 MWh anuais de aquecimento assegurados a partir de 300 furos com 30 metros cada. Globalmente, para uma potência instalada de 1,5 GWt na Europa, produzem-se anualmente 2,8 TWh.

A geotermia de baixa entalpia é aplicada essencialmente em utilizações directas do calor para aquecimento pela extracção de fluidos quentes existentes em profundidade, em contacto com as rochas (a algumas dezenas de °C) - o primeiro aproveitamento na escala residencial foi realizado em 1892 em Boise (Idaho, EUA). Na Europa, para uma potência instalada de cerca de 6 GWt, obtém-se uma produção anual da ordem de 22 TWh. Tirando partido das condições naturais, a Islândia é o país mais avançado neste tipo de utilizações, sendo a capital, Reikjavik, integralmente aquecida a partir de fontes geotérmicas, bem como diversas outras cidades. A potência instalada a nível mundial é estimada em 28 GW. Em Portugal Continental existem apenas alguns aproveitamentos de baixa entalpia associados a balneoterapia, com maior expressão em S. Pedro do Sul e Chaves (Lourenço & Cruz, 2005; Gomes, 2007). Pelos custos de instalação envolvidos, trata-se de uma tecnologia tipicamente usada em bairros ou cidades, o que permite a partilha do investimento na infraestrutura. Do ponto de vista económico é altamente rentável, sendo particularmente adequada aos países frios, onde o aquecimento representa a quase totalidade dos requisitos de climatização. O aproveitamento da geotermia de baixa entalpia depende, da existência de condições geológicas que favoreçam a presença de fluidos quentes próximos da superfície topográfica, e da capacidade de gestão dos aproveitamentos que deve assegurar que a extração do fluido geotérmico não seja superior à recarga natural, evitando assim a rápida exaustão do recurso.

A geotermia de alta entalpia, visando a produção de energia eléctrica, teve início em Larderello (Itália), em 1911. Requer a existência combinada de três factores geológicos: a) a existência de um gradiente geotérmico invulgarmente elevado; b) a existência de fluidos subterrâneos em contacto com a rocha quente; c) a existência de permeabilidade que permita a percolação dos fluidos e o inerente contacto com um significativo volume de rocha quente. Em geral, os requisitos referidos apenas são encontrados em locais específicos de algumas regiões particulares do globo,

fundamentalmente na proximidade dos bordos de placas tectónicas onde existe vulcanismo activo. A raridade da conjugação de tais factores e a limitação geográfica da sua ocorrência leva a que, não obstante a elevada competitividade da energia eléctrica produzida, a expressão mundial seja pouco significativa (ca. 10 GW em 2010). Os principais países produtores são os EUA (3,1 GW), as Filipinas (1,9 GW), a Indonésia (1,2 GW), o México (1,0 GW), a Itália (0,8 GW), a Nova Zelândia (0,6 GW) a Islândia (0,6 GW) e o Japão (0,5 GW). Em Portugal, as condições geológicas adequadas a este tipo de aproveitamento são atingidas nos Açores - onde na ilha de S. Miguel são, nesta base, supridas ca. 40% das necessidades de energia eléctrica. A potência instalada é de 23 MW, existindo planos de expansão para a ilha Terceira.

A produção de energia eléctrica é assegurada por centrais de vapor seco, quando o fluido geotérmico recolhido é constituído por vapor. O vapor é introduzido directamente numa turbina que, subsequentemente, acciona um gerador. Quando o fluido geotérmico se encontra no estado líquido (como resultado da elevada pressão no reservatório), são utilizadas centrais do tipo *flash*. Neste caso, o fluido é recolhido sob pressão e injectado num compartimento hermético, onde se realiza a sua despressurização, o que induz a ebulição da água e a libertação súbita (*flash*) de vapor que, por sua vez, acciona uma turbina. A água residual pode ser reinjectada no reservatório geotérmico por forma a prolongar o seu tempo de vida. A reinjecção de fluidos tem sido realizada com sucesso, sendo paradigmático o caso do campo geotérmico The Geysers, nos EUA, que tem recebido a água residual processada nos sistemas de tratamento da cidade de Santa Rosa. Um terceiro tipo de centrais de produção de energia eléctrica são as centrais binárias, em franco desenvolvimento nos anos mais recentes. Neste caso, o fluido geotérmico não é directamente utilizado na central, sendo utilizados permutadores para transferir o seu calor para um fluido secundário com baixo ponto de ebulição (isobutano, isopentano ou similares) que vaporiza e acciona a turbina. As centrais binárias permitem produzir energia eléctrica a partir de fluidos a temperaturas muito inferiores às necessárias em centrais de vapor seco ou do tipo *flash*, existindo centrais comerciais a operar a 120°C. Alguns desenvolvimentos recentes sugerem que, a curto prazo, será possível operar com fluidos a temperaturas da ordem dos 70-80°C. As centrais do tipo binário têm ainda a vantagem de não emitir gases para a atmosfera, uma vez que o fluido geotérmico opera em circuito fechado. Em geral, a profundidade de operação dos sistemas geotérmicos convencionais para produção de energia eléctrica não excede os 2 km.

O Conceito EGS/HDR

O conceito de “Hot Dry Rock” surgiu no final dos anos 70 como resposta às primeiras crises petrolíferas, tendo em vista alargar significativamente as áreas geográficas do globo susceptíveis de poderem produzir energia eléctrica a partir de fontes geotérmicas. Após alguns anos de investigação nos anos 80 e 90, onde foram desenvolvidos diversos projectos experimentais (Fenton Hill, Coso, Desert Peak, Glass Mountain e The Geysers/Clear Lake, nos EUA; Rosemanowes, na Inglaterra; Soultz-sous-Forêt e Le Mayet de Montagne, em França; Hijiori e Ogachi, no Japão; Falkenberg, Horstberg, e Bad Urach, na Alemanha; Basel e Geneve, na Suíça; e Fjallbacka, na Suécia (MIT (2006))). Este conceito viria a ser esquecido em consequência da era de petróleo barato que então se iniciou. Em Portugal, foram realizados alguns estudos académicos de que é exemplo o de Godinho *et al.* (2001). Inevitavelmente, este conceito iria ressurgir no início do presente século, uma vez mais como em reacção às flutuações do preço do petróleo, desta vez sob a designação de EGS - “Engineered ou “Enhanced Geothermal Systems”. O conceito é relativamente simples, consistindo no aproveitamento do calor produzido no interior da Terra por rochas localizadas a profundidades de 4 a 6 km abaixo da superfície, em zonas de gradiente geotérmico apenas, marginalmente, superior ao normal. Atendendo à escassa probabilidade de existência de fluidos em quantidades significativas a tais profundidades e à reduzida permeabilidade expectável, a criação de um reservatório geotérmico passa pela estimulação hidráulica das rochas, induzindo a sua fissuração e subsequente injeção de fluidos a partir da superfície. Desta forma, dos três requisitos naturais determinantes para a criação de um reservatório geotérmico, dois são em alternativa assegurados por técnicas de engenharia, sendo apenas necessário que exista rocha quente com a temperatura adequada ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$), o que justifica a designação de EGS. O reservatório geotérmico deverá ter um volume significativo, da ordem de 1 km^3 ou mais, por forma a que o processo de extracção do calor possa persistir durante 20 a 30 anos sem decréscimo exagerado da temperatura da rocha. Este é o tempo suficiente para rentabilizar economicamente o projecto.

Os notáveis progressos da indústria petrolífera alcançados nos últimos anos relativamente à perfuração profunda e ao desenvolvimento de técnicas de estimulação hidráulica, contribuíram de forma notória para o ressurgimento do ideal EGS que teve a prova de conceito, no ano de 2008, no projecto experimental da UE localizado em Soultz-sous-Forêt (França), com o início da produção de energia eléctrica numa central piloto de 1,5 MW (actualmente em fase de expansão para 6 MW). O reservatório

geotérmico situa-se a 5 km de profundidade, a temperatura de *ca.* 200°C (Figura 1), desenvolvendo-se em rocha granítica. O reservatório é alimentado por um furo de injeção (GPK3), com débito de 100 kg/s, sendo a água recolhida após percolar a rocha através de dois furos de recuperação (GPK2 e GPK4), que distam 600 metros cada do furo do injeção. A água é conduzida para uma central binária à superfície, onde chega a *ca.* 180°C, e após permutação do calor novamente reinjectada no reservatório.

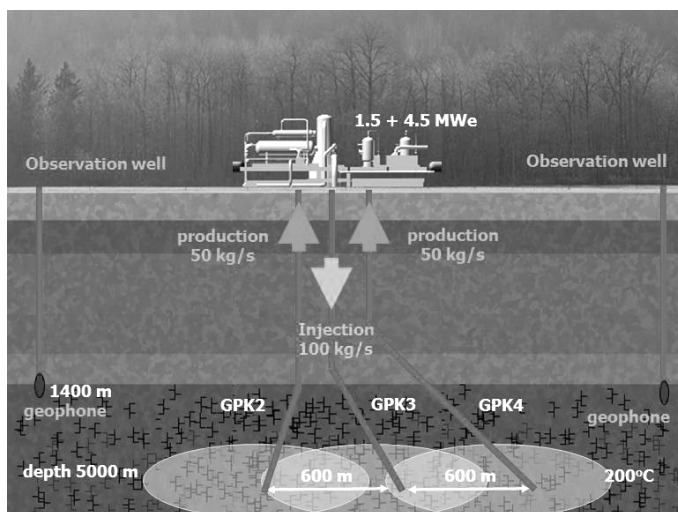


Figura 1. Diagrama ilustrativo do projecto experimental de Soultz-sous-Forêt (reproduzido de www.soultz.net).

O conceito EGS tem mobilizado, recentemente, um grande número de projectos em todo o mundo, boa parte dos quais com capitais privados. Só na Austrália, até Março de 2007, foram solicitadas mais de 100 licenças de áreas de prospecção e pesquisa para HDR, com área total de mais de 62000 Km². Nesses projectos estão envolvidas 16 empresas, a maioria cotadas em bolsa. O projecto Habanero, da empresa Geodynamics, localizado na região de Cooper Basin, no ano de 2008 concluiu, com sucesso, a fase de estimulação hidráulica e conexão entre os furos, preparando-se no final de 2009 para o início da produção experimental de energia; contudo, o colapso de um dos furos levou ao refazer dos trabalhos, esperando-se que ocorra a reactivação do projecto ainda em 2010. O objectivo da Geodynamics é o de ter uma potência de 500 MW instalada neste local até 2020, tirando partido de uma situação geológica muito favorável. Existem dezenas de projectos

em diferentes etapas de desenvolvimento e em diferentes zonas desde a Austrália, Suíça, Estados Unidos, ou Alemanha e Espanha, entre outras.

O calor utilizado pela geotermia HDR/EGS resulta de dois componentes aditivos. Um deles corresponde à dissipação térmica, por condução, do calor armazenado no planeta (fluxo térmico basal). O outro decorre do calor gerado nas próprias rochas através do decaimento dos isótopos radiogénicos de potássio, tório e urânio, bem como dos gerados nas suas cadeias de decaimento. É de salientar que o decaimento radioactivo nas rochas do planeta Terra gera o equivalente a 30 TW de potência energética, o que ultrapassa largamente o consumo mundial. A energia geotérmica pode, por conseguinte, ser considerada uma energia renovável.

A geotermia convencional é normalmente desenvolvida em regiões com vulcanismo activo, onde o fluxo térmico basal é localmente muito elevado. No que respeita à tecnologia EGS, continua a ser relevante a implementação de projectos em locais onde o gradiente geotérmico seja um pouco superior à média crustal de 25-30°C, uma vez que cada projecto exige vários furos profundos e os custos de execução crescem de forma não linear com a profundidade. A existência de um gradiente geotérmico local ou regional acrescido pode resultar de diversos factores geológicos como sejam: a existência de actividade magmática relativamente recente em termos geológicos; a presença de volumes significativos de rochas ricas em elementos radiogénicos, e como tal possuindo elevadas produções de calor interno. Os aspectos tectónicos são também relevantes: designadamente, a existência de grabens preenchidos com alguns quilómetros de sedimentos sobrepostos a rochas graníticas constitui um dos cenários geológicos mais favoráveis, uma vez que os sedimentos actuam como um “cobertor” que isola em parte o fluxo térmico proveniente dos granitos os quais se encontram tipicamente enriquecidos em elementos radiogénicos e, como tal, produzem níveis acrescidos de calor. Uma discussão mais detalhada sobre este assunto pode ser encontrada em Genter *et al.* (2003); Pereira e Neves (2011).

Note-se, para concluir, que um quilómetro cúbico de granito com temperatura de 250°C armazena energia correspondente a 40 milhões de barris de petróleo se a extracção for efectuada através de um fluido à temperatura de 150°C. É de salientar que um quilómetro cúbico de granito (com uma massa de aproximadamente 2 500 milhões de toneladas) necessita de menos de 100 000 toneladas de circulação de água para extrair o seu calor. Apenas é necessário expor 1/25 000 partes da massa do granito à circulação da água para que tal aconteça.

Vantagens competitivas da geotermia EGS/HDR

A geotermia é a única fonte conhecida de energia renovável com capacidade para produzir electricidade de forma praticamente contínua. A taxa de disponibilidade verificada nas centrais geotérmicas é superior a 90%, chegando a superar a das centrais baseadas em combustíveis fósseis e é 4 a 5 vezes superior à alcançada por fontes como a eólica e a solar. É, por conseguinte, a única fonte de energia alternativa que pode, potencialmente, substituir os combustíveis fósseis e a energia nuclear na produção da energia de base que tem de ser constantemente assegurada na rede eléctrica. Para além desta característica relevante, ao contrário das outras fontes de energia, convencionais ou alternativas, cuja disponibilidade é limitada por diversos factores intrínsecos, na geotermia o recurso (calor interno da Terra) é ilimitado e o seu aproveitamento apenas se encontra dependente do engenho humano. Na vertente ambiental, a geotermia assegura a produção de energia eléctrica mais limpa, sem emissão de gases com efeito de estufa ou outro tipo de poluentes, não gerando igualmente resíduos perigosos.

Num exaustivo estudo intitulado “*The future of Geothermal Energy*” elaborado em 2006 pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), por solicitação do Governo dos Estados Unidos da América, é afirmado: “*Geothermal energy from EGS represents a large, indigenous resource that can provide base-load electric power and heat at a level that can have a major impact on the United States, while incurring minimal environmental impacts. With a reasonable investment in R&D, EGS could provide 100 GWe or more of cost-competitive generating capacity in the next 50 years. Further, EGS provides a secure source of power for the long term that would help protect America against economic instabilities resulting from fuel price fluctuations or supply disruptions. Most of the key technical requirements to make EGS work economically over a wide area of the country are in effect, with remaining goals easily within reach.*” As conclusões do relatório, ainda que respeitantes aos EUA, podem ser estendidas à maior parte das regiões do globo.

Do ponto de vista económico, as centrais geotérmicas convencionais apresentam custos de produção por kWh próximos dos obtidos com base em combustíveis fósseis. No que se refere ao EGS/HDR, na presente fase em que a tecnologia se pode ainda considerar imatura, é de prever que os custos sejam significativamente mais elevados, com tendência, contudo, para descerem com o aumento do número de projectos bem sucedidos e a subsequente aprendizagem tecnológica. Adoptar uma nova ideia, mesmo quando apresenta vantagens que parecem óbvias, é uma tarefa difícil e

requer normalmente um período longo desde a prova do conceito até à sua aceitação generalizada.

Por este facto, diversos países estão a apoiar activamente este tipo de energia, através da atribuição de preços mais favoráveis de compra da energia produzida, geralmente situados entre os atribuídos à energia eólica e à energia solar. A transformação de energia geotérmica em electricidade é uma indústria de capital intensivo e muito dependente de alta tecnologia. O investimento de capital pode ser dividido em três fases distintas: a) selecção de áreas com potencialidades; b) sondagens para produção; c) construção de estações de produção de electricidade. De acordo com um estudo de viabilidade económica efectuado pelo MIT, integrado no trabalho já referenciado (MIT, 2006), os custos de produção previstos situam-se entre 6 e 11 cêntimos USD por kWh (Figura 2) quando a tecnologia atingir a sua maturidade. O cenário base foi elaborado para uma instalação de 3 furos de produção para um de injeção separados por distâncias de 500 metros, para um débito de geofluido de 80Kg/s por furo de produção, uma temperatura no fundo do furo de 400° C e uma taxa de diminuição da temperatura de 3% ao ano. Os parâmetros financeiros utilizados no modelo para o cenário base foram um rácio de dívida relativamente ao capital de 60/40 e uma taxa de juro de 8%. A rendibilidade do investimento é de 17%.

Os custos de perfuração constituem um dos factores com maior peso no custo final da energia produzida, pelo que os desenvolvimentos tecnológicos neste domínio poderão potenciar grandemente o uso da geotermia. É também expectável que prossiga a evolução técnica das centrais binárias, permitindo produzir energia eléctrica a partir de fluidos com temperaturas mais reduzidas e melhorando a eficiência da extracção.

O número de países produtores de energia geotérmica bem como a capacidade instalada aumentaram significativamente desde o início da década, passando de 21 com 8,7 GW, actualmente, para 46 com 13,5 GW. A *International Geothermal Association* estima que em 2050, com o advento da tecnologia EGS, a produção mundial de energia eléctrica de fontes geotérmicas possa vir a ascender a 150 GW.

Um aspecto a acautelar no desenvolvimento de projectos EGS prende-se com o risco da indução de sismicidade na fase de estimulação hidráulica e de exploração, o que reforça a necessidade da realização de estudos geológicos rigorosos.

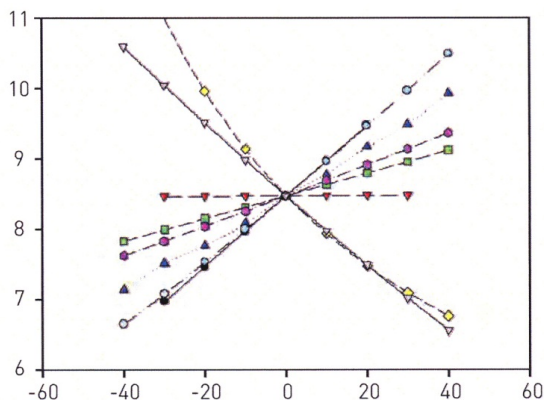


Figura 2. Efeito da variação de diversos factores face ao cenário base (em abcissas, %) sobre o custo final da energia eléctrica produzida (em ordenadas, cêntimos de USD). Os factores considerados são, na metade esquerda do gráfico e de cima para baixo, os seguintes: débito do fluido geotérmico; rácio dívida/capital (%); custo da estimulação hidráulica; custo da central de produção de energia; taxa de juro; taxa de redução da temperatura do reservatório; rendibilidade do capital (%); custos da perfuração e de instalação dos sistemas.

A nível europeu, alguns dos contextos mais favoráveis à implementação deste tipo de projectos caracterizam-se pela sua inserção em áreas tectonicamente activas, o que potencia este risco. O projecto de Basileia, na Suíça, exemplifica o risco referido, dado que a indução de dois sismos de pequena intensidade (3.4 e 3.1 na escala de Richter) em Dezembro de 2006 e Janeiro de 2007, sentidos pelas populações e causando estragos em alguns edifícios, levou à suspensão do projecto (Baisch *et al.*, 2010).

O caso do território nacional

Em 2008 várias empresas apresentaram projectos de prospecção e pesquisa visando a produção de energia eléctrica a partir de fontes geotérmicas no território continental português: foi o caso da Martifer, da Kernow Resources & Development e da Geovita. O contexto geológico dos diversos projectos sugere que apenas o da empresa Geovita se enquadra no conceito EGS/HDR, correspondendo, os restantes, a uma tipologia mais próxima da geotermia convencional. O projecto da Geovita, com suporte científico do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, resultou de estudos de reavaliação do potencial geotérmico do Centro e Norte de Portugal realizados em 2007 (ver Pereira & Neves, 2011), e do subsequente pedido dirigido à Direcção Geral de Energia e Geologia em Abril de 2008

de atribuição de uma área de prospecção e pesquisa na região das Beiras. Esta área, com *ca.* 530 km², foi outorgada pela DGEG à Geovita em Dezembro de 2008, tendo em Janeiro de 2009 sido concedido um ponto de ligação à rede eléctrica nacional com potência de 3 MW. Em Agosto de 2009 foi atribuído um preço garantido de venda da energia eléctrica de 0,27 € por kWh, que é dos mais elevados da Europa. O projecto previa o investimento de 1 M€ no prazo de 3+2 anos, na fase de prospecção e pesquisa; contudo, as dificuldades decorrentes da crise económica iniciada em 2008 levaram ao adiamento dos trabalhos, procurando a Geovita encontrar parcerias que permitam viabilizar a sua concretização. Estimativas realizadas com base em informação disponível e seguindo o mesmo procedimento do MIT (2006) para o território dos EUA, sugerem que, na área concessionada para efeitos de prospecção e pesquisa, entre os 3 e os 10 km de profundidade, possa existir 2295 EJ enquanto recurso energético, o que compara com o consumo anual de 0,18 EJ do país em 2005. A recuperação de 2% do recurso disponível corresponderia a mais de 250 vezes tal consumo.

Considerações finais

Portugal vem concretizando um significativo investimento em energias renováveis, com forte aposta na energia eólica, hídrica e, em menor grau, na energia solar – as razões para este facto são do conhecimento geral, incluindo motivações de carácter ambiental e de redução da dependência externa.

As energias renováveis referidas apresentam, infelizmente, limitações intrínsecas que as condenam a constituírem uma solução orientada para a minimização do consumo de combustíveis fósseis, e não para a sua completa substituição. Tal situação resulta da intermitência da produção energética baseada no sol, no vento e na chuva, o que obriga à existência de soluções de recurso inevitavelmente baseadas em fontes não renováveis.

A geotermia, pelo carácter inesgotável do calor da Terra e permanente disponibilidade do recurso, apresenta um enorme potencial de desenvolvimento futuro, no domínio da climatização de edifícios e no da produção de energia eléctrica. De entre o conjunto das fontes renováveis, é a única energia alternativa que permite assegurar o nível de produção base necessário às redes eléctricas, dada a sua taxa de disponibilidade superior a 90%, constituindo, nesta perspectiva, o único substituto conhecido aos combustíveis fósseis e à energia nuclear. As limitações actuais na utilização da energia geotérmica, resultantes da heterogeneidade da distribuição

geográfica das fontes de calor ao nível do planeta, são susceptíveis de ser ultrapassadas com o advento da maturidade tecnológica dos inovadores sistemas geotérmicos estimulados (EGS/HDR). Contudo, na fase actual, os problemas de financiamento decorrentes da crise económica mundial iniciada em 2008 constituem um entrave significativo ao desenvolvimento de projectos EGS, em particular na Europa, por serem projectos de capital intensivo, o qual não se encontra disponível ou tem um custo muito elevado para investimentos de risco. Tal não impede que prossigam algumas evoluções tecnológicas, sendo notórios os progressos alcançados nos últimos anos designadamente no domínio da melhoria do rendimento das centrais binárias. Algumas tecnologias promissoras, de que é exemplo a utilização de lasers na perfuração, têm potencial para produzir súbitos e relevantes acréscimos de competitividade económica aos projectos EGS.

No que respeita ao território continental português, o desenvolvimento de projectos EGS enfrenta ainda, para além das dificuldades referidas, algumas outras de carácter nacional resultantes da quantidade e, por vezes, da qualidade do conhecimento da base de recursos geotérmicos. Encontram-se bem estabelecidos os procedimentos a seguir na fase de prospecção e pesquisa de recursos geotérmicos, que são do domínio público e devidamente regulados no âmbito dos Decretos-Lei 87/90 e 90/90 de 16 de Março, competindo à Direcção Geral de Energia e Geologia a qualificação de um fluido ou de uma formação geológica como recurso geotérmico. Contudo, as empresas interessadas em investir neste domínio enfrentam uma desvantagem competitiva face a outros países europeus, resultante da falta de conhecimento geológico de superfície e, em particular, da estruturação crustal profunda, sendo igualmente muito escassa a informação existente sobre fluxos térmicos. Por conseguinte, nos estádios iniciais de desenvolvimento de uma nova tecnologia será preferível em termos de custo-eficácia investir em R&D em fase preliminar à dos projetos de produção.

Agradecimentos: Os autores dedicam o presente trabalho ao Professor Manuel Maria Godinho, o qual foi pioneiro na avaliação do potencial das rochas granitóides portuguesas para a geotermia HDR.

Bibliografia

Baisch, S., Martin, C., Serianex Group (2010) - Seismic risk analysis of the Basel geothermal (EGS) project. Proceedings of the 32th General Assembly of the European Seismological Commission, p. 63.

- Genter, A., Guillou-Frottier, L., Feybesse, J.-L., Nicol, N., Dezayes, C., Schwartz, S. (2003) - Typology of potential Hot Fractured Rock resources in Europe. *Geothermics*; 32, 701-710.
- Godinho, M.M., Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F. (1991) - Potencial térmico das rochas graníticas num segmento do Maciço Hespérico (Portugal Central). *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*; 112, 469-483.
- Gomes, L.M.F (2007) - Aproveitamento em cascata em São Pedro do Sul. *Boletim de Minas*; 42 (1), 5-17.
- Lourenço, C., Cruz, J. (2005) - Aproveitamentos geotérmicos em Portugal Continental. XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros, 1-9.
- MIT (2006) – The future of geothermal energy.
http://www1.eere.energy.gov/geothermal/future_geothermal.html.
- Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F. (2011) - Potencial EGS/HDR da região Centro e Norte de Portugal. “Modelação de Sistemas Geológicos”, livro de Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho, neste volume.
- Rogers, E. M. (2003) - *Diffusion of innovations*. New York, Free Press.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Representações pictóricas nos manuais de ensino de Ciências Naturais (7º ano) e de Geologia (10º ano)

Rita Parreiral¹; Luís Gama Pereira²; Celeste Gomes³

¹Centro de Geofísica, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL
ritacruz08@gmail.com

²Centro de Geofísica, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL
gpereira@dct.uc.pt

³Centro de Geofísica, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL
romualdo@dct.uc.pt

Palavras-chave: Representações pictóricas, Manuais escolares, Ensino da Geologia

Resumo

Neste estudo apresentam-se algumas reflexões sobre a forma como as representações pictóricas (fotografias, desenhos, esquemas, gráficos e mapas) são incluídas nos manuais Ciências Naturais (7º ano) e de Geologia (10º ano). A análise dos dados permitiu concluir que os manuais do ensino básico valorizam diferentes representações pictóricas enquanto nos manuais do ensino secundário não existem informações explícitas sobre a importância didáctica da utilização da imagem. Relativamente à predominância das diversas representações pictóricas, no âmbito dos subtemas analisados, a fotografia destaca-se em relação às restantes categorias, optando os autores dos manuais dos dois ciclos pela utilização de fotografias de exemplos da Geologia de Portugal, em detrimento dos exemplos internacionais.

Key-word: *Illustrations, Textbooks, Geology education*

Abstract

In this study we reflect upon how the illustrations (photographs, drawings, diagrams, graphs and maps) are presented in Natural Sciences and Geology textbooks in elementary and secondary education. Data analysis showed that elementary textbooks value different pictorial representations, while in secondary school textbooks there is no explicit information about the pedagogical relevance in using images. Analysing the predominance of various pictorial representations, under the sub-themes discussed, we conclude that the photographs stands out compared to other categories, having the textbook authors in both teaching cycles opted for photographs of Portuguese Geology instead of international ones.

Introdução

O termo representação define-se, no sentido mais lato, como o conjunto de símbolos ou sinais utilizados nos vários processos de comunicação. As representações podem ser divididas em internas (representações mentais) e externas. As internas resultam da complexidade da estrutura cognitiva dos indivíduos, sendo continuamente construídas e influenciadas/modificadas pelas representações externas que lhes são apresentadas, por exemplo, nos processos de ensino. As externas poderão, por sua vez, dividir-se em representações pictóricas e linguísticas. As representações linguísticas dizem respeito aos processos de linguagem oral e escrita, enquanto as pictóricas incluem as diversas categorias de imagens, como fotografias, desenhos, esquemas, gráficos e mapas (Otero, 2002; Otero *et al.*, 2003). As representações pictóricas distinguem-se, essencialmente, pela relação analógica que estabelecem com os conteúdos ou realidades que pretendem reproduzir. Neste sentido, é possível destacar, dentro das diversas categorias de imagens, as fotografias e os desenhos como as formas pictóricas com carga analógica maior, uma vez que, sobretudo no caso da fotografia, este tipo de representação possui um estreito paralelismo com o objecto ou objectos que pretende reproduzir (Flusser, 1985). Por outro lado, os mapas, os esquemas e os gráficos apresentam, comparativamente com as fotografias e os desenhos, um grau de abstracção maior, bem como uma especificidade menor, relativamente aos objectos ou processos que pretendem representar.

O manual escolar constitui um recurso importante: *“Since earliest times, the school textbook has accompanied and guided teachers and pupils. (...) The development in recent decades of audiovisual aids has only in exceptional cases challenged the textbook as the didactic instrument par excellence (...)”* (Hummel, 1985). Assim, deve ser dada uma atenção particular à forma como o manual é entregue aos seus utilizadores. Neste estudo, foram analisadas as representações pictóricas em manuais, dando continuidade a estudos anteriores onde se concluiu que em manuais de Ciências Naturais do 7º ano e de Geologia do 10º ano como, por exemplo, *“(...) de uma forma geral, o conteúdo verbal não comunica, efectivamente, com a representação pictórica que o acompanha. Na maioria dos casos analisados, o corpo do texto apenas se limita a fazer referência à imagem, não alertando o utilizador para a importância da sua leitura e interpretação (66,2% dos casos nos manuais do 7º ano e 55,7% dos casos nos manuais do 10º ano)”* e *“(...) as representações pictóricas figuram, muitas vezes, nos manuais estudados, como meros elementos decorativos que, não obstante a sua importância ao nível da motivação dos alunos, poderão, por si só, não apresentar grande impacto ao nível da*

aprendizagem dos conteúdos científicos.)” (Gomes e Parreiral, em preparação).

A análise das orientações curriculares do ensino básico (Galvão *et al.*, 2001) e do programa curricular do secundário (Silva *et al.*, 2001), bem como dos respectivos manuais (7º e 10º anos), permitiu constatar que as representações pictóricas abundam nos manuais de ensino da Geologia (sobretudo nos do ensino básico), o que reduz, obrigatoriamente, o espaço ocupado pelas representações externas linguísticas (texto escrito) na apresentação dos conteúdos geológicos. Observou-se, ainda, que as imagens, em especial na categoria de fotografia, figuram como fundo de muitas páginas, adquirindo uma importância bastante expressiva, principalmente nos manuais do 7º ano.

Com base nesta primeira análise, foi efectuado um estudo comparativo e qualitativo da forma como as diversas representações pictóricas são contempladas pelos manuais de Ciências Naturais (7º ano) e de Geologia (10º ano). No caso particular da fotografia, foi avaliado se os registos de exemplos da Geologia de Portugal são, comparativamente com os internacionais, devidamente valorizados pelos autores dos manuais, bem como constatar a existência de exemplos não referenciados geograficamente. Neste sentido, foram formuladas 3 questões de investigação:

– Nos manuais seleccionados, de Ciências Naturais (7º ano) e de Geologia (10º ano), predomina alguma das formas de representação pictórica (fotografia, desenhos, esquemas, gráficos e mapas)?

– Nos manuais, a utilização de modelos pictóricos (categoria de fotografia) de exemplos da Geologia de Portugal é valorizada em detrimento dos modelos da Geologia internacional?

– Nos manuais, os modelos pictóricos (categoria de fotografia) da Geologia de Portugal e internacional são devidamente referenciados, em termos geográficos?

Uma análise prévia, para a selecção dos conteúdos científicos mais adequados à natureza deste estudo, culminou com a escolha dos subtemas “*Ocorrência de Dobras e Falhas*” e “*Paisagens Geológicas*” (Galvão *et al.*, 2001), para o 7º ano, e dos subtemas “*As Rochas, arquivos que relatam a história da Terra*” e “*A medida do tempo geológico e a idade da Terra*”, dentro do tema aglutinador “*A Geologia, os geólogos e os seus métodos*”, para o 10º ano (Silva *et al.*, 2001), pelo paralelismo que apresentam. A selecção destes conteúdos justifica-se pelo facto de nos parecerem mais propícios à utilização de representações pictóricas, tornando-se, ainda, possível abranger processos da geodinâmica interna e externa da Terra, que

se complementam na estrutura dos programas curriculares, das orientações curriculares e dos manuais do ensino básico e secundário.

Metodologia

Para uma análise mais criteriosa, foram utilizados os programas curriculares vigentes, do ensino básico (orientações curriculares do 3º ciclo – Ciências Físicas e Naturais) e secundário (programa de Biologia e Geologia – 10º ano), tendo sido escolhidos, em consonância com os respectivos programas, 6 manuais do 7º ano de escolaridade, designados por A, B, C, D, E e F e 4 manuais do 10º ano, denominados por A, B, C e D. Dos 6 do 7º ano, 3 pertencem à edição de 2002 e os restantes à edição de 2006. Os 4 manuais do 10º ano pertencem à edição mais recente (2007) (Tabela 1). A selecção destes manuais baseou-se, essencialmente, na facilidade de acesso, abrangendo-se, no caso do ensino básico, edições diferentes (2002 e 2006), com o objectivo de, num estudo mais amplo, comparar as duas edições, relativamente aos aspectos considerados. Na realização deste estudo, utilizaram-se técnicas de análise de conteúdo (Bardin, 2009).

Tabela 1. Temas, subtemas e manuais de ensino analisados.

Nível de Ensino	Programa Curricular	Tema: Subtema	Ano	Manual (Edição)
Básico	Orientações Curriculares do 3º Ciclo. Ciências Físicas e Naturais (2001)	<i>Dinâmica interna da Terra: Ocorrência de dobras e falhas</i> <i>Dinâmica externa da Terra: Paisagens Geológicas</i>	7º	A, D, C (2006) B, E, F (2002)
Secundário	Programa de Biologia e Geologia 10º ano (2001)	<i>A geologia, os geólogos e os seus métodos:</i> <i>As rochas, arquivos que relatam a história da Terra</i> <i>A medida do tempo geológico e a idade da Terra</i>	10º	A, B, C, D (2007)

Desenvolvimento

A análise das representações externas pictóricas foi baseada na definição de categorias e subcategorias, consideradas fundamentais neste estudo (Tabela 2). As Competências foram definidas com base nos conteúdos seleccionados

descritos nos manuais, no início de cada subtema, e, de uma forma indirecta, nas actividades propostas (Tabelas 3 e 4).

Tabela 2. Categorias e subcategorias consideradas na análise dos manuais.

Categoria	Subcategoria
Competências	Competências a desenvolver com a realização das actividades propostas/experiências educativas
Tipologia das Representações pictóricas	Fotografias, desenhos, esquemas, gráficos e mapas
Referência geográfica das representações pictóricas	Fotografia nacionais e internacionais com ou sem referência geográfica

Tabela 3. Competências principais mencionadas nos manuais do 7º ano.

Manual	Subtema	Competência
	<i>Ocorrência de falhas e dobras</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar dobras e falhas nos afloramentos, aquando da realização de saídas de campo. 2. Construir modelos que simulem dobras e falhas. 3. Relacionar a ocorrência de dobras e falhas com a movimentação da litosfera. 4. Dar exemplos de rochas mais sujeitas à ocorrência de dobras e falhas.
Ensino Básico	<i>Paisagens geológicas</i>	<ol style="list-style-type: none"> 5. Compreender que a Terra é um sistema dotado de dinamismo interno e externo. 6. Observar e comparar paisagens naturais, mais ou menos sujeitas à intervenção do homem. 7. Observar a acção dos diferentes agentes na formação/alteração das paisagens geológicas. 8. Reconhecer o contributo dos agentes erosivos na formação das paisagens geológicas. 9. Observar/identificar/comparar diferentes paisagens geológicas. 10. Descrever aspectos característicos das diferentes paisagens geológicas. 11. Conhecer a distribuição geral das rochas no território nacional. 12. Relacionar as propriedades das rochas com o tipo de paisagem que originam, quando submetidas aos diferentes agentes. 13. Reconhecer a importância da utilização das rochas. 14. Reconhecer a importância da preservação do património geológico e construído. 15. Compreender as paisagens geológicas como testemunhos da dinâmica da Terra.

Tabela 4. Objectivos ou competências mencionados nos manuais do 10º ano.

Manual	Domínio	Objectivo/Competência
Ensino Secundário	Procedimental	1. <i>Planear e realizar pequenas investigações, teoricamente enquadradas.</i> 2. <i>Usar fontes bibliográficas de forma autónoma.</i>
	Atitudinal	3. <i>Desenvolver atitudes e valores inerentes ao trabalho individual e colectivo.</i> 4. <i>Analisar a importância da Geologia na resolução de problemas sobre o passado da Terra.</i>
	Conceptual	5. <i>Reconhecer a importância das rochas no fornecimento de informações sobre o passado da Terra.</i> 6. <i>Identificar diferentes tipos de rochas.</i> 7. <i>Explicar a noção de estrato e a sua importância em Geologia.</i> 8. <i>Distinguir idade relativa de idade absoluta.</i>
		Outro

A análise dos dados, relativa aos manuais do 7º ano, permite afirmar que, para a dinâmica interna e externa da Terra, os manuais analisados valorizam a utilização de representações externas pictóricas como forma dos alunos desenvolverem as competências enunciadas (Tabela 3). Relativamente à dinâmica interna da Terra (“*Ocorrência de Falhas e Dobras*”), poder-se-á considerar que o uso e a exploração de fotografias, desenhos e mapas torna-se fundamental na identificação, por parte dos alunos, de dobras e de falhas nos afloramentos (ponto 1, Tabela 3), caso não seja possível a deslocação ao terreno e a observação *in situ*. Alguns manuais analisados sugerem que os alunos e/ou professores “construam” novos modelos de dobras e falhas (ponto 2, Tabela 3), por recurso à fotografia, e não excluem possibilidades de articulação com outras disciplinas, por exemplo, o recurso à ilustração na disciplina de Educação Visual. Ao nível da dinâmica externa, a importância da utilização das representações pictóricas no desenvolvimento das competências (enumeradas nos 6 manuais do ensino básico analisados), torna-se ainda mais evidente, uma vez que, para observar, identificar, comparar e descrever diferentes paisagens geológicas (pontos 9 e 10, Tabela 3), é necessário utilizar uma série de registos fotográficos e/ou ilustrações que permitam reproduzir, de forma directa e evidente, os exemplos que se pretendem ilustrar, dado nem sempre ser possível a realização de aulas de campo. Para além disso, na

maioria das vezes, os três tipos de paisagens geológicas não fazem parte, em simultâneo, do contexto geológico em que se inserem as escolas. Por outro lado, para que os alunos possam conhecer a distribuição geral das rochas no nosso país (ponto 11, Tabela 3), não sendo possível o seu reconhecimento directo em todo o território nacional, apenas as representações como os mapas geológicos e os registos fotográficos e/ou ilustrações da geologia das diversas regiões permitirão o desenvolvimento desta competência expressa nos manuais de ensino.

Para o ensino secundário, é possível afirmar que, no que diz respeito aos objectivos (domínios procedimental, atitudinal, conceptual e outros) contemplados nos 4 manuais do 10º de escolaridade, não existem referências claras à importância da utilização da imagem na sua concretização (Tabela 4). Contudo, os pontos 6, 7 e 8 (domínio conceptual) poderão ser atingidos mais facilmente com o recurso a representações pictóricas que permitam aos alunos reconhecer e distinguir diferentes tipos de rochas.

Relativamente às diversas categorias de representações pictóricas (“Tipologia das Representações Pictóricas”), para os subtemas seleccionados, nos manuais do ensino básico, destaca-se, de forma bastante expressiva, a fotografia em relação às restantes tipologias, apresentando 104 referências (56,2% dos casos analisados) (Tabela 5). A seguir à fotografia, a categoria mais utilizada pelos 6 manuais de ensino diz respeito aos desenhos (53 registos, ou seja, 28,6% dos casos), por vezes apresentados sob a forma de banda desenhada. Por outro lado, destaca-se, no âmbito dos subtemas analisados, uma presença menor de gráficos, com 11 registos (5,9% dos casos), de mapas, com 9 registos (4,8% dos casos) e de esquemas, com, apenas, 8 registos (4,3% dos casos).

Tabela 5. Categoria das representações pictóricas nos manuais.

Manuais	Categorias				
	Fotografias Nº (%)	Desenhos Nº (%)	Esquemas Nº (%)	Gráficos Nº (%)	Mapas Nº (%)
7º ano	104 (56,2)	53 (28,6)	8 (4,3)	11 (5,9)	9 (4,8)
10º ano	60 (52,2)	5 (4,3)	43 (37,4)	6 (5,2)	1 (0,9)

Com base nos dados da Tabela 6, que apresentam a relação de domínio das diferentes representações pictóricas, nos 4 manuais do 10º ano é possível afirmar que, para os conteúdos analisados, a categoria fotografia,

com 60 presenças (52,2% da totalidade dos casos analisados), domina, de forma bastante expressiva, sobre as restantes categorias (desenhos, esquemas, gráficos e mapas). Os dados mostram-nos, também, que os autores dos manuais do 10º ano de escolaridade utilizam, com bastante frequência, os esquemas, como forma de apresentação dos conteúdos científico-didáticos (43 presenças, ou seja, 37,4% dos casos). Para as restantes categorias, os desenhos (5 presenças, 4,3% dos casos) e, sobretudo, os mapas geológicos (1 presença, 0,9% dos casos) parecem ser representações pictóricas muito pouco valorizadas pelos autores dos manuais do ensino secundário. Se compararmos os dados expressos na Tabelas 5, podemos afirmar que, em todos os manuais, a categoria fotografia parece ser a mais valorizada pelos autores dos manuais de Geologia.

Contudo, de acordo com os dados para ambos os graus de ensino, relativamente aos subtemas analisados, observa-se uma diferença de opções, por parte dos respectivos autores, no que diz respeito à utilização das restantes representações pictóricas. Assim, os autores dos manuais do 7º ano parecem privilegiar, a seguir à fotografia, o desenho, enquanto os responsáveis pelo conteúdo visual dos manuais do 10º ano utilizam, com maior frequência, os esquemas.

Relativamente à utilização de gráficos, se tivermos em consideração que foram analisados 6 manuais do 7º ano e, apenas, 4 do 10º ano, poderemos concluir que o número de representações gráficas nos manuais do ensino secundário (6 gráficos, ou seja, 5,2% dos casos analisados) é similar ao observado nos manuais do ensino básico (11 gráficos, 5,9% dos casos). Por outro lado, em todos os manuais, os mapas geológicos são uma representação pictórica pouco valorizada, no âmbito dos subtemas analisados, sendo a menos utilizada no caso do ensino secundário (9 presenças nos 6 manuais do ensino básico e 1 presença nos 4 manuais do ensino secundário).

Os dados revelam que a maior valorização do desenho, nos manuais do 7º ano de escolaridade, em relação ao esquema, mais utilizado nos manuais do 10º ano, parece mostrar uma convicção generalizada, por parte dos respectivos autores, nas vantagens da utilização de formas pictóricas mais analógicas, no ensino básico, em detrimento de formas de representação menos analógicas, utilizadas nos níveis de ensino mais avançados (ensino secundário).

Na categoria “Referência Geográfica das Representações Pictóricas (Categoria Fotografia)”, para o ensino básico, as fotografias de exemplos da Geologia de Portugal (47 registos) estão presentes num número bastante

mais expressivo do que os exemplos referentes à Geologia internacional (22 fotografias) (Tabela 6). Assim, os exemplos da Geologia de Portugal estão presentes em cerca de 45,2%, enquanto os exemplos internacionais aparecem em 21,2% do total dos casos analisados. O número de fotografias (35 registos) que não aparecem referenciadas, em termos geográficos, nos 6 manuais do 7º ano de escolaridade (33,6% dos casos) torna-se bastante expressivo e não permite que os utilizadores dos manuais localizem os exemplos apresentados.

Tabela 6. Representações pictóricas, categoria fotografia, nos manuais.

Manuais	Referência Geográfica		
	Nacional Nº (%)	Internacional Nº (%)	Sem Referência Nº (%)
7º ano	47 (45,2)	22 (21,2)	35 (33,6)
10º ano	30 (50,0)	1 (1,7)	29 (48,3)

Nos manuais do ensino secundário, como se tinha verificado nos do ensino básico, as fotografias de exemplos da Geologia de Portugal (30 fotografias) dominam, relativamente aos exemplos internacionais, com, apenas, 1 registo, estabelecendo-se, neste caso, uma relação percentual de 50% de exemplos nacionais, para 1,7% de internacionais (Tabela 6). Também nos manuais do 10º ano, subsiste um número elevado de registos fotográficos não referenciados geograficamente (29 fotografias num total de 60 registos, ou seja, 48,3% dos casos).

Considerações finais

A forma como as representações pictóricas são contempladas nos manuais de Ciências Naturais do 7º ano e de Geologia do 10º ano, permite concluir que, para os subtemas e manuais analisados, os autores dos manuais do 7º ano valorizam diferentes formas pictóricas de representação do conhecimento, contemplando-as nas propostas para o desenvolvimento das diversas competências. Contudo, nos manuais do 10º ano, é possível concluir que, na generalidade dos casos, não existem explicações precisas sobre a importância da utilização da imagem para a concretização dos objectivos dos domínios procedimental, atitudinal e conceptual.

Relativamente ao predomínio das diferentes representações pictóricas nos manuais investigados a fotografia, com 104 presenças nos 6 manuais do

7º ano e 60 presenças nos 4 manuais do 10º ano de escolaridade destaca-se, grandemente, em relação às restantes formas pictóricas consideradas neste estudo (desenhos, esquemas, gráficos e mapas). Por outro lado, nos manuais do ensino básico, o desenho apresenta-se como a segunda categoria mais utilizada, com 53 presenças, enquanto, nos manuais do ensino secundário, os autores parecem privilegiar, a seguir à fotografia, os esquemas, com 43 presenças, num total de 115 representações.

Assim, a maior aposta dos manuais do 7º ano, na utilização dos desenhos, relativamente aos esquemas, mais empregues no 10º ano, traduz uma maior valorização das formas pictóricas mais analógicas, no ensino básico, em detrimento dos modelos menos analógicos, utilizados nos níveis de ensino mais avançados.

Para os manuais, os mapas geológicos são uma representação pictórica relativamente pouco valorizada sendo, mesmo, a menos utilizada no caso do ensino secundário. Considerando que um dos subtemas de análise se relaciona com os tipos de rochas/paisagens geológicas, o facto de escassearem os mapas geológicos, sobretudo da Geologia de Portugal, parece-nos um aspecto sob o qual os autores e/ou professores deveriam reflectir, quando seleccionam as representações pictóricas para os manuais e para o ensino.

Quanto à utilização de fotografias com exemplos da Geologia de Portugal e/ou internacional, os resultados mostram que os exemplos nacionais, relativos aos conteúdos analisados, estão presentes numa percentagem bastante expressiva, comparativamente aos internacionais. Assim, pode-se concluir que, no âmbito dos subtemas analisados, os autores valorizam os exemplos científico-didácticos nacionais, em detrimento dos internacionais, embora mais mediáticos e que, no âmbito dos conteúdos investigados, uma grande percentagem de fotografias não apresenta qualquer referência ao local onde foram registadas, não possibilitando, aos alunos e restantes utilizadores, a identificação dos modelos geológicos (nacionais e/ou internacionais) expressos nos manuais. Em suma, sublinhamos que sendo os manuais escolares um recurso essencial para o Ensino e a Aprendizagem, a sua elaboração deveria conduzir a um resultado equilibrado relativamente às diferentes representações.

Manuais Analisados

Antunes C, Bispo M, Guindeira P. (2006) - Descobrir a Terra 7. Ciências Naturais-Terceiro Ciclo do Ensino Básico. Lisboa. Areal Editores.

Costa, A., Matos, J., Gaibino, R. (2002) - Eco Terra-Ciências Naturais. 3º Ciclo. Lisboa. Plátano Editores.

- Ferreira, J., Ferreira, M. (2007) - Planeta com Vida. Geologia 10º ano. Carnaxide. Editora Santillana.
- Lima, J., Portugal, I., Santos, L. (2002) - Vita-Ciências Naturais. 3º Ciclo do Ensino Básico. Porto. Edições Asa.
- Marques, M. (2007) - Uma Breve História Natural da Terra-Geologia. Ensino Secundário. Asa Editores.
- Mota, L., Viana, M. (2002) - Bioterra-Ciências Físicas e Naturais. Ciências Naturais. 3º Ciclo. Porto. Porto Editora.
- Mota, L., Viana M. (2006) - Bioterra. Ciências Naturais-Terceiro Ciclo do Ensino Básico. Porto. Porto Editora.
- Oliveira O, Ribeiro E, Silva, J. (2007) - Desafios. Biologia e Geologia. Ensino Secundário (10º e 11º Ano). Porto. Edições Asa.
- Silva, A., Mesquita, A, Gramaxo, F., Santos, M., Baldaia, L., Félix, J. (2007) - Terra., Universo de Vida-Geologia. Porto. Porto Editora.
- Silva, A.D, Santos, M.E., Mesquita, A.F., Baldaia, L., Félix, J.M. (2006) - Planeta Vivo. Ciências Naturais-Terceiro Ciclo do Ensino Básico. Porto. Porto Editora.

Dedicatória: Os autores dedicam este estudo ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho, associando-se à Homenagem ao Homem, ao Geólogo e ao Professor.

Referências Bibliográficas

- Bardin, L. (2009) - Análise de conteúdo, Lisboa: Edições, 70, 287 p.
- Flusser V. (1985) - Filosofia da Caixa Preta. São Paulo. Hucitec, 92 p.
- Galvão, C., Freire, A., Neves, I., Pereira, M. (2000) - Ciências Físicas e Naturais-Competências Essenciais no Ensino Básico. Lisboa. Ministério da Educação. Departamento da Educação Básica.
- Galvão C, Neves A, Freire A, Lopes A, Santos M, Vilela M, Oliveira M, Pereira M. (2001) - Ciências Físicas e Naturais-Orientações Curriculares para o 3º Ciclo do Ensino Básico. Lisboa. Ministério da Educação. Departamento da Educação Básica, 42 p.
- Hummel, C. (1985) - School textbooks and lifelong education- An analysis of schoolbooks from three countries. Hamburgo: Unesco Institute for Education, 147 p.
- Otero, M. (2002) - Imágenes y Enseñanza de la Física: Una visión cognitiva. Tesis (Doctoral). Burgos. Universidad de Burgos.
- Otero, M., Greca I, Silveira F. (2003) - El uso de imágenes visuales en el aula y el rendimiento escolar en Física: Un estudio comparativo. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias; 2 (1), 22 p.
- Parreiral, R., (em preparação) - Modelos para o Ensino e Aprendizagem de Temas de Geologia, no Ensino Básico e no Ensino Secundário. Um Estudo de Avaliação. Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Parreiral, R., Gomes, C. (em preparação) - Representações nos manuais de ensino de Ciências Naturais (7º ano) de Geologia (10º ano), em Portugal.
- Parreiral, R., Gomes, C. (2009) - Representações Pictóricas nos Manuais de Ensino de Ciências Naturais do 7º ano de escolaridade. XIII Encontro Nacional de Educação em Ciências. Castelo Branco; 953-962.
- Silva. C., Amador, F., Baptista, J., Valente, R. (2001) - Programa de Biologia e Geologia (10º ou 11º anos). Curso Científico-Humanístico de Ciências e Tecnologias. Lisboa. Ministério da Educação, 97 p.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Potencial EGS/HDR da região Centro e Norte de Portugal

Alcides Pereira¹; Luís Neves¹

1IMAR, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL.
apereira@dct.uc.pt; luisneves@dct.uc.pt

Palavras-chave: Potencial geotérmico, EGS, HDR, Portugal

Resumo

A geotermia do tipo EGS/HDR apresenta um elevado potencial enquanto fonte de energia eléctrica com carácter renovável, encontrando-se presentemente em desenvolvimento dezenas de projectos nos EUA, Austrália e Europa. Na região centro e Norte de Portugal não é possível encontrar alguns dos cenários geológicos mais favoráveis a este tipo de aproveitamento geotérmico, normalmente associados a rochas graníticas possuindo espessa cobertura de sedimentos. Contudo, alguns granitos hercínicos de natureza HHP que ocorrem na região apresentam indicadores favoráveis à existência de fluxos térmicos superiores aos normais na crosta, o que potencialmente os qualifica para o efeito de aproveitamento geotérmico EGS/HDR. Em favor desta possibilidade concorrem, designadamente, o grande volume e profundo enraizamento de alguns destes corpos graníticos, a sua elevada produção interna de calor radiogénico ($>3,5 \mu\text{Wm}^{-3}$), as evidências geoquímicas de que os teores de elementos radiogénicos são susceptíveis de não decrescer rapidamente em profundidade, e ainda as inferências baseadas em geotermómetros aplicados a águas termais que sugerem fluxos térmicos locais da ordem dos $140 \pm 10 \text{ mWm}^{-2}$, duplos dos normalmente observados na crosta continental.

Key-words: Geothermal potential, EGS, HDR, Portugal

Abstract

Engineered Geothermal Systems (EGS) present a high potential as a renewable source of energy for electricity production; dozens of projects are currently being developed in the USA, Australia and Europe. In the central and northern region of Portugal it is not possible to find the most common geological scenarios that are usually considered favorable for this new type of geothermal exploitation, namely those associated with deep granites covered by a thick sedimentary sequence. However, some HHP granites of this region of Portugal show several evidences of increased heat flow, which could make them suitable for EGS/HDR. This conclusion is based in the large volume and deep-rooted nature of some plutons, their high internal heat production ($>3,5 \mu\text{Wm}^{-3}$), geochemical evidence suggesting that the concentrations of the radiogenic elements are not likely to be

significantly reduced with depth, and also results from geothermometers applied to thermal waters, that allow to estimate heat flow in the range $140\pm 10 \text{ mWm}^{-2}$, which approximately doubles typical values of the continental crust.

Introdução

A energia geotérmica é utilizada com sucesso na produção de electricidade há um século, encontrando-se actualmente instalada uma capacidade de 10 GW a nível mundial, com significativa expansão em anos recentes. São diversas as vantagens deste tipo de energia: as emissões de CO₂ são reduzidas ou mesmo nulas, os custos de produção competitivos, os impactes ambientais praticamente inexistentes e a taxa de disponibilidade das centrais muito elevada (equivalente à das baseadas em combustíveis fósseis). Pelo exposto, e atendendo ao carácter inesgotável do calor interno da Terra, a energia geotérmica é a única energia renovável com capacidade para substituir os combustíveis fósseis na geração do nível de base de energia eléctrica que é necessário assegurar nas redes de distribuição.

Contudo, as condições geológicas necessárias à implementação de um projecto geotérmico ocorrem com alguma raridade, restringindo-se no essencial a regiões com vulcanismo activo, geograficamente muito limitadas, onde seja possível recuperar fluidos a alta temperatura naturalmente existentes a profundidades reduzidas ou moderadas (geralmente até 2 km). Tal justifica a pouca expressão deste tipo de energia a nível mundial; em Portugal, apenas os Açores apresentam um elevado potencial para a aplicação deste tipo de geotermia, que se pode designar por convencional.

Tal poderá no entanto ser alterado de forma significativa pelos recentes avanços alcançados no domínio dos EGS (Enhanced ou Engineered Geothermal Systems), conceito equivalente ao idealizado nos anos 70/80 sob a designação de HDR (*Hot Dry Rock*). Este novo tipo de exploração geotérmica desenvolve-se a profundidades superiores a 4 km, sendo o reservatório geotérmico gerado por técnicas de engenharia, com estimulação hidráulica e injeção de fluidos a partir da superfície. O âmbito geográfico da sua aplicação é assim grandemente alargado face à geotermia convencional, dada a maior facilidade na obtenção das temperaturas necessárias a profundidades maiores. O conceito foi testado com sucesso em 2008 no projecto experimental de Soultz-sous-Forêt (França), encontrando-se um elevado número de projectos a decorrer em diversos países, incluindo Portugal (ver Neves *et al.*, 2011).

O presente trabalho tem por objectivo apresentar uma avaliação do potencial geotérmico da região Centro e Norte de Portugal para a implementação de projectos do tipo EGS/HDR.

Condicionantes Geológicas à implementação de EGS/HDR

No quadro da tecnologia presentemente disponível, na produção de energia eléctrica de origem geotérmica poderão ser usados fluidos com temperaturas variáveis entre 150-250°C ou 100-120°C, no caso de estarem disponíveis, respectivamente, caudais moderados ou elevados; os projectos EGS/HDR têm como alvo o primeiro dos intervalos de temperatura referidos. Com o propósito de obter tais temperaturas com um custo mínimo de perfuração, um projecto EGS/HDR exige como condição a disponibilidade de gradientes geotérmicos mais elevados que a média (40-50°C/km face aos normais 25-30°C/km), embora não tão elevados como os que caracterizam as regiões com vulcanismo activo.

A distribuição da temperatura na crosta depende do fluxo térmico. Este parâmetro por sua vez depende do fluxo térmico basal, que corresponde à dissipação de calor do centro para a superfície da Terra, a que se adiciona uma componente de produção de calor radiogénico associada ao decaimento dos elementos radioactivos contidos nas próprias rochas (U, Th e K). Em geral, fluxos térmicos superiores ao da média crustal (60 mWm⁻²) são observados quando existe um incremento no fluxo basal, situação que ocorre nas regiões com vulcanismo activo ou recente em termos geológicos (*ex.*: sistemas de rifte peri-alpinos e bacias de origem tectónica situadas no interior do cinturão alpino – *c.f.* Genter, 2003). Em muitos casos, como é exemplo o rifte do Reno, trata-se de grabens bordejados por falhas normais, conduzindo os processos tectónicos ao adelgaçamento da crosta e a fenómenos de vulcanismo de idade terciária ou mesmo quaternária. Sedimentos pós-paleozóicos, nalguns casos com mais de 1000 m de espessura, preenchem as áreas tectonicamente deprimidas, assentando discordantemente sobre rochas hercínicas, por vezes de natureza granítica. Muitas das áreas na Europa consideradas de elevado potencial geotérmico integram-se neste enquadramento geodinâmico, de que é emblemático o projecto de Soultz-sous-Forêt (Genter *et al.*, 2003).

Contudo, em áreas tectonicamente estáveis também é possível a ocorrência de fluxos térmicos elevados, sendo normalmente considerado como enquadramento geológico preferencial a ocorrência de granitos possuindo alguns quilómetros de cobertura sedimentar. Admite-se, neste caso, que o efeito de isolamento térmico criado pelos sedimentos contribua

para um significativo acréscimo da temperatura na rocha granítica, onde é constituído o reservatório geotérmico. Este tipo de enquadramento geológico é exemplarmente ilustrado na região de Cooper Basin (Austrália), onde se encontram em desenvolvimento diversos projectos EGS/HDR.

Menos atenção tem sido dada no entanto às potencialidades associadas aos granitos do tipo HHP (High Heat Production granites) que ocorrem em zonas tectonicamente estáveis, ou sismicamente de baixa actividade, aflorantes ou com cobertura sedimentar pouco espessa, aos quais se podem associar também fluxos térmicos regionais acrescidos, como resultado da sua elevada produção de calor radiogénico interna. O caso mais conhecido é o do plutónio de Carnmenellis, aflorante no sudoeste de Inglaterra (v.g. Rodrigues *et al.*, 1995). Uma das razões para esta situação deve-se ao menor acervo de informação disponível sobre os fluxos térmicos prevalentes neste tipo de enquadramento geológico, comparativamente ao das áreas inseridas em espessas bacias sedimentares, as quais foram muitas vezes prospectadas pela indústria petrolífera. As rochas graníticas são especialmente abundantes no Sul da Europa. Na realidade, este tipo de rochas ocupa uma área muito significativa no Maciço Hespérico; proporcionalmente às restantes rochas a relação neste sector da cadeia hercínica pende fortemente para as de natureza ígnea, o que é uma situação única no quadro europeu, encontrando-se expostos alguns batólitos graníticos com características que os tipificam como HHP (Godinho *et al.*, 1991).

Potencial geotérmico EGS da região Centro e Norte de Portugal

O substrato geológico da região Norte e Central de Portugal continental é composto maioritariamente por rochas ígneas e metassedimentares de idade hercínica e ante-hercínica, localmente cobertos por rochas sedimentares, em geral de espessura reduzida e de idade terciária (Figura 1). Os últimos eventos magmáticos na região, associados às intrusões de rochas filonianas de natureza básica remontam ao Mesozóico. Não se encontram presentes, por conseguinte, os enquadramentos geológicos considerados como mais favoráveis ao desenvolvimento de projectos EGS/HDR, tal como discutido no capítulo anterior, com a excepção dos associados a rochas com elevada produção de calor radiogénico interno.

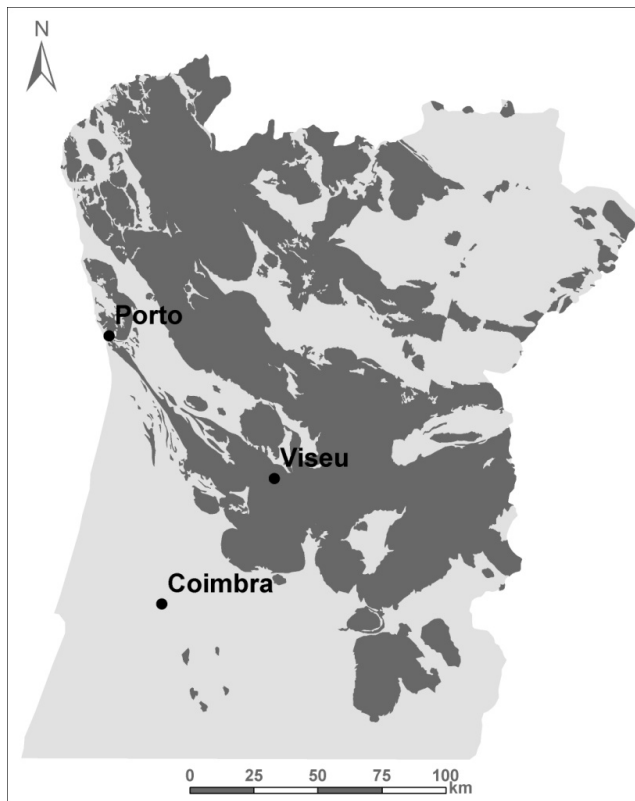


Figura 1. Enquadramento geológico simplificado da região Centro e Norte de Portugal. A cinza escuro representam-se as rochas granitóides, maioritariamente de idade hercínica; a área restante é composta por rochas metassedimentares de idade ante-hercínica bem como rochas sedimentares pós-paleozóicas.

São muito escassos os dados actualmente disponíveis sobre o fluxo térmico em Portugal continental. No que se refere ao Maciço Hespérico, a Zona Centro-Ibérica (ZCI) tem vindo a ser reconhecida como um dos sectores do território onde os valores deste parâmetro serão mais elevados que a média crustal. Em trabalho recente, Correia e Ramalho (2005), numa escala com máximo de 4, integraram a ZCI no grupo 3 que se caracteriza por apresentar fluxos de calor com média estimada de 78 mWm^{-2} , acima, pois, do valor médio crustal. Contudo, e como referem os mesmos autores, este valor médio pode estar subestimado atendendo a que os dados disponíveis foram maioritariamente obtidos em furos muito superficiais, em geral de profundidade inferior a 100 m. Neste sentido parece ir o facto de se encontrarem reconhecidos alguns corpos de natureza granítica com características que os poderão filiar como HHP, os quais potencialmente podem incrementar localmente o fluxo térmico (Godinho *et al.*, 1991).

Estes últimos autores estimaram a produção radiogénica (A_0) de rochas aflorantes na ZCI na base das concentrações de U, Th e K, tendo obtido resultados variáveis no intervalo 1,7-11 μWm^{-3} . Neste conjunto, as rochas metassedimentares situam-se no limiar inferior do intervalo, próximo à média crustal, enquanto as rochas de composição granítica apresentam a maior produção de calor radiogénico; neste último caso, são frequentes os valores médios situados entre 3,1 e 4,3 μWm^{-3} . O valor de $A_0=3,5 \mu\text{Wm}^{-3}$ tem-se como o limiar para que um granito se possa considerar, em princípio, rocha de elevado potencial geotérmico (Webb *et al.* 1985), concluindo-se em Godinho *et al.* (1991) que, em face da informação disponível para as rochas aflorantes na região Norte e Centro de Portugal, a área aflorante ocupada por este tipo de rochas possa ser de algumas centenas de quilómetros quadrados.

De referir, no entanto, que os valores de A_0 disponíveis foram estimados a partir dos teores de elementos radiogénicos medidos em amostras de superfície; dada a reconhecida mobilidade do U é provável que os teores tenham sido subestimados, situação já referida por outros autores em contextos similares (*v.g.* Webb *et al.*, 1985), pelo que a produção de calor radiogénico poderá ser ainda mais elevada. No mesmo sentido apontam os dados relativos ao fluxo de radiação gama natural emitido pelos materiais geológicos, parâmetro que pode ser usado como estimador da concentração dos elementos radiogénicos (Pereira *et al.*, 2010). Dados disponíveis para o território continental mostram a ocorrência de fluxos elevados, espacialmente associados às rochas graníticas aflorantes na ZCI, com taxas de exposição à radiação gama frequentemente superiores a 200 nGy/h.

Outro indicador do fluxo térmico potencial consiste na existência de um vasto conjunto de emergências de águas minerais naturais na área em análise, as quais, nalguns casos, brotam à superfície com temperaturas elevadas, destacando-se as termas de Chaves, de S. Pedro do Sul e de Alcafache com valores superiores a 50°C (Figura 2). Utilizando o teor em SiO_2 das águas minerais naturais como geotermómetro e assumindo a relação empírica definida em Swanberg & Morgan (1978), que relaciona a temperatura com o fluxo térmico (a qual foi validada através da aplicação com sucesso em diversas regiões do globo), foi possível estimar este último parâmetro, na base das composições químicas conhecidas para as emergências localizadas na ZCI; os valores obtidos dispersam-se entre 115 e 190 mWm^{-2} , agrupando-se a maioria no intervalo $140\pm 10 \text{mWm}^{-2}$. Este intervalo, ainda que constitua uma estimativa com um nível de incerteza elevada, está, no entanto, de acordo com os dados apresentados durante a

discussão anterior, reforçando a possibilidade de ocorrência de fluxos térmicos mais elevados do que os valores conhecidos até ao momento em algumas regiões da ZCI, em particular em associação às rochas de natureza granítica e como resultado de uma produção interna de calor acrescida por parte destas.

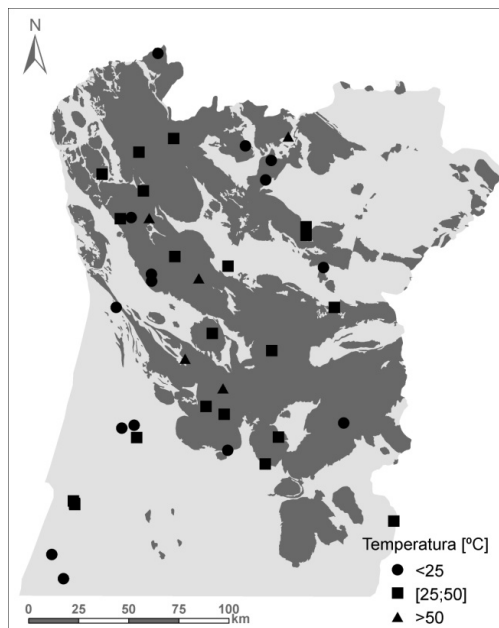


Figura 2. Localização das nascentes de águas minerais naturais na região Centro e Norte de Portugal com indicação da temperatura na emergência.

Os granitos hercínicos tardi-orogénicos da região das Beiras como alvo preferencial para aplicações geotérmicas do tipo EGS/HDR

Conforme já referido, apenas corpos ígneos com extensão vertical muito significativa e elevada produção interna de calor têm capacidade para influenciar de forma decisiva o fluxo térmico local, através da adição de uma relevante contribuição de calor radiogénico. Neste sentido, são as rochas graníticas da ZCI com características HHP alvos preferenciais, por apresentarem as mais elevadas produções de calor radiogénico (Godinho *et al.*, 1991); e, de entre estas, serão expectáveis os mais elevados fluxos térmicos locais por parte das que apresentem enraizamento profundo e homogeneidade na distribuição vertical dos radionuclídeos.

De entre as rochas graníticas hercínicas distinguem-se duas séries, a dos granitos sin-tectónicos e a dos tardi a pós-tectónicos, apresentando ambas as séries produções de calor radiogénico semelhantes (Godinho *et al.*, 1991). Contudo, as rochas que integram a série mais antiga são em geral consideravelmente mais diferenciadas do que as tardi a pós-tectónicas, o que sugere poderem corresponder a plutonitos com pequena volumetria e extensão vertical. A correlação observada entre os teores de U e o grau de fraccionação da rochas é igualmente um indicador que vai no mesmo sentido (Figura 3), tal como observado por Webb *et al.* (1985) no Reino Unido. Ao invés, os granitos tardi a pós-tectónicos, e em particular o batólito granítico das Beiras, mostram uma evolução geoquímica moderada e invariância de U com o grau de fraccionação (Figura 3), características que sugerem poderem estas rochas apresentar significativo enraizamento crustal com manutenção das suas características geoquímicas e radiológicas.

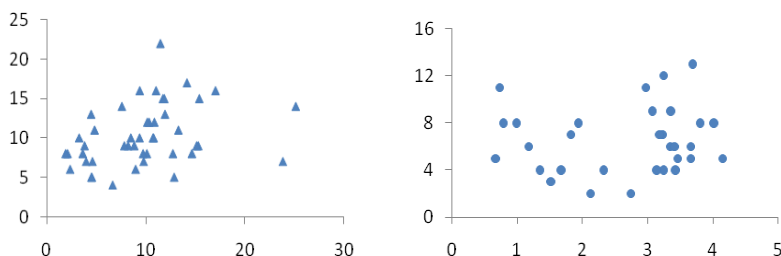


Figura 3. Racio Rb/Sr (abscissas) vs. U (ordenadas) para granitóides da região de Viseu; à esquerda granitos sintectónicos, à direita granitos tardi a pós-tectónicos. Informação recolhida em (Neves, 1993).

Dados gravimétricos obtidos em rochas graníticas do Norte de Portugal indicaram a possibilidade de a raiz dos corpos ígneos se encontrar a profundidades significativas; num caso de estudo, Sant’ovaia & Noronha (2005) indicam como provável a profundidade de 16 km para um desses corpos. O tratamento de dados disponíveis referentes ao campo gravítico do território português, na base da carta gravimétrica de Portugal (Instituto Geográfico e Cadastral, 1967), através da aplicação de análise de superfícies de tendência, permite evoluir um pouco mais no sentido da identificação de áreas preferenciais, onde as rochas graníticas denotam enraizamento profundo. Para o propósito, a informação foi tratada através da aplicação de métodos polinomiais, tendo sido deduzido um modelo de variação regional de grau 3, o qual é significativo e absorve parte relevante da variabilidade total. Do ponto de vista da detecção de anomalias negativas no campo gravítico, o melhor indicador disponível consiste no mapa dos resíduos do

modelo, ou seja, no mapa que traduz a diferença entre a tendência regional deduzida e os valores observados localmente (Figura 4). Desta análise verifica-se a persistência de significativas anomalias negativas associadas a alguns corpos graníticos, onde se destaca o maciço da Serra da Estrela, bem como uma parte do batólito granítico das Beiras, designadamente no sector de Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital.

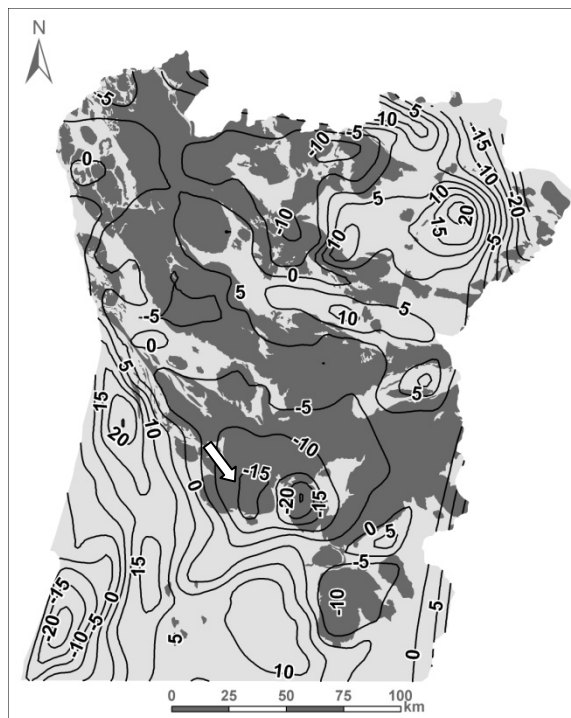


Figura 4. Mapa de resíduos do modelo polinomial de variação regional do campo gravítico medido na região Centro e norte de Portugal (a seta indica de forma aproximada o afloramento do batólito das Beiras – região de Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital)

É neste último sector, contudo, onde se observam os indícios de maior mobilidade do U, patente na ocorrência, na superfície topográfica ou na sua proximidade, de um elevado número de locais onde as concentrações deste elemento podem ser várias vezes superiores à média estimada para a rocha granítica encaixante. Trabalhos de prospecção levados a cabo desde a década de 50 pelas diversas companhias mineiras detectaram a presença de alguns milhares de locais com significativas anomalias radiométricas. Algumas dessas anomalias (num total de 61) deram origem a explorações

mineiras tendo sido produzido um total de 4370t de U_3O_8 (Nero *et al.*, 2005). A maior parte das mineralizações são superficiais, estendendo-se até à profundidade máxima de 50 m, sendo compostas por fosfatos secundários, como são os casos da autunite e da torbernite. Dados de análise por traços de fissão obtidos no granito das Beiras evidenciaram a existência de uma forte mobilização do U dos suportes mineralógicos primários (Neves *et al.*, 1997), sendo um deles a uraninite, um mineral facilmente lixiviável em contacto com fluidos meteóricos, cuja presença foi detectada no mesmo tipo de rochas (Pinto, 2001). A lixiviação da uraninite primária e subsequente deposição de U em armadilhas estruturais é um processo que permite explicar as características do fenómeno mineralizante que afecta a região. É, assim, expectável que a maiores profundidades a probabilidade de ocorrência da interacção com fluidos meteóricos seja bem menor e, por conseguinte, os teores de U na rocha não alterada serão mais elevados que os observadas em rochas colhidas em afloramento, potenciando os valores de A_0 .

É ainda de referir que o batólito granítico das Beiras apresenta os mais elevados fluxos de radiação gama de superfície do território nacional (>200 nGy/h), com especial ênfase para a continuidade espacial do mesmo no sector de Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital. Na mesmo sector ocorrem igualmente diversas emergências termais, para além da de Alcafache já citada: Caldas da Felgueira ($T=36^\circ C$), Caldas de Sangemil ($T=50^\circ C$); Granjal ($T=23^\circ C$) e Caldas de S. Paulo ($T=23^\circ C$), cujo quimismo corrobora a possibilidade de ocorrência de valores de fluxo térmico elevados, conforme já anteriormente discutido.

A avaliação das tipologias mais favoráveis no espaço europeu à ocorrência de temperaturas não inferiores a $200^\circ C$ até profundidades de 5 km efectuada por Genter *et al.* (2003), na base da informação disponível sobre o fluxo térmico, indicou como um dos contextos favoráveis as rochas graníticas aflorantes no sudoeste de Inglaterra (Cornualha), em particular o plutonito de Carnmnellis, tal como já referido. Este corpo tem semelhanças do ponto de vista petroquímico com o batólito granítico das Beiras, reunindo ambos alguns indicadores favoráveis ao potencial geotérmico, nomeadamente no que respeita à produção de calor radiogénico, filiação no grupo das rochas do tipo HHP, densidade de mineralizações de U no espaço aflorante, distribuição de K, Th e U em profundidade, volumetria significativa e ainda a presença de emergências de águas minerais naturais, por vezes com temperaturas elevadas (próximo dos $50^\circ C$). No entanto, e comparativamente ao plutonito de Carnmnellis, o batólito das Beiras tem área aflorante *ca.* 10 vezes superior e, ainda que não se disponha, no

momento, de informação sobre a posição da raiz do corpo ígneo, na base dos dados gravimétricos anteriormente apresentados afigura-se provável que esta se encontre a uma profundidade de vários quilómetros, pelo que será significativamente mais volumoso.

Pelo exposto, conclui-se pela existência de um potencial geotérmico relevante por parte das rochas tardi a pós-tectónicas que integram o batólito granítico das Beiras, com ênfase para o sector Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital.

Avaliação do potencial energético de um segmento do batólito das Beiras (Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira Hospital).

Com base na metodologia desenvolvida pelo MIT (2006) estimou-se para um segmento crustal com ca. 530 km² de área ocupada pelo batólito das Beiras, no sector Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital, a quantidade de energia geotérmica armazenada. Estudos deste tipo serão, nesta fase, necessariamente preliminares dada a insuficiência em alguma informação sobre o segmento em causa; procurou-se, no entanto, controlar a incerteza com recurso a informação disponível em contextos geológicos similares. Na base das temperaturas estimadas em profundidade para o segmento crustal, assumindo com fontes térmicas o calor proveniente do manto e o produzido pelo decaimento dos elementos radioactivos (Pereira *et al.*, 1996), que aponta para valores superiores a 100°C apenas a profundidades superiores a 3 km, e atendendo ao limite que é possível atingir actualmente pela tecnologia de perfuração (10 km), restringiu-se a modelação numérica ao intervalo delimitado por aquelas profundidades. Com suporte na formulação matemática explicitada pelo MIT (2006), estimou-se subsequentemente a quantidade de energia térmica disponível assumindo a individualização do segmento crustal em porções cada uma delas com dimensão de 530km² x 1 km.

Na figura 5 apresenta-se o resultado obtido, o qual sugere que a energia disponível possa atingir os 2295 EJ (ExaJoule=10¹⁸J). Considerando o cenário de recuperação mais pessimista equacionado na avaliação do potencial do território dos EUA (MIT, 2006), o qual considera o valor de 2%, estaria acessível nesta região uma quantidade de energia de 46 EJ. Compare-se estes valores com o consumo total de energia eléctrica em Portugal, em 2006 de 48545 GWh (www.iea.org), o que equivale a 0,18 EJ.

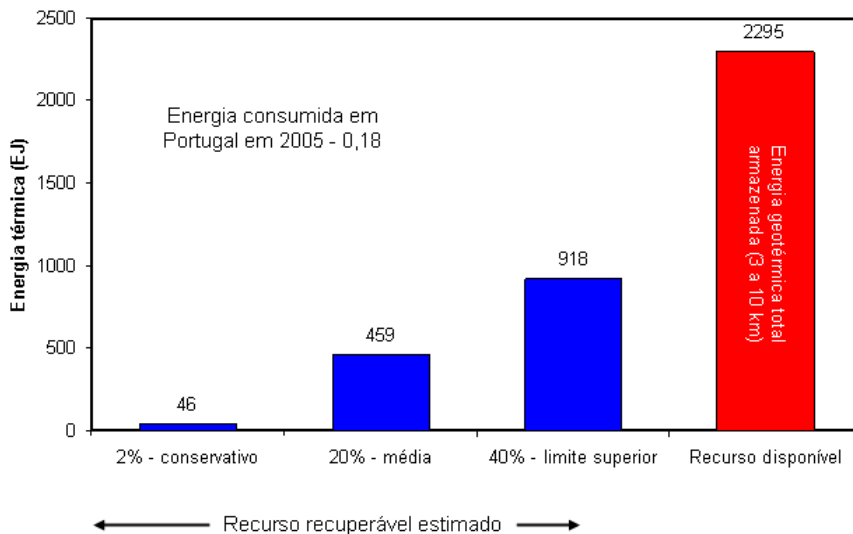


Figura 5. Estimativa das reservas em energia geotérmica acumulada entre os 3 e os 10 km no segmento crustal referente à área proposta bem como no recurso recuperável para vários cenários; cálculos efectuados na base da metodologia proposta pelo MIT (2006).

Conclusões

É muito escassa a informação existente sobre fluxos térmicos no território continental português, o que não permite aferir de forma directa o seu potencial geotérmico, designadamente no domínio da sua aplicação às tecnologias emergentes EGS/HDR; na avaliação do potencial geotérmico do espaço europeu, realizada por Genter *et al.* (2003), parte significativa da Ibéria surge sem qualquer informação associada.

Não obstante, diversas evidências indirectas sugerem que o fluxo térmico possa ser elevado em algumas áreas da região Centro e Norte, em associação às rochas graníticas, em particular aos granitos tardi a pós-tectónicos que integram o batólito granítico das Beiras. Tal decorre da elevada produção de calor radiogénico interno destas rochas, bem como da provável extensão crustal das mesmas em profundidade. A avaliação preliminar de um segmento do batólito com 530 km² compreendido entre Santa Comba Dão, Nelas e Oliveira do Hospital, mostra que a energia existente entre os 3 e os 10 km de profundidade, ainda que recuperada em muito pequena proporção (2%), equivale a mais de 250 vezes o consumo total anual de energia do país.

Agradecimentos: Os autores dedicam o presente trabalho ao Professor Manuel Maria Godinho, o qual foi pioneiro na avaliação do potencial das rochas granitóides portuguesas para a geotermia HDR.

Bibliografia

- Correia, A., Ramalho, E. C. (2005) - Updated surface heat flow density map in mainland Portugal. *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turquia*, 1-5.
- Genter, A., Guillou-Frottier, L., Feybesse, J.-L., Nicol, N., Dezayes, C., Shwartz, S. (2003) - Typology of potential Hot Fractured Rock resources in Europe. *Geothermics*; 32, 701-710.
- Godinho, M.M., Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F. (1991) - Potencial térmico das rochas graníticas num segmento do Maciço Hespérico (Portugal Central). *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*; 112, 469-483.
- Instituto Geográfico e Cadastral (1967) - Carta gravimétrica de Portugal, escala 1: 1000 000.
- MIT (2006) - The future of geothermal energy. http://www1.eere.energy.gov/geothermal/future_geothermal.html.
- Nero, J.M.G., Dias, J.M.M., Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F., Torrinha, J. (2005) - Environmental evaluation and remediation methodologies of radioactive abandoned mines in Portugal. *Proceedings do International Workshop on Environmental Contamination from Uranium Production Facilities and Remediation Measures, International Atomic Energy Agency*, 145-158.
- Neves, L.J.P.F. (1993) - Variabilidade geoquímica e diversidade das rochas granitóides da região de Torredeita (Viseu, Portugal Central) - Um modelo petrogenético explicativo. *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*; 115, 107-136.
- Neves, L.J.P.F., Pereira, A.J.S.C., Carter, A., Godinho, M.M., Dias, J.M.M., Hurford, A.J. (1997) - Evidência de mobilização recente do urânio num granito da região de Torredeita (Viseu): um estudo por traços de fissão. *X Semana de Geoquímica e IV Congresso dos Países de Língua Portuguesa, Braga. Actas*, 401-403.
- Neves, L.J.P.F., Pereira, A.J.S.C., Dias, J.M.M. (2011) - Os Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS/HDR) – um desafio para o século XXI (este volume).
- Pereira, A.J.S.C Godinho, M.M., Castro, J.A.M. (1996) - Modelagem bidimensional do arrefecimento do plutonito de Tábua (Portugal Central). *Comunic. Inst. Geol. e Mineiro*; 82, 15-30.
- Pereira, A.J.S.C., Godinho, M.M., Neves, L.J.P.F. (2010) - On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: a case study in the Iberian Uranium Province. *J. Env. Radioactivity*; 101, 10, 875-882.
- Pinto, M.M.S.C. (2001) - Mineralizações uraníferas no vale de Abrutiga e estudos de impacte ambiental da sua exploração. *Tese de mestrado, Universidade de Coimbra*, 156 p.
- Rodrigues, N.E.V., Green, A.S.P., Barley, R. (1995) - Modeling tracers tests in the Rosemanowes HDR reservoir. *Geothermics*; 24, 3, 375-384.
- Sant’ovaia, H. & Noronha, F. (2005) - Gravimetric anomaly modeling of the post-tectonic granite pluton of Águas Frias-Chaves (Northern Portugal). *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*; 30, 87-98.
- Swanberg, C.A. & Morgan, P. (1978) - The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and regional heat flow map of the United States. *Pure Appl. Geophys.*; 117, 227-241.
- Webb, P.C., Tindle, A.G., Barritt, S.D., Brown, G.C., Miller, J.F. (1985) - Radiothermal granites of the United Kingdom: comparison of fractionation patterns and variation of heat production for selected granites. In: “High heat production (HHP) granites, hydrothermal circulation and ore genesis”, *The Institution of Mining and Metallurgy*, 409-424.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

O gás radão no contexto da legislação sobre a Qualidade do Ar Interior em edifícios – situação em Portugal

Paulo Norte Pinto¹; Alcides Pereira²; Luís Neves³

^{1,2,3}IMAR, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Portugal. ¹ppinto@dct.uc.pt; ²apereira@dct.uc.pt; ³luisneves@dct.uc.pt

Palavras-chave: Radão, Qualidade do ar interior, Portugal, RSECE

Resumo

O gás radão tem vindo a ser reconhecido como um importante factor de risco ambiental, principalmente quando se encontra em concentrações elevadas no ar interior de edifícios, estando actualmente classificado pela Organização Mundial de Saúde como carcinogénico do grupo 1. Neste contexto, desde 2006 existe legislação em Portugal sobre a matéria que estabelece limites máximos para a sua concentração no ar interior de edifícios. Pretende-se com este trabalho fazer uma síntese da legislação em vigor com enfoque na componente experimental de amostragem e análise. São ainda apresentados e interpretados alguns dados estatísticos sobre as medições que têm vindo a ser efectuadas no Laboratório de Radioactividade Natural, do Departamento de Ciências da Terra, da Universidade de Coimbra, no contexto do Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios.

Key-words: Radon, Indoor air quality, Portugal, RSECE

Abstract

Radon gas has been recognized as an important environmental risk factor, especially when found in high concentrations inside buildings, and is currently classified by the World Health Organization as a carcinogen type 1. In this context, there is legislation in Portugal since 2006 that sets limits to its concentration in indoor air. The aim of this work was to synthesize the existing legislation with focus on the sampling and analysis. Some statistical data about the measurements obtained in the Natural Radioactivity Laboratory, of the Department of Earth Sciences, of the University of Coimbra are presented, and discussed in the context of the National Energy Certification of Buildings System.

Introdução

A Directiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios, estabelece que os Estados membros da União Europeia devem implementar um sistema de certificação energética (Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios – SCE), de forma a informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios aquando da construção, da venda ou do arrendamento dos mesmos, exigindo também que o sistema de certificação abranja igualmente todos os grandes edifícios públicos e edifícios frequentemente visitados pelo público.

O Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização nos Edifícios (RSECE, definido no Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril) e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, definido no Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril) consubstanciam a actual legislação existente, que enquadra os critérios de conformidade a serem observados nas inspecções a realizar no âmbito deste sistema de certificação, estabelecendo, para o efeito, os requisitos que devem ser aferidos relativamente aos seguintes aspectos: eficiência energética, qualidade do ar interior, ensaios de recepção de sistemas após a conclusão da sua construção, manutenção e monitorização do funcionamento dos sistemas de climatização, inspecção periódica de caldeiras e equipamentos de ar condicionado e responsabilidade pela condução dos sistemas (Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril).

É atribuída à Agência para a Energia (ADENE) a gestão do SCE (Dec. Lei n.º 78/2006, artigo 6.º, n.º 1), sob supervisão da Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG, ex. Direcção Geral de Geologia e Energia) e da Agência Portuguesa do Ambiente (APA, ex. Instituto da Ambiente), respectivamente, no que respeita à certificação e eficiência energética e à qualidade do ar interior (Dec. Lei n.º 78/2006, artigo 5.º, alíneas a) e b) respectivamente).

É no contexto do SCE que surge o gás radão como um agente contaminante do ar interior em edifícios, com valor limite definido em 400 Bq.m^{-3} , e a sua pesquisa obrigatória, apenas em edifícios construídos em zonas graníticas, nomeadamente nos distritos de Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco (RSECE, artigo 29.º, n.º 8, alínea c).

No presente trabalho procura-se fazer uma análise da legislação vigente sobre o SCE no que respeita ao gás radão, com especial ênfase nas questões metodológicas relativas à análise do mesmo gás em edifícios; procura-se ainda apresentar alguns resultados sobre dados obtidos no Laboratório de Radioactividade Natural sobre a matéria.

O gás radão

O radão é um elemento químico do grupo dos gases raros. Nas condições normais de temperatura e pressão é um gás inodoro e incolor, e é também o mais denso gás conhecido (nove vezes mais denso do que o ar). Penetra facilmente materiais como o papel, a madeira e outros elementos construtivos de um edifício (Godinho *et al.*, 1999). O radão tem vários isótopos (conhecem-se 16), todos eles radioactivos, com tempos de meia-vida curtos, dos quais se destaca o ^{222}Rn com um tempo de meia-vida de 3,82 dias; este é o isótopo que importa medir no que concerne o RSECE, vertente Qualidade do Ar Interior (RSECE-QAI).

O ^{222}Rn é um isótopo da cadeia de decaimento do isótopo ^{238}U do urânio, o qual constitui mais de 99% do urânio geralmente presente nas rochas e solos. Quanto maior a concentração deste isótopo, maior o potencial de produção de gás radão do substrato geológico, razão pela qual se definem as zonas graníticas, constituídas maioritariamente por rochas que apresentam teores claramente superiores à média crustal, como aquelas em que a sua pesquisa se torna obrigatória à luz da legislação.

O gás radão tem vindo a ser reconhecido como um importante factor de risco ambiental, podendo da sua inalação resultar um incremento no risco de cancro do pulmão de 16% por cada 100 Bq.m^{-3} de aumento na concentração de radão medida no ar interior (Darby S. *et al.*, 2005); por se tratar de uma relação dose-resposta linear, o risco de cancro do pulmão aumenta proporcionalmente com o aumento da dose por exposição; o radão e todos os seus descendentes estão classificados pela Organização Mundial de Saúde (através da Agência Internacional de Investigação do Cancro – IARC) como carcinogénicos do grupo 1 (WHO-IARC, 1998; WHO, 2009). Dados obtidos no território nacional têm vindo a mostrar que, com alguma frequência, as concentrações do gás radão em espaços confinados podem atingir valores muito elevados, por vezes com alguns milhares de Bq.m^{-3} (Neves e Pereira, 2004; Pereira e Neves; 2010) e, por consequência, este terá que ser um factor importante a considerar na avaliação da qualidade do ar.

O SCE

O SCE tem como finalidade (Dec. Lei n.º 78/2006, artigo 2.º):

- a) Assegurar a aplicação regulamentar, nomeadamente no que respeita às condições de eficiência energética, à utilização de sistemas de energias renováveis e, ainda, às condições de garantia da qualidade

do ar interior, de acordo com as exigências e disposições contidas no RCCTE e no RSECE;

- b) Certificar o desempenho energético e a qualidade do ar interior nos edifícios;
- c) Identificar as medidas correctivas ou de melhoria de desempenho aplicáveis aos edifícios e respectivos sistemas energéticos, nomeadamente caldeiras e equipamentos de ar condicionado, quer no que respeita ao desempenho energético, quer no que respeita à qualidade do ar interior.

Estão abrangidos pelo SCE os seguintes edifícios (Dec. Lei n.º 78/2006, artigo 3.º, n.º 1):

- a) Os novos edifícios, bem como os existentes sujeitos a grandes intervenções de reabilitação, nos termos do RSECE e do RCCTE, independentemente de estarem ou não sujeitos a licenciamento ou a autorização, e da entidade competente para o licenciamento ou autorização, se for o caso;
- b) Os edifícios de serviços existentes, sujeitos periodicamente a auditorias, conforme especificado no RSECE;
- c) Os edifícios existentes, para habitação e para serviços, aquando da celebração de contratos de venda e de locação, incluindo o arrendamento, casos em que o proprietário deve apresentar ao potencial comprador, locatário ou arrendatário o certificado emitido no âmbito do SCE.

Excluem-se do âmbito de aplicação do SCE as infra-estruturas militares e os imóveis afectos ao sistema de informações ou a forças de segurança que se encontrem sujeitos a regras de controlo e confidencialidade (Dec. Lei n.º 78/2006, artigo 3.º, n.º 3).

Resumindo, estão sujeitos ao RCCTE:

- Edifícios residenciais novos;
- Edifícios residenciais existentes em caso de venda ou arrendamento;
- Pequenos edifícios de serviços novos ou existentes, sem sistema de climatização centralizada ou com sistemas de $P_n \leq 25$ kW (potência nominal).

Estão sujeitos ao RSECE:

- Edifícios residenciais com sistema de climatização de $P_n > 25$ kW;

- Edifícios de serviços:
 - Pequenos com sistema de climatização de $P_n > 25$ kW;
 - Grandes:
 - Novos com $A > 500$ m² (área útil);
 - Existentes com $A > 1000$ m².

No caso de edifícios com mais do que uma fracção autónoma, o presente Regulamento aplica-se individualmente a cada uma delas, caso sejam adoptados sistemas individuais de climatização para cada uma, ou ao edifício como um todo, caso seja adoptado um sistema centralizado de climatização para todo o edifício (Dec. Lei n.º 79/2006, artigo 2.º, n.º 3).

Aos edifícios sujeitos a grandes intervenções de reabilitação, cujo custo da intervenção seja superior a 25% do valor do edifício, são aplicados os mesmos requisitos previstos para os edifícios novos da mesma tipologia (Dec. Lei n.º 79/2006, artigo 2.º, n.º 1, alínea e).

O processo de certificação dos edifícios é conduzido por Peritos Qualificados (PQs) em articulação com a ADENE, cujo exercício e funções se encontram definidos nos artigos 7.º e 8.º do Dec. Lei n.º 78/2006.

Das obrigações dos promotores ou proprietários dos edifícios ou equipamentos, é de salientar que os mesmos são responsáveis, perante o SCE, pelo cumprimento de todas as obrigações, quando aplicáveis, decorrentes das exigências do Dec. Lei n.º 78/2006, do RCCTE e do RSECE (Dec. Lei n.º 78/2006, artigo 9.º, n.º 2).

O prazo de validade dos certificados para os edifícios que não estejam sujeitos a auditorias ou inspecções periódicas, no âmbito do RSECE, é de 10 anos (Dec. Lei n.º 78/2006, artigo 10.º). As auditorias referidas no ponto anterior têm a seguinte periodicidade (Dec. Lei 79/2006, artigo 33.º):

- a) De dois em dois anos no caso de edifícios ou locais que funcionem como estabelecimentos de ensino ou de qualquer tipo de formação, desportivos e centros de lazer, creches, infantários ou instituições e estabelecimentos para permanência de crianças, centros de idosos, lares e equiparados, hospitais, clínicas e similares;
- b) De três em três anos no caso de edifícios ou locais que alberguem actividades comerciais, de serviços, de turismo, de transportes, de actividades culturais, escritórios e similares;
- c) De seis em seis anos em todos os restantes casos.

Assim, o Dec. Lei. n.º 79/2006 define no seu artigo 4.º os requisitos exigenciais, sendo de salientar no n.º 2, alínea a, uma taxa mínima de

renovação do ar por espaço, 0,6 renovações/hora (RCCTE, artigo 14.º, alínea b), e na alínea b, os valores máximos das concentrações de algumas substâncias poluentes no ar interior, que no caso do radão será 400 Bq.m^{-3} (RSECE, artigo 29.º, n.º 8, alínea c).

Quando na auditoria de QAI for detectada uma concentração mais elevada do que a concentração máxima de referência, o proprietário ou o titular do contrato de arrendamento ou locação do edifício deve preparar um Plano de Acções Correctivas da QAI (PAC-QAI) no prazo máximo de 30 dias a contar da data de conclusão da auditoria, submetendo-o à aprovação da APA; deve ainda apresentar os resultados de nova auditoria que comprove que a QAI desse edifício passa a estar de acordo com as concentrações de referência, finda a aplicação do PAC-QAI (RSECE, artigo 12.º, n.º 6).

No caso da ocorrência de problema grave de QAI, valor da concentração máxima de referência acrescido de 50% (RSECE, artigo 29.º, n.º 12), o prazo para a sua correcção pode ser reduzido para oito dias ou, se necessário, pode ser decretado o encerramento imediato do edifício (RSECE, artigo 12.º, n.º 7 e n.º 8).

Metodologia para a medição do radão (a nota técnica NT-SCE-02)

A necessidade de auditorias à QAI, deu origem à elaboração de uma nota técnica, a NT-SCE-02 de Outubro de 2009 (NT), que deve ser aplicada por Peritos Qualificados (PQs) do SCE, e que define as regras e orientações metodológicas a serem seguidas aquando da medição das substâncias poluentes do ar interior. A nota deve ser aplicada pelos PQs nas auditorias periódicas à QAI em edifícios de serviços com sistemas de climatização de $P_n > 25 \text{ kW}$, com a periodicidade definida no artigo 33.º do Dec. Lei n.º 79/2006.

Os poluentes a medir estão definidos no Anexo II da NT, sendo que para o caso do gás radão, e apesar da sua medição apenas ser obrigatória nas zonas graníticas conforme o definido no artigo 29.º, n.º8, alínea c) do RSECE, a respectiva concentração máxima aplica-se a edifícios em qualquer outra zona do país onde este seja analisado.

Os métodos de monitorização estão definidos na tabela 1, conforme Anexo III na NT.

Tabela 1. Métodos de monitorização do radão nos termos do RSECE.

Parâmetro	Método/Princípio de referência ¹	Método/Princípio equivalente ²	Características técnicas	
			Erro máximo admissível	Resolução
Radão (Rn)	Detectores de estado sólido	Detectores passivos	±10% concentração máxima	1 Bq.m ⁻³

¹O método de referência é um método estabelecido por legislação nacional, comunitária, ou internacional (ex, ISO) para a medição de um poluente específico do ar ambiente. Os métodos CEN (ex. ISO), são considerados métodos de referência.

²O método equivalente é um método de medição que estabelece uma resposta adequada para os fins em vista em relação ao método de referência; no método equivalente, os resultados não diferem do método de referência dentro de um determinado intervalo de incerteza estatística.

O Anexo V da NT define no seu ponto 3 o método de amostragem espacial e temporal para os diferentes poluentes, incluindo o gás radão. Neste último caso, o número mínimo de pontos de amostragem ou de medição em cada zona deve ser calculado pela seguinte expressão, arredondando para a unidade:

$$N_j = \frac{0,125 \times \sqrt{A_j}}{j^2}$$

Onde:

N_j – número mínimo de pontos de medida no piso de índice j ;

A_j – área do piso j , em m²;

j – índice de numeração do piso, desde o piso habitado de menor cota ($j=1$) até ao máximo de $j=3$.

O número de pontos fica assim condicionado à área do edifício bem como ao piso, restringindo a avaliação a pisos inferior ao 3º. Esta limitação relaciona-se com a densidade elevada do radão que, sendo mais pesado que o ar, tende a concentrar-se nos pisos térreos.

No que se refere à amostragem a mesma norma indica algumas regras complementares. Assim, se o piso habitado for o de menor cota e coincidir com o piso térreo, e neste não forem registados valores de concentrações acima do valor de concentração máxima de referência para o radão, não será necessário proceder a medições nos dois pisos seguintes. Caso o número de pisos habitados parcial ou totalmente subterrâneos seja superior a 3, deve garantir-se o mínimo de um ponto de medição em cada um deles, de preferência nos espaços próximos dos muros de contenção de terras.

O ponto 6 do mesmo anexo define o momento das medições por ponto de amostragem, que devem ser realizadas em períodos representativos do perfil normal de ocupação, utilização ou funcionamento do edifício.

No caso da utilização de detectores passivos, é recomendável que a amostragem seja iniciada 1 a 3 meses antes da realização da auditoria QAI; no caso da utilização de detectores sólidos (equipamentos de medição contínua), a medição deverá ser feita imediatamente após o final de períodos de inactividade do sistema de ventilação ou de funcionamento em regime de caudal mínimo, recomendando-se que estas sejam feitas ao início da manhã, com integração sucessiva de pelo menos 60 minutos. Deve ter-se em conta que estes equipamentos precisam de períodos iniciais de estabilização, que dependendo das características do equipamento podem variar entre 20 e 60 minutos.

A conformidade legal do parâmetro medido deve ser verificada mediante a observação da seguinte condição (Anexo VII, ponto 2):

$$[\text{Radão}]_{\text{MaxT}} \leq [\text{Radão}]_{\text{MR}}$$

Onde:

$[\text{Radão}]_{\text{MaxT}}$ corresponde ao valor máximo obtido de todos os pontos de medição/amostragem do edifício;

$[\text{Radão}]_{\text{MR}}$ corresponde à concentração máxima de referência.

Para se considerar em conformidade com a norma, a condição acima indicada deve ser verificada para todos os pontos de medição no edifício ou fracção autónoma.

Caso se verifique incumprimento relativamente à concentração máxima de referência, aconselha-se o recurso ao método de referência, seguindo as mesmas recomendações metodológicas descritas no ponto acima indicado do Anexo V. Pretende-se, com esta segunda verificação, eliminar o impacto das concentrações observadas durante o período de não ocupação do edifício, geralmente mais elevadas que durante o seu uso efectivo devido à reduzida ventilação, no valor médio diário estimado a partir dos detectores passivos. Esta segunda medição deverá ser a que consta no registo do certificado.

Caso esta condição não se verifique em um ou mais pontos de medição, o edifício deve ser considerado não conforme e ficar sujeito a um PAC-QAI, já atrás definido.

Resultados obtidos no Laboratório de Radioactividade Natural no contexto do SCE

O Laboratório de Radioactividade Natural (LRN), do Departamento de Ciências da Terra, da Universidade de Coimbra, tem vindo a efectuar medições de radão, no contexto do SCE, para empresas de certificação energética. Para o efeito têm sido utilizados detectores passivos, do tipo CR39, considerado método equivalente de medição conforme a NT-SCE-02, e cujo procedimento de revelação e contagem se encontra detalhadamente descrito em Pereira *et al.* 2010.

Desde o início do ano de 2009, o LRN forneceu *ca.* 650 detectores a empresas de certificação energética instalados maioritariamente em edifícios de serviços, dos quais 580 foram, até à data, revelados e contados. Destes, conhece-se o local de colocação de 541, cuja distribuição espacial pode ser conforme a figura 1.

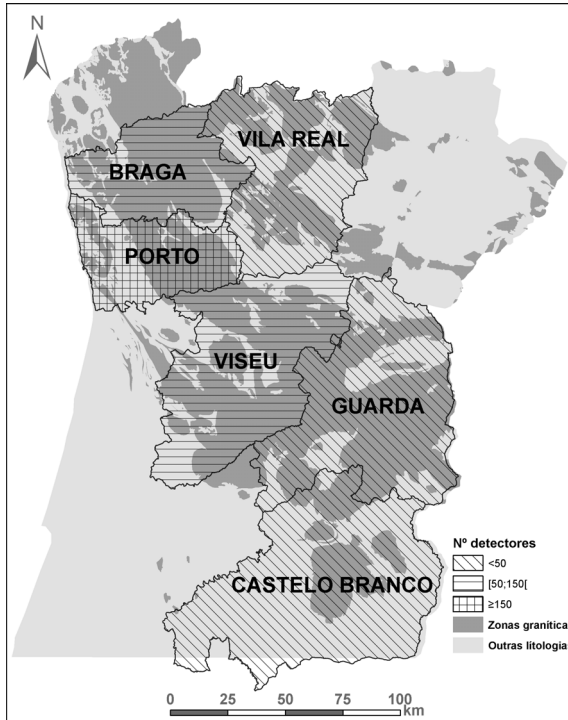


Figura 1. Distribuição espacial e densidade de colocação dos detectores passivos CR39 revelados pelo LRN.

Os resultados obtidos para os diferentes detectores são sistematizados na tabela 2 e na figura 2.

Tabela 2. Síntese dos resultados obtidos para a concentração de radão e do tempo de exposição dos detectores. n – numero de análises.

	n	Mínimo	Máximo	Média aritmética	Mediana
Concentração de Rn [Bq.m ⁻³]	541	2	5036	130	56
Tempo de exposição [dias]		16	370	68	55

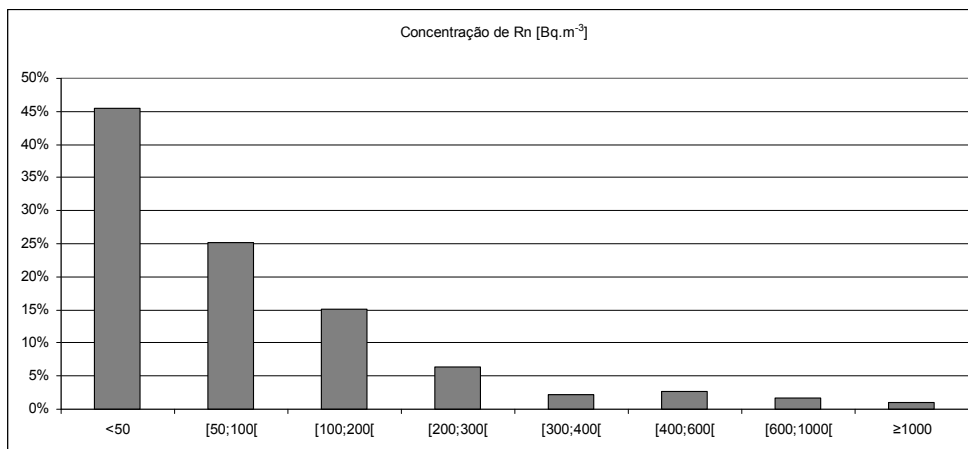


Figura 2. Histograma de frequências relativas dos dados referentes às análises de radão (valores em Bq.m⁻³).

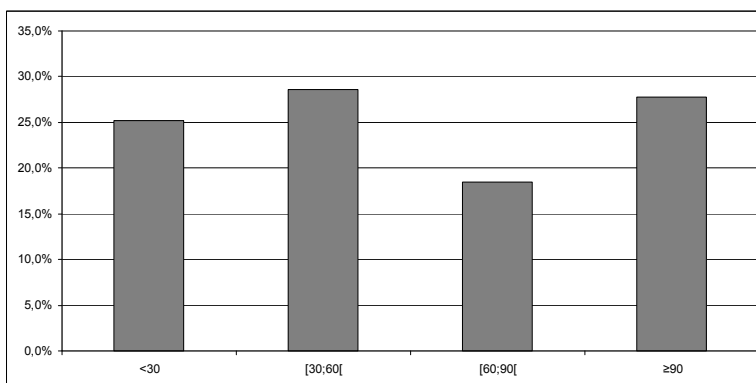


Figura 3. Histograma de frequências relativas do tempo de exposição dos detectores (dias).

O distrito do Porto (Figura 1) foi claramente objecto do maior número de medições, o que se compreende dada a elevada densidade populacional, e ainda ao facto do substrato geológico ser maioritariamente de origem granítica. Da análise dos resultados conclui-se ainda que em 95% dos detectores a concentração máxima de referência não foi ultrapassada (Figura 2); Contudo, 16 dos detectores apresentaram concentrações entre os 400 e os 600 Bq.m⁻³ e noutros 16 as concentrações situaram-se acima de 600 Bq.m⁻³.

Os detectores estiveram expostos, em média, 68 dias, embora o tempo de exposição seja variável no intervalo de 16 a 370 dias (Tabela 2). 25% dos detectores mediram as concentrações de radão num intervalo de menos de 30 dias situando este intervalo, em 38% dos casos em mais de 90 dias (Figura 3). Este intervalo de valores está conforme o disposto na legislação (NT-SCE-02, anexo V, ponto 6).

Na legislação vigente, se as concentrações ultrapassarem 50% do valor de referência, ou seja 600 Bq.m⁻³, a situação é considerada grave sendo necessária a aplicação de medidas correctivas com carácter de urgência (RSECE, artigo 29.º, n.º 12). Apesar de situados em substrato com potencial moderado a elevado de produção de gás radão, o número elevado de concentrações abaixo da referência pode justificar-se pela arquitectura e uso dos edifícios, bem como pela ventilação. Muitos dos edifícios estudados, maioritariamente de serviços, têm espaços com áreas amplas, boa ventilação (natural ou forçada) e, em geral, têm utilização exclusivamente diurna, período durante o qual são registadas as concentrações diárias de radão mais baixas (Neves e Pereira, 2004).

Conclusões

O SCE incorpora a avaliação da qualidade do ar interior em edifícios no qual se integra o parâmetro radão, gás radioactivo reconhecido como factor de risco ambiental por diversas instituições, entre as quais a Organização Mundial de Saúde, e que ocorre nos solos graníticos da região centro e norte de Portugal em concentrações muito significativas. Na legislação estabelecem-se, entre outras normas, a definição da concentração de referência e metodologias de amostragem e análise. Em face dos resultados obtidos no LRN, em algumas centenas de detectores, a grande maioria dos valores está abaixo da concentração de referência definida na legislação e que se explica, entre outros factores, pela arquitectura e pelo uso dos edifícios em causa, em geral de serviços, e em boa parte dispondo de sistemas de ventilação forçada.

Nota dos autores

Pretendeu-se com este trabalho fazer uma recolha sumária da legislação em vigor, com especial destaque para o gás radão. A sua leitura não deve dispensar a consulta integral da referida legislação.

Agradecimentos

Os autores dedicam o presente trabalho ao Professor Manuel Maria Godinho, o qual foi pioneiro nos estudos sobre a geologia do radão, tendo contribuído para a criação do Laboratório de Radioactividade Natural do Departamento de Ciências da Terra, do qual foi proponente e coordenador.

Bibliografia

- Darby, S.; Hill, D.; Auvinen, A.; Barros-Dios, J.M.; Baysson, H.; Bochicchio, F.; Deo, H.; Falk, R.; Forastiere, F.; Hakama, F.; Heid, I.; Kreinbrock, L.; Kreuzer, M.; Lagarde, F.; Mäkeläinen, I.; Muirhead, C.; Oberaigner, W.; Pershagen, G.; Ruano-Ravina, A.; Ruosteenoja, E.; Schaffrath Rosario, A.; Tirmarche, M.; Tomáscaron, L.; Whitley, L.; Wichmann, H-E.; Doll, R., (2005) - Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*; 330 (7845), 223-227.
- Decreto Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril – Define o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios. *Diário da República*; I série-A, N.º 67, 2411-2415.
- Decreto Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril – Define o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios. *Diário da República*; I série-A, N.º 67, 2416-2468.
- Decreto Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril – Define o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. *Diário da República*; I série-A, N.º 67, 2468-2513.
- Godinho, M.M.; Neves, L.J.P.F. & Pereira, A.J.S.C., (1999) - O gás radão – um inimigo público... mas não na cidade de Coimbra. *Cadernos de Geografia*, n.º especial (Actas do II Colóquio de Geografia de Coimbra, Coimbra 1999), 65-70.
- Nota Técnica NT-SCE-02 (2009) - Metodologia para auditorias periódicas de QAI em edifícios de serviços existentes no âmbito do RSECE. Agência Portuguesa do Ambiente, Direcção Geral de Energia e Geologia, Agência para a Energia. 43p.
- Neves, L.J.P.F & Pereira, A.J.S.C., (2004) - Radioactividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra. *Geonovas*; n.º 18, 103-114.
- Pereira, A.J.S.C. & Neves, L.J.P.F., (2010) - Geogenic controls of indoor radon in Western Iberia. *Proceedings of the 10th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping*, Prague, 205-210.
- Pereira, A.J.S.C. & Neves, L.J.P.F. & Pinto, P.G.N., (2010) - Concentração de gás radão em estabelecimentos de ensino da região centro – um risco natural a considerar na requalificação dos edifícios escolares. *Radioprotecção*; II, 16 e 17, 99-105.
- WHO (2009) - WHO handbook on indoor radon – a public health perspective. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 110p.
- WHO-IARC (1998) - Man-made Mineral Fibres and Radon. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans; Volume 43, 9p.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Instabilidade de taludes de escavação no Areeiro, Coimbra

Mário Quinta-Ferreira¹; Pedro Andrade²; António Saraiva³

^{1,2,3}Dep. Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, Portugal, ¹mqf@dct.uc.pt,

²pandrade@dct.uc.pt, ³asaraiva@dct.uc.pt

Palavras-chave: Estabilidade, Taludes, Riscos, Coimbra

Resumo

Analisam-se algumas instabilizações de taludes de escavação ocorridos na zona do Areeiro em Coimbra, que ocorreram preferencialmente após períodos de pluviosidade intensa. Os deslizamentos são do tipo planar, tendo ocorrido ao longo de camadas silto-argilosas de inclinação reduzida, intercaladas nas camadas areníticas dos Grés de Silves. São abordados os taludes Este e Oeste da Urbanização da Quinta do Areeiro e o talude Oeste da Escola do Areeiro. É também abordado, como termo comparativo, o talude Este da Quinta da Portela, situado no lado oposto do vale. No Areeiro a instabilização ocorre mesmo em taludes de escavação com apenas alguns metros de altura, enquanto, na Quinta da Portela, o talude de escavação com cerca de 15 metros de altura se apresenta estável. Conclui-se que as instabilizações são o resultado da conjugação de vários factores: estrutura geológica, geomorfologia e a presença de camadas silto-argilosas que exibem baixa resistência ao corte quando saturadas. Como as instabilizações mostram evidências de evolução no tempo, questiona-se a estabilidade a longo prazo dos terrenos adjacentes à Escola do Areeiro e indicam-se algumas medidas preventivas.

Key-words: *Stability, Slopes, Risks, Coimbra*

Abstract

Slope failures in the area of Areeiro in Coimbra are analysed. The slides occurred in excavation slopes mainly after periods of intense rainfall. They are of planar type and occurred along silt-clay layers with reduced inclination, inserted in the sandstone layers of the “Grés de Silves” formation. The studied slopes are the East and West slopes of the Urbanization of “Quinta do Areeiro” and the West slope of Areeiro’s School. For comparison purposes the East slope of “Quinta da Portela” located in the opposite side of the valley is also analysed. In Areeiro the failure occurs even in excavation slopes with just a few meters high while in “Quinta da Portela” excavation slopes 15 meters high are stable. It is concluded that the main factors leading to slope failure are the conjugation of the geologic structure with geomorphology, the presence of the silt-clay layers of low shear strength, when saturated by intense rainfall. As the processes responsible for slope failures

show evidence of evolution with time, the long term stability of the terrains close to the Areeiro's School are questioned, and some preventive procedures are described.

Introdução

O desenvolvimento urbano nas zonas de topografia acidentada, tende a requerer a execução de escavações e de aterros para a criação de plataformas que melhorem o aproveitamento do espaço e a acessibilidade. Estas modificações na geometria original dos terrenos, alteram o equilíbrio existente e tendem a criar condições de instabilidade. Com o passar do tempo, muitos dos taludes executados com deficiente qualidade acabam por instabilizar, designadamente quando ocorrem condições capazes de diminuir o factor de segurança, tais como é o caso da precipitação persistente (Quinta Ferreira *et al.*, 2005, 2006).

Apesar de nem sempre ser fácil de antever as condições que podem levar à instabilização de taludes, a execução de um estudo geológico dos terrenos e a respectiva caracterização geotécnica, fornecem informação essencial quer à sua prevenção, quer à remediação das instabilizações. Sendo a informação geológica fundamental para o entendimento dos fenómenos da geodinâmica externa e das consequências da intervenção humana nos terrenos, a sua importância tende a ser tanto maior, quanto maior for a interferência humana nos sistemas geológicos. No entanto, muitas vezes, a ocorrência de problemas tende a estar directamente dependente da interacção entre a geologia e a obra, sendo particularmente relevantes as singularidades geológicas que, mesmo com pequena expressão cartográfica, tendem a ser condicionantes do comportamento dos maciços naturais. Incluem-se nesta categoria as descontinuidades (*e.g.* falhas, diaclases, planos de estratificação) e as camadas ou os níveis com características geológicas particulares que podem conferir um comportamento problemático.

A ocorrência de instabilizações de taludes na zona de Coimbra tem vindo a causar problemas diversos e prejuízos elevados, constituindo um problema que importa prevenir e minimizar (Quinta Ferreira, Quinta Ferreira, 2004). No presente trabalho são analisadas algumas situações de instabilização de taludes de escavação executados para a implantação de arruamentos e edificios na zona do Areeiro, em Coimbra. Nestes taludes as singularidades geológicas condicionaram o tipo e o local das instabilizações, procurando-se um melhor entendimento das causas, e inferir as suas consequências.

Enquadramento geológico e mineralogia dos pelitos

Na zona estudada encontram-se os grés do Triásico, designados na literatura geológica como Grés de Silves. A estrutura geológica caracteriza-se genericamente por ser um monoclinal com pendor moderado para oeste, encontrando-se pontualmente algumas falhas que modificam, significativamente, o pendor e a orientação dos estratos. Nas vertentes da área estudada, os Grés de Silves apresentam-se geralmente cobertos por solos residuais de pequena espessura. Na zona central do vale encontram-se aluviões de espessura moderada, cobrindo um possível alinhamento de fractura.

De acordo com Miranda *et al.* (2010a,b) nos taludes analisados encontram-se níveis correspondentes a depósitos dos termos A1 e A2, e ainda e ao termo B1 de Palain (1976), equivalentes os dois primeiros à Formação de Conraria, e o último à Formação de Castelo Viegas (Azerêdo *et al.*, 2003). Enquanto que os níveis grosseiros avermelhados, arenoconglomeráticos, resultam essencialmente de deposição fluvial, os níveis pelíticos acinzentados, correspondem essencialmente a sedimentação lacustre de pequenas profundidades (Miranda *et al.*, 2010a,b).

Sabendo-se que os pelitos condicionam a ocorrência das instabilizações, procurou-se identificar a sua mineralogia, para o que foram recolhidas quatro amostras na base do termo A2, em camadas que sofreram deslizamentos. Duas amostras foram recolhidas no talude Oeste da Urbanização da Quinta do Areeiro e as outras duas no talude Oeste da Escola do Areeiro. Realizaram-se difractogramas de raios X da fracção total e da fracção argilosa ($<2\mu\text{m}$) em lâmina sedimentada. Os difractogramas foram obtidos num aparelho Phillips PW 3710 equipado com ampola de Cu a funcionar com uma tensão de 40 kV e uma intensidade de corrente de 20 mA. Os resultados dos difractogramas na fracção total revelaram a presença de quartzo, feldspato potássico, micas e vestígios de dolomite. Na fracção argilosa revelaram a presença de illite (predominante), caulinite (mais rara) e de um interestratificado de illite-vermiculite (Figura 1).

Episódios de instabilização

Na Figura 2 localizam-se os taludes de escavação analisados. Os três taludes com ocorrências de instabilização situam-se no lado Este do vale: 1- talude Este da Urbanização da Quinta do Areeiro, situado na retaguarda da urbanização que se encontra em construção; 2- talude Oeste da Urbanização da Quinta do Areeiro, no arruamento do lado nascente da Escola do Areeiro; 3- talude Oeste da Escola do Areeiro, no arruamento que separa a Escola do

Areiro do Parque Municipal de Campismo de Coimbra. O quarto talude localiza-se no lado oposto do vale e resultou da execução de uma grande escavação, sendo designado como talude Este da Quinta da Portela.

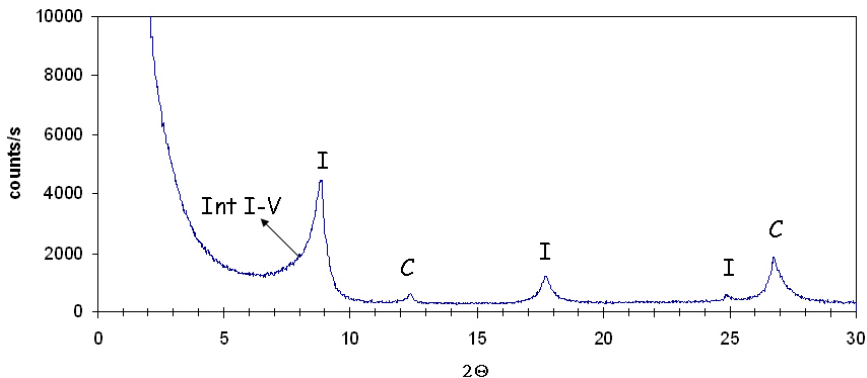


Figura 1. Diffractograma da fracção argilosa (<2µm) no estado normal, da amostra recolhida no talude Oeste da Urbanização da Quinta do Areiro. C – caulinite; I - ilite; Int I-V - interestratificado de ilite-vermiculite.

1- Talude Este da Urbanização da Quinta do Areiro

De entre os três taludes que sofreram instabilização, este é o que se encontra a cotas mais elevadas. Para a criação da plataforma da urbanização da Quinta do Areiro foi efectuada uma escavação vertical de vários metros, que seria estabilizada com um muro de contenção em gabiões. A escavação foi efectuada no limite Este da urbanização, no início de 2006. A instabilização ocorreu essencialmente na zona central da escavação (Figura 3). A escavação de um talude vertical entre a urbanização e o terreno acima, onde se encontra uma vivenda, foi a causa da instabilização. O movimento ocorreu pouco tempo após a escavação, durante a



Figura 2. Localização dos taludes utilizando uma imagem do Google Earth.

- 1- talude Este da Urbanização da Quinta do Areiro;
- 2- talude Oeste da Urbanização da Quinta do Areiro;
- 3- talude Oeste da Escola do Areiro;
- 4- talude Este da Quinta da Portela.

construção do muro de contenção em gabiões. Tratou-se de um deslizamento planar que ocorreu segundo os planos de estratificação dos pelitos existentes na base do talude. A ocorrência de uma falha na retaguarda do bloco instabilizado, com orientação $N48^{\circ}W$; subvertical, oblíqua à superfície de escavação, limitou a extensão do deslizamento até poucos metros de distância da vivenda no cimo da colina (Figura 3). O movimento do bloco deslizado abriu uma fenda de tracção com cerca de 2m de largura e com 3 a 5m de altura, tendo destruído parte do muro em fase de construção.

As camadas pelíticas de baixa resistência que permitiram o movimento apresentam um pendor de cerca de 16° e as suas coordenadas geológicas são: $N26^{\circ}W; 16^{\circ}SW$. São constituídas por pelitos (siltitos e argilitos) de cor cinzenta a cinzenta esverdeada, com espessura variando entre 0,1m e 0,3m (Figura 4). A estrutura interna das camadas de pelitos mostra que são constituídas por níveis muito finos, com alguns milímetros, de coloração alternadamente clara e escura, relacionados com a variabilidade dos processos de sedimentação lacustre que os formaram.



Figura 3. Vista geral da zona instabilizada do talude Este da Urbanização da Quinta do Areiro.

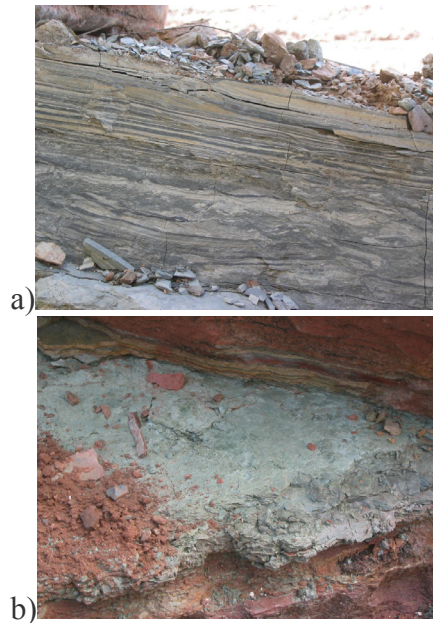


Figura 4. Pormenores da camada de pelitos que originou o deslizamento no talude Este da Urbanização da Quinta do Areeiro:

**a) níveis milimétricos de coloração clara e escura;
b) bordadura sul do plano de deslizamento, com pelitos de tonalidade esverdeada.**

A estabilização deste talude foi efectuada removendo a massa instabilizada, limitada inferiormente pela superfície de deslizamento, efectuando o reperfilamento do terreno e reconstruindo o muro de gabiões que foi parcialmente destruído com a instabilização.

2- Talude Oeste da Urbanização da Quinta do Areeiro

No início de Março de 2004, durante a execução de uma pequena escavação, com cerca de 1,5m a 3m de altura, para implantar o arruamento entre a Urbanização da Quinta do Areeiro e a Escola do Areeiro, ocorreu um deslizamento do lado da Urbanização, numa largura de cerca de uma dezena de metros (Figura 5). Para a ocorrência do deslizamento foi crucial a existência de camadas de menor resistência, com uma inclinação de 16° no sentido da escavação. Estas camadas correspondem aos níveis de pelitos na transição entre os termos A1 e A2 do Grés de Silves, intercalados nas camadas de arenitos siliciosos.

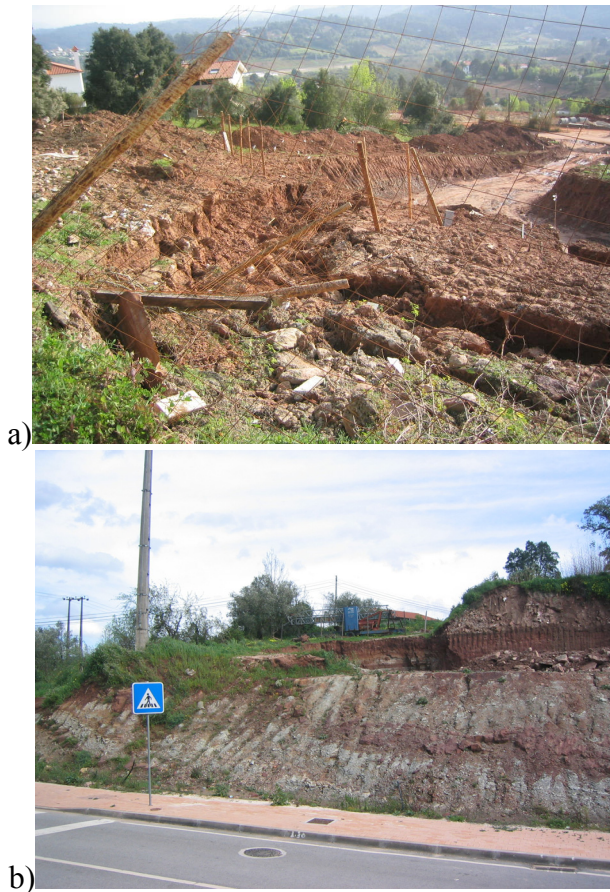


Figura 5. Talude Oeste da Urbanização da Quinta do Areeiro;

- a) Deslizamento planar para o arruamento em construção ocorrido em Março de 2004.**
- b) Geometria do talude após a remoção dos terrenos instabilizados e do reperfilamento final.**

A resolução desta instabilização passou pelo reperfilamento do talude, removendo os terrenos deslocados, diminuindo a altura do talude e reduzindo a sua inclinação para valores pouco acima do declive das camadas que ocasionaram a instabilização (Figura 5b). Apesar de ainda subsistir no talude uma pequena cunha de terreno com potencial de instabilização, por se encontrar limitada pelas camadas pelíticas de baixa resistência, não se verificaram posteriormente instabilizações pois o peso desta cunha é muito reduzido e por se verificar uma boa drenagem das camadas de pelitos que se encontram expostas.

3- Talude Oeste da Escola do Areeiro

A abertura da rotunda e do arruamento que liga a Circular Urbana de Coimbra ao Parque Municipal de Campismo, obrigou à execução de uma escavação com cerca de 10m de altura na rotunda, reduzindo gradualmente de altura até ser nula, no limite Sul da escavação, junto à entrada para o Parque Municipal de Campismo de Coimbra. Neste talude ficaram expostos os termos A1 e A2 do Grés de Silves. Na transição entre estes dois termos encontram-se camadas de pelitos cinzentos a esverdeados, inclinando cerca de 15° para oeste, ou seja para a face do talude. Desde a execução da escavação em 2004, até ao presente, verificaram-se diversos episódios de instabilização, apresentando-se os três principais, ocorridos nos invernos de 2005, 2007 e de 2010.

A instabilização de 2005 é ilustrada na Figura 6. O movimento ocorreu, segundo uma camada de pelitos que corresponde à transição do termo A1 para o termo A2 do Grés de Silves (Palain, 1976). O deslizamento planar de 2005 destruiu o sistema de drenagem superficial e deixou estrias de movimento na superfície da bancada dos pelitos, tal como se pode observar na Figura 6b. Após esta instabilização, o talude foi limpo dos materiais caídos, reperfilado e foram executados vários trabalhos de estabilização e de drenagem. Os pelitos, sendo menos permeáveis que a massa arenítica concentravam a água na sua parte superior, diminuindo a estabilidade. Para minorar este efeito, foi colocada uma máscara drenante na superfície dos pelitos, na extensão do talude afectada. A zona intervencionada foi coberta com uma geomembrana biodegradável. Também se procedeu à reconstrução do murete, na base do talude, junto ao passeio.

No Inverno de 2007 a porção de terreno para sul da instabilização anteriormente descrita, e que ainda não tinha sido afectada, acabou por sofrer um deslizamento planar idêntico ao de 2005, mas de menor dimensão (Figura 7a).

Face à evolução observada no talude e às suas características particulares, inferiu-se em 2009 que a zona norte deste talude, seria também afectada por deslizamentos planares.

No Inverno de 2010 os mesmos mecanismos que provocaram a rotura em 2005 e em 2007 desencadearam novamente um deslizamento planar na camada dos pelitos, mas agora na zona norte do talude, que ainda não tinha sido afectada. A instabilização de 2010 movimentou um volume de material muito superior ao de 2007, com uma altura de queda elevada, atingindo o passeio e a estrada (Figura 7b).



Figura 6. Deslizamento planar no talude Oeste da Escola do Areeiro, ocorrido em Dezembro de 2005. a) Aspecto geral da instabilização que ocorreu segundo uma camada de pelitos na base do termo A2 dos Grés de Silves; b) Bloco deslizado e estrias de movimento na superfície da camada de pelitos.



Figura 7. Deslizamentos planares de 2007 e de 2010 no talude Oeste da Escola do Areeiro. a) deslizamento do Inverno de 2007 na zona sul; b) deslizamento do Inverno de 2010 na zona norte.

4- Talude Este da Quinta da Portela

Este talude é o de maior altura de entre os quatro descritos e é o único que não tem apresentado problemas de instabilização (Figura 8), a não ser a

queda de alguns seixos e de solos, devido à lavagem da superfície de escavação pela água das chuvas. É constituído essencialmente por arenitos, com algumas intercalações de pelitos e apresenta a estratificação com orientação: N15°-45°W; 10°-27°SW.



Figura 8. Vista do talude Este da Quinta da Portela que, apesar de ter cerca de 15m, não apresenta problemas de instabilização.

A variabilidade da atitude das camadas está relacionada com a presença de falhas com pendores elevados, com direcção aproximadamente perpendicular à frente do talude, provocando uma variação da inclinação dos estratos na proximidade das falhas. Para o bom desempenho deste talude contribui essencialmente o facto de a estratificação pender para o interior do terreno, o que tende a conferir boas condições de estabilidade a longo prazo. Além disso, a estrutura mergulhante para oeste expõe apenas a parte superior do termo A2 (Formação da Conraria) e a parte inferior do termo B1 (Formação de Castelo Viegas), sendo menos frequentes os níveis pelíticos.

Análise e discussão das condições de estabilidade.

Tal como já foi referido, o talude Oeste da Escola do Areeiro, tem uma altura elevada e está virado para a via pública, podendo a sua rotura ocasionar danos humanos e materiais importantes, pelo que foi escolhido para uma análise mais pormenorizada. Procedeu-se ao seu estudo estrutural, tendo-se efectuado a determinação da orientação e da rugosidade de 176 descontinuidades. Recorrendo à projecção estereográfica foi possível verificar a existência das 3 famílias, indicadas pelas letras A, B e C na

Figura 9. As suas orientações, em termos médios, são respectivamente N24°W;15°SW, N26°W;67°SW e N55°E;82°SE. A família A corresponde aos planos de estratificação das camadas areníticas e pelíticas, abrangendo cerca de 55% das descontinuidades. A família B apresenta um pendor elevado (67°) e uma direcção semelhante à da família A, mas com uma maior dispersão. As fracturas desta família são muitas vezes coincidentes com a própria face do talude. As descontinuidades da família C são menos frequentes, têm um pendor elevado, e uma dispersão dos valores da direcção mais acentuada do que a verificada para as descontinuidades pertencentes à família A.

A aplicação do método de Markland (1972) confirmou a possibilidade de ocorrência de rotura planar, envolvendo as descontinuidades da família A, desde que o ângulo de atrito da superfície seja igual ou menor que 15°. Quanto aos arenitos, apresentando-se as superfícies das descontinuidades ligeiramente rugosas a quase lisas, o seu ângulo de atrito é muito superior a 15°, inviabilizando o deslizamento. Apenas os pelitos apresentam valores de atrito da ordem dos 15° ou inferiores, tal como já se tinha verificado nas instabilizações anteriores.

Existe ainda a possibilidade de ocorrência da rotura em cunha devido à intersecção entre as descontinuidades das famílias A e C, se bem que estas últimas sejam poucos frequentes, no entanto, através da aplicação do refinamento ao método de Markland (1972), proposto por Hocking (1976), verifica-se que a rotura planar, provocada pelas descontinuidades da família A, tem uma maior probabilidade de se verificar do que a rotura em cunha, tal como se confirmou nas observações “in situ” das instabilizações.

Como a resistência ao corte dos pelitos é muito inferior à dos arenitos siliciosos que constituem a generalidade do talude, a execução da escavação criou as condições geotécnicas propícias à ocorrência de deslizamentos planares pelas camadas dos pelitos. A retroanálise das instabilizações constitui um modo fiável para avaliar as condições que estiveram na origem da instabilização dos taludes.

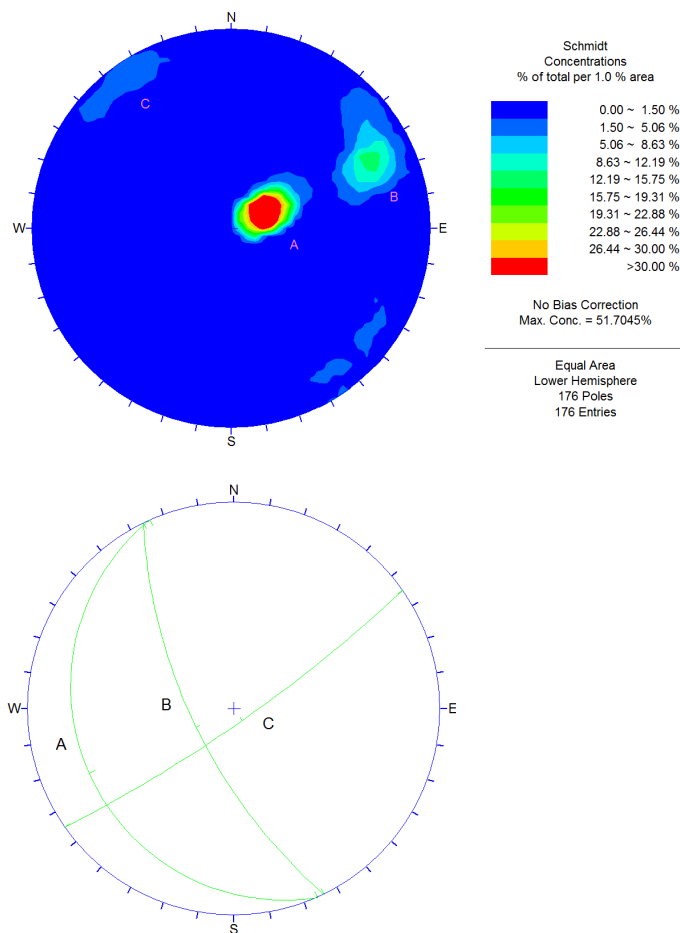


Figura 9. Diagramas de projecção estereográfica com as percentagens das concentrações dos pólos e com os planos das famílias das discontinuidades A, B e C, no talude Oeste da Escola do Areeiro, obtidos com o programa informático DIPS.

Na zona do Areeiro, a análise dos elementos geológicos dos dois lados do vale, Areeiro e Quinta da Portela, mostram que as principais condicionantes da ocorrência de deslizamentos são a conjugação da estrutura geológica com a geomorfologia e as características intrínsecas dos pelitos. Esta conjugação de factores favorece a instabilização de taludes de escavação, segundo planos com pequena inclinação, mesmo em taludes com apenas alguns metros de altura na zona do Areeiro. Na Quinta da Portela, estes mesmos factores favorecem a estabilidade dos taludes de escavação com cerca de 15 m de altura.

Os estratos responsáveis pela ocorrência das instabilizações são as camadas de pelitos de tonalidade acinzentada, por vezes esverdeada, que ocorrem intercaladas nas camadas de arenito avermelhado. Na sequência estratigráfica, o aparecimento dos pelitos marca a transição do termo A1 para o termo A2 dos Grés de Silves de acordo com a sistemática de Palain (1976). Os pelitos exibem resistência ao corte muito baixa, com ângulos de atrito que podem chegar aos 12°. A presença da água em situações de remoção do confinamento, ocasiona a degradação da estrutura interna dos pelitos, que são essencialmente monogranulares e muito porosos, favorecendo a sua rotura (Quinta Ferreira *et al.*, 2004). A estrutura geológica regional, genericamente com pendores moderados para oeste, a descompressão do maciço que é gerada pela abertura das escavações e a presença de camadas de pelitos propiciam a ocorrência de instabilizações segundo estas camadas, nos períodos de maior pluviosidade.

Considerações finais

Como os processos geradores das instabilizações mostram evidências de evolução com o tempo, em resultado da degradação progressiva dos pelitos quando descomprimidos, considera-se que as instabilizações tenderão a apresentar continuidade, em particular nas zonas do talude ainda não afectadas. Neste contexto questiona-se a estabilidade a longo prazo dos terrenos adjacentes à Escola do Areiro, pois que a descompressão do maciço, em conjunto com a molhagem, vão permitir a redução da resistência ao corte dos pelitos para valores muito baixos, podendo provocar novos movimentos de instabilização. Estes movimentos tenderão a ser desencadeados nas zonas mais sensíveis do maciço, que são as superfícies de escavação com uma interface livre e descomprimida.

Para prevenir a ocorrência de novas instabilizações, há que ter em conta a estratigrafia, a estrutura geológica, a geometria e a orientação da face dos taludes de escavação de modo a avaliar as zonas com possibilidade de se desenvolverem novas roturas no talude. Como a inclinação da estrutura geológica é inferior ao ângulo de atrito dos arenitos haverá pequena probabilidade de ocorrerem deslizamentos planares pelos arenitos. Apenas as camadas de pelitos podem exibir ângulos de atrito inferiores à inclinação da estratificação, pelo que a estabilidade está dependente destas camadas.

A caracterização estratigráfica permite identificar os locais onde ocorrem bancadas de pelitos. A análise estrutural facilita a antecipação das situações de instabilidade potencial. Há no entanto dificuldade em avaliar a

degradação temporal das características “in situ” dos pelitos, em resultado da descompressão junto às faces de escavação, e devido à saturação. A colocação de marcas topográficas na superfície dos taludes, e a sua leitura regular, em particular nos períodos de maior pluviosidade, permitiria acompanhar a evolução dos movimentos dos taludes e antecipar a ocorrência de episódios de instabilização. Deste modo seria possível tomar medidas adequadas antes de ocorrerem as instabilizações.

Bibliografia

- Azerêdo, A.C., Duarte, L.V., Henriques, M.H. & Manuppella, G. (2003) - Da dinâmica continental no Trásico aos mares do Jurássico Inferior e Médio. *Inst. Geológico e Mineiro*; 43p.
- Hocking, G.A (1976) - Method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics*; 13, 225–226.
- Markland, J.T. (1972) - A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slip type of failure is expected. *Imperial College Rock Mechanics Research Reprints*; 19, 1–10.
- Miranda, J., Pina, B., Matos, V., Calhã, A.M., Pena dos Reis, R., Pimentel, N. (2010a) - Estudo das fácies de leque aluvial em afloramento do Triásico Superior de Coimbra. e – *Terra*; 21 (9), 4p.
- Miranda, J., Pina, B., Matos, V., Calhã, A.M., Pena dos Reis, R., Pimentel, N. (2010b) - Estudo das fácies de leque aluvial em afloramento do Triásico Superior de Coimbra. VIII Cong. Nacional de Geologia, Braga. Apresentação em poster, 1p.
- Palain, C. (1976) - Une série détritico terrigène. Les “Grès de Silves”: Trias et Lias inférieur du Portugal. *Memórias, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa*; 25 (nova série), 377p.
- Quinta Ferreira, M., Lemos, L.L., Pereira, L.M (2006) - Influência da precipitação nos deslizamentos e no comportamento dos pelitos do Triásico, em Coimbra”. 10º Cong. Nacional de Geotecnia. 1, 61-72. Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
- Quinta Ferreira, M., Lemos, L.L., Pereira, L.M. (2005) - Influência da precipitação na ocorrência de deslizamentos em Coimbra, nos últimos 139 anos. *Geotecnia*, 104, Julho 2005, 17-30, Lisboa.
- Quinta Ferreira, M., Quinta Ferreira, T. (2004) - O problema das instabilizações de taludes em Coimbra. *Cadernos de Geografia*; nº 21/23, 127-142, Coimbra.
- Quinta Ferreira, M., Velho, J.L., Pereira, L.M. (2004) - Avaliação das características evolutivas dos pelitos do Triássico em Coimbra. 9º Congresso Nacional de Geotecnia; 1, 39-50. Universidade de Aveiro.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Litologias gnaisso-migmatíticas da faixa costeira Lavadores-Madalena: possível significado das paragêneses com hercinite

Maria dos Anjos Ribeiro¹; Helena Sant'Ovaia¹; Armanda Dória¹

¹DGAOT-FCUP/Centro de Geologia da UP, PORTUGAL, maribeir@fc.up.pt

Palavras-chave: Diatexitos, Metatexitos, Hercinite

Resumo

Na zona costeira de Lavadores – Madalena afloram rochas migmatíticas de natureza diatexitica e metatexitica, no bordo ocidental do maciço granítico pós-tectónico de Lavadores. O bandado migmatítico apresenta uma orientação geral NNW-SSE a NW-SE com dobramentos interfoliais fortemente assimétricos, de eixo em geral subvertical, mergulhante para SE. As litologias diatexiticas são leucocratas a mesocratas, sem foliação ou com foliação incipiente, de orientação muito irregular. As litologias metatexiticas apresentam foliação bem marcada no paleossoma metapelítico ou quartzo-pelítico, de orientação N120°-N140°, 75°SW. O neossoma ocorre em lenticulas irregulares, alongadas paralelamente à foliação do paleossoma, e apresenta tendência porfiróide. Nos diatexitos, quer na paragénese do paleossoma quer na paragénese do neossoma, existe hercinite com composição rica em Zn em Mg, em associação com silimanite e magnetite.

Key-words: *Diatexites, Metatexites, Hercynite*

Abstract

In Lavadores - Madalena coastal area outcrops, as host rocks at the western edge of the Lavadores post-tectonic granitic massif, migmatites (metatexites and diatexites). The banded migmatitic structure presents a general NNW-SSE to NW-SE orientation, and strong asymmetric interlayer folds with, generally subvertical axis, plunging to SE. The diatexites lithologies are leucocratic to mesocratic without foliation or with incipient one, with a very irregular orientation. The metatexites lithologies present a well defined foliation in the metapelitic or quartz-pelitic paleosome, trending N120-N140°, 75° SW. The neosome occurs as irregular lenticules, elongated parallel to the foliation paleosome, and with porphyritic tendency. In the diatexites paragenesis, either in the paleosome or in the neosome, occurs hercynite with a rich Mg-Zn composition, in association with magnetite and silimanite.

Introdução

Na zona costeira a sul da foz do Rio Douro, no litoral da cidade de Vila Nova de Gaia, aflora uma faixa de rochas metamórficas, com grande heterogeneidade litológica, incluindo rochas gnaisso-migmatíticas, metassedimentos pelíticos (micaxistos e quartzo-micaxistos) e anfibolitos (Sant’Ovaia *et al.*, 2008; Ribeiro *et al.*, 2010). Estas litologias foram descritas em termos geológicos, estruturais, petrográficos, petrofísicos e mineralógicos em Sant’Ovaia *et al.* (2008, 2010) e em Ribeiro *et al.* (2010). Os estudos petrográficos e mineralógicos já efectuados evidenciaram a ocorrência de hercinite, com considerável conteúdo em Zn, quer nas rochas metapelíticas, quer nas rochas gnaisso-migmatíticas associadas (Ribeiro *et al.*, 2010). Estes trabalhos incidiram sobre os afloramentos metamórficos da Praia das Pedras Amarelas e da Praia de Lavadores, um pouco a norte.

Estão em desenvolvimento estudos petrográficos e mineralógicos dos afloramentos metamórficos das Praias de Madalena Norte e de Madalena Sul, cuja descrição litológica e estrutural agora se apresenta.

No seu conjunto, este maciço metamórfico, aflorante numa faixa costeira estreita e irregular, no contacto ocidental do maciço granítico de Lavadores, apresenta variações consideráveis por predominância de diferentes litologias: na Praia das Pedras Amarelas é notória uma predominância de fácies diatexíticas, com predominância de rochas leucocratas, ainda que tendo associadas de modo subordinado fácies mesocratas de granularidade fina essencialmente biotíticas (Ribeiro *et al.*, 2010); nas Praias de Madalena Norte e de Madalena Sul são predominantes as fácies metatexíticas. O maciço não aflora de modo contínuo, quer devido à geometria do contacto intrusivo do Granito de Lavadores, quer porque fica tapado por depósitos arenosos do Quaternário, já um pouco consolidados, e pelos depósitos de praia actual. Embora as manchas de afloramento deste maciço metamórfico tenham exposição condicionada pela dinâmica costeira e pelas marés, quando expostas na zona de intermarés afloram sem alteração considerável.

Contexto geológico

Do ponto de vista geotectónico, este sector costeiro corresponde ao limite entre a Zona Centro Ibérica (ZCI) e a Zona Ossa Morena (ZOM), materializado numa zona de cisalhamento conhecida pela designação de Zona Cisalhamento Porto Tomar (ZCPT) (Ribeiro *et al.*, 1980). O Granito de Lavadores, de carácter pós-tectónico, com uma idade de instalação de $298 \pm 12,3$ Ma (Martins *et al.*, 2001), é intrusivo no maciço metamórfico

atrás referido, tendo instalação pós-cinemática, controlada pelas estruturas transtensivas associadas à deformação cisalhante (Sant’Ovaia *et al.*, 2008). De acordo com a bibliografia cartográfica, o Granito de Lavadores é intrusivo na Unidade de Lourosa, no bordo oriental (Oliveira *et al.*, 2010) e no bordo ocidental (Chaminé, 2000). Porém segundo a Folha 1 da Carta Geológica de Portugal, à escala 1/200.000, no seu bordo oriental, o Maciço Granítico de Lavadores contacta com uma unidade de micaxistos, gnaisses e migmatitos atribuídos ao “Complexo Xisto-Grauváquico” -Grupo de Douro, indiferenciado.

O maciço metamórfico aflorante na zona costeira de Vila Nova de Gaia entre as Praias de Lavadores e de Madalena Sul, constituindo o encaixante no bordo ocidental do Granito de Lavadores, apresenta litologias diversas de carácter gnaisso-migmatítico, com litologias metatexíticas e diatexíticas, com deformação varisca, materializada numa geometria de carácter cisalhante direito, mais evidente nos sectores onde predominam rochas gnaisso-migmatíticas de carácter metatexítico, com estrutura estromática mais marcada (Ribeiro *et al.*, 2010). O bandado migmatítico apresenta uma orientação geral NNW-SSE a NW-SE com dobramentos interfoliais fortemente assimétricos, de eixo em geral subvertical, mergulhante para SE. Os estudos do *fabric* magnético efectuado nestas litologias indicaram, igualmente, uma foliação magnética orientada NW-SE.

Litologias diatexíticas

As litologias diatexíticas afloram sobretudo na zona da Praia das Pedras Amarelas e na Praia de Salgueiros. Estas rochas apresentam características consonantes com as descritas por Sawyer (2008). Predominam rochas leucocratas sem foliação ou com foliação mais ou menos incipiente, com um padrão de orientação muito irregular. É a cor amarelada desta litologia predominante que é responsável pela designação da Praia. Afloram também, ainda que de modo subordinado, e com carácter intrusivos nas fácies leucocratas (Figura 1a), diatexitos mesocratas de granularidade fina, com abundantes lenticulas restíticas, orientados paralelamente à foliação (Figura 1b).

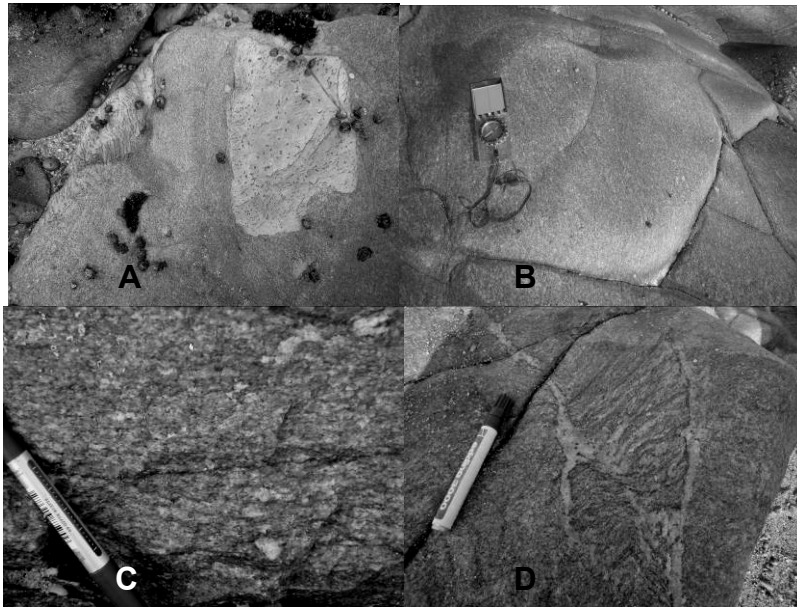


Figura 1. Aspectos litológicos dos diatexitos (200metros a sul dos rochedos das Pedras Amarelas, frente ao parque infantil).

As rochas diatexíticas mesocratas, quando os restitos são mais esporádicos, têm carácter isotrópico, e localmente apresentam tendência porfiróide (Figura 1c). Apresentam frequentes estruturas em rede (“diktyonitic structure”), marcadas por pequenos veios leucocratas, concordantes e secantes com a foliação (Figura 1d).

No afloramento do maciço metamórfico a norte das Pedras Amarelas (um pouco a sul do restaurante Casa Branca) as fácies leucocratas são minoritárias, predominando as rochas diatexíticas mesocratas finas com abundantes restitos, tendência porfiróide, e frequentes lenticulas e vénulas pegmatíticas. O afloramento deste maciço destaca-se do ponto de vista morfológico, relativamente ao granito de Lavadores, por não ocorrerem os grandes blocos arredondados (Figura 2a).

A foliação nos diatexitos mesocratas é de carácter irregular, quer em termos de penetratividade quer em termos de orientação: N120° a N170°. Apresentam fracturas com orientação N35° a N60°, inclinando 25° a 55°N, com preenchimento cataclástico turmalinizado e com grande extensão lateral, embora com espessuras milimétricas (Figura 2b).



Figura 2. Aspectos morfológico e fracturação com preenchimento cataclástico turmalinizado das rochas diatexíticas mesocratas (frente ao Restaurante Casa Branca) .

Litologias metatexíticas

Nas Praias de Madalena Norte e de Madalena Sul afloram litologias migmatíticas, com larga predominância de metaxistos (Figura 3). Estas rochas apresentam foliação bem marcada no paleossoma metapelítico a quartzo-pelítico, com orientação N120°-N140°, 75°SW (Figuras 3a e b). O neossoma ocorre em lenticulas irregulares, alongadas paralelamente à foliação do paleossoma, e apresenta megacristais de feldspato subédricos a arredondados, mais ou menos dispersos, com dimensão que atinge 1 a 2cm. Por vezes o neossoma tem carácter pegmatóide e existem estruturas pegmatíticas secantes à foliação e ao bandado migmatítico (Figura 3c). Porém algumas das estruturas pegmatíticas são posteriores ao Granito de Lavadores, porque cortam o contacto entre este e o maciço metamórfico envolvente.

Existem zonas lenticulares de espessura métrica de carácter diatexítico mesocrata, de granularidade grosseira e porfíróide, com encraves arredondados de paleossoma e algumas bandas de material melanocrata constituindo estruturas “schlieren” (Figura 3d). idênticas às descritas por Brown (2001).

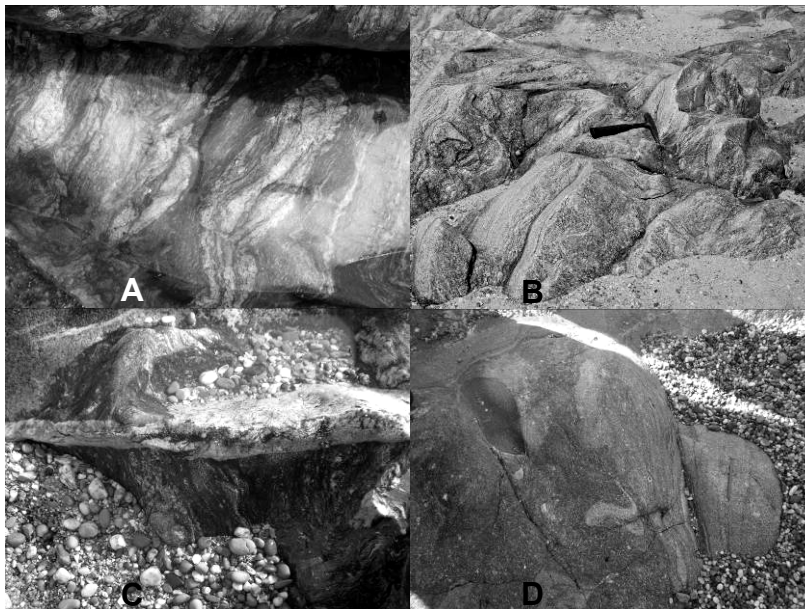


Figura 3. Aspectos litológicos dos matexitos (A, B e C) e dos diatexitos associados (D) (Praia da Madalena Sul).

Petrografia

O estudo petrográfico efectuado envolveu apenas as litologias diatexiticas leucocratas e mesocratas com biotite mais ou menos dispersa sem foliação ou definindo uma foliação incipiente e nos encraves restíticos metapelíticos. Os diatexitos apresentam bandado gnáissico marcado por diferenciação composicional. Apresentam uma mineralogia composta por: quartzo+ plagioclase + feldspato K + biotite +/- cordierite +/- granada +/- andaluzite+ magnetite+ hercinite. Nas estruturas “schlieren” e em encraves restíticos a mineralogia é composta por: biotite+ silimanite+ quartzo +/- moscovite+ magnetite + hercinite. A textura dos diatexitos é granular sem orientação preferencial embora a forma alongada dos nódulos restíticos e a sua distribuição marque uma orientação, mais ou menos evidente macroscopicamente.

A hercinite ocorre em aglomerados de pequenos cristais translúcidos de cor verde muito escura a negra, sempre em associação com silimanite fibrolítica e com magnetite (Figura 4). Apresenta uma composição rica em Zn e em Mg (cerca de 12% de ZnO e de MgO) (Ribeiro *et al.*, 2010).

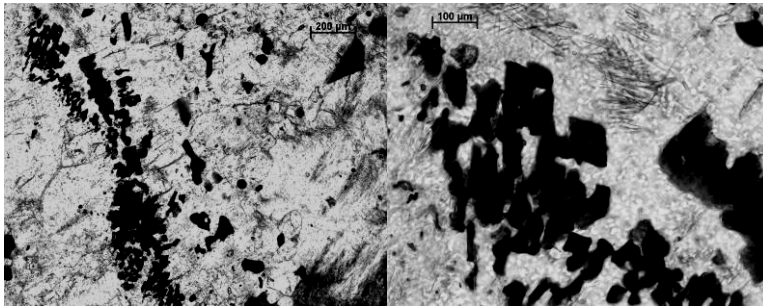


Figura 4. Aspectos textural da espinela hercínítica rica em Zn, em associação com sillimanite e magnetite.

Considerações finais

As litologias metatexíticas e diatexíticas aflorantes nas Praias do litoral de Vila Nova de Gaia apresentam deformação de carácter cisalhante, afectando paleossomas, leucossomas e mesossomas resultantes de um processo de migmatização por segregação e/ou por injeção, sin-cinemático relativamente à fase de deformação cisalhante. O carácter sin-cinemático da migmatização é interpretado com base nas relações geométricas e nas características litológicas das diversas fácies descritas, envolvendo fácies metapelíticas (micaxistos e quartzo-micaxistos), metatexitos com estrutura estromática, diatexitos leucocratas e diatexitos mesocratas. A ocorrência de hercinite rica em Zn, quer nos metassedimentos e nas estruturas “schlieren” quer nos núcleos restíticos dos diatexitos mesocratas, e o facto de a biotite não se observar em contacto com a espinela, ocorrendo esta em associação com a magnetite, a fibrolite e o quartzo, permite a interpretação de que a biotite foi consumida numa reacção de desidratação, geradora de hercinite, óxidos de Fe-Ti associados (série magnetite-ulvospinela) e “melt” (Ribeiro *et al.*, 2010), tal como referido por Nex *et al.* (2001). A abundância de magnetite nos metapelitos, já evidenciada pelos elevados valores de Susceptibilidade Magnética e curvas de Magnetização Isotérmica Remanescente (Sant’Ovaia *et al.*, 2009), e sua associação paragenética com espinela rica em Zn, favorece a correlação destas rochas metapelíticas com litologias pertencentes ao Complexo Xisto-Grauváquico (CXG), que ocorrem um pouco a oriente desta faixa costeira, e que apresentam paragénese ricas em estauroilite (Ribeiro *et al.*, 2008).

É de salientar a referência à ocorrência de espinela hercínítica em anfíbolitos da região de Torredeita (Viseu) (Neves & Godinho, 1992) e o facto de Valle Aguado *et al.* (2010) descreverem na região NE de Viseu a existência de migmatitos diatexíticos e metatexíticos associados a

metassedimentos com estaurolite relíquia. Estas duas referências relacionam-se ambas com o eixo de antiforma Porto-Viseu.

O maciço metamórfico descrito deverá corresponder ao bordo cisalhado da ZCI, ou poderá corresponder à cintura metamórfica Porto-Viseu (Valle Aguado & Azevedo, 2006).

Não é de excluir que as condições de fusão fossem também facilitadas por advecção de fluidos metamórficos e/ou magmáticos, registados na ZCPT, numa fase sin-cinemática, prévia à instalação do maciço granítico de Lavadores. O facto de os diatexitos serem predominantes no sector mais a norte poderá ser indicador de estarem associados a uma zona com maior taxa de fusão. Contudo de acordo com Sawyer (2008) quando se verifica simultaneidade de fusão e de deformação, o movimento do “melt” é significativo, conduzindo a elevadas fluxos e concentrações em zonas de maior deformação, sem que seja significativo de maior taxa de fusão.

Agradecimentos

Este trabalhos insere-se nas actividades do Centro de Geologia da UP (CGUP), com o suporte financeiro da FCT, POCI 2010.

Bibliografia

- Brown, M. (2001) - Orogeny, migmatites and leucogranites: A review. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*; 110, 4, 313-336.
- Carta Geológica de Portugal, escala 1:200 000, Folha 1. Serviços Geológicos de Portugal, 1992.
- Chaminé, H.I. (2000) - Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho – Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa Morena): implicações geodinâmicas. Universidade do Porto (Tese de doutoramento); 497p.
- Martins, H.C.B., Almeida, A., Noronha, F., Leterrier, J. (2001) - Novos dados geocronológicos de granitos da região do Porto e granito de Lavadores. *Actas do VI Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa e XII Semana de Geoquímica, Univ. Algarve, Faro*, 146-148.
- Neves, L.F., Godinho, M.M. (1992) - Geologia da região de Torredeita (Viseu, Portugal Central) com especial ênfase para os granitóides. *Memorias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Geol. Univ Coimbra*; 113: 1-28.
- Nex, P.A.M., Oliver, G.J.H., Kimmaird, J.A. (2001) - Spinel-bearing assemblages and P-T-t evolution of the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia. *Journal of African Earth Sciences*; 32, 3, 471-469
- Oliveira, M., Noronha, F., Lima, A. (2010) - Cartografia Geológica à escala 1/10.000 da região SW da Folha Geológica 9C – Porto. *Revista Electrónica de Ciências da Terra, Geosciences On-line Journal*, e –Terra, <http://e-terra.geopor.pt>. ISSN 1645-0388; 22 (16).
- Ribeiro, A., Pereira, E., Severo, L.G. (1980) - Análise da deformação na zona de cisalhamento Porto-Tomar, na transversal de Oliveira de Azeméis. *Comun. Serv. Geol. Portg.*, Lisboa; 66, 3-9.
- Ribeiro, M. A., Sant’Ovaia, H., Dória, A. (2010) - Ocorrência de hercinite em gnaisses e em metassedimentos da Praia de Lavadores (norte de Portugal). In: Flores, D & Marques, M.

- (eds). X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa. XVI Semana de Geoquímica. Memórias; 14, Resumos p.84; CD p. 183-190.
- Ribeiro, M.A., Dória, A., Sant’Ovaia, H. (2008) - Relações entre deformação, magmatismo e metamorfismo na região oriental do maciço do Porto. In. Sant’Ovaia, H., Dória, A. & Ribeiro, M.A. (eds), “GGET’08 – 8ª Conferência Anual, 24-25 de Julho 2008” – Resumos alargados, Memórias nº 13, Univ. Porto, Faculdade de Ciências, Depº Geologia, 39-43.
- Ribeiro, M.A., Sant’Ovaia, H., Dória, A. (2010) - Zn-rich hercynite-magnetite assemblage in gneiss and metasedimentary rocks from Lavadores (Northern Portugal). *Geoch. Cosmoch. Acta. Goldschmidt Abstracts 2010*; 74, (12, S1), A868.
- Sant’Ovaia, H., Ribeiro, M.A., Cardoso, I. (2008) - Caracterização estrutural e metamórfica do sector Lavadores - Pedras Amarelas: Estudos de ASM. In. Sant’Ovaia, H., Dória, A. & Ribeiro, M.A.(eds), “GGET’08 – 8ª Conferência Anual, 24-25 de Julho 2008” – Resumos alargados; Univ. Porto, Faculdade de Ciências, Memórias; 13, Depº Geologia, 81-36.
- Sant’Ovaia, H., Ribeiro, M.A., Gomes, C. (2009) - Magnetite-bearing mineral assemblages in igneous and metamorphic facies (N Portugal). *Geoch. Cosmoch. Acta. Special supplement*; 73 (13, S1): A1115.
- Sawyer, E.W. (2008) - Atlas of Migmatites. *The Canadian Mineralogist, Special Publications*, 9, NRC Reseach Canal, Ontário, Canadá, 331p.
- Stoddart, E.D. (1979) - Zinc-rich hercynite in high-grade metamorphic rocks: a product of the dehydration of staurolite. *American Mineralogist*; 64, 736-741.
- Valle Aguado, B., Azevedo, M.R. (2006) - Trajectórias PTt na cintura metamórfica de Porto-Viseu: implicações no magmatismo granítico. VII Congresso Nacional de Geologia, Estremoz 2006. Livro de Resumos; III, 1215-1218.
- Valle Aguado, B., Azevedo, M.R., Santos, J.F., Nolan, J. (2010) - O Complexo Migmatítico de Mundão (Viseu, norte de Portugal). *Revista Electrónica de Ciências da Terra, Geosciences On-line Journal, e –Terra*, <http://e-terra.geopor.pt>. ISSN 1645-0388; 16 (9).

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

A metodologia de Trabalho de Projecto no ensino e aprendizagem das Geociências

Ana Rola¹; Isabel Abrantes²; Celeste Gomes³

¹Centro de Geofísica, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL
anave@mail.pt

²IMAR-CMA, Departamento de Ciências da Vida, Universidade de Coimbra, PORTUGAL
Isabel.abrantes@zoo.uc.pt

³Centro de Geofísica, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL
romualdo@dct.uc.pt

Palavras-chave: Trabalho de Projecto, Ensino, Aprendizagem, Geociências

Resumo

O trabalho de Projecto (TP) pressupõe processos de aprendizagem centrados no aluno e envolve a planificação, a implementação e a avaliação de um projecto, bem como a comunicação dos resultados. Neste estudo pretendemos reflectir sobre a importância, as vantagens e os constrangimentos da metodologia do TP no processo de ensino e de aprendizagem em Geociências. A partir dos estudos analisados, pode concluir-se que o TP é uma metodologia relevante na aprendizagem em Geociências, para promover a cultura científica e o desenvolvimento de competências, importantes na formação dos jovens, enquanto cidadãos, e de contribuir para a valorização dos conteúdos científicos.

Key-words: *Project Work, Teaching, Learning, Geosciences*

Abstract

Project Work (PW) requires student-centered learning and involves the planning, implementation and evaluation of a project and, then, the presentation of its results. In this study we intend to reflect on the importance, benefits and constraints of PW methodology in the process of teaching and learning Geosciences. Taking into consideration the studies analyzed, we can conclude that PW is a methodological approach in learning in geosciences, and it can be used to promote scientific literacy and develop important competences in the education of young people as citizens and to contribute to the enhancement of scientific contents.

Introdução

O Trabalho de Projecto (TP) remonta às Academias de Arquitectura de Roma e Paris, no século XVI, e ao ensino de engenharia no século XVIII,

em França, na Alemanha e na Suíça (Knoll, 1997). No século XX ganha notoriedade com Kilpatrick, através da publicação do artigo “*The Project Method*”, no qual apresenta o conceito de projecto e a sua importância educativa (“*The word 'project' is perhaps the latest arrival to knock for admittance at the door of educational terminology*”. Kilpatrick, 1918, p. 319). Apesar da popularidade que alcançou, à data, esta metodologia não se afirmou devido, sobretudo, às críticas de Dewey e outros educadores. Ressurge, na década de 70 do século XX, como alternativa ao ensino tradicional, centrado no currículo e na figura do professor, responsável pela transmissão de conhecimentos (Knoll, 1997).

Neste estudo pretendemos, na sequência da análise de trabalhos realizados e de outros em desenvolvimento, reflectir sobre a importância, as vantagens e os constrangimentos da metodologia do TP nos processos de ensino e de aprendizagem em Geociências.

O Trabalho de Projecto

O TP consiste num conjunto de processos de aprendizagem, em que o aluno planifica e desenvolve um projecto na procura de uma solução, ou soluções, para um problema do seu interesse. O TP “*desenvolve-se em grupo, logo em confrontos, com conflitos cognitivos, com questionamentos, conversas e debates de ideias e pontos de vista diferentes. Cada um constrói o conhecimento mas esta construção faz-se num processo de interacção com os colegas (nos pequenos grupos formados ou no grupo turma), com o professor, com a instituição escola, com a comunidade*” (Leite e Santos, 2004, p. 3). É uma metodologia centrada no aluno, onde este intervém de forma activa no processo de construção e mobilização de conhecimento e no desenvolvimento de outras competências sociais e específicas, através da realização de um projecto. Esta metodologia exige “*(...) an active process of cognition, searching and acquiring knowledge instead of the traditional form of education where the students are only regarded as persons acquiring knowledge.*” (Kolmos, 1996, p. 146).

Abrantes *et al.* (2002) apresentam algumas características fundamentais do TP que o distinguem de outras metodologias. O projecto corresponde a uma actividade intencional que se desenvolve a partir de um objectivo e problema inicial, aos quais estão associados um produto final. Pressupõe iniciativa, autonomia e cooperação por parte de quem desenvolve o trabalho. Exige autenticidade, uma vez que não se pretende uma “*(...) mera reprodução de um trabalho já feito por outros (...)*” (Abrantes *et al.* 2002, p. 28). Envolve alguma complexidade e incerteza, própria da

definição de uma situação-problema, capaz, por sua vez, de gerar novos problemas. Finalmente, exhibe um carácter prolongado e faseado, compreendendo, pelo menos, três fases essenciais: a planificação do projecto, com definição do problema e planeamento, a execução e a avaliação do trabalho desenvolvido. Segundo Abrantes *et al.* (2002, p. 30) “*É preciso planear e calendarizar as actividades a desenvolver, gerir o desenvolvimento do trabalho durante o qual surgirão imprevistos e obstáculos diversos e, finalmente, avaliar o produto final e o percurso realizado*”.

Nas Orientações de Área de Projecto dos Cursos Científico-Humanísticos e de Projecto Tecnológico dos Cursos Tecnológicos (DGIDC, 2006), área curricular que favorece o TP como metodologia, a fase de planificação é dividida em duas etapas: selecção do tema/problema e do grupo de trabalho e concepção e elaboração do projecto. Realçam, desta forma, a importância da selecção e definição do problema, que deve ser sempre do interesse do aluno, mesmo que a sugestão do tema não parta dele “*A escolha do problema pode partir de ideias dos alunos ou de sugestões do professor.*” (Abrantes *et al.*, 2002, p. 33).

Outra característica fundamental em TP é a apresentação dos resultados/solução do problema perante os colegas, escola ou comunidade (Kolmos, 1996). De acordo com este investigador “*There will always be a final result, which partly rounds off the Project work process from a cognitive point of a view, and partly from a presentation point of view (...)*” (Kolmos, 1996, p. 146). A comunicação dos resultados do projecto conduzirá, assim, ao desenvolvimento da confiança, da auto-estima e de competências de comunicação oral e escrita, importantes nas diversas áreas científicas.

Em TP, a intervenção do professor é muito discutida. Apesar da inversão da ênfase do ensino para a aprendizagem, o professor continua a desempenhar um papel fundamental em todo o processo, o de coordenador da aprendizagem do aluno. Assim, “*(...) cabe aos professores apresentar propostas desafiantes, que conduzam os alunos a novas experiências e ao contacto com diversas realidades*” (Abrantes *et al.*, 2002, p. 13). O professor deve orientar, através de sugestões, o trabalho realizado pelo aluno, apoiar e auxiliar a superar os obstáculos, sempre com uma atitude de crítica construtiva, de modo a evitar o desânimo e a frustração, em especial nas etapas intermédias do projecto (Monteiro, 2009). O TP exige, do professor, capacidade de liderança, de gestão de conflitos e de auto-confiança, para não desistir perante adversidades, e ainda conhecimento dos interesses dos alunos. Contudo, o professor deve procurar manter um certo

distanciamento do trabalho, de modo a otimizar o desenvolvimento de competências e evitar que os alunos estejam a realizar um projecto, com o qual não se identificam, especialmente se o tempo de realização do projecto for longo (Abrantes *et al.*, 2002). Fried-Booth (2002, p. 18), a respeito de projectos longos, afirma que *“The irony is off course that the more passive you appear to be, the more successful the project is in terms of student autonomy and independent learning. Passivity does not indicate inactivity”*.

No entanto, *“Not all projects are successful. Some teachers are too inexperienced to guide the process well. They may expect too much ability on the part of the learners to take control of the project without having laid the necessary groundwork or they may fail to let students take the lead when they can. (...) Some may feel teachers are abdicating their roles if they do not provide answers, or they may not want to learn with and from their classmates”* (Wrigley, 1998).

Em Portugal, um estudo realizado com professores de Área de Projecto, revelou alguns pontos fortes e fracos do papel do professor e do aluno, na implementação da metodologia de TP (Sampaio, s/d). Para os docentes, realizar TP em Área de Projecto *“(...) desenvolve a iniciativa e a criatividade, estimula a comunicação, o trabalho de grupo e o espírito crítico (...)”* e mostra também algumas fragilidades como a *“(...) falta quer de empenho quer de motivação dos alunos. (...) os educandos com interesse em participar activamente, ao longo do ano lectivo, reduzem as suas expectativas (...), sendo, portanto, muito difícil manter a motivação dos alunos num patamar elevado.”* ou ainda *“(...) a falta de empenho dos professores (talvez devido ao descrédito da aplicabilidade desta área e/ou dificuldade em atingir os objectivos propostos), a imperícia dos estudantes em pesquisar, a dificuldade em concretizar o produto final e de gerir o tempo.”* (Sampaio, s/d, p. 4). Este estudo destaca a importância do professor no desenvolvimento de TP. Um professor motivado, confiante e conhecedor da metodologia será capaz de incentivar e orientar os alunos na realização do projecto, de modo a que o sentimento de frustração não invada o trabalho. Assim, *“Apesar do reconhecimento das vantagens da metodologia de trabalho em projecto existe um hiato entre tal reconhecimento e o domínio dessas metodologias por parte dos profissionais envolvidos no respectivo desenvolvimento.”* (Capucha, 2008, p. 8).

Trabalho de Projecto no Ensino

A reforma curricular do ensino básico (1º, 2º e 3º ciclos) e secundário, (Decreto-Lei nº6/2001 e Decreto-Lei nº7/2001, de 18 de Janeiro), introduziu

a Área de Projecto, uma área curricular não disciplinar, com vista à concepção, realização e avaliação de projectos, que substituiu a Área-Escola. A Área de Projecto tem um carácter interdisciplinar e transdisciplinar, com articulação dos saberes das diferentes disciplinas, com ênfase no aluno e no processo de aprendizagem. Em Área de Projecto procura-se, “(...) *recolhendo, analisando, seleccionando informação, resolvendo problemas, tomando decisões adequadas, justificando essas decisões e comunicando-as, por escrito e oralmente, utilizando suportes diversificados, nomeadamente as novas tecnologias da informação/comunicação (...)*”, que os alunos sejam capazes de articular “(...) *numa dimensão inter e transdisciplinar, os saberes teóricos e práticos;*” das diversas áreas curriculares disciplinares (DGIDC, 2006, p. 9). O TP assume-se como uma metodologia relevante para Área de Projecto, ao potenciar o “(...) *desenvolvimento da integração e construção de saberes escolares interdisciplinares; desenvolvimento de competências e saberes sociais, valores e atitudes cívicas, mobilização dos alunos e da comunidade na construção social educativa.*” (Leite e Santos, 2004, p. 1).

A metodologia de Trabalho de Projecto e a aprendizagem baseada em problemas podem aparecer de forma indistinta nos documentos oficiais de Educação, como acontece em Orientações de Área de Projecto dos Cursos Científico-Humanísticos e de Projecto Tecnológico dos Cursos Tecnológicos (DGIDC, 2006). Estas metodologias são semelhantes e promovem a aprendizagem, enquanto processo activo edificado sobre o interesse, a curiosidade e a experiência do aluno, e não tanto no processo de ensino, no sentido tradicional de transmissão de conhecimentos. A diferença entre aquelas reside no papel do aluno, atendendo a que “(...) *the characteristic of problem-based learning is role of the learner who chooses the problem and/or methods to be used.*” (Kolmos, 1996, p. 146).

O TP é uma metodologia a privilegiar no processo de ensino e de aprendizagem em contexto de sala de aula (Dias e César, 2008), como em actividades extracurriculares, porque “*Aprende-se quando os conteúdos, o processo, as actividades, e os objectivos de aprender têm significado, têm sentido para o indivíduo ao nível cognitivo, emocional-afectivo e social*” (Leite e Santos, 2004, p. 4).

Também no ensino superior, o TP tem sido implementando como metodologia. Bourner *et al.* (2001) analisaram as experiências vivenciadas pelos alunos do primeiro ano dos cursos de Contabilidade e constataram que os alunos consideravam a experiência positiva, dado que «(...) *develops a range of skills that are important to students (...), including “working with others in a group”, “researching”, “analysis of data” and “action planning*

and organising» (Bourner *et al.*, 2001., p. 29). Resultados similares foram obtidos com alunos do primeiro e segundo ano de Ciências Veterinárias: “*Students generally responded positively to group project work and indicated that it was a useful learning tool and a welcome variety in assessment*” (Mills e Woodall, 2004, p. 484). Numa experiência piloto por TP, realizada na Universidade do Minho, Portugal, obtiveram-se resultados significativos na aprendizagem de conteúdos específicos e na motivação dos alunos para a aprendizagem (Lima *et al.*, 2005). Neste estudo “*Foi reconhecido por uma grande parte dos alunos que a aprendizagem é mais eficiente e eficaz neste modelo por projectos, pois há mais motivação, maior responsabilização por parte dos alunos, maior nivelamento do esforço de aprendizagem e uma aprendizagem mais gradual e contínua*” (Lima *et al.*, 2005, p. 1794).

O Trabalho de Projecto na Aprendizagem de Temas de Geologia

O TP é uma realidade em cursos de Geociências: “*(...) project work is a very important component of the course. The Environmental Geoscience Teaching Team provides a list of different projects from which you can choose a subject that interests you, however students are actively encouraged to devise and design their own projects*” (School of Earth & Ocean Sciences, s/d).

No ensino básico e secundário, é uma metodologia utilizada, essencialmente, em Área de Projecto. No entanto, os estudos realizados noutras disciplinas e em contexto extracurricular revelaram que o TP pode constituir uma notável metodologia de aprendizagem, que possibilita a construção de conhecimentos e o desenvolvimento de outras competências sociais, comunicacionais e específicas, no âmbito do ensino das Geociências (Correia e Gomes, 2009; Pires *et al.*, 2009; Rocha *et al.*, 2009; Rola e Gomes, 2010; Rola *et al.*, em preparação).

Metodologia

Neste estudo foram consideradas cinco publicações sobre a utilização de TP como metodologia para o desenvolvimento de temas de Geologia, com alunos do ensino básico e secundário (Tabela 1).

No trabalho sobre “*Actividades práticas em contexto extracurricular, com alunos do 9º ano de escolaridade*”, o desenvolvimento de trabalhos de projecto “*(...) pode classificar-se como francamente positivo pelas aprendizagens que proporcionou e pelo facto dos resultados constituírem*

uma base para a realização de exercícios práticos de interpretação de dados, no âmbito da radioactividade natural em águas de nascente do concelho da Lousã” e também pela oportunidade, uma vez que, *“Os alunos desenvolveram competências no âmbito das actividades práticas (...)”* (Rocha *et al.*, 2009, p. 602).

Tabela 1. Trabalhos em Geociências com recurso à metodologia de Trabalho de Projecto.

Tema	Referência
Magnetismo ambiental e poluição de solos	Correia e Gomes (2009)
Radioactividade em águas de consumo	Pires <i>et al.</i> (2009)
Radioactividade natural em águas de nascente	Rocha <i>et al.</i> (2009)
Diversos temas de Geologia	Rola e Gomes (2010)
Terra e a saúde	Rola <i>et al.</i> (em preparação)

A realização de TP permitiu uma mudança das concepções dos alunos sobre o próprio significado de TP e o desenvolvimento de competências sociais e transversais às diversas disciplinas, como reconhecem os alunos: *«(...) “desenvolve a capacidade de trabalho em grupo”; “torna-nos críticos” e “ensina-nos a realizar trabalhos importantes para o resto da nossa vida”»* (Rola e Gomes, 2010, p. 3). Simultaneamente, possibilita o reconhecimento da importância das Geociências para a comunidade através da *“(...) realização de trabalhos de pesquisa, recorrendo à metodologia de trabalho de projecto, que aproximem a escola da comunidade em que se insere.”* e, estes trabalhos *“(...) facultaram aos alunos informação específica sobre amostras de solos, sedimentos e poeiras do concelho em que habitam (...) e permitiram-lhes (...) utilizar métodos de estudo que não conheciam, numa área do conhecimento pouco divulgada nas escolas.”* (Correia e Gomes, 2009, p. 836 e p. 847).

Os estudos de Correia e Gomes (2009) e Rola e Gomes (2010) mostraram a importância da divulgação do produto final do TP no desenvolvimento de competências comunicacionais. A apresentação do trabalho desenvolvido no âmbito do magnetismo ambiental, no *“(...) III*

Congresso dos Jovens Geocientistas, constituiu um momento de aprendizagem e brio pessoal, um momento de referência que irá certamente perdurar na memória dos jovens participantes neste projecto” (Correia e Gomes, 2009, p. 847). Além disso, «*A possibilidade da realização de um projecto científico e sua apresentação perante os pares, num congresso, constituiu uma mais-valia para a sua formação, como se constata nas opiniões dos alunos sobre o trabalho de projecto realizado: “Consegui entender melhor como fazer trabalhos científicos”; “Ensinou[-me] a encarar com empenho o trabalho”(...)*» (Rola e Gomes, 2010, p. 3).

Num estudo de avaliação, com alunos do 9º ano de escolaridade, sobre a temática “Terra e a Saúde”, através da realização de TP foram realizados os trabalhos seguintes: 1) “*O Mercúrio e a saúde*”; 2) “*Arsénio: um veneno ou um medicamento?*” 3) “*Geofagia*”; 4) “*Poluição da atmosfera...as poeiras que respiramos*”; 5) “*Factores ambientais do cancro: Amianto e radão*”; 6) “*Ferro...de que modo influencia a saúde?*” 7) “*A acção do flúor na saúde*”; 8) “*Selénio: de que modo influencia a saúde?*” A avaliação teve por base as respostas dos participantes a um questionário aplicado antes do início dos trabalhos e após a comunicação dos resultados, numa sessão decorrida na escola. O estudo revelou que os alunos haviam tomado contacto com a temática principalmente através da televisão e da escola. No entanto, evidenciavam falta de conhecimentos e algumas ideias incorrectas, como, por exemplo, as doenças serem determinadas apenas por factores biológicos. Após a realização dos trabalhos, os alunos revelaram melhorias importantes, especialmente a nível da compreensão no âmbito dos subtemas estudados e do tema, em geral (Rola *et al.*, em preparação).

Os estudos analisados salientam também o estímulo a nível do interesse pela área científica em apreço e a aspiração de prosseguir estudos nessa área. A realização de trabalhos através da metodologia de TP contribuiu para a aprendizagem das ciências, em particular da Geologia, e para a formação dos alunos enquanto cidadãos (Rola e Gomes, 2010). Por outro lado, “*(...) a escolha de contextos particularmente aliciantes para os jovens, onde os conteúdos assumam relevância é uma das formas que se mostrou promissora para fomentar o ensino das Ciências num meio onde predomina a falta de incentivo pelo prosseguimento de estudos*” (Pires *et al.*, 2009, p. 593).

A realização de projectos contextualizados, em actividades curriculares ou extracurriculares, constituiu uma estratégia importante para a construção do conhecimento em Ciência, numa perspectiva interdisciplinar, e, em particular, em Geologia. Revelou-se igualmente importante no

desenvolvimento de outras competências, nomeadamente, de capacidades, de atitudes e de valores.

Conclusão

Os estudos de avaliação da metodologia TP têm revelado que a sua implementação, em diferentes níveis de ensino (básico, secundário e superior), apresenta vantagens para os alunos, na medida em que os envolve no planeamento, execução e avaliação de projectos, construídos a partir de problemas, significativos e interessantes para quem desenvolve o trabalho. Os alunos têm a oportunidade de desenvolver competências importantes para o seu futuro, o espírito crítico, a autonomia, a criatividade e a capacidade de trabalhar em grupo. A apresentação do produto final do projecto promove o desenvolvimento de competências comunicacionais, tanto a nível oral como escrito. Os estudos destacam ainda a construção e mobilização de conhecimentos como resultado importante da aplicação do TP.

Com base nos trabalhos analisados, podemos concluir que o TP constitui uma metodologia relevante de aprendizagem em Geociências, capaz de promover a literacia científica e o desenvolvimento de competências (específicas, sociais e comunicacionais) importantes na formação dos jovens e de contribuir para a valorização dos conteúdos científicos. No entanto, esta metodologia nem sempre é fácil de concretizar, provavelmente, devido a dificuldades sentidas por alunos e professores, por ser algo diversa do ensino tradicional.

Em suma, consideramos que a implementação da metodologia de TP no ensino deve ser promovida, tanto em contexto de aula, como em actividades extracurriculares e que é importante continuar a realizar estudos de investigação e avaliação que traduzam as vantagens e/ou os constrangimentos da aplicação desta metodologia nos processos de ensino e de aprendizagem em Geociências.

Dedicatória: As autoras dedicam este estudo ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho, associando-se à Homenagem ao Homem, ao Geólogo e ao Professor.

Bibliografia

Abrantes, P., Figueiredo, C., Simão, A. (2002) - Reorganização curricular do ensino básico: novas áreas curriculares. Vol. 2. Lisboa. Departamento da Educação Básica, Ministério da Educação.

- Bourner, J., Hughes, M., Bourner, T. (2001) - First-year undergraduate experiences of group Project Work. *Assessment & Evaluation in Higher Education*; 26 (1), 19-39.
- Capucha, L. (2008) - Planeamento e avaliação de projectos – Guião prático. Lisboa: Ministério da Educação, Direcção-Geral de Inovação e Desenvolvimento Curricular.
- Correia, G., Gomes, C. (2009) - Estudos ambientais na Área de Projecto do 12º ano de escolaridade: uma aplicação prática. XIII Encontro Nacional de Educação em Ciências, Castelo Branco; 836-848.
- Decreto-Lei Nº 6/2001 de 18 de Janeiro - Novos currículos do ensino básico.
- Decreto-Lei Nº 7/2001 de 18 de Janeiro - Novos currículos do ensino secundário.
- DGIDC - Direcção-Geral de Inovação e de Desenvolvimento Curricular (2006) - Orientações. Área de Projecto dos Cursos Científico-Humanísticos. Projecto Tecnológico dos Cursos Tecnológicos. Lisboa: Ministério da Educação, Direcção-Geral de Inovação e Desenvolvimento Curricular. Acedido em http://www.dgicd.min-edu.pt/secundario/Documents/AP_PT_Homolog.pdf, em 30 de Outubro de 2010.
- Dias, E., César, M. (2008) - Trabalho de projecto associado ao trabalho colaborativo: Cidadania em cenários de educação formal. In Sousa, F., Carvalho, C. (eds.). *Actas da conferência ibérica: Educação para a cidadania* (pp. 245-253). Lisboa. CIEFCUL.
- Fried-Booth, D. (2002) - *Project work*. Oxford: Oxford University Press.
- Kilpatrick, W.H. (1918) - The project method. *Teachers College Record*; 19 (4), 319-335.
- Knoll, M. (1997) - The project method: Its vocational education origin and international development. *Journal of Industrial Teacher Education*; 34 (3), 59-80.
- Kolmos, A. (1996) - Reflections on project work and problem-based learning. *European Journal of Engineering Education*; 21 (2), 141-148.
- Leite, E., Santos, M. (2004) - Metodologia do Trabalho de Projecto. In Leite, E., Malpigue, M., Santos, M. *Nos Trilhos da Área de Projecto*. Lisboa. Ministério da Educação.
- Lima, R., Carvalho, D., Flores, M.A., Hattum, N. (2005) - Ensino/aprendizagem por projecto: balanço de uma experiência na universidade do Minho. In Silva, Bento D., Almeida, Leandro S. (coord). *Actas do Congresso Galaico-Português de Psicopedagogia*, 8, Braga, Portugal, 2005 [CD-ROM]. Braga. Centro de Investigação em Educação do Instituto de Educação e Psicologia da Universidade do Minho; 1787-1798.
- Mills, P., Woodall, P. (2004) - A comparison of the responses of first and second year veterinary science students to group project work. *Teaching in Higher Education*; 9 (4), 477-489.
- Monteiro, M. (2009) - Guia do Aluno – Área de Projecto – 12º ano. Porto. Porto Editora.
- Pires, E., Gomes, C., Pereira, A. (2009) - Actividades extra-curriculares – um projecto ganho. XIII Encontro Nacional de Educação em Ciências, Castelo Branco; 584-594.
- Rocha, A., Maia, M., Gomes, C., Pereira, A. (2009) - Actividades práticas em contexto extracurricular com alunos do 9º ano de escolaridade. XIII Encontro Nacional de Educação em Ciências, Castelo Branco; 595-603.
- Rola, A., Gomes, C. (2010) - O trabalho de projecto em Geologia. Um estudo de avaliação com alunos do 7º ano de escolaridade. *e-Terra*; 15, 30. XIII Congresso Nacional de Geologia, Braga. (<http://metododirecto.pt/CNG2010/index.php/vol/article/viewFile/58/169>).
- Rola, A., Abrantes, I., Gomes, C. (em preparação) - Trabalho de projecto sobre o tema “Terra e a Saúde”. Um estudo de avaliação com alunos do 9º ano de escolaridade.
- Sampaio, P. (s/d) - Pensar a Área de Projecto. *Revista Noesis* (Acedido em http://www.dgicd.min-edu.pt/revista_noesis/Documents/artigos_teoricos/RepensaraareadeProjecto.pdf, em 08 de Janeiro de 2010.
- School of Earth & Ocean Sciences (s/d) - Environmental Geoscience (BSc). Cardiff University, Wales. Acedido em <http://www.cardiff.ac.uk/earth/degreeprogrammes/undergraduate/bsc/environmental/index.html>, 30 de Outubro de 2010.
- Wrigley, H.S. (1998) - Knowledge in action: The promise of project-based learning. *Focus on Basics*; 2 (D), 13-18.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Modelação de processos de queda de blocos em vertentes na região de Alvaiázere; dois estudos caso

Pedro Santos¹; Alexandre Tavares²

¹Departamento de Ciências da Terra - FCTUC, PORTUGAL, psantos@dct.uc.pt

²Departamento de Ciências da Terra - FCTUC e Centro de Estudos Sociais da Universidade de Coimbra, PORTUGAL, atavares@ci.uc.pt

Palavras-chave: Queda de blocos, RockFall Analyst, Susceptibilidade, Alvaiázere

Resumo

A região de Alvaiázere apresenta características geológicas e geomorfológicas muito contrastadas que resultam do contacto entre terrenos da Orla Mesocenozoica e do Maciço Hespérico, fortemente deformados por acção tectónica antiga e recente. Este enquadramento tem potencialmente um efeito condicionante sobre os processos de movimentos de massa em vertente. O estudo que se apresenta descreve a aplicação de um método de modelação tri-dimensional do processo de queda de blocos na região de Alvaiázere, realizado de modo a caracterizar a susceptibilidade de ocorrência. A cartografia de susceptibilidade foi obtida recorrendo à extensão RockFall Analyst, que corre sobre a plataforma ArcGIS. A aplicação do modelo realizou-se em dois contextos genericamente distintos – um referente a terrenos do Maciço Antigo e outro em terrenos jurássicos que incluem a Serra de Alvaiázere e a sua envolvente. Nestes locais, seleccionaram-se como “áreas de alimentação” (*seeders*) aquelas que apresentavam declive superior a 20°. Tendo em conta os factores condicionantes dos processos, introduzidos como dados de entrada no modelo – factores morfológicos, litológicos e de ocupação do solo – os resultados obtidos parecem evidenciar uma preponderância do factor declive como o principal condicionante da distribuição das classes de susceptibilidade. É ainda de salientar uma preponderância de movimentos entre 15m a 30m na distancia de projecção.

Key-words: Rock fall, RockFall Analyst, Susceptibility, Alvaiázere

Abstract

The region of Alvaiázere presents contrasted geological and geomorphological characteristics, that comes from representation of two morpho-structural domains, the Mesocenozoic Basin and the Hesperian Massif, deformed by ancient and recent tectonic activity. This framework have potential conditioning effect on the processes of slope mass movements. The study describes the application of three-dimensional modeling of the process of rock fall in the region of Alvaiázere, carried out to characterize their susceptibility of occurrence. The mapping of susceptibility was obtained using the RockFall

Analyst extension, which runs on the ArcGIS platform. The application of the model took place in two distinct areas - one located in the grounds of the Hesperian Massif, northeastern sector of Alvaiázere municipality, and the other in the Jurassic domains including Alvaiázere mountain range and its surrounding areas. In these two case studies, seeder areas were selected where slope exceeded 20 degrees. Given the conditioning factors considered and introduced as input data in the model - morphological, lithological and land use - the results seem to indicate a preponderance of the slope factor as the main determinant of susceptibility classes distribution. The analysis also demonstrated that mostly the average projection distance has range values between 15m and 30m.

Introdução

Âmbito e objectivos

O estudo realizado inseriu-se no âmbito de um acordo-programa estabelecido entre o Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e o Município de Alvaiázere, ao abrigo do qual se têm produzido uma série de elementos relativos à gestão do risco, incluindo cartografia de susceptibilidade a movimentos de massa em vertente.

Em função das características biogeofísicas e de ocupação humana do território, a queda de blocos foi identificada como um dos processos a caracterizar. Consideram-se abrangidos no conceito de queda de blocos os processos de movimento, por desprendimento, de materiais rochosos a partir de uma superfície inclinada, sem ocorrência de deformação apreciável da superfície (WP/WLI UNESCO, 1993). O movimento descendente pode ser feito por queda, ressalto ou rolamento.

A avaliação da susceptibilidade recorreu a métodos de modelação tri-dimensional, permitindo identificar i) a localização e características das principais áreas de génese do movimento de queda de blocos; ii) a trajectória e as áreas de projecção dos blocos deslocados.

Caracterização da área

A região de Alvaiázere apresenta unidades morfo-estruturais representativas da Orla Mesocenozóica e do Maciço Hespérico. No sector oriental da área de estudo aparecem representados os materiais do Maciço Hespérico, nomeadamente as Formações do Grupo de Cácemes (xistos, arenitos e siltitos), do Quartzito Armoricano e gnaisses tonalíticos do Proterozóico médio (SGP, 1992) em contacto a oeste com os materiais triásicos do Grupo Grés de Silves, Morfológicamente, dominam as serras e colinas de xistos, gnaisses e grauvaques, que servem de cabeceira às bacias dos rios Nabão e

Zêzere em confronto, na depressão periférica ocidental, com os materiais sedimentares detriticos, e carbonatados, localmente evaporíticos.

No domínio da Orla salientam-se como elementos geomorfológicos mais relevantes: o vale do rio Nabão, a oeste, de orientação aproximada Norte-Sul, constituindo o limite natural do concelho de Alvaiázere com os concelhos de Ansião e Pombal e a Serra de Alvaiázere, com uma altura máxima de 618m, formada por calcários do Jurássico médio, nomeadamente envolvendo as Formações dos Calcários de Cabaços, Calcários de Sicó e Margas e calcários de S. Gião (SGP, 1992).

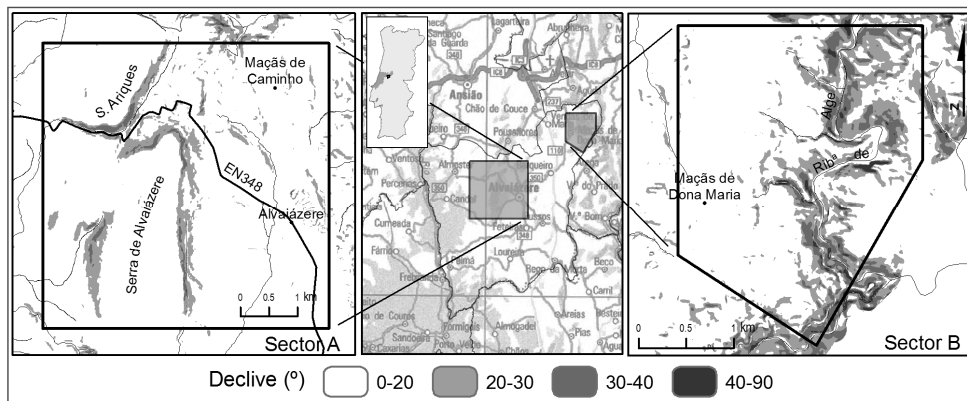


Figura 1. Enquadramento e classes de declive da área em estudo.

No conjunto, a orografia é marcada pelas colinas que conferem um aspecto ondulado à paisagem. As áreas de maior declive consistem nas vertentes da Serra de Alvaiázere e nas vertentes que definem as linhas de água do sector nascente do concelho, de onde se salientam os vales encaixados da Ribeira de Alge e seus afluentes (Figura 1). As áreas mais aplanadas consistem nos fundos de vale do Rio Nabão e da Ribeira da Murta e na Depressão de Alvaiázere.

A ocupação do solo dominante relaciona-se com a actividade agroflorestal, o que reflecte em parte os condicionamentos impostos pelas características pedológicas e morfológicas – solos na sua maioria pouco desenvolvidos e declives acentuados. As principais áreas urbanas são Alvaiázere, Pussos, Cabaços, Rego da Murta e Maçãs de D. Maria (Figura 1).

Metodologia

Extensão RockFall Analyst

A modelação tri-dimensional do processo de queda de blocos foi realizada com recurso à aplicação RockFall Analyst (*Centre for Risk Assessment for Geohazards Studies, University of Alberta*[®]), versão 1.1, que consiste numa extensão do programa de Sistemas de Informação Geográfica ArcGIS (ESRI[®]). A aplicação RockFall Analyst (RA) modela o processo físico da queda de blocos a partir de uma determinada origem e de acordo com as características da superfície e do bloco (Lan, 2007).

A aplicação deste modelo teve como dados de entrada:

- Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de 5 m, elaborado a partir de cartografia vectorial produzida na escala 1:10.000 para a maior parte da área analisada, e escala 1:2000, para a área da vila de Alvaiázere e sua envolvente próxima.

- Áreas de alimentação (*seeders*, na linguagem da extensão RA), que identificam os locais onde tem início o movimento de queda do bloco. Neste trabalho optou-se por seguir um critério alargado, isto é, consideraram-se com potencial para gerar movimentos de queda as áreas com declive superior a 20°. Em cada polígono de declive superior a este valor foi definida uma malha de pontos espaçada 10 m, longitudinal e latitudinalmente, os quais constituíram os pontos de início (*seeder points*) da modelação da queda de blocos.

- Propriedades da superfície (*material properties* na linguagem da extensão RA), que identificam as características físicas que condicionam o desencadeamento do movimento e condicionam o processo físico durante o mesmo. As propriedades da superfície consideradas são o ângulo de atrito (ϕ), o coeficiente de restituição normal (Rn) e o coeficiente de restituição tangencial (Rt), cujos valores se apresentam nas Tabelas 1 e 2, adaptados ao contexto da área em análise a partir de dados constantes em Rocha (1981), Valejjo *et al.* (2002), Dorren & Seijmonsbergen (2003) e Lan *et al.* (2007) recorrendo a cartografia geológica e de uso do solo.

Quanto aos coeficientes de restituição observa-se que quanto maior o declive e menor a rugosidade do uso do solo, maiores são os valores de restituição normal e tangencial porque aumenta também a favorabilidade para o início e subsequente movimento de queda.

Tabela 1. Ângulo de atrito adoptado.

	ϕ
Calcários de Sicó – J2O	40
Calcários de Cabaços (Calcários de Casmião) – J3	35
Formação do Quartzito Armoricano: seq. ordovícica indiferenciada – OQABS**	35
Gnaisses tonalíticos – PEM*	30
Grés de Silves – TJ	35
Margas e calcários de Quiaios e de São Gião – J1	35
Ortognaisses migmatíticos – gz1m	35
Xistos, grauvaques, chertes negros, vulcanitos ácidos e xistos porfiroblásticos - PES	30

Para além destes dados de entrada são indicadas as condições iniciais do movimento, como a massa do bloco, a velocidade inicial, a velocidade a partir da qual se considera cessado o movimento, entre outros (Tabela 3).

Tabela 2. Coeficiente de restituição normal e tangencial adoptado.

Uso do Solo	Declive							
	60-90°		40-60°		30-40°		0-30°	
	Rn	Rt	Rn	Rt	Rn	Rt	Rn	Rt
Erva	0,45	0,95	0,4	0,9	0,35	0,85	0,3	0,8
Agrícola	0,45	0,9	0,4	0,85	0,35	0,8	0,3	0,75
Agrícola, abandonada / 1ª fase	0,45	0,9	0,4	0,85	0,35	0,8	0,3	0,75
Agrícola, abandonada / 2ª fase	0,45	0,85	0,4	0,8	0,35	0,75	0,3	0,7
Agrícola, abandonada / 3ª fase	0,45	0,85	0,4	0,8	0,35	0,75	0,3	0,7
Mato	0,45	0,85	0,4	0,8	0,35	0,75	0,3	0,7
Agro-florestal, agrícola, activa	0,4	0,8	0,35	0,75	0,3	0,7	0,28	0,65
Agro-florestal, agrícola, abandonada / 1ª fase	0,4	0,8	0,35	0,75	0,3	0,7	0,28	0,65
Agro-florestal, agrícola, abandonada / 2ª fase	0,4	0,8	0,35	0,75	0,3	0,7	0,28	0,65
Agro-florestal, agrícola, abandonada / 3ª fase	0,4	0,8	0,35	0,75	0,3	0,7	0,28	0,65
Agro-florestal, florestal, activa	0,4	0,75	0,35	0,7	0,3	0,65	0,28	0,6
Agro-florestal, florestal, abandonada / 1ª fase	0,35	0,75	0,3	0,7	0,28	0,65	0,25	0,6

Tabela 2 (continuação)

Uso do Solo	Declive							
	60-90°		40-60°		30-40°		0-30°	
	Rn	Rt	Rn	Rt	Rn	Rt	Rn	Rt
Agro-florestal, agrícola, abandonada / 3ª fase	0,4	0,8	0,35	0,75	0,3	0,7	0,28	0,65
Agro-florestal, florestal, activa	0,4	0,75	0,35	0,7	0,3	0,65	0,28	0,6
Agro-florestal, florestal, abandonada / 1ª fase	0,35	0,75	0,3	0,7	0,28	0,65	0,25	0,6
Agro-florestal, florestal, abandonada / 3ª fase	0,35	0,75	0,3	0,7	0,28	0,65	0,25	0,6
Florestal, limpa	0,35	0,75	0,3	0,7	0,28	0,65	0,25	0,6
Florestal, com erva	0,35	0,7	0,3	0,65	0,28	0,6	0,25	0,55
Florestal, com mato	0,35	0,7	0,3	0,65	0,28	0,6	0,25	0,55
Florestal, com outras	0,35	0,7	0,3	0,65	0,28	0,6	0,25	0,55
Ocupação humana	0,4	0,7	0,35	0,65	0,3	0,6	0,3	0,55

Tabela 3. Propriedades de alimentação inicial (*seeder properties*) adoptadas.

Propriedades	Unidade	Valores assumidos
Massa	kg	100
Distância entre blocos	m	Malha 10 x 10
Velocidade inicial	Horizontal	m/s
	Vertical	m/s
Altura à superfície topográfica	m	5
Configuração estocástica	N.º de blocos no ponto de início	1
	Intervalo angular	° (graus)
Limiar de translação e paragem	Velocidade do movimento aéreo	m/s
	Distância do movimento aéreo	m
	Ângulo do movimento aéreo	° (graus)
	Velocidade mínima (paragem)	m/s
Opções	Número de pontos em cada célula	2
	Tolerância para cálculo do impacte	0.001

Ponderação dos resultados provenientes da aplicação da extensão RockFall Analyst

Da modelação realizada resultaram dados em formato vectorial *shape file* relativos à trajectória do movimento – percurso e altura (aquando da ocorrência de salto/voo) – e à velocidade do movimento. No passo seguinte, estas três saídas do modelo foram convertidas para formato matricial (células de 10m x 10m) representando a frequência, expressa em n.º movimentos/célula, a altura (m) e a energia (kg.(m/s)²).

Os valores matriciais foram posteriormente reclassificados em valores de 1 a 5 de acordo com o histograma de frequências – a frequência e a energia foram classificadas pelo método dos quantis; a altura foi classificada manualmente por pequenos ajustes à classificação em intervalos naturais. Estes *scores* parcelares foram ponderados de modo a se obter o *score* final de cada célula, de acordo com a seguinte expressão:

$$Score_final = [Score_frequência]*0.5 + [Score_altura]*0.2 + [Score_energia]*0.3$$

As classes de susceptibilidade foram estabelecidas a partir dos valores de *score* final, de acordo com os intervalos apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação da susceptibilidade obtida por modelação tri-dimensional.

Valor final	Classe
0	Não aplicável
]0 – 1.66]	Moderada a baixa
]1.66 – 3.33]	Elevada
]3.33 – 5]	Muito elevada

Estudos caso

O método acima descrito foi aplicado a duas áreas de natureza geológica e geomorfológica distinta (Figura 1):

- Sector A: com uma área de 2514.83 hectares, abrange a Serra de Alvaiázere e parte da Serra de Ariques bem como as localidades de Alvaiázere e Maçãs de Caminho. Este sector insere-se na unidade morfo-estrutural Orla Mesoceno-zóica Ocidental, onde a litologia predominante são margas e calcários das Formações de Margas e Calcários de S. Gião, Calcários de Sicó e materiais do Grupo Grés de Silves;

- Sector B: com uma área de 687.95 hectares, situa-se a nordeste de Alvaiázere, e distinguem-se duas áreas: uma a oriente que inclui o vale encaixado da Ribeira de Alge; e outra a ocidente, de morfologia mais suave e que inclui a localidade de Maçãs de Dona Maria. Este sector apresenta como litologia predominante gnaisses tonalíticos e quartzitos.

Resultados

No sector A verifica-se cerca de 15% de área total com classe de susceptibilidade atribuída, dos quais 86 ha têm susceptibilidade “muito elevada” e 150 ha susceptibilidade “elevada” (Tabela 5). No sector B, a percentagem de área total classificada como “muito elevada” e “elevada” é muito superior à verificada no sector A, sendo de 15.81 ha e 12.78 ha, respectivamente.

A cartografia de susceptibilidade produzida por modelação tri-dimensional nas áreas de alimentação consideradas (áreas de declive superior a 20°) evidenciam como áreas de susceptibilidade “muito elevada”, fundamentalmente os sectores de vertente onde o declive é mais acentuado (Figura 2).

Tabela 5. Área por classe de susceptibilidade obtida por modelação nos sectores A e B.

Classe de susceptibilidade	Sector A		Sector B	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Não aplicável	2147	85.37	411	59.69
Moderada a baixa	132	5.25	81	11.72
Elevada	150	5.97	88	12.78
Muito elevada	86	3.41	108	15.81
<i>Total</i>	<i>2515</i>	<i>100.00</i>	<i>688</i>	<i>100.00</i>

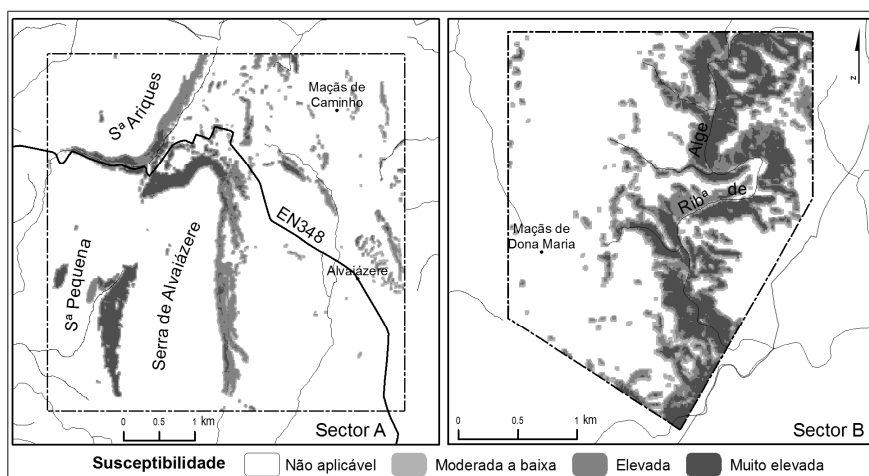


Figura 2. Susceptibilidade a queda de blocos por modelação tri-dimensional nos sectores A e B.

No sector A esta classe surge representada ao longo do Vale da Mata (canhão flúvio-cársico situado entre as serras de Ariques e Alvaiázere) afectando troços da EN 348 e nos flancos setentrional e ocidental da Serra de Alvaiázere. Com menor expressão, a classe “muito elevada” surge na Serra Pequena, no flanco oriental da Serra de Alvaiázere e em algumas vertentes envolventes à localidade de Maçãs de Caminho. No sector B, as classes de susceptibilidade “muito elevada” e “elevada” ocupam a quase totalidade das vertentes que definem o vale da Ribeira de Alge.

Para além da susceptibilidade a queda de blocos que resulta da ponderação dos *outputs* da extensão RA, é relevante analisar igualmente as áreas de projecção de blocos. Estes locais, quando correspondem a fundos de vale e a bases de vertente, não surgem na maior parte dos casos nas classes de susceptibilidade mais elevadas. Não obstante, a sua identificação é relevante pelo potencial de danos associado. A Figura 3 apresenta alguns exemplos de trajectórias modeladas no sector B (Maciço Antigo), onde se observa a forte correlação entre a distância percorrida pelo bloco e o declive das vertentes.

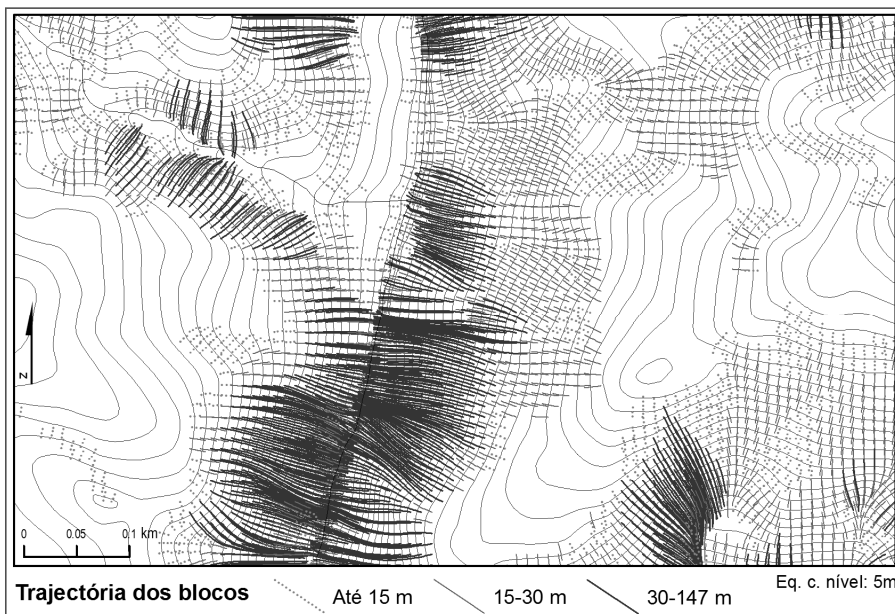


Figura 3. Exemplo de trajectórias calculadas pela extensão RockFall Analyst no sector B.

A comparação entre sectores – quanto à distância dos movimentos de queda de blocos – ressalta a diferença entre o número de blocos que

percorre distâncias superiores a 30 m nos dois sectores (Tabela 6). Este valor é de 22.48% das trajectórias no sector B e apenas 0.99% no sector A. A justificação para estes números encontra-se fundamentalmente no facto de no sector B os declives serem em média superiores, mas parte da explicação pode residir também no facto de as vertentes no sector A possuírem um menor comprimento de vertente.

Tabela 6. Distância dos movimentos de quedas de bloco nos sectores A e B.

Distância (m)	Sector A		Sector B	
	Freq. abs.	(%)	Freq. abs	Área (%)
[0 – 15[9263	40.49	6426	34.42
[15 – 30[13389	58.52	8046	43.10
[30 – 147]	227	0.99	4197	22.48
<i>Total</i>	<i>22879</i>	<i>100.00</i>	<i>18669</i>	<i>100.00</i>

Notas finais

A aplicação de modelação dos processos de queda de blocos recorrendo à extensão RA conduziu a dois tipos principais de resultados:

- identificação das principais áreas de alimentação, ou seja, aquelas onde o movimento de queda foi mais longo, não se ficando pelo o movimento proporcionado pelo impulso inicial definido pela velocidade horizontal e vertical.

- identificação das áreas de projecção, que surgem frequentemente com a classificação de susceptibilidade moderada a baixa devido à baixa frequência, energia e altura que as caracteriza.

O declive surge como principal factor condicionante, quer para o início da queda quer para a distância percorrida. A litologia, a partir da qual se extraíram os ângulo de atrito actua como um factor diferenciador da susceptibilidade de relevância inferior ao declive. Um exemplo disto é o que se observa entre os flancos oriental e ocidental da Serra Pequena. Nestes dois flancos o declive e o uso do solo são semelhantes e o único factor diferenciador é a litologia – no flanco oriental afloram Calcários de Sicó (ângulo de atrito 40°); no flanco ocidental afloram as Camadas de Cabaços (ângulo de atrito 35°). Esta diferença surge como explicação para o facto de a mancha de susceptibilidade “Muito elevada” ser superior no flanco ocidental, enquanto no flanco oriental, esta mesma classe de susceptibilidade se confina aos sectores de vertente com maior declive.

O principal ponto fraco da metodologia aplicada reside no facto de se aplicarem factores de ponderação aos *outputs* da extensão RA por forma a definir a susceptibilidade, tendo verificado que os valores desta surgem subvalorizados nas áreas de projecção. Contudo, estas áreas são relevantes num contexto de gestão do risco dado o potencial de dano a elas associado, em particular afectando vias rodoviárias e habitações situadas para além das áreas de alimentação consideradas.

A aplicação da extensão RockFall Analyst pode constituir uma ferramenta complementar relativamente a outras metodologias de avaliação da susceptibilidade a queda de blocos, nomeadamente aos métodos heurísticos. Esta complementaridade torna-se evidente considerando a escassez de bases de dados com registos históricos de processos de queda de blocos.

Bibliografia

- Dorren L.K.A., Seijmonsbergen A.C., (2003) - Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. *Geomorphology*; 56:49-64.
- GSC (2002) - GSC Atlantic Rock Properties Database. Geological Survey of Canada/Dalhousie University. http://gsca.nrcan.gc.ca/pubprod/rockprop/search_e.php.
- Lan H., Martin C.D., Lim C.H. (2007) - RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences*; 33, 262-279.
- Lan H., 2007. Manual for Rockfall Analyst. 3D Rockfall Modeling Extension to ArcGIS 9.x. 2ª edição, Centre for Risk Assessment for Geohazards Studies, University of Alberta, 68 p.
- Rocha M. (1981) - Mecânica das rochas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 445 p.
- SGP (1992) - Carta Geológica de Portugal (1:500.000). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002) - Ingeniería Geológica. Prentice Hall. Madrid, 717p.
- WP/WLI UNESCO (1993) - Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies, Canadian Geotechnical Society (ed.), Richmond, BiTech Publishers Ltd..

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

As energias renováveis em Portugal. A importância da energia hidroeléctrica e da energia eólica

António Saraiva¹

¹Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, PORTUGAL, asaraiva@dct.uc.pt

Palavras-chave: Energias renováveis, Energia hidroeléctrica, Energia eólica

Resumo

Apresenta-se uma análise da importância das energias renováveis em Portugal Continental e particularmente da energia hidroeléctrica e da energia eólica. A energia hidroeléctrica, especialmente a produzida nas grandes centrais, é essencialmente produzida nas horas mais nobres do diagrama de consumos. A energia eólica que é volátil e intermitente, pode ter produções muito variáveis ao longo do dia. Na generalidade das situações a produção de energia eólica é mais intensa durante a noite do que durante o dia, o que coloca dificuldades à gestão da rede eléctrica, devido à dificuldade em descontinuar as centrais térmicas. Assim, o seu adequado aproveitamento só pode ser feito com recurso a aproveitamentos hidroeléctricos em regime de albufeira e com capacidade de bombagem hidroeléctrica instalada. A potência hidroeléctrica instalada, que teve um peso de 81 % na década de 60, passou para 29 % em 2009. Em contraponto a potência eólica instalada passou de 76 MW, em 2000, para 3841 MW em Setembro de 2010. Portugal, na sequência de directivas da União Europeia, deveria ter no ano de 2010 uma taxa de cobertura de 39 % de fontes de energia renováveis (FER) relativamente à energia bruta produzida

Key-words: Renewable energy, Hydropower energy, Wind energy

Abstract

Hydropower and wind power are important in Portugal. Hydropower, in large power plants, is mainly produced in the finest hours of the diagram of consumption. Wind power is intermittent and volatile, and may have highly variable yields throughout the day. In general the production of wind energy is more intense at night than during the day, which poses difficulties for the management of the electric grid, due to difficulty in discontinuing the thermal power plants. Thus, their proper use can only be done using hydropower plants with pumping water capacity installed. The hydroelectric power installed, which had a weight of 81% in 1960, fell to 29% in 2009. In contrast the wind power installed rose from 76 MW in 2000 to 3841 MW in September 2010. Portugal, following the UE directives, should have in 2010 a coverage rate of 39 % from renewable energy sources (RES) for the gross energy produced.

Introdução

A produção de energia eléctrica a partir de fontes de energia renováveis (FER) tem sido ampla e intensamente desenvolvida em Portugal, particularmente ao nível da energia eólica. A União Europeia, através das directivas definiu metas para os vários países integrantes ao nível da percentagem de cobertura das FER, apontando-se que em 2010 Portugal deveria ter uma cobertura de 39 % relativamente à energia bruta produzida. No fim do ano de 2009 o parque electroprodutor compreendia uma potência instalada de 11268 MW em centrais pertencentes aos Produtores em Regime Ordinário (PRO) e de 5128 MW em centrais pertencentes aos Produtores em Regime Especial (PRE). Em Portugal, o potencial hidroeléctrico explorado é de 46 %, o que contrasta, por exemplo, com os 96 % na Alemanha e os 95% na França e na Itália.

As Energias Renováveis

O poder político executivo em Outubro de 2003, estabeleceu as metas a alcançar para as diferentes formas de produção de energia na sequência da directiva da União Europeia. Mais recentemente, o MEI (Tabela 1) redefiniu essas metas que se tornaram mais ambiciosas na sequência da aprovação do Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico (PNBEPH) que prevê que o potencial hidroeléctrico aproveitado passe dos actuais 46 % para os 70 % em 2020 e que a potência eólica instalada atinja os 5700 MW (COBA, PROCESL, 2007). No entanto, e apesar do forte investimento na instalação de novos parques eólicos, ainda falta instalar, para se alcançarem as metas definidas, 2292 MW de potência eólica.

Mais recentemente, em Setembro de 2010, foi estabelecido o programa Estratégia Nacional de Energia 2020 (ENE 2020) em que se preconizam novas metas a atingir ao nível das FER, a saber (Tabela 2).

A Complementaridade Hídrica-Eólica

O potencial hidroeléctrico por explorar em condições técnicas e económicas é da ordem dos 5,2 TW. A importância dos aproveitamentos hidroeléctricos na produção de energia eléctrica atingiu um máximo em 1960 com um valor de 81 % e de então para cá tem vindo progressivamente

Tabela 1. Metas indicativas para as fontes de energia renováveis

Referência	Metas Anteriores	Novas Metas (2007-2010)
Produção de electricidade com base energias renováveis	39 % do consumo bruto	45 % do consumo bruto
Energia hidroeléctrica	46 % do potencial 5000 MW em 2010	7000 MW em 2020, 70 % do potencial (5575 MW em 2010)
Energia eólica	3750 MW	5100 MW em novas instalações + 600 MW por upgrade do equipamento em 2010
Biomassa	100 MW	150 MW
Solar	50 MW	150 MW
Ondas	50 MW	250 MW em zonas piloto
Biogás	50 MW	100 MW
Biocombustíveis (transportes rodoviários)	5,75 %	10 %
Micro-geração	--	50000 sistemas

Tabela 2. Metas indicativas para as fontes de energia renováveis

Referência	ENE 2020 (RCM 29/2010)
Consumo de energia final	31 %
Energia hidroeléctrica	8600 MW até 2020
Mini-hídricas	Mais 250 MW
Energia eólica	+ 2000 MW até 2012 (já atribuída) + 400 MW sobreequipamento de parques existentes + 3000 MW (a atribuir por concurso)
Biomassa	+ 250 MW (já atribuída)
Solar	+ 1500 MW
Ondas	+ 250 MW
Geotermia	+250 MW

a diminuir e, em 2009, ficou pelos 29 % (Figura 1). A par deste facto, verificou-se que de um modo vincado a partir do ano de 2003, ocorreu um grande incremento na potência eólica instalada que passou de 253 MW para 3841 MW em Setembro de 2010. Nas últimas décadas a construção de novos aproveitamentos hidroeléctricos foi reduzida, tendo sido construídos os aproveitamentos do Alto Lindoso, que entrou em funcionamento no ano de 1994, com uma potência instalada de 630 MW nos dois grupos, e o de

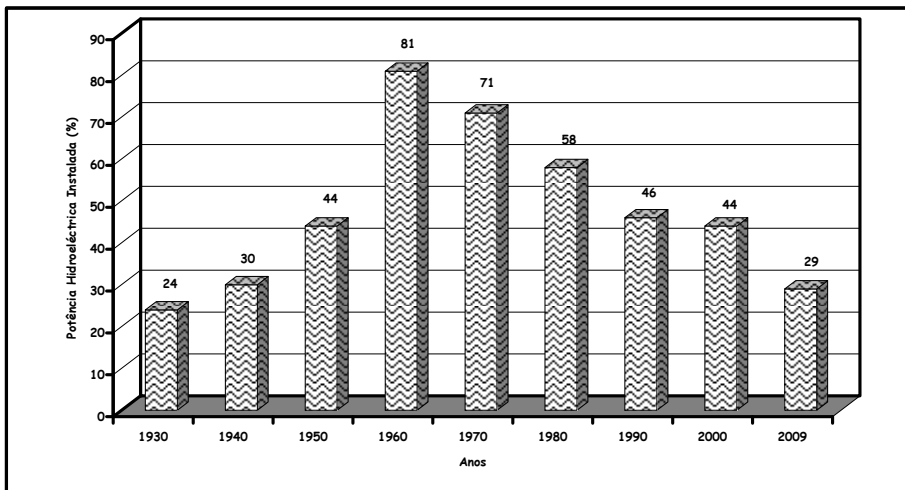


Figura 1. Peso relativo da potência hidroelétrica instalada relativamente à potência total (dados de Vasconcelos, 2010).

Alqueva com uma potência instalada de 260 MW que entrou em funcionamento em 2004 e o de Frades (reforço de potência designado por Venda Nova II durante a fase de obras) com uma potência de 191,6 MW e que foi inaugurado no ano de 2007. Estes dois últimos centros electroprodutores estão equipados com grupos reversíveis.

O grande incremento verificado na instalação de potência eólica (Figura 2) coloca problemas significativos à gestão da rede de transporte. A produção eólica é muito volátil e intermitente conforme o evidenciam os diagramas de produção eólica disponibilizados pela REN. Por outro lado, a energia eólica é uma energia que não está submetida a instruções de despacho como acontece, por exemplo, com a hidroelétrica ou a térmica. Tal implica que seja necessário dispor de equipamentos geradores de reserva capazes de rapidamente poderem entrar, e sair, de serviço, quer em regime de produção, quer em regime de bombagem hidroelétrica. Tal poderá permitir fazer um adequado aproveitamento dos excedentes de energia existente na rede.

A volatilidade e a intermitência da energia eólica podem ser exemplificadas pelas situações referidas a seguir e pelos dados apresentados na tabela 3.

Em 22 de Setembro de 2008 a energia eólica produzida satisfaz 0,7 % do consumo de energia eléctrica, em 28 de Março de 2009 37 %. Em 25 de Março de 2010, a energia eólica alcançou a maior quota instantânea do consumo com um valor de 63% às 2h45min. (REN, 2010).

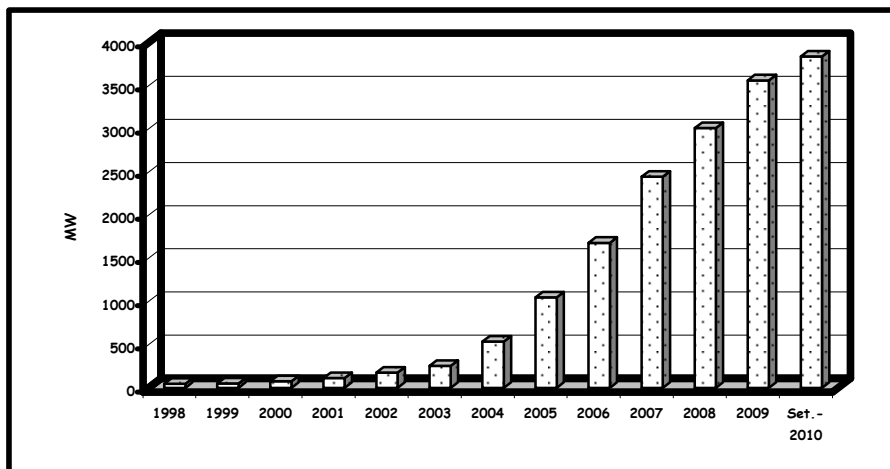


Figura 2. Variação da potência eólica instalada (Dados da DGEG, 2010).

Tabela 3. Alguns indicadores relativos à energia eólica e à bombagem hidroeléctrica (dados da REN, 2007, 2008, 2009 e 2010).

	2007	2008	2009	2010 – 1º Sem.
Ponta máxima rede pública (MW)	9110	8973	9217	9403
Potência eólica máxima (MW)	1693	2197	2856	3031
Máxima produção eólica diária (GWh)	37	45	64	63
Maior consumo nacional (%)	21	32	49	43
Potência eólica instantânea máxima (%)	96	48	69	63
Bombagem hidroeléctrica (GWh)	541	639	929	191

Para além destes factos há a assinalar que podem ocorrer perdas significativas de potência em intervalos de tempo muito reduzidos, como é evidenciado nos diagramas relativos à produção eólica referente ao dia 15 de Novembro de 2009. Neste dia (REN, 2009), ocorreram perdas de potência superiores a 590 MW e a 500 MW entre as 11h - 11h 15 min. e as 14h 15 min. - 14h 30 min, respectivamente, e ganhos superiores a 400 MW e a 360 MW entre as 11h 15 min -11h 30 min e as 14h 30 min - 14h 45 min. As quebras ou incrementos de potência registados são muito significativos. A título de exemplo refira-se que os centros electroprodutores, com maior

potência, instalados em Portugal são a central termoelétrica de Sines (central a carvão), que está equipada com quatro grupos geradores com uma potência total de 1256 MW e a central termoelétrica do Ribatejo (central de ciclo combinado a gás natural) equipada com três grupos geradores com uma potência de 1200 MW. Estes acontecimentos obrigam à mobilização de equipamentos de reserva capazes de entrarem em produção muito rapidamente.

As centrais hidroelétricas, em regime de albufeira, podem entrar e sair da rede muito rapidamente (poucos minutos), o que lhes confere uma grande flexibilidade para a gestão do sistema e a produzirem energia nas horas “mais nobres” em que o custo da energia eléctrica na produção é significativamente mais elevado do que nas designadas horas de vazio. A bombagem hidroelétrica permite fazer bombagem de jusante para montante, quando existem excedentes de energia na rede (originada pela produção térmica durante a noite ou por excesso de energia eólica), para posterior turbinamento nas designadas horas de ponta em que o custo da energia produzida é significativamente mais elevado.

O facto do incremento na produção eólica não estar a ser acompanhado por um aumento na capacidade de bombagem, pode originar dificuldades acrescidas. No decorrer do ano de 2010, o excesso de produção de energia a partir de fontes de energia renováveis levou à exportação de energia a custo zero em períodos significativos do dia como aconteceu, por exemplo, nos primeiros dias de Janeiro de 2010. No sentido de evitar que num futuro, a médio prazo, estes acontecimentos voltem a ocorrer com a mesma intensidade, a generalidade dos aproveitamentos hidroelétricos em construção, e a construir no âmbito do PNBEPH, ficarão equipados com grupos reversíveis no sentido de permitirem uma gestão mais adequada da energia, quer nas horas de vazio, quer nas horas de ponta (tabela 4).

De modo a incentivar a produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis, particularmente com base na mini-hídrica, o Governo da República Portuguesa abriu em Novembro de 2010 um procedimento concursal conducente ao licenciamento de aproveitamentos hidroelétricos com uma potência máxima a instalar de até 20 MW. As concessões serão atribuídas por 45 anos e aos produtores será paga, durante 25 anos, uma tarifa média indicativa de € 95 / MW. Refira-se que os preços marginais para Portugal, praticados no OMEL, variaram no dia 5 de Janeiro de 2010 entre € 1,03 / MWh e € 57,86 / MWh, no dia 1 de Novembro de 2010 entre € 0,10 / MWh e € 58,13 / MWh, no dia 30 de Novembro de 2010 entre € 32,90 / MWh e € 74,51 / MWh, enquanto que no dia 5 de Dezembro de 2010 os preços oscilaram entre € 30,92 / MWh e € 54,0 / MWh.

Tabela 4. Designação e potência dos A. H. a construir e em construção (INAG).

Aproveitamento	Adjudicatário	Potência a Instalar (MW)	Reversibilidade
		A construir	
Gouvães	Iberdrola	660	Sim
Padroselos (*)	Iberdrola	230	Sim
Daivões	Iberdrola	118	Não
Alto Tâmega	Iberdrola	127	Não
Girabolhos	Endesa	354,8 (2 escalões)	Sim
Foz-Tua	EDP	323,6	Sim
Fridão	EDP	256	Não
Alvito	EDP	136	Sim
Em construção			
Baixo Sabor	EDP	140+30 (2 escalões)	Sim
Ribeiradio-Ermida	Greenvouga	72+6,6 (2 escalões)	Sim

(*) – Este aproveitamento não será construído na sequência da emissão da correspondente Declaração de Impacte Ambiental (DIA).

Considerações finais

A forte implementação da energia eólica representa um contributo para a produção de energia eléctrica a partir das FER e, por via disso, permitir uma acentuada redução das emissões de CO₂ para a atmosfera. No entanto, dada a sua volatilidade, intermitência e o facto de ser uma energia não despachável, a mesma só poderá ser utilizada cabalmente, e de um modo racional, quando conjugada com os aproveitamentos hidroeléctricos equipados com grupos reversíveis (turbina-bomba) de modo a possibilitar que em períodos de excesso de energia na rede se recorra à bombagem hidroeléctrica.

Bibliografia

COBA, PROCESL (2007) - Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico (PNBEPH). Memória, 183 pp.

DGEG (2010) - Renováveis. Estatísticas Rápidas. Agosto/Setembro, nº 66/67, 22 pp. Direcção Geral de Energia e Geologia.

INAG. <http://pnbeph.inag.pt/np4/p/projectos> (consultada em 20/10/2010).

- REN (2007, 2008, 2009 e 2010) - Estatísticas Diárias e Mensais dos Consumos de Energia Eléctrica. Redes Energéticas Nacionais, S. A.
- Resolução do Conselho de Ministros 29/2010 (2010) - Diário da República, 1ª Série, de 10 de Setembro de 2010.
- Vasconcelos, J. (2010) - O futuro das Políticas Energéticas. CIAHP2010, Porto, 15-33.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Contributos sedimentológicos e geoquímicos para a modelação dos sistemas petrolíferos portugueses: as séries jurássicas ricas em matéria orgânica da Bacia Lusitânica (Portugal)

Ricardo Silva¹; Luís Duarte¹; Ana Azerêdo²; João Mendonça Filho³

¹Departamento de Ciências da Terra e IMAR-CMA, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra, Largo Marquês de Pombal, 3000-272 Coimbra, PORTUGAL.

ricardo.silva@student.dct.uc.pt, lduarte@dct.uc.pt

²Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia e Centro de Geologia, Campo Grande, 1749-016, Lisboa, PORTUGAL. acazeredo@fc.ul.pt

³Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Cidade Universitária, CEP: 21949-900, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, BRASIL. graciano@geologia.ufrj.br

Palavras-chave: Rocha geradora, Formação de Vale das Fontes, Formação de Cabaços, Jurássico, Bacia Lusitânica

Resumo

A elaboração de modelos sedimentológicos preditivos é uma das principais ferramentas na prospecção de petróleo. No entanto, no que respeita aos sistemas carbonatados, a concepção de modelos geológicos coerentes é complexa, devido à intrincada relação entre os diversos parâmetros físicos, químicos, geológicos e biológicos que controlam a deposição nesses ambientes. O objectivo deste trabalho é o de apresentar uma caracterização sumária de dois dos mais importantes intervalos estratigráficos potencialmente geradores de petróleo da Bacia Lusitânica: o membro Margo-calcários com níveis betuminosos da Formação de Vale das Fontes (Pliensbaquiano) e a Formação de Cabaços (Oxfordiano inferior?/médio). Os estudos em progresso, em especial sobre a matéria orgânica, deverão conduzir a trabalhos de modelação visando aperfeiçoar o conhecimento da evolução lateral e temporal dos ambientes deposicionais e da geração, maturação e migração de hidrocarbonetos relacionados com os referidos intervalos estratigráficos.

Key-words: *Source rock, Vale das Fontes Formation, Cabaços Formation, Jurassic, Lusitanian Basin*

Abstract

The elaboration of predictive sedimentological models is one of the main tools in petroleum prospection. However, regarding carbonate systems, building-up coherent geological models is complex due to the intricate relationship between the several physical, chemical,

geological and biological factors that control the deposition in those environments. The objective of this work is to present a brief characterization of two of the most important Jurassic potential source-rocks in the Lusitanian Basin: the Marly limestones with organic-rich facies member of the Vale das Fontes Formation (Pliensbachian) and the Cabaços Formation (Early?/Middle Oxfordian). Ongoing studies, particularly on organic matter, will likely lead to modelling works aiming at improving current knowledge on the lateral and temporal evolution of the depositional environments and hydrocarbon generation, maturation and migration related to those stratigraphical intervals.

Introdução

A prospecção de hidrocarbonetos assenta num vasto conjunto de ferramentas, sendo uma delas a elaboração de um modelo evolutivo da bacia que permita a dedução das mais diversas propriedades dos corpos rochosos presentes numa determinada área em prospecção. No entanto, a concepção de modelos com significado geológico relativos aos sistemas sedimentares carbonatados é difícil, uma vez que estes implicam um conhecimento alargado sobre os vários factores físicos, químicos, geológicos e biológicos que governam a sedimentação nestes ambientes de deposição.

No registo jurássico da Bacia Lusitânica (BL) são reconhecidos vários intervalos ricos em matéria orgânica. Destes, apenas dois têm distribuição bacinal e são reconhecidos como rochas potencialmente geradoras de petróleo. O primeiro corresponde ao membro Margo-calcários com níveis betuminosos (mb MCNB) da Formação de Vale das Fontes (Pliensbaquiano) e o segundo à Formação de Cabaços (Oxfordiano inferior?/médio) (ver por exemplo, Azerêdo *et al.*, 2002; Oliveira *et al.*, 2006; Duarte *et al.*, 2010a,b; Silva *et al.*, 2010a). Este trabalho tem como objectivo apresentar uma caracterização sumária das duas unidades litológicas referidas, desde o seu contexto e dinâmica sedimentar ao conteúdo em matéria orgânica e parâmetros associados, tendo como base os estudos de detalhe actualmente em curso.

Enquadramento geológico genérico dos dois intervalos em estudo

A BL é uma pequena bacia de direcção aproximadamente Norte-Sul, situada no lado ocidental do Maciço Ibérico (Figura 1). A sua origem está relacionada com a abertura do Oceano Atlântico e apresenta várias semelhanças com outras bacias vizinhas (por exemplo, Wilson *et al.*, 1989;

Azerêdo *et al.*, 2002; Duarte *et al.*, 2010b e referências contidas nestes trabalhos).

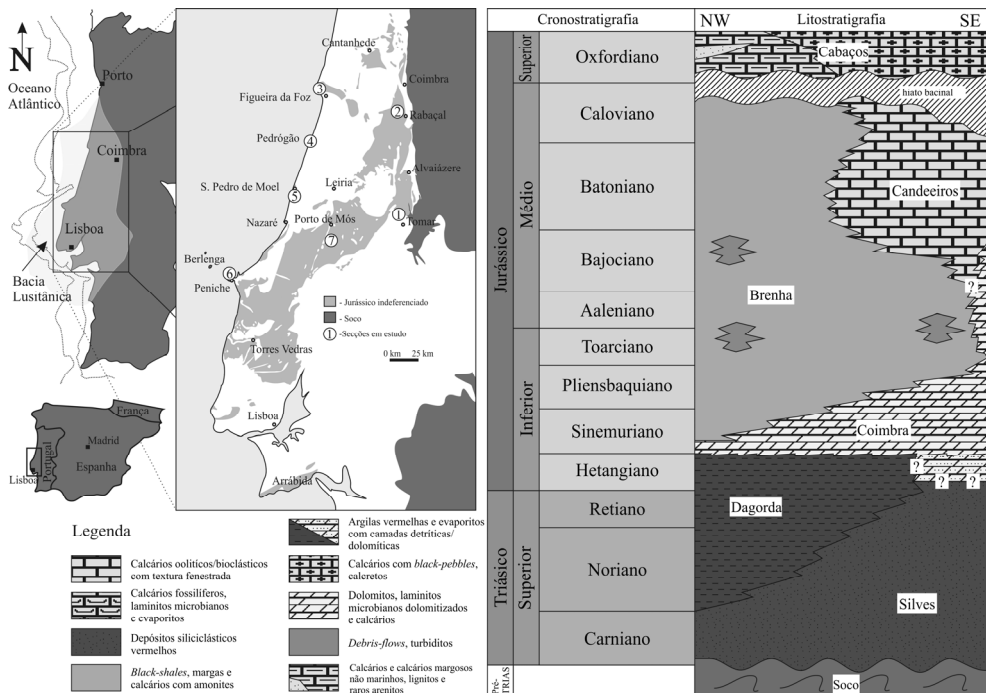


Figura 1. Mapa geológico simplificado, referente aos afloramentos do Jurássico na Bacia Lusitânica e esquema litostratigráfico genérico para o intervalo Triásico Superior–Jurássico Superior; modificado de Azerêdo *et al.* (2002).

A evolução triásico–jurássica da BL consiste em duas grandes etapas de sedimentação limitadas por discontinuidades, correspondendo aos períodos de tempo Triásico Superior–Jurássico Médio e Jurássico Superior–Cretácico Inferior (Wilson *et al.*, 1989). As unidades de Silves e de Dagorda marcam o início da sedimentação na bacia e são sobrepostas pela Formação de Coimbra e os grupos informais Brenha e Candeeiros, representando o início e desenvolvimento de um sistema deposicional do tipo rampa carbonatada, aberta para noroeste (Figura 1). O primeiro intervalo em estudo, o mb MCNB da Formação de Vale das Fontes, é incluído no grupo Brenha e é de idade topo de Ibex–Margaritatus (Pliensbaquiano). Corresponde a um conjunto de alternâncias margo-calcárias de natureza hemipelágica, com um abundante registo de macrofósseis bentónicos e nectónicos (Duarte e Soares, 2002; Duarte, 2007; Duarte *et al.*, 2010b).

A passagem Jurássico Médio–Superior corresponde a um hiato bacinal, abrangendo o Caloviano Superior–Oxfordiano Inferior, embora, pontualmente e em regiões mais a leste, possa abranger até o Batoniano superior. Esta desconformidade é precedida por uma regressão forçada complexa, resultando em variações litológicas bruscas (Azerêdo *et al.*, 2002). Os primeiros sedimentos do Jurássico Superior pertencem à Formação de Cabaços (Figura 1) e correspondem ao desenvolvimento de sistemas deposicionais do tipo lacustre, lagunar e marinho raso (Azerêdo *et al.*, 2002; Azerêdo e Cabral, 2004; Azerêdo *et al.*, 2010a,b).

Jurássico Inferior: Mb Margo-calcários com níveis betuminosos

O mb MCNB, quando comparado com as unidades enquadrantes, é caracterizado por um aumento dos litótipos margosos e pela ocorrência das fácies ricas em matéria orgânica, particularmente bem desenvolvidas no sector oeste (Duarte e Soares, 2002; Duarte *et al.*, 2010b) (Figura 2).

Com base em diversos critérios, e embora a variação litológica seja pequena, é possível distinguir três domínios no sector norte da BL (ver por exemplo, Duarte e Soares, 2002; Duarte *et al.*, 2004, Duarte, 2007; Silva *et al.*, 2010b). A oeste (Peniche, S. Pedro de Moel e Brenha) e correspondendo ao sector mais distal, a principal característica do mb MCNB é a abundância das fácies ricas em matéria orgânica e os seus elevados valores de COT (cerca de 15-20%), incluindo até mesmo vários níveis de verdadeiros *black-shales* (Duarte *et al.*, 2010a,b; Silva *et al.*, 2010c).

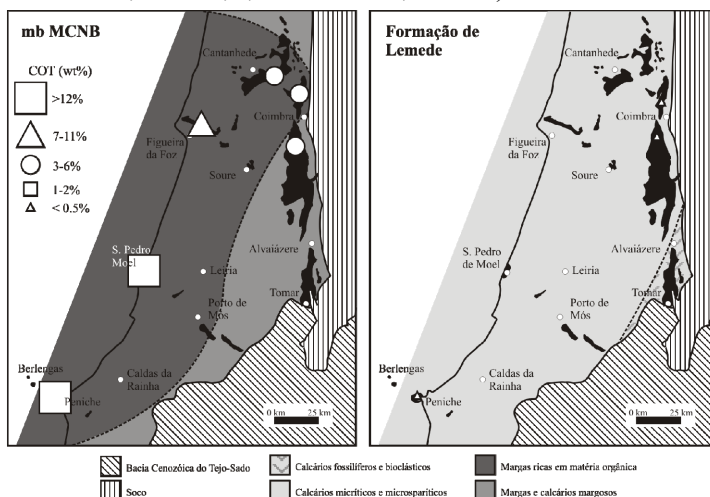


Figura 2. Mapas de distribuição de fácies e variação lateral de COT para o mb MCNB e unidade subjacente, a Formação de Leme (modificado de Duarte *et al.*, 2010b).

São também abundantes os macrofósseis nectónicos (amonites e belemnites) e bentónicos (braquiópodes, bivalves, equinodermes e gastrópodes). No domínio centro-leste (Rabaçal), a sedimentação tem um carácter intermédio e distingue-se pela ocorrência significativa de nautilóides, pela presença de pequenos montículos *mud-wacke-packstone* (associados com nautilóides na base ou com grandes Litoceratídeos no topo da secção) e restos de animais de maior porte (ictiossáurios?). Localmente são observadas fácies ricas em matéria orgânica. O sector sudeste (Tomar) representa o ambiente de menor profundidade estudado. As suas características são a ausência das fácies ricas em matéria orgânica e o aumento da expressão dos macrofósseis bentónicos (nomeadamente dos braquiópodes e bivalves) e de fácies bioclásticas. As observações palinofaciológicas e o estudo dos biomarcadores relacionados com proveniência (Figura 3) mostram que a matéria orgânica particulada consiste numa mistura variável de componentes marinhos e continentais preservados num ambiente deposicional marinho com condições redox variáveis (Silva *et al.*, 2010c).

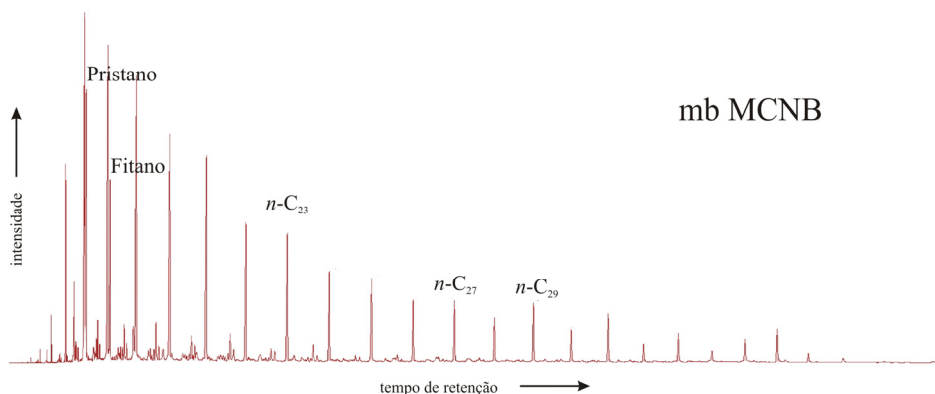


Figura 3. Cromatograma (m/z 85) de uma amostra do mb MCNB.

Jurássico Superior: Formação de Cabaços

A Formação de Cabaços (Oxfordiano inferior?/médio) representa os primeiros sedimentos de idade Jurássico Superior na BL. O seu registo em afloramento é relativamente reduzido e o seu reconhecimento de campo implica bom conhecimento da unidade, pois é condicionado pela ausência de qualquer (macro)fóssil-índice (ver em Azerêdo *et al.*, 2010a,b, a mais recente observação, em afloramento, desta unidade).

Esta unidade apresenta uma grande dinâmica sedimentar. A norte, na base da secção do Cabo Mondego, observam-se fácies de carácter misto

entre o siliciclástico e o carbonatado, possivelmente correspondendo a uma primeira incursão deltaica e ao desenvolvimento de pequenas baías de água doce a salobra (Wright, 1985). Um pouco mais a sul e ao longo da costa, em Pedrógão, a parte da série lateralmente equivalente ao referido acima para o Cabo Mondego, tem um carácter parálico, com o desenvolvimento de sistemas lacustres semi-permanentes que se tornam persistentes para sudeste e com claras evidências de exposição (Azerêdo *et al.*, 2002; Azerêdo e Cabral, 2004) (Figura 4). Para o topo, a sucessão tende a apresentar um carácter mais marinho (ex. Azerêdo *et al.*, 2002), tornando-se marinho franco na unidade sobrejacente, a Formação de Montejunto, embora pontualmente se observem fácies proximais do tipo peritidal (ex. Azerêdo e Wright, 2004; Wright e Azerêdo, 2006).

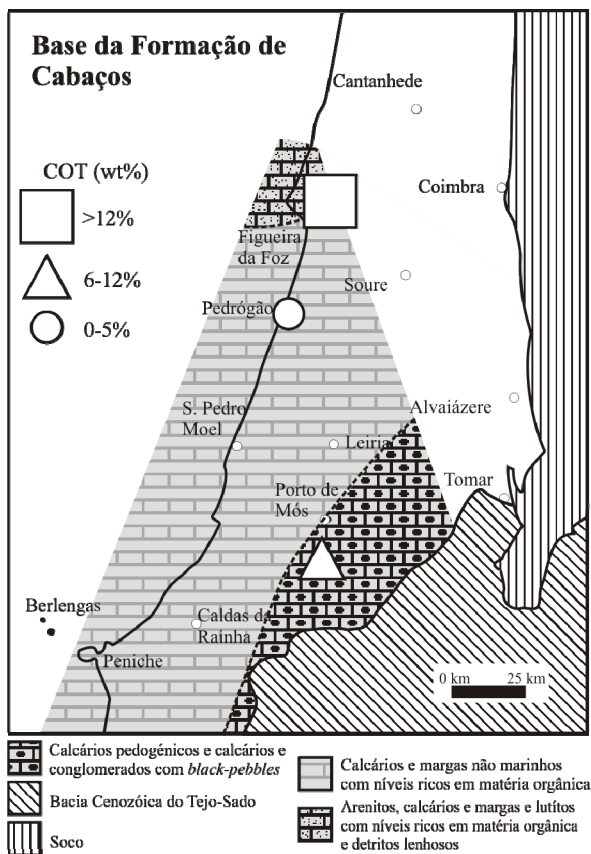


Figura 4. Mapa genérico de distribuição de fácies (de acordo com Azerêdo *et al.*, 2002) e COT máximo para a base da Formação de Cabaços.

O valor máximo de 30,7% de COT na Formação de Cabaços foi determinado no Cabo Mondego, atingindo 11,6% no Maciço Calcário Estremenho (Vale de Ventos) e 4,7% em Pedrógão. Os estudos palinofaciológicos em curso nestes locais mostram que a matéria orgânica particulada é predominantemente continental (fitoclastos, pólen e esporos), pontuada por eventos menores de influência marinha (por exemplo, ocorrência de raras algas *Prasinophyta* e quistos de dinoflagelados). Alguns dos níveis analisados possuem uma importante contribuição de outros tipos de componentes, como matéria orgânica amorfa ou algal de água doce (Silva *et al.*, 2010a e ver também Barron e Azeredo, 2003 para um maior detalhe sobre os estudos palinológicos). Os biomarcadores relacionados com proveniência são consistentes com as palinofácies (Figura 5).

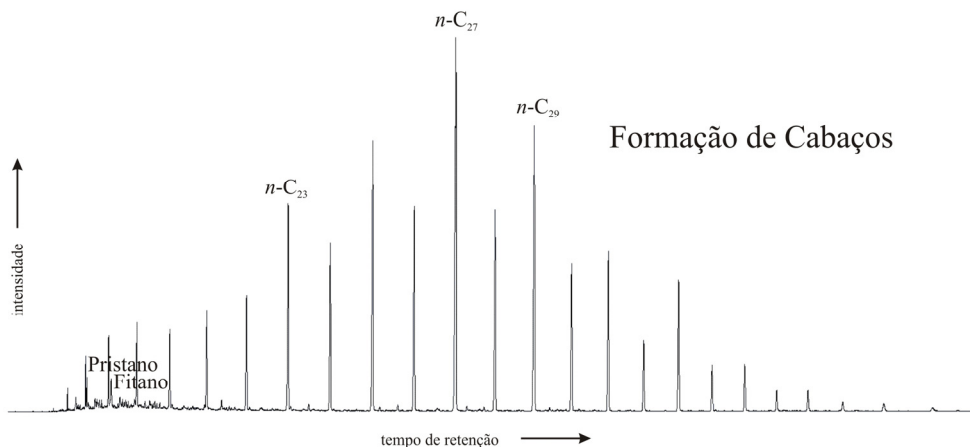


Figura 5. Cromatograma (m/z 85) de uma amostra da Formação de Cabaços.

Considerações Finais

Na BL, o mb MCNB e a Formação de Cabaços correspondem aos dois intervalos estratigráficos com extensão bacinal potencialmente geradores de petróleo. A intersecção dos diversos parâmetros sedimentológicos e geoquímicos em estudo, com recurso paralelo a quadros biostratigráficos detalhados e/ou a observações de campo de alta resolução, permitirá uma reconstituição bastante fina das condições paleoceanográficas vigentes durante a sedimentação daquelas unidades e o aperfeiçoamento dos respectivos modelos sedimentares.

Agradecimentos

Agradece-se à FCT-MCTES pelo suporte financeiro providenciado a Ricardo Silva, através de uma Bolsa de Doutoramento. Este trabalho é uma contribuição para o projecto PTDC/CTE-GIX/098968/2008, financiado pela FCT-MCTES.

Bibliografia

- Azerêdo A.C., Cabral, M.C. (2004) - Bio-sedimentary signatures of high-frequency salinity/subaerial exposure changes: Examples from the Oxfordian of Portugal (Cabaços Formation). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*; 110 (1), 231–238.
- Azerêdo A.C., Cabral, M.C., Martins, M.J.F., Loureiro, I.M., Inês, N. (2010a) - Nota preliminar sobre a ocorrência da Formação de Cabaços (Oxfordiano) na região da Serra do Bouro (Caldas da Rainha). Resumos estendidos do VIII Congresso Nacional de Geologia. e-Terra, 2010a; 21 (6), 4 p..
- Azerêdo, A. C.; Cabral, M. C.; Martins, M.J.; Loureiro, I. M. & Inês, N. (2010b) (*in press*) Estudo estratigráfico dum novo afloramento da Formação de Cabaços (Oxfordiano) na região da Serra do Bouro (Caldas da Rainha). *Comunicações Geológicas*, 97.
- Azerêdo, A.C., Wright, V.P., Ramalho, M.M. (2002) - The Middle-Late Jurassic forced regression and disconformity in central Portugal: eustatic, tectonic and climatic effects on a carbonate ramp system. *Sedimentology*; 49, 1339–1370.
- Azerêdo, A.C., Wright, V.P. (2004) - Multi-scale signatures and events in carbonate systems (Middle to early Upper Jurassic, Lusitanian Basin). In: Duarte, L.V., Henriques, M.H. (Eds.), *Carboniferous and Jurassic Carbonate Platforms of Iberia. 23rd IAS Meeting of Sedimentology, Field Trip Guide Book, Coimbra*; 1, 75–91.
- Barrón, E., Azerêdo, A.C. (2003) - Palynology of the Jurassic (Callovian-Oxfordian) succession from Pedrógão (Lusitanian Basin, Portugal). *Palaeoecological and palaeobiogeographical aspects. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*; 227, 259-286.
- Duarte, L.V. (2007) - Lithostratigraphy, sequence stratigraphy and depositional setting of the Pliensbachian and Toarcian series in the Lusitanian Basin (Portugal). In: R. B. Rocha (ed). *The Peniche section (Portugal). Contributions to the definition of the Toarcian GSSP. International Subcommission on Jurassic Stratigraphy 2007*, 17–23.
- Duarte, L.V., Silva, R.L., Mendonça Filho, J.G., Oliveira, L.C. (2010a) - Evidências geoquímicas do Jurássico Inferior de Peniche (Bacia Lusitânica, Portugal): Estado de arte e perspectivas futuras. *X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, XVI Semana de Geoquímica, Memórias*; 15, 3–24.
- Duarte, L.V., Silva, R.L. Oliveira, L.C.V., Comas-Rengifo, M.J., Silva, F. (2010b) - Organic-Rich facies in the Sinemurian and Pliensbachian of the Lusitanian Basin, Portugal: Total organic carbon distribution and relation to transgressive-regressive facies cycles. *Geologica Acta*; 8 (3), 325–340.
- Duarte, L.V., Soares, A.F. (2002) - Litostratigrafia das series margo-calcárias do Jurássico Inferior da Bacia Lusitânica (Portugal). *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*; 89: 135–154.
- Duarte, L.V., Wright, V.P., López, S.F., Elmi, S., Krautter, M., Azerêdo, A.C., Henriques, M.H., Rodrigues, R., Perilli, N. (2004) - Early Jurassic carbonate evolution in the Lusitanian Basin (Portugal): facies, sequence stratigraphy and cyclicity. In: Duarte, L.V., Henriques, M.H. (Eds.), *Carboniferous and Jurassic Carbonate Platforms of Iberia. 23rd IAS Meeting of Sedimentology, Field Trip Guide Book, Coimbra*; 1, 45-71.
- Oliveira, L.C.V., Rodrigues, R., Duarte, L.V., Lemos, V. (2006) - Avaliação do potencial gerador de petróleo e interpretação paleoambiental com base em biomarcadores e isótopos estáveis do

- carbono da seção Pliensbaquiano-Toarciano inferior (Jurássico inferior) da região de Peniche (Bacia Lusitânica, Portugal). *Boletim de Geociências da Petrobras*; 14 (2), 207-234.
- Silva, R.L., Azerêdo, A.C., Mendonça Filho, J.G., Duarte, L.V., Cabral, M.C. (2010a) - The Middle-Upper Jurassic transition in the Lusitanian Basin (Portugal): preliminary evaluation of TOC, Sulphur, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ variation in carbonate deposits from mainly non-marine environments. In: Ruiz-Omeñaca, J.I., Piñuela, L. & García-Ramos, J.C. (Eds.), *Comunicaciones del V Congreso del Jurásico de España*. Museo del Jurásico de Asturias (MUJA), Colunga, 150.
- Silva, R.L., Duarte, L.V., Comas-Rengifo, M.J., Azerêdo, A.C. (2010b) - Top Ibex–Margaritatus (Pliensbachian) series of the Lusitanian Basin (Portugal): sedimentology, events and high-resolution correlation. *Livre de Résumé, Réunion spécialisée de la Société Géologique de France en hommage of Serge Elmi*, Lyon, France, 95-96.
- Silva, R.L., Mendonça Filho, J.G., Duarte, L.V., Comas-Rengifo, M.J., Azerêdo, A.C. and Ferreira, R., (2010c) - Organic-rich facies of the top Ibex–Margaritatus zones (Pliensbachian) of the Lusitanian Basin (Portugal): TOC and biomarkers variation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*; 74 (12-S1), A962.
- Wilson, R.C.L., Hiscott, R.N., Willis, M.G., Gradstein, F.M. (1989) - The Lusitanian basin of west-central Portugal: Mesozoic and Tertiary tectonic, stratigraphy, and subsidence history. *AAPG Memoir*; 46, 341–361.
- Wright, V. P. (1985) - Algal marsh deposits from the Upper Jurassic of Portugal. In: Toomey, D. F. & Nitecki, M. H. (Eds.), *Palaeoalgology: Contemporary Research and Applications 1985*, 330-341. Springer-Verlag, New York.
- Wright, V.P., Azerêdo, A.C. (2006) - How relevant is the role of macrophytic vegetation in controlling peritidal carbonate facies?: Clues from the Upper Jurassic of Portugal. *Sedimentary Geology*; 186, 147–156.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Interações entre os subsistemas terrestres e sua concepção nas esferas sociais e ambientais

Pedro Douglas da Silva¹; Magnólia Nascimento²; Thiago Crepaldi³; Alberto Neto³

¹Geólogo pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), BRASIL Pós – Graduando pela Universidade de Coimbra (UC), em Engenharia Geológica e de Minas, Departamento de Ciências da Terra. pedrosalquod@ig.com.br

²Geóloga, D. Sc.(a). Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus de Fortaleza, BRASIL.

³Graduandos em Biologia pela Universidade de Coimbra (Licenciatura: UC).

Palavras-chave: Ciências, Tecnologia, Ambiente, Sociedade

Resumo

Admitindo que o Planeta Terra constitui um Sistema aberto e apresenta subsistemas, tais como a Atmosfera, Geosfera, Hidrosfera e Biosfera, o presente artigo, visa apresentar os saberes biológico e geológico integrados, constituindo os pilares para a sensibilização ambiental e conseqüentemente um desenvolvimento sustentável. Não obstante, esta pesquisa é descritiva, apresentando uma abordagem qualitativa e estudo de caso, enfocando a mineração como objeto principal, caracterizando aspectos relevantes ao ensino-aprendizagem de geociências, aspectos sociais e ambientais pertinentes a vivência profissional dos autores. A produção de mármore tem aumentado significativamente no Brasil e como conseqüência sua extração gera uma enorme quantidade de efluentes que, dispostos de forma ecologicamente incorreta podem ser prejudiciais à saúde humana. O Maciço Carbonático do Espírito Santo é o maior em extensão e representação deste corpo rochoso no Brasil. Com o objetivo de evitar o desperdício de resíduos sólidos, o lançamento da lama abrasiva no ambiente e conseqüentemente diversos impactos ambientais de âmbito negativo, faz-se necessário sua reutilização e este estudo tem por finalidade, apresentar diferentes aspectos do reaproveitamento destes rejeitos, que por vezes, quando indevidamente expostos ao ambiente podem assorear rios, poluindo suas águas e gerando impactos como o comprometimento da sobrevivência animal e vegetal neste ecossistema. Segundo a legislação ambiental, o gerador de resíduos é responsável por todo o ciclo de vida desse material: desde sua geração até a sua disposição final. Dessa forma, a reutilização desse resíduo é de grande importância tanto para a preservação do ambiente como para empresas e empresários. Contudo, o presente artigo, visa apresentar diferentes metodologias, sendo elas: econômicas, sócias, ambientais, biogeoquímicas, onde os resíduos da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais e de moagem de rochas são uma fonte potencial de matéria-prima a ser aplicada na produção de artefatos com fins na indústria de tijolos ecológicos e na agricultura.

Key-words: Sciences, Technology, Environment, Society

Abstract

Assuming that the Earth is an open system and subsystem features such as Atmosphere, Geosphere, Hydrosphere and Biosphere, this article aims to present the integrated biological and geological knowledge, constituting the foundation for environmental awareness and consequently a sustainable development. Nevertheless, this research is descriptive, qualitative approach and presenting a case study, focusing on mining as its main subject, characterizing important aspects of the teaching-learning in geosciences, social and environmental aspects relevant professional experience of the authors. The production of marble has increased significantly in Brazil and consequently its extraction generates a large quantity of effluent, arranged in an ecologically incorrect can be harmful to human health. The Massif Carbonatic of the Holy Spirit is the largest in scope and representation of this rocky body in Brazil. Aiming to avoid wastage of solid waste, the release of the abrasive slurry on the environment and consequently many negative environmental impacts of the framework, it is necessary to re-use and this study aims to present different aspects of reuse of these wastes, which sometimes, when unduly exposed to the environment can aggrade rivers, polluting their water, causing environmental impacts as the involvement of plant and animal survival in this ecosystem. According to environmental legislation, the waste generator is responsible for the entire life cycle of this material: from its generation to final disposal. Thus, the reuse of this waste is of great importance for the preservation of the environment and for businesses and entrepreneurs. However, this article aims to present different methodologies, namely: economic partners, environmental biogeochemistry, where the residues of the industry of ornamental stones and grinding rocks are a potential source of raw material to be applied in the production of artifacts for the purpose of green bricks in industry and agriculture.

Introdução

As geociências são oriundas de observações e experimentos, acarretando na compreensão dos processos internos e externos do planeta Terra. Esta ciência, tornou-se de extrema importância no cenário global, pois está inserida no cotidiano e na essência do ser humano, além de influenciar o progresso da sociedade. Entretanto, a biosfera e a geosfera, transpõem este conhecimento, perfazendo uma interação entre os processos naturais (solos, rochas) e os processos biológicos, cuminando com a Natureza e o Meio Ambiente. Esta relação intrínseca é tida como sendo essencial para que a compreensão histórico-evolutiva não se restrinja apenas a relação genética, evidente e amplamente estudada, e que se utilize desta ferramenta para traçar um padrão evolutivo correlacionando com as perspectivas já existentes. Contudo, esta relação promove a compreensão da ocupação do espaço geográfico, ou seja, nos sítios que o homem ocupa e ocupará tendo em vista o desenvolvimento econômico, político e social.

A mineração é entendida como uma atividade antrópica, que visa à obtenção de um determinado bem mineral, gerador de diversos impactos positivos e negativos à sociedade. Um bom exemplo de impacto negativo é o ambiental, que pode ser irreversível, e são decorrentes do desconhecimento, descumprimento e desrespeito às normas, éticas e técnicas presentes nas leis ambientais vigentes no país. Contudo, é cabível ressaltar que as leis presentes na legislação ambiental nada mais são do que uma medida tomada com o intuito de fazer com que haja a preservação dos recursos naturais, sendo que estes, quando sofrem prejuízos atingem direta ou indiretamente a sociedade, e muito mais do que isso, comprometem a existência da biodiversidade e conseqüentemente o fluxo natural da vida. Preservar o meio ambiente não deve ser equacionado apenas considerando os valores socioeconômicos, e sim, a valoração biológica, a fim de se preocupar com valores de existência. Os subsídios minerais e energéticos fornecidos a sociedade na forma de matéria-prima são produtos da mineração e são representados comumente pelos depósitos e jazimentos minerais, petróleo, gás natural e água subterrânea e estes bens naturais são abastecedores das indústrias.

Meio ambiente e desenvolvimento sustentável são assuntos que alcançaram uma imponente posição social acarretando discussões e estudos em diversas áreas científicas. O conceito legal brasileiro de meio ambiente, presente no art. 3.º, I, da Lei n.º 6.938 de 31 de Agosto de 1981 conceitua-se: “Conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas”.

Objetivos

O objetivo do presente artigo é apresentar um estudo de caso decorrente da atividade de mineração no Sul do Estado do Espírito Santo, no Brasil, caracterizando aspectos ambientais decorrentes da atividade extrativista em si, associando estes diagnósticos a interação do subsistema geosfera ao biosférico.

Tabela 1. Exemplos de interações entre os subsistemas terrestres. Adaptado de Biologia e Geologia (Santos, A., Santos, M.S., Santos, M.D., 2009).

Subsistema	Subsistema	Interações entre os subsistemas terrestres
Biosfera	Geosfera	As plantas terrestres captam do solo grande parte dos nutrientes. Muitos dos produtos resultantes da decomposição de cadáveres e restos de seres vivos ficam integrados na geosfera. Os seres vivos contribuem para a alteração das rochas, no que pode ser denominado intemperismo biológico.
Hidrosfera	Biosfera	As águas são poluídas por ação humana. Parte da água do ciclo hidrológico está retida nos seres vivos, cuja constituição é maioritariamente por água. As plantas, para realizarem a fotossíntese, necessitam de água.
Hidrosfera	Geosfera	A hidrosfera fornece, através das águas dos oceanos enriquecidas em dióxido de carbono atmosférico, o CO ₂ necessário a formação das rochas carbonatadas da geosfera. As erupções vulcânicas fornecem os materiais (lava, gases, piroclastos) e a energia a hidrosfera, alterando a composição das águas oceânicas.
Atmosfera	Geosfera	As erupções vulcânicas libertam para a atmosfera inúmeros gases e energia sob a forma de calor. Os gases acumulados na atmosfera podem ser utilizados para a formação dos calcários e de outras rochas carbonatadas. A desintegração de elementos radioativos provenientes da litosfera permite a libertação de energia térmica para a atmosfera.
Atmosfera	Biosfera	Os seres fotossintetizantes devolvem a atmosfera o oxigênio resultante da fotossíntese, o qual pode ser utilizado na respiração da maioria dos seres vivos. As plantas captam o dióxido de carbono e libertam oxigênio, mas também enriquecem a atmosfera em vapor de água. O homem, com a emissão de gases mais ou menos poluentes a partir de fábricas, de automóveis e da exploração de combustíveis, pode alterar a composição da atmosfera.

Metodologia de Trabalho

Os materiais e métodos constituíram-se basicamente de: (1) Levantamento bibliográfico sobre a Geologia da área de estudo, bem como, sobre os aspectos relevantes a indústria local; (2) Visitas técnicas a estas indústrias e seus locais de atividade, tais como pedreiras e beneficiamento mineral, a fim de detalhar os impactos ao meio físico e (3) através de uma equipe de composição interdisciplinar, em laboratório, utilizando como ferramentas básicas a geologia, biologia e a química, ensaiar e medir as amostras recolhidas no campo, com a finalidade de propor medidas mitigadoras a estes danos ambientais.

Na etapa referente a geoquímica, as amostras coletadas foram tratadas no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geologia da UFRJ, onde foram cumpridos três estágios. O primeiro foi a obtenção da brita das amostras em fragmentador de mandíbula, que é precedida de lavagem e retirada de eventuais capas de alteração. No segundo, as britas foram lavadas e triadas, para que posteriormente fossem quarteadas. Em seguida, no terceiro estágio, o material quarteado foi moído em panela de tungstênio Siebtechnik, onde a granulometria deve atingir frações menores que 200 mesh após 1,5 minutos de moagem.

Na terceira etapa as análises foram realizadas por espectrometria por fluorescência de raios-X, que determina a concentração de elementos maiores e menores na forma de óxidos e a concentração de elementos traço em ppm (partes por milhão) e por ICP-MS, para a determinação de elementos traço, particularmente ETR. As determinações por FRX foram efetuadas no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Departamento de Geologia da UFRJ, utilizando-se o espectrômetro Philips PW2400.

Resultados

Com o avanço da ciência e tecnologia, o ser humano tem sido apontado como o maior e mais eficaz transformador do meio natural, sendo por isso considerado criador e criatura do ambiente ao qual está inserido, pois vem sofrendo as consequências dos seus próprios atos. Segundo os pensamentos e postulações do filósofo e iluminista francês François-Marie

Arouet, de pseudônimo Voltaire, no século XVIII, “a displicência da população ao risco é uma responsabilidade inerente ao próprio ser humano”, sendo atualmente, necessárias estratégias internacionais para a redução de riscos e desastres naturais, entretanto, a maior problemática, no momento, é tornar as cidades resilientes.

Para contexto de compreensão integrada dos problemas ambientais aqui relacionados e compreensão da essencialidade da preservação ambiental para a manutenção da vida terrestre como ela é, torna-se necessário ter-se o conhecimento integrado das áreas biogeoquímicas, pois a geosfera e a biosfera estão intimamente associadas nos processos naturais. Na tabela (Tabela 1) relaciona-se de forma simplificada algumas correlações entre os subsistemas terrestres, tratando principalmente do elemento carbono, que constitui a matéria orgânica e inorgânica, em diferentes proporções.

Além do elemento carbono, na biosfera encontram-se outros elementos químicos (cálcio, fósforo, enxofre, nitrogênio, dentre outros) que

também possuem ciclos na biosfera, sendo denominados ciclos biogeoquímicos, que permite, tanto a utilização destes elementos pelos organismos, como a liberação desses elementos para o meio ambiente, permitindo assim, a manutenção da vida. Este, portanto, é um processo reciclável, pois as substâncias naturais são transformadas continuamente, sem sair da biosfera. Sendo, por isso, considerados como processos integrados, devido aos elementos estarem presentes tanto na atmosfera, geosfera, hidrosfera - já que o mesmo nitrogênio presente no ar é utilizado por bactérias nitrificantes e presentes em raízes de plantas; o fósforo, o cálcio e o carbono estarem presentes na composição dos organismos, ao mesmo passo, que estão presentes como nutrientes terrestres e o oxigênio ser essencial para os seres aeróbios, em geral, em diversos ambientes diferentes – os ciclos agem como um processo conjunto da vida.

O estudo de caso a ser apresentado, retratará, as principais demandas sócio-ambientais provenientes do Sul do Espírito Santo, inserido geologicamente no Orógeno Ribeira, mais precisamente no Terreno / Complexo Paraíba do Sul. Foram reconhecidas em mapeamento regional, cinco unidades litológicas distintas: mármore, escarnito, gnaisses, granitos e rocha metabásica, retratando assim, os impactos positivos e negativos da atividade mineira: (i) a problemática dos resíduos sólidos inertes e (ii) a recuperação destas áreas impactadas.

A exploração da rocha em si contribui para um forte impacto visual e estrutural do terreno (Figura 1) e nessa mesma fase de lavra ou na subsequente, o beneficiamento, há geração de resíduos que comumente não têm um fim apropriado. Os resíduos produzidos pela atividade são os estéreis (fragmentos de rochas irregulares, de diversas proporções) e os rejeitos (casqueiros, cacos, lama abrasiva). Os órgãos de fiscalização ambiental estão constantemente exigindo uma destinação correta para esses resíduos (Figura 2), destino esse que não seja em encostas, riachos ou terrenos abandonados próximos à atividade (no caso dos estéreis ou casqueiros e cacos, respectivamente) e em solo sem impermeabilização (no caso da lama abrasiva). Vale ressaltar, que o lançamento destes resíduos em um determinado local transpõe as barreiras daquele ambiente, alastrando muitas vezes a poluição para além do local de descarte. Pensando em termos de níveis aquáticos, o que não percebe-se, mas é muito decorrente, é que os resíduos lançados em riachos e águas correntes, em geral, tem como destino final os oceanos. Assim, apesar de não ser perceptível para a maioria das pessoas, o aumento de resíduos sólidos, aumentam os níveis de eutrofização, que é evidenciado pelo aumento do número de organismos fotossintéticos (algas), nas zonas marinhas.



Figura 1. Pedreiras a céu aberto de mármore no Espírito Santo e a conseqüente poluição física do terreno.

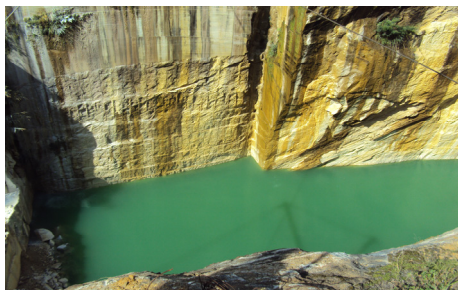


Figura 2. a) Depósito de rejeito das pedreiras e b) calha de pedra abandonada preenchida por água, constituindo impacto visual e proliferação de insetos, dentre outros danos ambientais e sociais.

Como linha de pesquisa, procurou-se desenvolver projetos envolvendo o emprego de materiais alternativos na construção civil com o objetivo de oferecer para as comunidades carentes processos construtivos mais baratos. Com essa preocupação, procurou-se desenvolver alternativas para a fabricação de tijolos ecológicos, a partir da lama abrasiva (Figura 3). Por tijolo ecológico, entende-se o material que não necessite de queima, ou seja, é um material de fácil montagem, fabricados a partir do pó do mármore e não vão ao forno para serem queimados, tornando sua produção ecologicamente correta. Os tijolos ecológicos são feitos de uma mistura de solo-cimento, na proporção de 10:1, devidamente umedecida e submetida à prensa manual, de custo baixo, uma vez que se destina a atender uma comunidade, ou seja, a partir dos resíduos da produção de mármore, pode se produzir manualmente tijolos estruturais ecológicos, que levam cerca de 80% de lama abrasiva. Contudo, a reutilização desse resíduo, no caso, a lama abrasiva, tem sido de extrema relevância principalmente para os empresários do setor de rochas. A preocupação com a preservação do meio ambiente tem sido freqüente, devido ao sistema de gestão de qualidade

destas empresas, no tocante as leis ambientais em vigor, bem como, a imagem da própria empresa, que não deseja estar vinculada a degradação ambiental.



Figura 3. Um dos maiores problemas da atividade mineira, no tocante aos aspectos ambientais: a questão da lama abrasiva, que pode ser reutilizável na construção civil.

Levando em consideração que resíduos de mármore também são minérios, torna-se altamente irracional e abrupto ao ambiente o pó de serragem ou os rejeitos dos blocos serem descartados em lagoas de decantação e aterros. Evitar o desperdício e com isso minimizar poluições ambientais seria altamente coerente reciclando os resíduos e oportunando processos de aproveitamento desses efluentes. O uso desses resíduos poderia ser aplicado como corretivo de acidez de solos, como fonte de cálcio e magnésio para a agricultura e apresentariam uma forte possibilidade para obtenção de material cerâmico. A partir disso, a obtenção de subprodutos diminuiria a quantidade de rejeitos descartados na natureza, além da geração de empregos na reutilização de um material indesejável e a princípio sem valor comercial.

Sendo assim, o Sul do Estado do Espírito Santo destaca-se como sendo o maior produtor de rochas ornamentais no Brasil, portanto, considerado como um exemplo de Arranjo Produtivo Local (*APL Mineral*) e apresenta expressiva geodisponibilidade de carbonato de cálcio e magnésio, devido às ocorrências de lentes de mármore calcíticos e dolomíticos com cerca de 40 km de extensão, distribuído numa área de cerca de 180.000 ha, compreendendo os municípios de Vargem Alta e Cachoeiro de Itapemirim, destacando neste último, os distritos de Itaoca – Gironda (Figura 4).

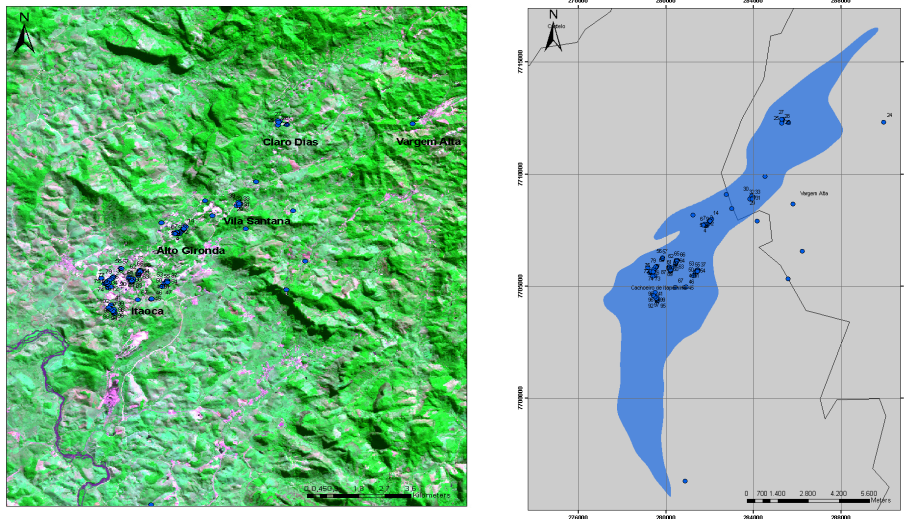


Figura 4. Imagem da lente de mármore (direita) e imagem de satélite evidenciando as pedreiras de exploração de mármore no sul-capixaba visitados (esquerda). Imagens de Silva, P. D. 2009.

O lançamento de resíduos sólidos inertes decorrentes da atividade mineira no meio físico preocupa a sociedade em geral, e mais especificamente geólogos e ambientalistas, em função dos impactos ambientais causados, muitas vezes, irreversíveis. Assim sendo, pretende-se associar o conhecimento geológico e agroecológico, investigando a possibilidade no tocante à reutilização e reaproveitamento dos rejeitos dos mármore produzidos na lavra como fertilizantes na agricultura. As análises químicas constituem uma ferramenta para correlacionar geologia à agricultura, através do método da calagem. Esse método agrícola consiste na adição de frações moídas de carbonato de Ca e Mg no solo, elevando o pH do mesmo, sendo este processo responsável por uma eficácia nos adubos, melhorias na produtividade das culturas e fornecimento de Ca e Mg como nutrientes que são necessários aos vegetais, dentre outros. Análises químicas por meio de Fluorescência de Raio X em 23 amostras de mármore (Figura 5) evidenciam proporções diferenciadas de CaO , MgO e SiO_2 , e como elementos traços Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , CrO_2 , Rb_2O e SrO .

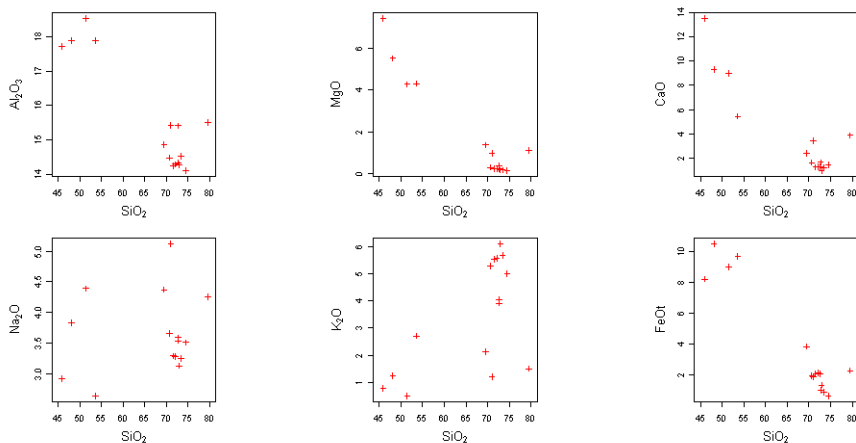


Figura 5. Digramas de Harker dos elementos maiores para os mármore, atestando sua aplicabilidade na agricultura, evidenciando a importância da geoquímica a luz da agroecologia.

Segundo a classificação de calcários agrícolas (Secretaria de Fiscalização Agropecuária Brasileira) cinco amostras que apresentam valores de MgO abaixo de 5% são classificadas como insumos calcíticos; duas amostras em função de seus teores de MgO situarem-se na faixa de 5 a 12 % são magnesianas; enquanto as demais, com teores de MgO acima de 12% são classificadas como dolomíticas. Das rochas analisadas, entre mármore calcíticos e dolomíticos, as porcentagens médias de CaO foram de 64%, MgO de 23% e FeOt de 0,07 % sugerindo que a elevada disponibilidade dos elementos Ca e Mg nestas rochas podem indicar o seu uso como fertilizadores de solos, corrigindo simultaneamente a acidez dos mesmos e fornecendo de nutrientes secundários como Mg e Fe, necessários às plantas em dosagens corretas. Teores significativos de SiO₂ (0,3-26%) e Na₂O (0,08-0,07%), elementos benéficos, são outros indicadores da qualidade desses mármore para uso como fertilizantes. Mapeamento em detalhe aponta a existência de mármore enriquecidos em minerais com potássio, tais como tremolita – actinolita e flogopita, oriundos de processos metassomáticos de contato. Estes materiais poderiam ser fontes de K, que é absorvido em altas concentrações pelas plantas e por isso, considerado macronutriente essencial ao seu desenvolvimento. Conclui-se, portanto, que uma das alternativas aos resíduos da lavra dos mármore do Sul do Espírito Santo seria o seu emprego no processo de calagem, demonstrando que a ferramenta geologia através da geoquímica constitui-se de extrema

importância para o gerenciamento e valoração desse recurso. (Adaptado de Silva, Mello e Almeida, 2010).

Em se tratando da recuperação de áreas degradadas a restauração busca o reparo do meio ambiente a aproximadamente como era e a reabilitação visa uma nova utilidade para a área, além de ser ecologicamente correto, a renovação deste sítio degradado pela mineração pode ser vantajosa. Segundo Barth (1989), a recuperação não é um evento que ocorre em época determinada, mas um processo que se inicia antes da mineração e termina muito depois desta ter-se completado. Porém, apenas as grandes mineradoras seguem a definição de Barth, no setor de rochas ornamentais, como exemplo, apenas as maiores empresas têm ou participam de projetos ambientais, enquanto que nas demais pouco se faz e isso reflete no número de lavras de rochas ornamentais interditas no Estado do Espírito Santo.

Entende-se que a indústria mineira interpreta que os recursos minerais sejam infinitos e que tudo que aparentemente não sirva mais deve ser descartado, o que corrobora e colabora para sua extração, em quantidades maiores do que as necessárias, e os rejeitos sejam dispostos na natureza de forma irresponsável, podendo vir a contaminar solos e águas, ao invés de serem reaproveitados como subprodutos. Por tudo isso, conclui-se, que a atividade mineira desencadeia uma série de problemáticas ambientais, porém, existe impactos positivos e negativos a sociedade e concomitantemente com o progresso científico e tecnológico, surgem novas tecnologias capazes de minimizar tais danos, transformando em subprodutos ou produtos os diferentes resíduos das diversas etapas do ciclo de vida das rochas e a educação ambiental nos dias atuais, seria uma ferramenta participativa de aprendizagem e formação cidadã.

Conclusões

A mineração acarreta diversos impactos ambientais que desencadeiam, dentre outros: (i) a perda de capital natural; (ii) perda de funções ambientais (tal como, a contaminação de solos e de aquíferos); (iii) perda da biodiversidade;

Entretanto, a presença e disposição de resíduos sólidos, provenientes destas atividades, alteram a paisagem e, portanto, são considerados como um degradador ambiental. Contudo, visando a mitigação de tais danos ao meio físico, propõe-se a reutilização equilibrada destes resíduos como subprodutos comerciais e que sejam ambientalmente corretos. Portanto, os resíduos sólidos inertes, produzidos pela extração de mármore no Sul do Espírito Santo, podem ser reutilizados na construção civil e na agricultura,

evidenciando a interdisciplinaridade da causa, sendo que a última, tem sido amplamente utilizável, na integração dos conhecimentos geológicos e biológicos aos da engenharia agrônoma, pois, a calagem é uma metodologia de redução de Ph de solos, que tem que ser calculada e especificada a cada caso, pois, cada solo, necessita de uma dosagem correta de nutrientes, pois senão ocorre uma degradação química do mesmo.

Bibliografia

- Barth, R. C. (1989) - Avaliação da recuperação de áreas mineradas no Brasil. Boletim técnico nº1. Sociedade de investigações florestais – SIF, Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa e Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. Viçosa, MG; 41 p.
- Santos, A., Santos, M. S., Santos, M. D. (2009) - Biologia e Geologia. Resumos das matérias, actividades, exercícios e soluções. Edições ASA; 272 p.
- Silva, P. D., Almeida, C. N., Mello, E. F., Mandu, D. I. (2009) - Mapeamento Regional de mármore no sul do Espírito Santo. Anais do XI Simpósio de Geologia do Sudeste, São Pedro – SP; 82 p.
- Silva, P. D.; Mello, E. F.; Almeida, C. N. (2010) - Resíduos Sólidos provenientes da Lavra de Mármore no Sul do Espírito Santo – Geodisponibilidade aplicada à agroecologia. Anais do 45 Congresso Brasileiro de Geologia, Belém do Pará.
- Silva, P. D.; Nascimento, M. B.; Wandermurem, C. E. R. (2010) - O conhecimento geológico como uma das ferramentas construtoras das competências e habilidades necessárias a formação do cidadão e sua consciência ambiental. Anais do II Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves (RS); 1 - 8.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Ortognaisse Serra da Cangalha: Interface entre Mapeamento Geológico, Petrografia e Geoquímica

Pedro Douglas da Silva¹; Júlio César Mendes²

¹Geólogo pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Pós – Graduando pela Universidade de Coimbra (UC), em Engenharia Geológica e de Minas, Departamento de Ciências da Terra. pedrosalguod@ig.com.br

²Geólogo, D Sc. Docente da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Palavras-chave: Faixa Ribeira, Ortognaisses, Geoquímica

Resumo

A área de mapeamento deste trabalho situa-se no limite dos estados do Rio de Janeiro e do Espírito Santo, entre os municípios de São José do Calçado e Guaçuí, onde foram definidas quatro unidades de mapeamento: hornblenda-biotita ortognaisse, granada-biotita paragnaisse, granulito e charnockito. O objeto do presente artigo é a caracterização petrográfica e geoquímica do hornblenda-biotita ortognaisse, denominado Ortognaisse Serra da Cangalha. O Ortognaisse Serra da Cangalha tem composição monzogranítica e heterogeneidade textural relacionada à intensidade de deformação imposta às amostras estudadas. A composição mineralógica observada é constituída por quartzo, ortoclásio pertítico, plagioclásio, biotita e hornblenda (essenciais), Cpx (augita), opacos, titanita, zircão, apatita (acessórios) e muscovita, calcita e clorita (secundários). Análises químicas por FRX realizadas em amostras do Ortognaisse Serra da Cangalha evidenciam para esse corpo uma assinatura Cálcio-alcálica de alto K, com tendência fortemente metaluminosa a fracamente peraluminosa. O diagrama TAS revela que as amostras se posicionam próximo ao limite dos campos subalcalino e alcalino, com composições variando de granodioríticas a graníticas/sieníticas, evidenciando o enriquecimento em álcalis da sequência. São importantes os elevados teores de K₂O e Na₂O e valores de Ba maiores que 1000 ppm. Uma das amostras de ortognaisse revela concentrações muito inferiores de K₂O e Ba e maiores teores de Na₂O e CaO, indicando não ser parte da sequência, podendo estar associada a outra suíte. Desta forma, a geoquímica delimita distintos ortognaisses e o granulito.

Key-words: Central Ribeira belt, Orthogneiss, Geochemistry

Abstract

The mapping of this area of work falls within the limits of the states of Rio de Janeiro and Espírito Santo, between the towns of São José do Calçado and Guaçuí, which defined four mapping units: hornblende-biotite orthogneiss, garnet-biotite paragneiss, granulite and charnockite. The object of this paper is to characterize petrography and geochemistry of

the hornblende-biotite orthogneiss, called Serra da Cangalha orthogneiss. Mountain of the orthogneiss has Cangalha monzogranitic composition and textural heterogeneity related to the intensity of deformation imposed on the samples. The observed mineralogical composition consists of quartz, feldspar perthitic, plagioclase, biotite and hornblende (core), Cpx (augite), opaques, titanite, zircon, apatite (accessories) and muscovite, calcite and chlorite (secondary). Chemical analysis by XRF performed on samples of Serra da Cangalha orthogneiss evidence for such a signature body-calcium high-K alkaline, with a tendency strongly metaluminous to weakly peraluminous. The TAS diagram reveals that the samples are positioned close to the limit of subalkaline and alkaline fields, with compositions ranging from granodiorite to granite / syenitic, showing enrichment in alkalis of the sequence They are important as high percentages of K_2O and Na_2O and values greater than 1000 ppm Ba. One sample of orthogneiss shows much lower concentrations of Ba and K_2O and higher content of Na_2O and CaO, indicating not be part of the sequence, and may be associated with another suite. Thus, the geochemistry defines distinct granulite and orthogneiss.

Introdução

As unidades litológicas da região noroeste do Estado do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo estão situadas no segmento Setentrional da Faixa Ribeira. A área de estudo está geotectonicamente inserida no contexto da Faixa Móvel Ribeira, Província Mantiqueira, formada a partir da aglutinação do megacontinente Gondwana Ocidental, no final do Neoproterozóico por ação da Orogenia Brasileiro – Panafricano, cujo período colisional (diacrónico) entre o Cráton de São Francisco e Congo Ocidental se situa no intervalo 630 – 560 Ma.

As rochas estudadas no presente trabalho derivam de um pretérito mapeamento geológico, que culminou na amostragem de material aflorante na área pertencente aos limites dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, onde se encontra a zona de contato entre rochas granulíticas Paleoproterozóicas do complexo Juiz de Fora e gnaisses provavelmente pertencentes ao Domínio Costeiro do Terreno Oriental, de idade ainda incerta. Durante o desenvolvimento do evento Brasileiro, vários corpos ígneos se colocaram na crosta aí existente. As rochas componentes desses corpos mostram comportamento químico-mineral variado como também foram afetadas em graus diferentes pelos efeitos da compressão e de movimentos transcorrentes ocorridos durante este evento.

A área focalizada neste estudo compõe-se de rochas metamorfisadas em fácies anfíbolito alto a granulito que sofreram intensa compressão e deformação durante a orogênese brasileira assim como também pela atuação de expressiva zona de cisalhamento dextral, a Zona de

Cisalhamento de Guaçuí, localizada a cerca de 10 km a oeste da área em questão.

Objetivos

O objetivo do presente trabalho é a caracterização petrográfica e geoquímica de ortognaisses, charnockitos e granulitos. As rochas coletadas para este trabalho afloram no limite dos Estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro, no Brasil, propriamente situadas na porção oriental da região Serrana do Estado do Espírito Santo, entre os municípios de São José do Calçado e Guaçuí.

Metodologia de Trabalho

A metodologia de trabalho consistiu em nove etapas: (1) Pesquisa Bibliográfica, acerca da geomorfologia, geotectônica e outros contextos de totais relevâncias a este projeto; (2) mapeamento geológico regional e confecção de mapa geológico da área alvo de estudo, (3) laminação e análise petrográfica das rochas amostradas no levantamento de campo, (6) Preparação das amostras, (7) Litogeoquímica de rochas, (8) Tratamento dos dados e (9) Interpretação geológica dos dados e obtenção de resultados. Posteriormente ao mapeamento, amostragem e petrografia foram realizados os procedimentos para a análise química.

A primeira etapa baseou-se numa extensa pesquisa bibliográfica, onde houve a obtenção dos dados sobre a geologia regional e contexto geotectônico, com a finalidade de aprofundar os conhecimentos acerca dos eventos geológicos, tectônicos, geoquímicos e geocronológicos referentes à área em questão.

Na etapa referente a geoquímica, as amostras coletadas foram tratadas no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geologia da UFRJ, onde foram cumpridos três estágios. O primeiro foi a obtenção da brita das amostras em fragmentador de mandíbula, que é precedida de lavagem e retirada de eventuais capas de alteração. No segundo, as britas foram lavadas e triadas, para que posteriormente fossem quarteadas. Em seguida, no terceiro estágio, o material quarteado foi moído em panela de tungstênio Siebtechnik, onde a granulometria deve atingir frações menores que 200 mesh após 1,5 minutos de moagem.

Na terceira etapa foram analisadas quimicamente rochas gnáissicas e granulíticas relacionadas provavelmente ao Domínio Costeiro do Terreno Oriental da Faixa Ribeira e ao Complexo Juiz de Fora, respectivamente. As

análises foram realizadas por espectrometria por fluorescência de raios-X, que determina a concentração de elementos maiores e menores na forma de óxidos e a concentração de elementos traço em ppm (partes por milhão) e por ICP-MS, para a determinação de elementos traço, particularmente ETR. As determinações por FRX foram efetuadas no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Departamento de Geologia da UFRJ, utilizando-se o espectrômetro Philips PW2400, e as análises por ICP foram efetuadas no Acme Analytical Laboratories Ltd, no Canadá.

Resultados

Foram individualizados quatro litotipos que correspondem as seguintes unidades mapeadas: (1) Ortognaisse Serra da Cangalha, (2) Granada - Biotita Paragnaisse, (3) Ortogranulito e (4) Charnockito.

O denominado Ortognaisse Serra da Cangalha, refere-se a uma Hornblenda – Biotita Ortognaisse de cor cinza claro, leuco a mesocrática com granulometria média a localmente fina e muito fina, esta última relacionada à área de influência de tensões cisalhantes provavelmente associadas à atuação da Zona de Cisalhamento de Guaçuí (Figuras 1 a e b). Sua ocorrência principal deriva de afloramentos na forma de lajedos, encostas, escarpas íngremes e menos comumente como blocos de tamanhos variados encontrados espalhados sobre o solo.



Figura 1. a) e b): Aspectos Gerais do Ortognaisse Serra da Cangalha.

Apresenta-se localmente migmatizados, observando-se principalmente estruturas estromáticas (Figura 2e) e schöelen (Figura 2d), e menos comumente schlieren e nebulítica.

Em lâmina, a rocha é caracterizada como fanerítica leuco a mesocrática, inequigranular seriada, hipidiomórfica a xenomórfica (figura 3e.) com granulometria fina (0,1 a 1 milímetro) a média (1 a 2,5 milímetros),

localmente com cristais de ortoclásio de até 5 milímetros, e índice de cor variando entre 5 e 40%.

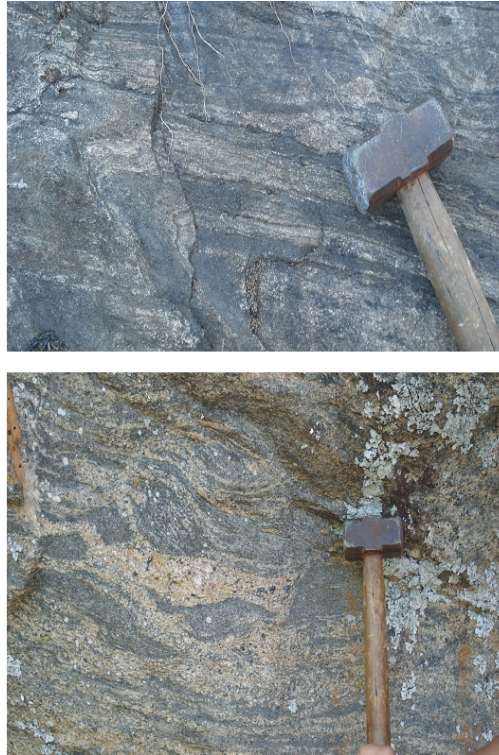


Figura 2. Ortognaisse migmatítico com estrutura schöelen (topo) e Ortognaisse migmatítico com estrutura estromática dobrada (fundo).

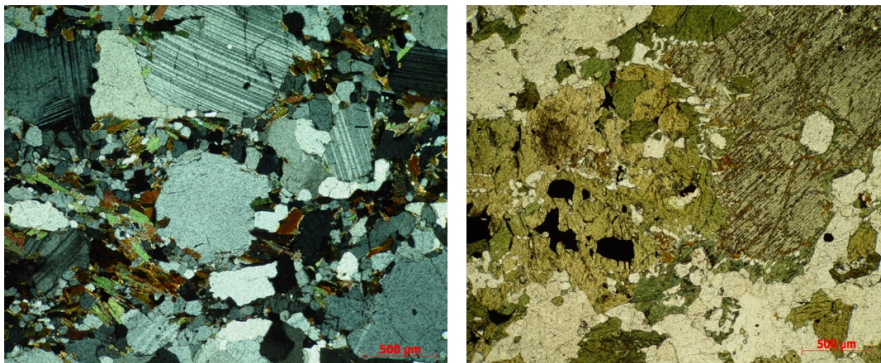


Figura 3. Textura de desequilíbrio mineral, com substituição de piroxênio por hornblenda e desta para biotita (direita) e Textura inequigranular seriada do Ortognaisse Serra da Cangalha (esquerda).

De entre os minerais máficos ocorrem, em ordem decrescente de quantidade, biotita, anfibólio de pleocroísmo verde (hornblenda), minerais opacos e clinopiroxênios de tonalidade verde claro e geralmente de alta birrefringência (provável augita diopsídica). Texturas de substituição mineral são comuns entre clinopiroxênio e hornblenda, estando o primeiro muitas vezes como núcleo relíctico no anfibólio (Figura 3d.). A biotita também pode ser resultado de uma fase secundária à hornblenda, mais raramente ao piroxênio. Os minerais opacos são encontrados como fases primárias, na forma de pequenas inclusões ou grãos isolados, ou ainda, como produto da exsolução nas reações que desestabilizam o clinopiroxênio e são formadas hornblenda e biotita.

Os minerais félsicos são representados por quartzo, feldspato potássico (ortoclásio) e plagioclásio (em média An₃₃ - oligoclásio a andesina). Os grãos de quartzo exibem evidências de recuperação, como forte extinção ondulante, e chegam a estar recristalizados em fitas (*ribbon quartz*) ou ainda como pequenos cristais (<0,1mm) junto com feldspatos, formando uma trama que revela agregados de minúsculos cristais de contornos retos a poligonais em meio a grãos maiores de feldspatos e minerais máficos. Os contatos entre estas fases félsicas em geral são irregulares, em forma de lobos e cúspedes, podendo ainda ser poligonal ou reta.

Os minerais acessórios identificados foram titanita, zircão, apatita e allanita. Zircão ocorre sobretudo como pequenas inclusões (granulares ou prismas alongados) nas fases principais, apatita também é comum na forma de inclusão, mas também são observados cristais maiores individualizados, e allanita é mais rara e encontrada em poucas amostras. A titanita apresenta dois modos de ocorrência: envolvendo mineral opaco na forma de auréola, indicando substituição de ilmenita/Ti-magnetita, e como grãos irregulares, anédricos, via de regra associados a biotita e menos comumente hornblenda. Enquanto a primeira associação mineral pode refletir substituição ainda na fase intramagmática (um crescimento tardio de titanita sobre opacos) ou mesmo reequilíbrio metamórfico, a segunda deve resultar de evento metamórfico que gerou biotita, hornblenda e titanita.

O granada-biotita gnaiss é uma rocha paraderivada observada em blocos, cortes de estradas, drenagens e lajedos, ocorrendo em ampla variação granulométrica, de fina a grossa em escala de afloramento, leucocrática a mesocrática. Sua foliação geralmente é bem definida por lâminas biotíticas, sendo localmente protomilonítica com o desenvolvimento de quartzo fitado e matriz muito recristalizada. Apresenta agregados de minerais máficos, frequentes granadas vermelhas e marrons e

esparsos porfiroblastos de K-feldspato. Em lâmina, a sua granulometria é média, com grãos variando de 0,1 a 3,0 milímetros, podendo apresentar cristais maiores de granada com até 4 milímetros. Os minerais são anédricos a subédricos e recristalização mineral é evidente em grãos de quartzo e feldspatos; esses últimos mostram clara sericitização, principalmente a microclina. Os contatos entre minerais variam de retos e irregulares a lobados e cuspidos. A textura em geral é gnáissica (lepidoblástica), no entanto textura granoblástica ocorre como resultado de recristalização da rocha.

Ortogranulito Juiz de Fora: rochas desta unidade ocorrem em afloramentos de corte de estrada, em encostas e como blocos isolados. É um litotipo com índice de cor muito variado, desde leuco a, mais raramente, melanocrático, de granulação fina a média, cor verde a preta, geralmente com foliação pouco desenvolvida e avançado grau de recristalização. São por vezes laminados, mostrando lâminas claras e escuras que são marcadoras da orientação da rocha. A orientação dos minerais, por sua vez, torna-se mais evidente na superfície de alteração, formando linhas realçadas pela erosão que destacam a foliação principal da rocha, assim como estruturas dobradas, eventualmente observadas. A mais significativa ocorrência desta rocha na área mapeada é em uma pedreira abandonada próxima à cidade de Guaçuí, área de domínio do Ortognaisse Serra da Cangalha. Em seção delgada a rocha é fanerítica fina com grãos hipidiomórficos, entre 0,1 e 0,6 milímetros, com amostras variando de isotrópica a visivelmente orientada. Apresenta de 5 até 40% de minerais máficos, intensa alteração de feldspatos e recristalização de quartzo, sendo rica em fases opacas e possuindo ocasionais grãos de granada e titanita. Minerais máficos mais frequentes: ortopiroxênio, clinopiroxênio, anfibólio (hornblenda), opacos e biotita, em agregados e lâminas máficas onde pode se observar relações de substituição entre estes minerais do centro para as bordas. Localmente observa-se tremolita como provável produto de reação retrometamórfica sobre hornblenda e clinopiroxênio. Os minerais félsicos são plagioclásio e quartzo, ocorrendo alguns feldspatos não geminados e com extinção ondulante que podem ser ortoclásio ou mais provavelmente serem plagioclásios sem maclas. Os contatos entre os minerais variam entre irregulares, poligonais e lobados.

O charnockito ocorre apenas em dois pontos visitados, na forma de pequenos lajedos e blocos dispersos no solo. A rocha é isotrópica mesocrática, tem cor verde e granulometria média, não apresentando qualquer estrutura visível. Possui xenólitos bem assimilados de gnaisse rico em granada e no lajedo pode-se observar que ela ocorre em contato brusco

com gnaiss leucocrático. Em lâmina, a rocha é fanerítica isotrópica inequigranular seriada, com minerais subbédricos a anédricos e índice de cor de cerca de 25%. A mineralogia essencial é plagioclásio, ortoclásio, quartzo, ortopiroxênio, clinopiroxênio, biotita e hornblenda, como minerais acessórios tem-se opacos, apatita e zircão. Os feldspatos são pouco alterados para sericita e rara calcita e os piroxênios mostram frequente transformação para mineral de cor vermelho alaranjada, associando-se notadamente a fases opacas, e contendo inclusões de apatita e zircão. Os feldspatos possuem comum hábito tabular e inclusões de opacos, biotita, zircão e apatita. Orto e clinopiroxênios encontram-se por vezes em contato direto, evidenciando cogeneticidade, e via de regra são substituídos nas bordas e fraturas por hornblenda e biotita, com expressiva exsolução de opacos.

A classificação petrográfica das amostras estudadas a partir da porcentagem modal, segundo o diagrama ternário QAP (Figura 4) mostra um protólito para o ortognaisse Serra da Cangalha que varia de (monzo) granito a granodiorito. O granulito tem composições variando de diorito a quartzomonzonito, chegando a tonalito. O charnockito revela composição granodiorítica e quartzomonzodiorítica.

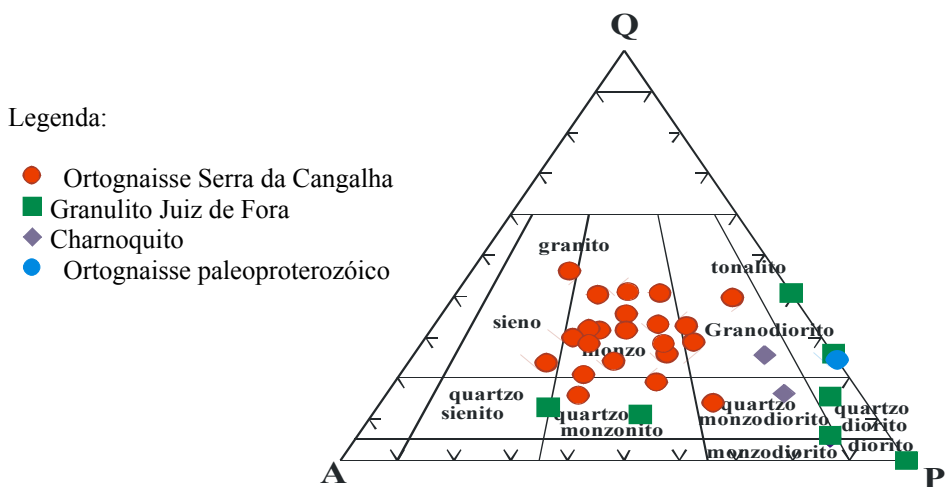


Figura 4. Classificação das rochas metamórficas de protólito ígneo plutônico, segundo Streckeisen (1976).

Com o intuito de caracterizar geoquimicamente as rochas estudadas, particularmente o ortognaisse Serra da Cangalha, foram realizadas dezessete análises químicas de rocha total (elementos maiores, menores e traços, incluindo os terras raras). Foram selecionadas quatorze amostras de hornblenda-biotita ortognaisse, duas de charnockito e uma de granulito.

As análises apresentam valores totais entre 98,21 e 100,32%, retratando a boa qualidade das mesmas, enquanto o percentual de LOI (*lost on ignition* ou perda ao fogo), inferior a 0,51%, mostra expressiva proporção de minerais anidros e pequeno grau de alteração das amostras. Dentre os ortognaisses, valores de SiO₂ entre 58,23 e 74,75% em peso revelam uma sequência expandida que possui evidência de cogeneticidade. Destaque para teores relativamente elevados de Fe₂O₃, CaO e K₂O e altos conteúdos de Ba e Zr, considerando-se a composição modal e química dos ortognaisses. Concentrações de MgO relativamente baixas são dignas de nota.

O diagrama Binário TAS (Figura 5a) mostra que a maioria das amostras se situa próximo ao limite dos campos subalcalino e alcalino, com composições dos ortognaisses variando de granodioríticas a graníticas / sieníticas e o granulito e charnockitos são gabróico-dioríticos. Os ortognaisses são predominantemente subalcalinos, evidenciados por um enriquecimento maior em SiO₂ do que nos álcalis (K₂O + Na₂O), com composições intermediárias a ácidas (58,0 a 74,9% de SiO₂).

O diagrama SiO₂ x K₂O de Peccerillo e Taylor (1976) indica para o Ortognaisse Serra da Cangalha e charnoquito uma assinatura cálcio-alcalina de alto K (Figura 5b), contrastando com um caráter cálcio-alcalino a toleítico para o granulito e ortognaisse paleoproterozóico, evidenciando novamente a distinção química entre os litotipos.

Na caracterização do magmatismo, os diagramas de variação ou Harker são de suma importância na caracterização geoquímica de rochas magmáticas, pois determinam as assinaturas químicas entre os membros de uma suíte de rochas, através da percepção de *trends* que caracterizam modificações químicas, podendo representar assim estágios na evolução de um magma.

Em função da variação observada nos teores de SiO₂ das amostras estudadas, este óxido foi escolhido como índice de diferenciação para análise preliminar do comportamento dos elementos maiores, menores (expressos em % de peso dos seus óxidos) e traços (expressos em partes por milhão – ppm), durante a cristalização das rochas, permitindo assim uma avaliação de possíveis processos de fracionamento que atuaram durante a cristalização primária das rochas estudadas.

Nos diagramas de Harker para os elementos maiores (Figura 6) são observados teores elevados de K₂O para os ortognaisses Serra da Cangalha, porém uma das amostras de ortognaisse, com símbolo de cor azul, revela concentrações muito inferiores em K₂O e enriquecimento em Na₂O e CaO, indicando não ser parte da sequência, sendo então provavelmente associada

a outra suíte. Para as amostras do Ortognaisse Serra da Cangalha, os *trends* observados são mais comumente retilíneos subparalelos entre si, sugerindo um processo de mistura de magmas como o mais atuante nestas rochas, visto que esses caminhos evolutivos lineares são mais típicos de processos de misturas magmáticas e/ou de assimilação. Ao mesmo tempo, a definição de *trends* correlacionando as amostras do Ortognaisse Serra da Cangalha aponta para uma provável cogeneticidade entre elas. As amostras de charnockito e do granulito evidenciam rochas ricas em Fe_2O_3 , MgO e CaO .

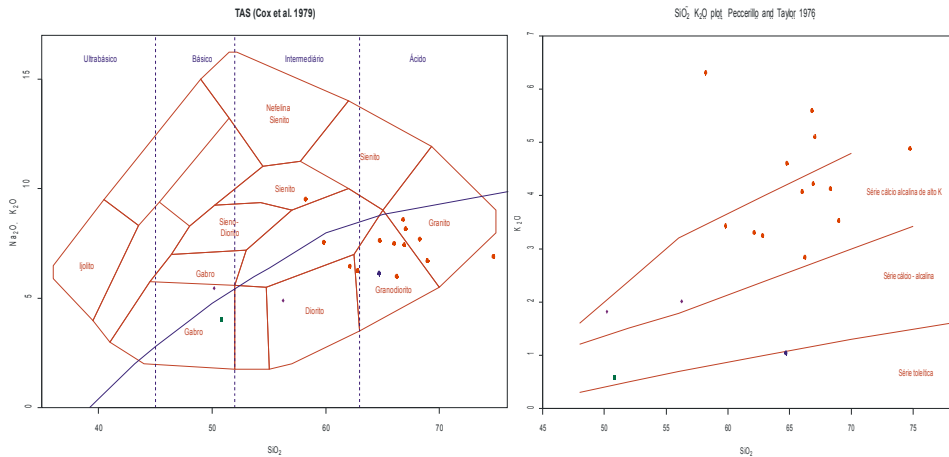
Nos diagramas de Harker para os elementos menores, os ortognaisses são mais pobres em TiO_2 , P_2O_5 e MnO quando comparados aos charnockitos e granulito. Estes últimos são enriquecidos em sua fase inicial nesses elementos. Os *trends* definidos continuam sendo primordialmente retilíneos e subparalelos.

Nos diagramas de Harker para os elementos traços observam-se valores superiores a 1000 ppm para Ba e também altos valores de Zr e Rb nos ortognaisses Serra da Cangalha, contrastando com baixos teores de Rb e Ba do ortognaisse paleoproterozóico. Essas concentrações enfatizam o enriquecimento em álcalis nos ortognaisses Serra da Cangalha e corroboram a afinidade geoquímica do Ba e Rb com o K, pois são alocados nos sítios cristalográficos ocupados pelo último em K-feldspatos e biotita.

Avaliando-se o comportamento dos elementos traços nos diagramas de Harker, apesar de certa dispersão das amostras ainda são evidentes dois *trends* retilíneos paralelos entre si, como já salientado, para os elementos maiores e menores, o que reforça a possível predominância de processos de mistura de magmas na evolução da sequência.

Desta maneira, a interpretação dos diagramas de Harker para vários dos elementos dosados aponta para uma assinatura química de provável cogeneticidade para amostras do Ortognaisse Serra da Cangalha, que se diferencia claramente do ortognaisse paleoproterozóico e do granulito e charnockitos, possivelmente relacionados a fontes distintas.

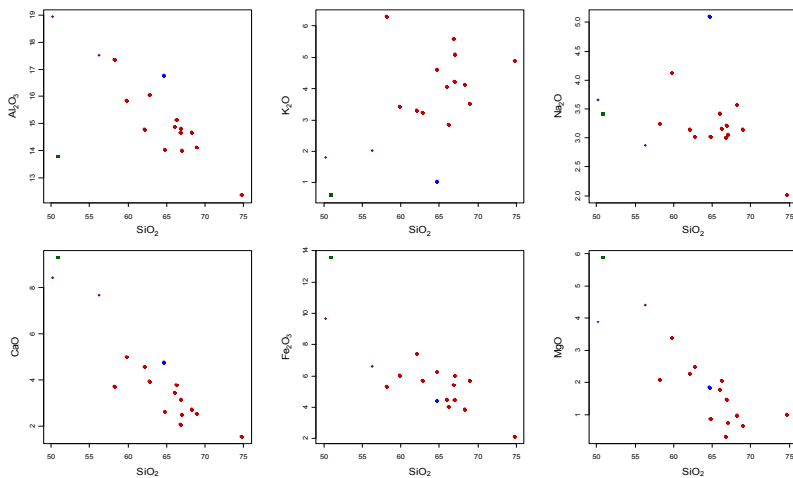
No diagrama AFM (Ferro total / álcalis ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) / MgO) os ortognaisses e charnockitos posicionam-se predominantemente no campo de rochas da série cálcio-alcalina, enquanto o granulito, mais enriquecido em elementos cafêmicos, plota no campo de rochas toleíticas (Figura 7).



Legenda:

- Ortognaisse Serra da Cangalha / ■ Granulito Juiz de Fora / ◆ Charnóquito /
- Ortognaisse paleoproterozóico

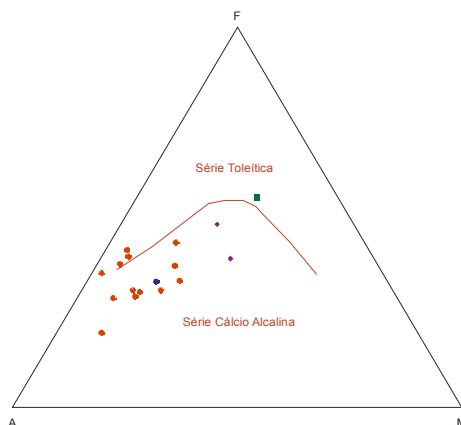
Figura 5. a) Diagrama TAS (COX et al. 1979) & b) Diagrama de Série Magmática de Peccerillo e Taylor (1976).



Legenda:

- Ortognaisse Serra da Cangalha / ■ Granulito Juiz de Fora / ◆ Charnóquito /
- Ortognaisse paleoproterozóico

Figura 6. Diagramas de Harker dos elementos maiores para todo o conjunto de rochas analisadas.



Legenda:

- Ortognaisse Serra da Cangalha / ■ Granulito Juiz de Fora / ◆ Charnoquito /
- Ortognaisse paleoproterozóico

Figura 7. Diagrama AFM (Irvine & Baragar 1971).

Conclusões

A partir do mapeamento geológico e de critérios petrográficos foi possível identificar os seguintes litotipos na área compreendida entre os municípios de Guaçuí e São José do Calçado: hornblenda-biotita ortognaisse, granada-biotita paragnaisse, granulito e charnockito. Os estudos geoquímicos conseguiram separar claramente dois tipos de ortogneisses, o Serra da Cangalha, principal foco deste estudo, e um datado como paleoproterozóico, além do granulito e charnockito.

A assinatura petrográfica e geoquímica do Ortognaisse Serra da Cangalha sugere: (i) O diagrama QAP mostra que o protólito do Serra da Cangalha é essencialmente monzogranítico e esse posicionamento praticamente num único campo infere cogeneticidade para estes gnaisses; (ii) O diagrama de Harker demonstra enriquecimento em álcalis no Ortognaisse Serra da Cangalha, evidenciado pelos altos valores de K_2O e moderados de Na_2O ; (iii) Os diagramas utilizados para caracterizar o magmatismo são coerentes com as análises químicas obtidas, onde está caracterizada uma sequência expandida pertencente a Série cálcio–alcalina a álcali–cálcica de alto K.

Bibliografia

- Horn, A. H. (2006) - Programa Geologia do Brasil : Folha Espera Feliz 1:100.000 : SE-24-V-A-IV. Relatório final do Projeto Pronageo da CPRM / UFMG - Belo Horizonte.
- Irvine, T. N., Baragar, W.R.A. (1971) - A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. Jour. Earth Science*; 8, 523-548.
- Peccerillo A., Taylor S.R. (1976) - Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*; 58, 63-81.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

O greisen do depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã (Ovar). Análise geoquímica da associação quartzo-moscovite

José Velho¹; Alcina Miranda¹; M. Cerdeira¹

¹Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, PORTUGAL, javelho@ua.pt

Palavras-chave: Greisenização, Moscovite, Caulino

Resumo

O depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã foi desenvolvido a partir de rochas migmatíticas condicionado por uma faixa de cisalhamento onde ocorreu deformação polifásica. A mineralogia do depósito é bastante complexa sendo evidentes dois estádios. Em primeiro lugar ocorreu um greisen onde se identificam as associações quartzo-moscovite e quartzo-turmalina. Posteriormente a esta fase, ocorreu uma outra relacionada com a formação de caulinite. São evidentes fenómenos de silicificação, turmalinização e greisenização. Neste trabalho são apresentados os resultados relativamente à associação quartzo-moscovite. As amostras retiradas do greisen mostram teores elevados em Al_2O_3 , CaO e perda ao rubro e menores teores em FeO, Na_2O , K_2O e Li_2O . Os valores mais elevados de ferro são provenientes das amostras da fácies pegmatítica enquanto as micas provenientes do greisen apresentam o valor mais baixo. Para além disso as moscovites do greisen apresentam valores baixos de B e de F. O modelo genético pressupõe ter havido um estádio inicial onde ocorreu um processo de albitização. Em seguida teria ocorrido uma circulação de uma fase fluida. Na altura da deformação sin- ou pós-D2, os fluidos caracterizavam-se quimicamente por actividades elevadas de H, B, F, Cl e Li, que modificaram os minerais presentes dando origem a associações mineralógicas do tipo quarto-mica e/ou quartzo-turmalina, que expressam um exogreisen.

Key-words: Greisenization, Mouscovite, Kaolin

Abstract

Kaolin deposit of S. Vicente de Pereira Jusã was developed from migmatitic rocks conditioned by a shear zone where a polyphasic deformation occurred. The mineralogy of the deposit is quiet complex where two stages can be identified. First, a greisen was formed identifying quartz-muscovite and quartz-tourmaline associations. After, occurred the formation of kaolinite. Silicification, turmalinization and greisenization phenomenon are evident. In this research only the results about quartz-muscovite assemblage are presented. Samples from the greisen show high contents in Al_2O_3 , CaO and loss of ignition, and less

contents in FeO, Na₂O, K₂O and Li₂O. The higher contents in Fe are those from the pegmatitic facies while muscovite from the greisen show the lowest content. Besides this information, these muscovites show low contents in B and F. The genetic model assumes an initial stage where an albitization process occurred. Then, a fluid phase followed. During sin or post D2 variscan deformation, these fluids were characterized by high activities of H, B, F, Cl and Li which modified the minerals present giving rise to mineralogical quartz-muscovite and quartz-tourmaline assemblages, which express an exogreisen.

Introdução

O depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã localiza-se na freguesia do mesmo nome, no lugar de Outeiro, concelho de Ovar. Geologicamente, faz parte da Zona de Ossa Morena (ZOM), constituída por formações metamórficas do Proterozóico Médio (micaxistos, gnaisses, migmatitos e gnaisses tonalíticos) e Superior (xistos porfiroblásticos, xistos cloríticos e moscovíticos, anfíbolitos e vulcanitos ácidos). Três unidades litoestratigráficas foram identificadas no autóctone do bordo NW da ZOM, da base para o topo: Unidade de Lourosa, Unidade de Espinho e Unidade de Arada (Ribeiro *et al.*, 1995). É na Unidade de Lourosa, caracterizada por metamorfismo de alto grau que ocorre o depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã, localizado mais concretamente no migmatito, isto é, no membro inferior da Unidade.

Ocorrem nesta unidade numerosos filões e injeções de granitóides de duas micas, atingindo-se a migmatização na parte central do antifórma de Vila da Feira. A migmatização é considerada contemporânea da fase D3 varisca (Ribeiro *et al.*, 1995). Os afloramentos daqueles granitóides, denominados de ortognaisses graníticos, constituem maciços dispersos de dimensões relativamente pequenas, alongadas segundo a direcção da xistosidade, N30°W (Aguado, 1992) (Figura 1). Pode-se definir uma pequena faixa com 1-2 km de largura média, por cerca de 25 km de extensão, em afloramentos descontínuos, por entre os xistos, desde Espinho até Adães. A maioria das intrusões graníticas encontra-se caulinizada e coberta por depósitos pliocénicos. Estas formações apresentam um estado de alteração superficial elevado que se encontram cobertas por numerosos depósitos de cobertura (altos níveis de praias antigas). São frequentes as intrusões de filões de quartzo com turmalina segundo direcções N60-70°E. O contacto com os xistos é franco e não se percebe qualquer auréola de metamorfismo. O depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã estende-se segundo um alinhamento NNW-SSE e é paralelo à falha que separa a Unidade de Lourosa da Unidade de Arada, tem, portanto, o mesmo

alinhamento da Faixa Blastomilonítica e a sua extensão foi estimada cobrindo uma área de cerca de 11 km² (Barbosa, 1988).

Neste depósito ocorrem paragénese mineralógicas que traduzem, entre outros, um fenómeno de greisenização o que torna este depósito de grande interesse mineralógico. Bobos e Gomes (1998) analisaram não apenas o greisen mas também a alteração pós-greisen, responsável pela formação de caulinite. O objectivo deste trabalho é uma contribuição para um melhor conhecimento geoquímico do exogreisen expresso pelo fenómeno de metassomatismo que deu origem à associação quartzo-moscovite, tentando interpretar a sequência de acontecimentos envolvidos.

O greisen quartzo-moscovite

Um greisen resulta de complexos processos metassomáticos tardios a posmagmáticos, que ocorrem no interior ou próximo de corpos graníticos consolidados e rochas adjacentes, sendo este processo precedido de metassomatismo alcalino durante o qual são produzidos os iões H⁺ que iniciam o processo (Pirajno, 1992; Stemprok, 1987).

A geologia do depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã é relativamente complexa e, por vezes, de difícil interpretação e cartografia devido à actividade extractiva bem como à qualidade dos afloramentos. Em certas áreas do depósito ocorre uma associação típica de quartzo e mica, por vezes com turmalina, que traduz um greisen. As associações mais comuns são quartzo-mica e quartzo-mica-turmalina, relacionadas muitas vezes com zonas onde ocorrem veios de quartzo aos quais se encontra associada uma fácies mais pegmatítica. Na figura 2 representa-se em esquema um afloramento com o greisen que surge em diversas zonas do depósito com diferentes granulometrias. A mica encontra-se parcialmente caulinizada e tem uma cor característica amarela-esverdeada.

Foram analisadas diversas amostras de micas tendo-se utilizado para tal os métodos analíticos da Fluorescência de Raio X (FRX), para a determinação dos elementos maiores, excepto o Na e o K que foram avaliados por espectrofotometria de chama. O F foi avaliado pelo método dos eléctrodos selectivos, enquanto para o B foi usada a espectrofotometria de plasma acoplado induzido (ICP). Para os elementos menores foi usada a espectrofotometria de absorção atómica.

As micas analisadas foram provenientes do migmatito alterado por argilização (M1 e M2) sendo que a amostra M1 possui um grão mais fino que a amostra M2, da fácies pegmatítica (M3, M4, M5), com granulometrias diferentes por ordem crescente. Analisaram-se duas amostras de mica

provenientes da fácies greisenizada (M6, M7) bem como de uma amostra do material mais caulinizado recolhida junto a uma fractura (M8). Sabe-se que a história da mica é complexa e diferentes gerações podem sobrepor-se espacialmente o que torna muito difícil o isolamento estrito de fases puras (Charoy, 1979). Na tabela 1 encontra-se representada a análise química das micas enquanto na tabela 2 são apresentados os resultados de F e de B, também naquelas micas.

Comparativamente com as restantes amostras, aquelas retiradas do greisen mostram teores mais elevados em Al_2O_3 , CaO e perda ao rubro e menores teores em FeO, Na_2O , K_2O e Li_2O , demonstrando que se está perante uma moscovite secundária formada, ao que tudo indica, a partir da plagioclase. Esta constatação mostra que o endogreisen já não se encontra presente no depósito estando-se perante o exogreisen, isto é, a fase posterior da alteração do greisen. Os valores mais elevados de ferro são provenientes das amostras da fácies pegmatítica (M3, M4, M5) enquanto as micas provenientes do greisen (M6 e M7) apresentam o valor mais baixo.

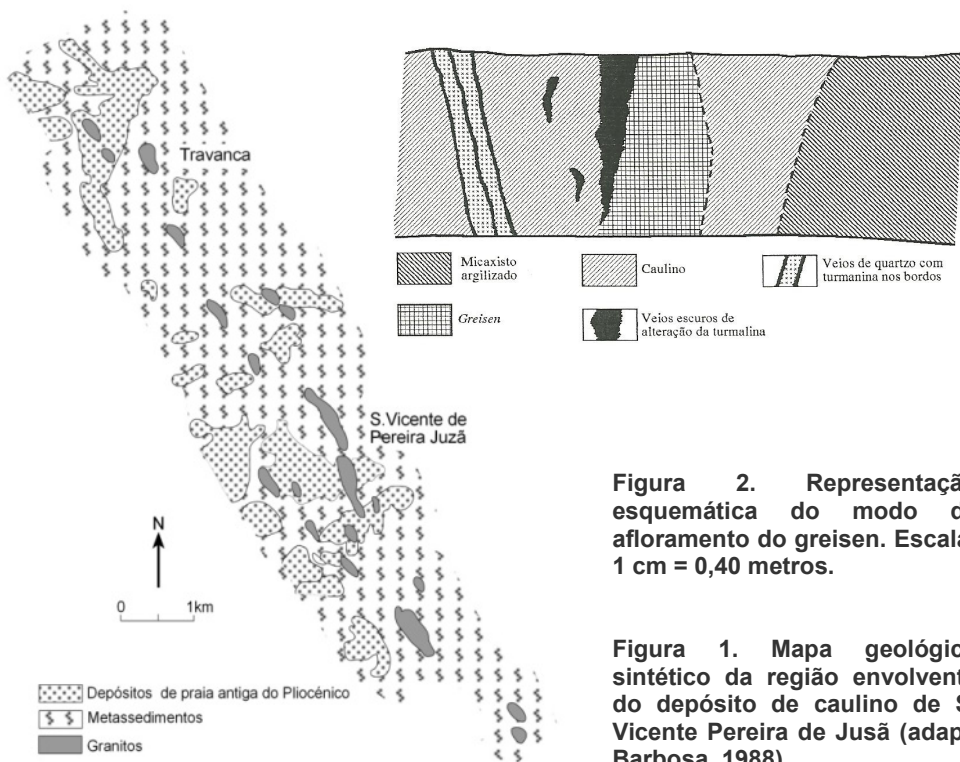


Figura 2. Representação esquemática do modo de afloramento do greisen. Escala: 1 cm = 0,40 metros.

Figura 1. Mapa geológico sintético da região envolvente do depósito de caulino de S. Vicente Pereira de Jusã (adapt. Barbosa, 1988).

Os teores em B e em F são muito baixos. O B parece possuir um comportamento inverso ao do Li, bem identificado nas amostras provenientes do pegmatito se bem que se possa delimitar os diferentes domínios (Figura 3). Quanto ao F passa-se o oposto (Figura 4), havendo entre este elemento e o Li uma correlação positiva onde, mais uma vez, os diferentes domínios se encontram bem definidos.

Tabela 1. Resultados da análise química nas micas de diferentes proveniências (valores em %).

Ref	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	P.R.	Total
M1	50,89	29,97	1,08	0,60	0,31	0,02	0,43	0,17	0,42	9,77	0,30	6,02	99,98
M2	50,95	33,34	0,15	0,70	0,31	0,02	0,12	0,14	0,90	8,98	0,06	4,60	100,09
M3	46,30	34,78	0,09	1,61	0,80	0,01	0,04	0,17	0,60	9,14	1,05	5,23	100,02
M4	45,05	34,10	0,08	1,91	0,88	0,05	0,09	0,18	0,80	11,00	0,82	5,09	100,05
M5	44,62	34,75	--	1,91	0,82	0,04	--	0,18	0,59	10,81	1,02	5,27	100,01
M6	45,23	37,25	0,24	0,51	0,21	0,03	0,21	0,19	0,16	7,98	0,02	7,77	99,80
M7	45,66	37,12	0,02	0,48	0,28	0,06	0,24	0,15	0,18	8,48	0,06	7,22	99,95
M8	46,69	35,89	0,33	0,53	0,23	0,05	0,09	0,19	0,37	6,94	0,06	8,70	100,07

Número de iões na base de 24 (O,OH)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Si	6,764	6,631	6,153	6,076	5,998	6,105	6,121	6,309
^{IV} Al	1,236	1,369	1,847	1,924	2,002	1,895	1,879	1,691
^{VI} Al	3,458	3,745	3,593	3,497	3,536	4,029	3,986	3,993
Fe ²⁺	0,067	0,076	0,200	0,217	0,218	0,057	0,077	0,060
Fe ³⁺	0,030	0,030	0,089	0,089	0,094	0,021	0,029	0,006
Mg	0,086	0,232	0,016	0,002	0,004	0,041	0,048	0,028
Mn	0,002	0,022	0,005	0,006	0,009	0,032	0,007	0,018
Ti	0,108	0,015	0,009	0,008	---	0,002	0,002	0,034
Ca	0,024	0,014	0,016	0,052	0,052	0,049	0,022	0,028
Na	0,112	0,202	0,189	0,209	0,210	0,048	0,047	0,097
K	1,656	1,484	1,543	1,893	1,857	1,378	1,450	1,202
Li	0,214	0,031	0,558	0,499	0,551	0,011	0,032	0,033

O Li possui um papel importante, senão mesmo preponderante, ao nível das micas, ao longo dos processos metassomáticos posmagmáticos. As fácies pegmatíticas representam termos das séries evolutivas graníticas originados a partir do magma residual rico em gases que pode ter concentrações de elementos voláteis como Li, F, B, Cl, entre outros. É natural, portanto, que as fases minerais que as constituem (neste caso a

mica), apresentem teores mais elevados desses elementos do que as que se formaram noutras condições.

Charoy (1979) havia mostrado que a greisenização desenvolve fases micáceas fortemente aluminosas não litíferas. Ao longo da greisenização a actividade do lítio ao nível das fases micáceas começará por aumentar, para diminuir fortemente nas fases posteriores. Os resultados mostram que o teor em Li é baixo.

Tabela 2. Teores de F e de B nas micas (valores em ppm).

Elemento	M1	M3	M4	M5	M6	M7
B	3,20	1,91	1,24	1,43	2,57	2,48
F	1,47	2,31	2,34	2,45	0,27	0,34

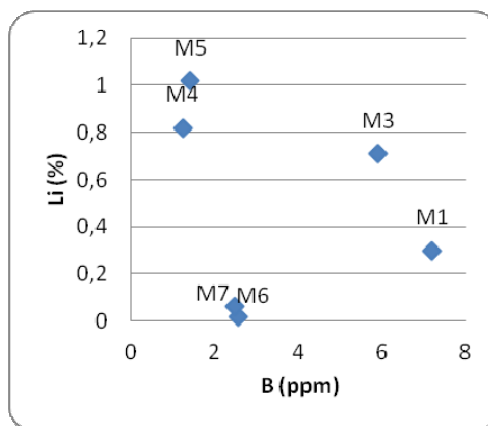


Figura 3. Relação entre os teores de B e de Li.

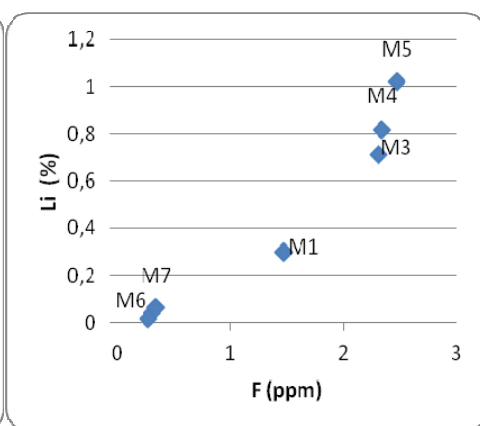


Figura 4. Relação entre os dados de F e de Li.

Os valores mais elevados de Li_2O registam-se nas micas da fácies pegmatítica enquanto o valor mais baixo ocorre na mica do greisen. O facto dos teores em F, observados nas micas do greisen, serem baixos, está de acordo com os dados de Fernandez (1991) que defende que, apesar deste elemento ter um papel relevante no processo de greisenização, este não se fixa na(s) fase(s) mineral(is) neoformada(s), concentrando-se na fase fluida hidrotermal.

Rocha total

Devido à impossibilidade de se conseguir recolher amostras sãs da rocha granítica torna-se inviável fazer-se um balanço geoquímico. A rocha sã não aflora no local em estudo nem tão pouco nas imediações do depósito. O estudo foi feito tendo apenas em vista tirar algumas ilações quanto à evolução geoquímica do processo de greisenização.

As análises químicas foram realizadas em amostras correspondentes a dois estádios de alteração distintos. Uma das amostras (A), traduz uma alteração precoce da rocha-mãe. A textura gnaissóide é ainda visível e a respectiva granularidade é fina a média. Os feldspatos apresentam efeitos de caulínização, facto que confere à rocha notável friabilidade. Uma segunda amostra foi estudada (B) que corresponde a um estádio mais evoluído da greisenização, caracterizado por granularidade média a fina. A degradação das amostras em termos texturais não permitiu a execução de lâminas delgadas para a realização do estudo petrográfico, restando, por isso, a análise química como meio de as caracterizar. Os resultados dessa análise encontram-se representados nas tabelas 3 e 4, no que diz respeito aos elementos maiores e aos elementos em traço, respectivamente.

Tabela 3. Resultados da análise química de elementos maiores (valores em %) efectuada sobre a rocha total, variando segundo o grau de alteração

Ref.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	P.R.	Total
A	69,47	19,75	0,26	1,00	0,40	----	0,31	0,10	1,29	2,11	0,12	5,90	100,71
B	69,94	22,16	----	0,10	0,05	----	0,11	0,07	0,02	2,22	0,02	5,35	100,04

Tabela 4. Resultados da análise química de elementos traço (valores em ppm) correspondentes a rocha total

Ref.	Ba	Zr	Nb	Y	Th	V	Zn	Cu	Ni	Pb	Rb	Sr	Cr
A	471	141	8	39	--	22	70	11	6	69	158	70	14
B	59	39	15	108	--	5	28	18	7	31	172	--	8

Ao considerarmos as análises de elementos maiores efectuadas na rocha total, correspondentes ao estádio inicial de alteração da rocha original bem como à fácies greisenizada, verifica-se um aumento do teor de Al₂O₃, para além de uma descida acentuada de Na₂O e de Fe quando se passa de um estádio para o outro. O Mn não foi detectado em nenhuma das fácies e o Li apresenta um valor muito mais baixo na fácies greisenizada, o que vem de encontro às conclusões de diversos autores, por exemplo, Charoy (1979).

A variação do Li é idêntica na rocha total e na mica correspondente. A análise do lítio na mica do greisen tinha mostrado um valor muito baixo, enquanto o teor em Li na mica da amostra que representa o estágio mais precoce de alteração é muito superior. Segundo Charoy (1975), é essencialmente a evolução química da fase micácea a responsável pelo aumento dos teores em Li observados nas rochas ao longo dos processos de evolução granítica, podendo os dados referidos relacionarem-se com este facto.

Quanto aos elementos traço, o facto de não se possuir análise química da rocha sã limita a interpretação dos resultados. No greisen, verifica-se um aumento de Rb e de Y bem como pequenos aumentos nos teores de Nb e de Cu. Não foi possível saber se as descidas verificadas em relação aos teores dos restantes elementos traço foi contínua ou se foi precedida de uma subida inicial relativamente à rocha sã.

Evolução da greisenização

O ambiente estrutural surge como um elemento determinante quanto à expressão dos fenómenos hidrotermais e ao seu prosseguimento em grande escala, para além da história tectónica e estrutural da zona onde o depósito se localiza. As estruturas regionais resultaram de uma deformação varisca polifásica, identificando-se quatro fases de deformação (Aguado, 1992).

As primeiras três são consideradas como sendo ante-Vestefaliano Médio enquanto a última será pós-Estefaliano Inferior. A actividade hidrotermal estará relacionada com um sistema deformacional que funcionou como canal de circulação de fluidos relacionados genética e espacialmente com intrusões granitóides ou com fluidos de origem metamórfica ou crustal. Nos estádios mais tardios, as águas meteóricas terão tido um papel relevante no desenvolvimento da caulnização, assunto que se encontra fora do âmbito deste trabalho.

A greisenização evidencia-se pela associação quartzo-mica (fina e amarela esverdeada), havendo locais onde a mica é o componente principal e outros em que o greisen é mais rico em quartzo-turmalina. Este fenómeno reflecte a alteração posmagmática de uma rocha primária granitóide, pela acção de soluções enriquecidas em voláteis, associadas ao processo de arrefecimento de intrusões graníticas.

Neste fenómeno de greisenização distinguimos entre endogreisen e exogreisen. No primeiro caso, podemos considerar ter havido um estágio inicial relacionado com um ambiente fechado onde ocorreu um processo de albitização. Mas, com o tempo, o sistema abre-se com a circulação de uma

fase fluida desequilibrada em relação à paragénese existente. Na altura da deformação sin- ou pós-D2, os fluidos caracterizavam-se quimicamente por actividades elevadas de H, B, F, Cl e Li, que modificaram os minerais presentes dando origem a associações mineralógicas do tipo quartzo-mica e/ou quartzo-turmalina, que expressam um exogreisen.

A este primeiro estágio caracterizado por uma sequência de eventos relacionados com a greisenização, terá ocorrido um segundo, caracterizado pela alteração pós-greisenização que inclui a caulinização (alteração supergénica) onde se formou caulinite estruturalmente desordenada para além de haloisite.

Conclusões

A contribuição deutérica para a caulinização e formação do depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã é apoiada pelos fenómenos de greisenização, de silicificação e de turmalinização de intervenção reconhecida no local. Esta estreita relação entre fenómenos de carácter tipicamente hidrotermal e a caulinização com uma extensão importante, não é, portanto, fortuita. A alteração deutérica, pela intensa fracturação que exige e pela instabilidade dos minerais que desenvolve, constituiu o factor indispensável e promotor do desenvolvimento de caulinização supergénica que se sobrepôs posteriormente. Neste trabalho foi apenas evidenciada a greisenização através da formação da associação quartzo-moscovite. As paragénese identificadas, as análises químicas realizadas e os dados de campo mostram que se está perante um exogreisen.

Bibliografia

- Aguado V. (1992) - Geologia estructural de la Zona de cizalla Porto-Tomar en la región de Oliveira de Azeméis – Serra de Arada (Norte de Portugal) Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Barbosa B. (1988) - Origem e idade dos caulinos portugueses em granitos. Boletim da Sociedade Geológica de Portugal; 24, 101-105.
- Bobos I, Gomes C. (1998) - Greisen and post-greisen alteration in the São Vicente de Pereira kaolinite deposit, Portugal. The Canadian Mineralogist; 36, 1615-1624.
- Charoy, B. (1979) - Définition et importance des phénomènes deutériques et des fluids associés dans le granite – Conséquences métallogéniques. Sciences de la Terre, Série “Mémoires”, 37.
- Charoy, B. (1975) - Ploemeur kaolin deposit (Brittany): na example of hydrothermal alteration. Petrologie; I (4), 253-266.
- Fernandez, A. (1991) - Petrologia granítica del pluton de Caldas de reyes (Pontevedra, España) – Estructura, mineralogia, geoquímica y petrogenesis. Tesis Doctoral, Ediciós Do Castro, Série Nova Terra, nº5, Madrid.
- Pirajno F. (1992) - Hydrothermal Mineral Deposit, Springer Verlag, New York.

- Ribeiro A, Pereira E, Chaminé H, Rodrigues J. (2005) - Tectónica do megadomínio de cisalhamento entre a Zona de Ossa Morena e a Zona Centro Ibérica na região de Porto-Lousã. Livro de Actas IV Congresso Nacional de Geologia, Universidade do Porto; 4, 329-333.
- Stemprok M. (1987) - Greisenisation. A review. Geol. Rundsch; 76, 169-175.

Parte 3
RESENHA BIOGRÁFICA

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Manuel Maria Godinho: um percurso de Vida

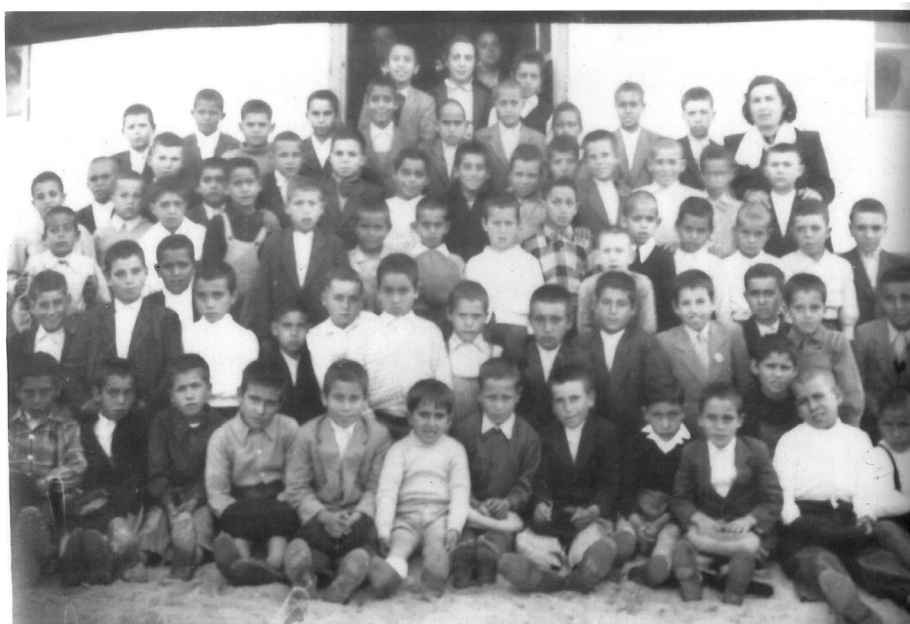
Luís Neves¹; Luís Godinho²; Pedro Godinho³

¹Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL, luisneves@dct.uc.pt

²Departamento de Eng. Civil, Universidade de Coimbra, PORTUGAL, lgodinho@dec.uc.pt

³Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, PORTUGAL, pgodinho@fe.uc.pt

Manuel Maria Godinho nasceu a 8 de Janeiro de 1940, em Maiorca, Figueira da Foz, mas cedo se mudou para Santana, terra que toma como sua e onde identifica as suas verdadeiras raízes. Manuel de Oliveira e Aida Godinho, seus pais, eram pessoas humildes que viveram sempre do trabalho agrícola, mas, longe do que era a realidade daqueles tempos, cedo perceberam a vontade e a capacidade que Manuel Godinho apresentava no que aos estudos dizia respeito.



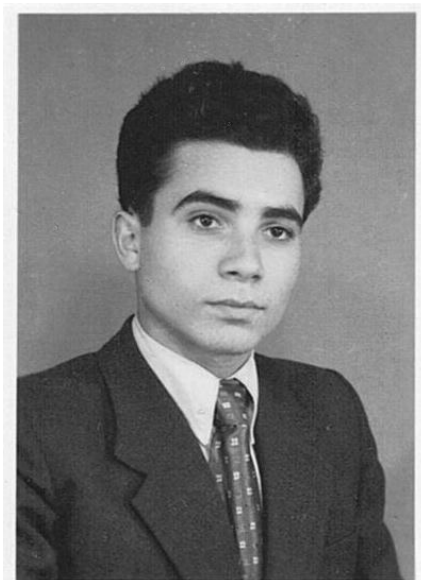
Foi já em Santana que frequentou a Instrução Primária, onde fez as 4 classes deste ciclo de ensino (é o terceiro, da esquerda para a direita, na segunda fila da imagem acima, envergando camisa branca). Entre toda a

vivência própria de um meio rural, desde cedo ajudando seus pais, demonstrou, desde logo, uma aptidão particular para o estudo, em todas as suas vertentes. Em 1950, com dez anos, realizou o exame do 2º grau, na Escola Conde de Ferreira, na Figueira da Foz, onde obteve a classificação de “distinto”. No entanto, nem as suas qualidades como estudante lhe garantiram escapatória aos processos pedagógicos então comuns, e, embora escassas vezes, compreendeu cedo o significado de um ensino autoritário. Ainda assim, continua a recordar a professora primária de então, e a reconhecer-lhe o mérito de ter conseguido ensinar e abrir as portas do conhecimento a toda uma geração.

Acedeu, então, ao 1º ciclo dos liceus, que preparou com base apenas num acompanhamento particular, em Santana, e sem frequência das aulas liceais. Apesar disso, submeteu-se a exame do 1º ciclo em 1953 no Liceu Municipal Dr. Bissaya Barreto, Figueira da Foz, onde obteve a classificação média de 17 valores.

Inscreveu-se, depois, no “Curso Geral de Comércio”, no ano lectivo de 1953-54, na Escola Industrial e Comercial da Figueira da Foz, curso que concluiu em 1955-56, com a classificação média de 16 valores. As capacidades de aprendizagem que revelava já nesta altura permitiram-lhe superar as dificuldades subjacentes à necessidade de fazer diariamente o percurso de comboio entre Santana e Figueira da Foz, que geralmente o obrigavam a sair da sua residência ainda de madrugada, e a voltar já ao final do dia. Apesar destas dificuldades, foi o aluno mais classificado da Escola em 1955, e um dos dois alunos mais classificados em 1956. Pelo facto, foi-lhe atribuído nos dois anos o prémio pecuniário “Dulce Bastos V. R. Simões”.

Quem o conheceu neste período recorda o gosto pela leitura e o empenho na aquisição de conhecimento, que lhe permitiram obter uma cultura geral fora do vulgar, apesar das limitações do meio onde vivia. Esta sua dedicação aos estudos não o impediu de viver intensamente todas as actividades próprias do meio, recordando até hoje as pescarias e os passeios com os amigos de então e de sempre, ou as sessões de pingue-pongue no edificio da Orquestra Filarmónica de Santana. Recorda também o curioso processo através do qual aprendeu, junto com outros, a nadar, e no qual tiveram como mestre o único elemento que na realidade nunca aprendeu essa actividade.



Seria normal, à época, que a escolaridade terminasse por aqui, após conclusão do “Curso Geral de Comércio”. Mas a vontade de aprender e de chegar mais longe, e o gosto pelo saber motivaram uma inflexão no seu percurso e um regresso ao Liceu. Matriculou-se em 1956-57 no 3º ano dos Liceus (2º ciclo) no recém-criado Liceu Nacional da Figueira da Foz. Concluiu, em 1958-59, o 5º ano deste ciclo de estudos com a classificação média elevada de 18 valores, tendo recebido, por esse motivo, um prémio pecuniário nacional. Seguiu-se o 3º ciclo dos Liceus, do qual fez o 6º e 7º anos cumulativamente em 1959-1960, como aluno externo frequentando o Colégio de S. Pedro, em Coimbra. Prestou então provas de exame do 7.º ano no Liceu nacional de D. João III, em Coimbra, onde obteve a classificação média de 18 valores. Esta tão elevada classificação distingue-o como aluno brilhante, sendo-lhe então atribuído o prémio nacional Infante D. Henrique, e, por parte do Colégio de S. Pedro, o prémio pecuniário Professor Ferrer Correia.

Já a residir em Coimbra, em 1960-61 matriculou-se na licenciatura em Ciências Geológicas na Universidade de Coimbra, que concluiu em Julho de 1964. Durante toda a licenciatura, usufruiu de uma bolsa de estudos da Fundação Calouste Gulbenkian, que as dificuldades económicas obrigaram a complementar com alguns trabalhos no Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra.



Uma vez mais, também na licenciatura se distinguiu como aluno de elevado valor, obtendo a classificação final média de 18 valores, oficialmente acrescentada de 1 valor por ser de 19 a média das disciplinas da especialidade (é o quarto na imagem acima, da esquerda para a direita). Os colegas recordam a sua preparação atempada nos estudos e a disponibilidade para ajudar nas dificuldades por estes sentidas, perdurando ainda, no domínio extra-académico, a fama de bom jogador de matraquilhos.

Como aluno com maior classificação de curso da Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra no ano lectivo de 1963-64 foi-lhe atribuído o prémio nacional Infante D. Henrique. Na realidade, não teve a possibilidade de usufruir deste prémio por se encontrar a cumprir serviço militar na altura em que o poderia fazer.

A sua colaboração com a Universidade de Coimbra iniciou-se ainda antes do final licenciatura. Entre Janeiro e Agosto de 1964, foi Auxiliar de Naturalista no Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra. Seguiu-se o ingresso como 2º assistente do grupo de Mineralogia e Geologia na Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra, em Agosto de 1964.

Começou, então, a sua carreira académica a entrecruzar-se com as obrigações militares. Foi chamado, em Maio de 1965, a cumprir serviço militar obrigatório, tendo efectuado a recruta em Mafra, onde concluiu o curso de oficiais milicianos. Regressou novamente à Universidade, onde reocupou o lugar de 2.º Assistente em Janeiro de 1966, por ser dispensado

de serviço militar até mobilização para o Ultramar. Foi novamente chamado, em Junho de 1966, e não tardou que rumasse à Guiné, para integrar a força portuguesa na guerra então travada nas ex-colónias. Aí cumpriu o serviço militar, numa das mais difíceis zonas operacionais, o posto avançado de Canquelifá próximo das fronteiras com o Senegal e com a Guiné Conacri. Comandando um destacamento, procurou estabelecer as melhores relações com as etnias locais, respeitando a sua cultura e tradições.



Em 1967 usufrui de um curto período de férias, parte do qual passado com colegas no Algarve visitando aspectos da geologia local, ao volante de um modelo Volkswagen então comum, que a história tornou conhecido pela designação de “carocha”. Uma forma, talvez, de manter ligação a realidades distintas da que, por obrigação, era forçado a viver. Viria a passar definitivamente à disponibilidade a 18 de Setembro de 1968, após dois anos marcantes.

Os difíceis tempos do Ultramar trouxeram, mais que não seja, um reforço da sua força de vontade, da capacidade de atingir as metas a que se propõe e da convicção de ser capaz de ultrapassar qualquer dificuldade. Trouxeram ainda uma experiência de vida única, que venceu ainda mais o seu carácter rigoroso, mas justo e respeitador de todos os seres humanos.

Depois de regressar do Ultramar, ingressou como Investigador da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, cargo que ocupou até Janeiro de 1972. É nesse período que a sua vida sofre nova

mudança, casando em 1969 com Maria Raquel, e sendo pai do primeiro filho, Pedro, em 1970. Nesse mesmo ano de 1970, estagiou no Centro de Cálculo da Universidade de Madrid, onde se iniciou na aprendizagem da programação de computadores e nas aplicações informáticas. Estagiou depois, em 1971, durante alguns meses no Departamento de Geologia da Universidade de St. Andrews, na Escócia, a fim de se familiarizar com algumas técnicas geomatemáticas e com a utilização de computadores nas Ciências da Terra. Este interesse, então pioneiro, acaba por marcar todo o seu percurso académico e por constituir uma marca indelével que deixa na Universidade de Coimbra. Deixa ainda, na memória de muitos que o conhecem, a imagem dos muitos cartões perfurados que na altura utilizava para actividades computacionais. Para além de inúmeras aplicações científicas então realizadas, pode referir-se, a título de curiosidade e como ilustração das dificuldades que se colocavam nos primórdios da era informática, o trabalho de prestação de serviços desenvolvido para a Empresa Nacional de Urânio com vista à estimativa das reservas e ao cálculo dos perfis óptimos de exploração do jazigo mineral de Nisa. Este trabalho, que envolveu a aplicação pioneira em Portugal de técnicas geoestatísticas, congregou inúmera informação radiométrica obtida em largas dezenas de sondagens, com espaçamento de apenas 10 cm; foram necessários 3 anos de trabalho a um funcionário da empresa para completar a informatização de todos os dados, devidamente armazenados em cartões perfurados, e trazidos em lotes semanalmente para Coimbra. Não raras vezes, a queda accidental das caixas onde os cartões perfurados eram transportados obrigava a laborioso trabalho de reconstituição da sequência correcta a introduzir em computador, sendo os cálculos realizados ao fim de semana por forma a tirar o melhor partido dos equipamentos existentes no Centro de Cálculo da Universidade de Coimbra. Note-se que os programas de cálculo eram na época elaborados em papel, transcritos para cartões perfurados, sendo apenas susceptíveis de ser testados após deslocação ao Centro de Cálculo. Por analogia, um pouco como jogar xadrez mentalmente sem tabuleiro.

Entre 1972 e 1979 ocupou o lugar de Técnico-Investigador na Faculdade de Ciências, prosseguindo, nesse período, os trabalhos visando a obtenção do Doutoramento. As vicissitudes subseqüentes à revolução de 1974 levaram à necessidade de reiniciar o trabalho de tese, então já próximo da conclusão. Viria a obter o grau de Doutor em 1981, na sequência da sua apresentação a provas por iniciativa própria, sem orientador, tendo o júri concedido o grau por unanimidade, com distinção e louvor.

Nos tempos livres do trabalho que efectuava para o seu Doutoramento, aproveitou para estudar um tema mais “leve” – Engenharia Civil. A profundidade com que se dedicou ao assunto permitiu-lhe elaborar o projecto da casa onde ainda hoje reside, incluindo os cálculos estruturais, e a supervisionar a sua construção. Foi ainda por esta altura que nasceu o seu segundo filho, Luís, em 1975.

De 1979 a 1985 foi Investigador Principal da Faculdade de Ciências e Tecnologia, efectuando, no final deste período, a sua Agregação. Após as provas, concorreu a um lugar de Professor Catedrático na mesma Faculdade. Como primeiro classificado neste concurso, assumiu o lugar de Professor Catedrático de nomeação provisória da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra entre Julho de 1985 e Julho de 1986. Obteve, então, a nomeação definitiva como Professor Catedrático da FCTUC, categoria que ocupou até 31 de Março de 2007, quando se aposentou.



Ao longo do seu percurso académico manteve sempre grande disponibilidade em servir a instituição universitária, tendo desempenhado diversos cargos de gestão ao nível Departamental, na administração da FCTUC e na Universidade de Coimbra, bem como noutros contextos externos a esta Universidade. Assim, foi por diversas ocasiões membro do Conselho Directivo do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, bem

como, posteriormente, do Departamento de Ciências da Terra da FCTUC, no qual também viria a assegurar o cargo de Presidente da Comissão Científica (2001-2002), órgão que também integrou como membro desde a sua constituição em 1994. Exerceu diversos mandatos como Vice-Presidente do Conselho Científico da FCTUC (1987-1991 e 1994-1999). Podem ainda ser referidas outras actividades relevantes na Universidade, designadamente a participação na comissão que estabeleceu o plano geral do Pólo II da Universidade de Coimbra, a participação na Assembleia que aprovou os Estatutos da Universidade de Coimbra em 1989-90 e na comissão da mesma Assembleia que redigiu a proposta, e ainda a participação na Assembleia que aprovou os Estatutos da FCTUC em 1991 e na comissão da mesma Assembleia que redigiu a proposta. Em todas as actividades de gestão referidas notabilizou-se pela forma discreta, mas eficaz, como sempre actuou, desbloqueando situações complexas através do diálogo com as partes envolvidas, e agindo segundo princípios de rigor, igualdade e transparência.

Externamente à Universidade de Coimbra integrou o Conselho Científico das Ciências Naturais no Instituto Nacional de Investigação Científica entre 1986-1999 e a comissão nacional para o Plano Energético Nacional. Participou também em várias comissões de avaliação, destacando-se a participação, como membro, na Comissão Nacional de Avaliação dos cursos de Biologia (2000-2001), bem como na Presidência da Comissão Nacional de Avaliação dos cursos de Geologia (2002-2003), ambas no âmbito do Conselho Nacional de Avaliação do Ensino Superior.

Salienta-se ainda a participação em inúmeros júris académicos da Universidade de Coimbra e de outras instituições Universitárias (Mestrado, Doutoramento, Agregação), bem como de concursos docentes para lugares de Professor Associado e Catedrático.

No domínio pedagógico, marcou gerações de alunos pelo profundo conhecimento, invulgar capacidade expositiva e permanente disponibilidade para esclarecimento das matérias. Bastas vezes foi também confessor das dificuldades extra-curriculares de alunos, a quem apoiou na resolução de problemas pessoais. Testemunham os seus antigos assistentes a exigência colocada para um adequado funcionamento das disciplinas, no que se refere aos conteúdos leccionados, assiduidade e disponibilidade de atendimento aos alunos. Estes factos explicam a razão pela qual granjeou o respeito e admiração dos que tiveram o privilégio de ser seus alunos, não obstante a exigência colocada na apreensão dos conhecimentos transmitidos.

Enquanto docente, leccionou inúmeras disciplinas de cursos de licenciatura e mestrado na área das Geociências (Geologia, Engenharia

Geológica e Engenharia de Minas), Geografia, Engenharia Civil e Engenharia do Ambiente da Universidade de Coimbra, tendo ainda colaborado com outras instituições nacionais na leccionação de mestrados, designadamente as Universidades de Aveiro, de Lisboa e dos Açores. Deu o exemplo quanto ao princípio comumente aceite mas pouco praticado de serem os Professores mais experientes a assumir as disciplinas básicas dos primeiros anos, com a inerente sobrecarga de serviço docente por se tratarem em geral de disciplinas frequentadas por maior número de alunos. É muito vasto o elenco de disciplinas leccionadas, podendo citar-se, entre outras, Geologia Geral, Mineralogia e Petrologia, Cristalografia, Geomatématica, Geoquímica, Paragéneses Mineral, Técnicas Mineralógicas, Petrologia Ígnea, Avaliação de Recursos, Seminário, Estágio, Geologia Ambiental, Transformações Globais e Observação e Experimentação em Geologia. Produziu diversos textos de apoio às disciplinas leccionadas.

No domínio pedagógico, é ainda de salientar a criação no ano lectivo de 1973/1974 da disciplina de Geomatématica, que leccionou ininterruptamente por cerca de três décadas; esta mantém-se como disciplina estruturante do curso de Geologia. Relewa também a participação na criação e formatação do Mestrado em Geociências da FCTUC (1991), curso que aproximou com grande sucesso esta área científica dos problemas do Ambiente e Ordenamento do Território. Foi igualmente autor da proposta de constituição da licenciatura em Engenharia do Ambiente na FCTUC, implementada em 2002.

No domínio científico, a sua actividade teve como temas centrais o estudo da geologia das rochas granitóides e de metamorfismos associados; da mineralogia e geoquímica destas rochas, em particular dos granitóides hercínicos da Zona Centro-Ibérica; da radioactividade natural das rochas e solos, visando averiguar da distribuição do gás radão como factor de risco para a saúde humana; das relações erosão/ascensão crustal e das transferências de matéria e geologia associadas; e ainda da intersecção dos fenómenos de alteração das rochas com o ciclo biogeoquímico do carbono. Em todas estas actividades utilizou, desde bem cedo, técnicas geomatemáticas, das quais foi em muitos casos pioneiro na aplicação a problemas da geologia portuguesa, desenvolvendo por si próprio os programas necessários para a execução dos cálculos ainda antes da disponibilidade generalizada de computadores pessoais e software informático. São de realçar as aplicações de técnicas multivariantes e de variáveis regionalizadas na quantificação de fenómenos geológicos, bem como a modelação de sistemas geológicos, em particular na simulação numérica do arrefecimento de corpos graníticos e em algumas vertentes do

ciclo do carbono. Como resultado da actividade científica desenvolvida publicou largas dezenas de artigos em revistas da especialidade, listados em anexo, tendo igualmente orientado diversas teses de mestrado e de doutoramento bem como participado em inúmeros congressos com apresentação de comunicações.

Ainda no domínio científico, são de referir dois projectos de investigação que coordenou, pelo carácter inovador e estruturante de ambos na época: 83/CEN/7 “Fenomenologia da implantação, cristalização e degradação de granitóides das Beiras e de Jazigos Minerais associados” e PRAXIS 2/2.1/CTA/399/94 “O radão como componente de alguns sistemas geológicos: implicações ambientais e avaliação do risco de radiação”. O primeiro projecto, concedido pelo INIC, propiciou a aquisição do primeiro computador para o Departamento de Ciências da Terra, facilitando grandemente a aplicação de técnicas geomatemáticas a dados geológicos. De acordo com o entendimento de rigor sempre prosseguido quanto à utilização de dinheiros públicos, devidamente incutido aos restantes membros da equipa de projecto, a rentabilização do equipamento foi concretizada de forma intensiva, com funcionamento quase ininterrupto assegurado através do escalamento de trabalho por turnos. Recordam os intervenientes que, na ausência quase total de software informático ao tempo, praticamente todas as acções desenvolvidas implicavam a elaboração de programas, o que era extensível a actos tão simples como por exemplo a impressão de um diagrama. O segundo projecto referido teve como principal valência ter permitido o lançamento de uma nova linha de investigação no domínio da geologia do radão, propiciando o desenvolvimento de metodologias e a aquisição dos primeiros equipamentos que viriam a originar o Laboratório de Radioactividade Natural do Departamento de Ciências da Terra, de que foi proponente e coordenador. A apetência pela criação de novas infraestruturas laboratoriais é, aliás, um traço marcante na carreira, tendo desde cedo implementado no então Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico diversas técnicas analíticas geoquímicas, de análise por raios-X e de separação de minerais.

Em 1989 constituiu a linha 4 do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra, então no âmbito do INIC; o Centro viria a integrar-se na década de 90 enquanto unidade de investigação na Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Coordenou a referida linha, constituída pelo Grupo de Modelagem de Sistemas Geológicos. Neste âmbito implementou diversos projectos de investigação, designadamente “Modelagem das transferências de calor e de massa em alguns sistemas geológicos”, “Base de dados para rochas ígneas portuguesas”, “Análise da componente geológica

de sistemas ambientais", "Geologia do radão" e "Avaliação de riscos geológicos em áreas urbanas". Na utilização de recursos financeiros sempre deu prioridade à criação de infraestruturas potenciadoras da investigação futura e à sua rentabilização, em detrimento de despesas mais voláteis ou não reprodutíveis.

Integrou diversas sociedades científicas nacionais e internacionais, designadamente a Sociedade Geológica de Portugal, a Associação Portuguesa de Geólogos, o Grupo de Geoquímica da Sociedade Geológica de Portugal, a International Association of Mathematical Geology, a Société Suisse de Minéralogie et Pétrographie, a Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, a Geochemical Society, a Geological Society of London e a American Geophysical Union. Editou durante cerca de três décadas, num trabalho laborioso e persistente, a revista científica "Memórias e Notícias", uma publicação do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico e do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra que constitui uma referência nacional na área científica e possui ampla divulgação internacional.

Entre os traços de carácter mais marcantes para quem o conhece, encontra-se o enorme respeito pelos restantes seres humanos. Na terra onde passou a sua juventude, é bem conhecido o apoio de vária ordem que tem prestado a diversos conterrâneos. É também bem conhecida a forma como evita mostrar qualquer tipo de superioridade junto de outras pessoas levando-o, por exemplo, a procurar não usar o título de "Doutor" fora do meio Universitário. Apesar das exigências da carreira universitária, não perdeu o gosto pelas actividades de campo, tendo mantido durante largos anos produção de vinho própria, e não perdendo ainda hoje oportunidade de cuidar dos terrenos anexos à habitação para fins hortícolas. Numa das facetas talvez menos conhecidas, cultiva a poesia e a literatura, tendo editado uma colectânea de poemas em 2007 com o curioso título "Cabaz de poemas de autores portugueses (que revisito de vez em quando)".

Originário de uma família pobre, apesar de muitas dificuldades e contra o que seria o normal no contexto da sua infância, conseguiu obter uma licenciatura, não tendo ainda assim desaparecido as contrariedades que o destino se encarregou de colocar no seu caminho. No entanto, enfrentou com humildade, mas também com obstinação e inteligência, os obstáculos com que se deparou, e superou-os sempre sem comprometer suas convicções, colocando em primeiro plano os interesses daqueles que com ele convivem ou, simplesmente, se cruzam. Esta pertinácia e postura moral fazem com que seja, mais ainda do que uma referência intelectual, um exemplo de vida que merece uma profunda admiração por parte de quem o

conhece. E quem o conhece aguarda os novos desafios que ainda estabelecerá para si próprio. Cujos resultados, certamente, ainda conseguirão surpreender a todos nós.

Agradecimentos: O presente texto beneficiou de contributos de diversas personalidades, a quem os autores exprimem o seu reconhecimento: Albano Gil, Joaquim Monteiro, José Matos Dias, Lélío Quaresma Lobo, Luís Gama Pereira, Maria Lucília Monteiro e Maria Raquel Godinho.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

O contributo científico da obra do Professor Manuel Maria Godinho

Graciete Dias¹

¹Escola de Ciências, Universidade do Minho, Braga, PORTUGAL, graciete@dct.uminho.pt

*Em toda a jornada lutou sempre com
penhascos e xisto, com fraguado e
granito, dando a cara a tudo o que
lhe quis barrar o caminho.*
Alves Redol

O Simpósio *Modelação de Sistemas Geológicos*, em boa hora organizado pelo Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, ganha especial relevo e brilho por se constituir como homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho. Num dos momentos do simpósio, cabe-me a honrosa missão de recordar as linhas mestras da obra científica de tão ilustre Professor e Investigador.

De facto, esta tarefa, constituindo para mim uma honra, é simultaneamente uma tarefa árdua. É uma honra, porque é naturalmente um privilégio fazer o elogio de tão conceituada figura universitária, pelo que agradeço o convite que me foi formulado pela Comissão Organizadora. É também uma tarefa árdua porque receio não ser capaz de assimilar e de explanar adequadamente o percurso do Professor Manuel Maria Godinho enquanto personalidade da ciência e da cultura.

Optei por iniciar esta apresentação com umas muito breves notas biográficas do Professor Manuel Maria Godinho. Nasceu na freguesia de Maiorca, concelho de Figueira da Foz, mas adoptou como sua a terra de Santana que constitui, assim, o berço de alguém que tem uma vida marcada pelo gosto de saber, pelo rigor, pelo carácter respeitador e por uma atitude de grande humanismo e simplicidade. Aluno brilhante, terminou o 7º ano dos Liceus em Coimbra em 1960, com a classificação média de 18 valores. Como estudante universitário, fez o seu percurso na Universidade de Coimbra, onde se licenciou em Ciências Geológicas em 1964, com a classificação final de 19 valores. Obteve em 1981 o grau de Doutor em

Mineralogia e Geologia pela Universidade de Coimbra, na especialidade de Mineralogia, Petrologia e Geoquímica, com a classificação de aprovado com distinção e louvor, tendo prosseguido nesta Instituição uma brilhante e profícua carreira como Investigador e Professor. Desde 1964, exerce sucessivamente funções de Auxiliar de Naturalista, 2º Assistente, Investigador, Técnico-Investigador, Investigador Principal e Professor Catedrático, com períodos de interrupção para cumprimento de serviço militar obrigatório, tendo sido mobilizado para a Guiné. Professor Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra desde 1985, aposentou-se em 2007.

Interessa aqui lembrar a missão da Universidade e consequentemente de todos os que nela trabalham, em particular dos seus professores. E dou a palavra ao Professor Lúcio Craveiro da Silva, insigne professor e humanista, que assim explicava:

“A Instituição Universitária nasceu na Idade Média com um ideal cultural que, vencendo o desgaste impiedoso dos séculos e acolhendo novas perspectivas e novos enriquecimentos, nunca mais deixou de existir. É que, por mais diversos que sejam os tempos, o homem compreendeu finalmente que necessita tanto de pão como de cultura e que, sem esta, ele não se realiza, a sociedade não floresce e todos os seus anseios de paz e desenvolvimento são ilusões. Ora um dos principais lares da cultura, na nossa civilização, é a Universidade. Nela se encontra privilegiadamente a sua definição, a sua razão de ser e a sua missão. Esta missão realiza-se principalmente pelo ensino e pela investigação; mas abrindo-se à comunidade que a criou e a quem serve, vive num diálogo permanente e enriquecedor, já transmitindo-lhe o saber, já descobrindo e reconhecendo os valores culturais que nela despontam”.

Efectivamente, a um professor cabem, na sua área de especialidade, funções de ensino e investigação, intimamente interligadas, bem como o exercício de actividades de interacção com a sociedade. Para estas três funções, o Professor Manuel Maria Godinho foi-se preparando, sem tréguas, pelo exercício empenhado e exigente de todas elas, de tal modo que a sua nomeação como Professor Catedrático foi o reconhecimento e consagração da sua alta competência e dedicação, que é o fundamento, a condição e a marca da autêntica autoridade académica e profissional.

Numa instituição universitária, a actividade de investigação é fundamental, não só enquanto missão da própria Universidade, mas também porque instrumento indispensável quer na formação de especialistas de qualidade quer na qualidade da prestação de serviço à comunidade. O Professor Manuel Maria Godinho teve sempre presente esta conexão e

assumiu-a como responsabilidade indeclinável. Por isso, e também por vocação, mergulhou a fundo na investigação e seduziu para ela os seus colaboradores, incluindo os mais jovens.

O que foi a sua obra científica está bem patente nas numerosas publicações (mais de uma centena) de que é autor ou co-autor, nacional e internacionalmente reconhecidas, e que se encontram listadas em anexo. Trata-se de produção científica reveladora de trabalho continuado e relevante ao longo de quarenta e sete anos de actividade de investigação. As suas primeiras publicações surgem em 1963-1964, então jovem licenciado motivado em particular para a caracterização mineralógica, mas logo no final da década de 60 do século passado emerge o seu interesse pela geologia das rochas graníticas. Trata-se de interesse que persiste e atravessa todo o seu percurso como investigador e que se mantém, como revelam dois artigos publicados no corrente ano de 2010. Os temas desenvolvidos incidem predominantemente no estudo mineralógico, petrológico e geoquímico de rochas graníticas, de processos metamórficos associados ao plutonismo granítico, bem como na modelação de processos petrogenéticos, com especial ênfase no estabelecimento de modelos numéricos aplicados ao estudo da evolução petrológica e de mecanismos de arrefecimento de corpos ígneos.

Em meados dos anos 90, o Professor Manuel Maria Godinho lança uma nova linha de investigação, no domínio da geologia do radão, tendo criado um prestigiado grupo de investigadores que desenvolve actividade nesta área. Foi proponente em 1996 e coordenou o Laboratório de Radioactividade Natural do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra. Trata-se de um laboratório de referência a nível nacional. A este propósito merece destaque o empenho e dedicação do Professor Manuel Maria Godinho na implementação de novas infraestruturas laboratoriais potenciadoras da investigação em curso e investigação futura, bem como na implementação de métodos e técnicas laboratoriais, designadamente preparação de amostras para análise química, separação de concentrados minerais, análise por difracção de raios-X e técnicas de análise química de materiais geológicos.

Mais recentemente, a interligação dos fenómenos de alteração das rochas com o ciclo biogeoquímico do carbono tem igualmente merecido a atenção do Professor Manuel Maria Godinho.

Mas, transversalmente à sua obra e como contributo de enorme relevância, é de referir a aplicação de técnicas geomatemáticas à petrologia, mineralogia e geoquímica de granitóides e à prospecção mineira, em especial nos domínios da análise de sistemas multivariantes e de variáveis

regionalizadas, bem como a modelação de sistemas geológicos, em particular na simulação numérica do arrefecimento de corpos ígneos com recurso a modelos numéricos bi e tridimensionais e em algumas vertentes do ciclo do carbono. O Professor Manuel Maria Godinho foi pioneiro em Portugal nas áreas da geomatemática e geoestatística e desde cedo se interessou pela sua aplicação a problemas da geologia portuguesa, como atesta a persistência destas abordagens na larga maioria das suas publicações desde o início dos anos setenta. É de referir a criação, pela sua mão, da disciplina de Geomatemática no ano lectivo de 1973/1974, que leccionou durante cerca de trinta anos e que se mantém como disciplina estruturante do curso de Geologia na Universidade de Coimbra. O nome do homenageado e, através dele, o da sua Universidade, a Universidade de Coimbra, está indelevelmente ligado a este trabalho pioneiro, reconhecido a nível nacional e internacional. A este propósito se refere a presidência da International Association for Mathematical Geosciences, em artigo publicado no presente volume.

Destacaria a profundidade e rigor científico e a reflexão crítica como traços marcantes da obra do Professor Manuel Maria Godinho. Os trabalhos publicados recorrem à utilização de grande número de dados, mas sempre com uma preocupação clara de distinção entre dados analíticos e sua interpretação, robustecendo as conclusões com recurso a modelos numéricos, mas sem deixar de apresentar os pressupostos dos modelos enquanto simplificações dos sistemas naturais, discutindo a sua fundamentação geológica, bem como a fiabilidade dos modelos.

Neste contexto não resisto a citar o homenageado que, a propósito do tema da sua dissertação de doutoramento, referia:

“Para que a ordem da natureza granitológica não seja um sonho que perseguimos, e a anarquia uma lei absoluta que obscurece a sua inteligibilidade, é necessário e imperioso envidar esforços no sentido de quantificar o elemento aleatório nessa natureza que é essencialmente estocástica e não fundamentalmente determinista. Como fazê-lo? Este o grande desafio que se lança às nossas capacidades; mas o reconhecimento de que é necessário é já um passo em frente, e um passo importante. Um segundo passo significativo poderá ser dado pela formulação de modelos genéticos a partir de dados obtidos na observação da natureza, erigidos de modo a expurgar das suas inter-relações gerais, ou a atenuar, a perturbação do elemento aleatório de que estão eivados os dados de partida; o conhecimento da actuação de processos físico-químicos sobre a matéria de modelos reduzidos e controlados pode fundamentar a construção de modelos conceptuais que, no conjunto, em si condensem a

dinâmica essencial do sistema natural. Conceptualizado o modelo, a sua verificação contra os sistemas naturais observados permitirá eventuais reajustamentos e aperfeiçoamentos, ou, em extremo, o seu abandono e substituição. Esta a filosofia essencial que presidiu à concepção do presente trabalho. Fazendo a incerteza parte da própria natureza das coisas, é deixada considerável margem de liberdade para exercício da imaginação criadora”.

E, após citar W. S. Fyfe, conclui:

“O avanço em tal domínio dependerá em boa parte desse exercício, quando ponderadamente doseado e controlado, e dos modelos que através dele se possam erigir hoje para amanhã substituir por outros menos incoerentes e menos imperfeitos. Um facto será sempre certo: os modelos, as hipóteses, as teorias, poderão modificar-se, adaptar-se, substituir-se, abandonar-se; os dados factuais sobre os quais foram construídos, quando criteriosamente obtidos, esses permanecerão, mesmo que incompletamente compreendidos”.

Belíssima reflexão, publicada em 1980 nas *Memórias e Notícias*, uma publicação do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, de que o Professor Manuel Maria Godinho foi editor durante cerca de três décadas, trabalho a que se dedicou com persistência e tenacidade, constituindo-se esta revista científica como uma referência nacional, e não só, na área das Ciências da Terra.

E porque convicto de que uma investigação profícua se estimula em íntima simbiose, o Professor Manuel Maria Godinho foi tecendo uma rede de colaborações, com visão a distância e com pertinácia, progressivamente mais numerosas e mais estreitas. Gostaria de realçar o papel do Mestre que, com saber, exigência, qualidades pedagógicas, dedicação e clarividência, marcou a formação de gerações de geólogos, engenheiros geólogos, engenheiros de minas e outros especialistas. Orientou mais de uma dezena de mestrandos e doutorandos e marcou certamente a carreira dos seus colaboradores mais próximos, onde destaco os Professores Luís Neves e Alcides Pereira com quem o homenageado partilha, há mais de vinte e cinco anos, o seu labor de Professor e Investigador.

Ao longo da sua carreira académica, exerceu na Universidade de Coimbra variados e distintos cargos e participou em numerosas actividades institucionais, indicadores da sua disponibilidade face à Instituição, que gostaria de sublinhar. No referente à coordenação e gestão científica, criou em 1989 uma das linhas do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra, unidade de investigação do INIC, posteriormente integrada na FCT, constituindo-se assim o Grupo de Modelagem de Sistemas

Geológicos. Neste âmbito, implementou e coordenou diversos projectos de investigação, alguns com financiamento externo. Desempenhou variados cargos de planeamento e gestão universitária a nível da Faculdade e do Departamento, onde realçaria o cargo de Vice-Presidente do Conselho Científico da Faculdade de Ciências e Tecnologia em 1987-1991 e 1994-1999 e o cargo de Presidente da Comissão Científica do Departamento de Ciências da Terra em 2001 e 2002. A sua ampla cultura, a solidez do seu percurso académico, científico e pedagógico, a clara visão da realidade universitária, dos desafios, constrangimentos e oportunidades que se iam colocando às instituições de ensino superior, repercutiram-se em numerosas actividades de relevância a nível institucional.

O Professor Manuel Maria Godinho envolveu-se intensamente em conferências e comunicações nos diversos domínios da sua actividade científica. O prestígio do Professor na comunidade científica, nacional e internacional, está bem documentado pela sua integração activa em prestigiadas organizações científicas, designadamente na Sociedade Geológica de Portugal, na Associação Portuguesa de Geólogos, no Grupo de Geoquímica da Sociedade Geológica de Portugal, no International Association of Mathematical Geology, na Société Suisse de Minéralogie et Pétrographie, na Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, na Geochemical Society, na Geological Society of London e na American Geophysical Union. Integrou o Conselho Científico das Ciências Naturais do INIC no período 1986-1999 e a Comissão Nacional para o Plano Energético Nacional, tendo ainda desenvolvido actividades de avaliação externa no âmbito do Conselho Nacional de Avaliação do Ensino Superior em 2000-2003. Em todas elas deixou a sua marca inconfundível de autoridade académica e de profissional de alta competência e dedicação.

Nesta justíssima homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho, procurei ser porta-voz do seu longo e brilhante percurso científico e do valioso contributo da sua obra, que entendo estar expressa nos temas e projectos de investigação que abraçou e em que foi inovador e pioneiro, na produção científica, nas colaborações científicas encetadas e acarinhadas, na sua participação activa junto da comunidade científica nacional e internacional, na sua disponibilidade e na repercussão do seu saber junto da instituição que o acolhe, e ainda na forma como marcou gerações. Tarefa difícil que apenas me foi possível aflorar.

Foi no trabalho do dia-a-dia destes quarenta e sete anos de actividade como Professor e Investigador que muitos tiveram o privilégio de ter podido contar com o contributo do Professor Manuel Maria Godinho. Reafirmo a elevada estima que nutro pela sua carreira de Cientista e de Professor.

Admiro os seus atributos pessoais de inteligência, visão, rigor, seriedade, coerência e liderança, que marcam a diferença e fazem do Professor Manuel Maria Godinho uma referência como Cientista, como Professor e como Homem. Bem haja!

Agradecimentos

Agradeço à Comissão Organizadora do Simpósio a amabilidade do convite para participação neste evento de homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho, que muito me honra. Ao Professor Luís Neves endereço agradecimentos por toda a informação que me facultou sobre a vida e obra do homenageado.

(Página deixada propositadamente em branco)

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Publicações científicas do Prof. Doutor Manuel Maria Godinho

Godinho, M. M. (1963) - Tapiolite de Cavala - Nota prévia. Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra; 56, 41-44.

Godinho, M. M. (1964) - Análise difractométrica quantitativa de quartzo em argilas do Barracão (Pombal - Leiria). Idem; 57, 1-5.

Godinho, M. M. (1964) - Contribuição para o conhecimento do comportamento térmico da malaquite e da azurite. Idem; 57, 7-19.

Neiva, J. M. C., Neiva, A. M. R. e Godinho, M. M. (1965) - Meteorização do granito em clima temperado quente - alteração do granito de Pisões (Montalegre). Idem; 60, 33-53.

Godinho, M. M. (1969) - A note on the error due to impurities in the elemental analysis of mineral concentrates. Idem; 68, 24-26.

Godinho, M. M. (1970) - Sobre a ocorrência de whitlockite, newberyite e struvite num cálculo do intestino humano. Idem; 69, 97-109.

Godinho, M. M. (1971) - Sobre a possibilidade de aplicação da análise grupal na classificação regional das rochas graníticas. Comun. I Congr. Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica; Secção 8 (Informática), 157-163.

Godinho, M. M. e Jaleco, J. M. P. (1973) - Feldspatos potássico dos granitóides da região de Castro-Daire (Viseu - Portugal). I - Estado estrutural. Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra; 76, 44-71.

- Godinho, M. M. e Jaleco, J. M. P. (1974) - Feldspatos potássicos dos granitóides da região de Castro-Daire (Viseu - Portugal). II - Nota sobre a variação regional da obliquidade no plutonito de Castro-Daire. Idem; 77, 105-110.
- Mendes, F. P. e Godinho, M. M. (1974) - Variação mineralógica em rochas da área de Murrupula (Moçambique). Idem; 77, 85-95.
- Godinho, M. M. (1974) - Equações para cálculo da composição química de granitóides moscovítico-biotíticos a partir da sua composição modal. Idem; 77, 97-103.
- Godinho, M. M. (1974) - Sobre o plutonometamorfismo da região Guardão (Caramulo - Portugal). Idem; 78, 37-77.
- Godinho, M. M. e Silva, F. G. (1974) - Lítio em granitóides da região de Guardão (Caramulo - Portugal). Idem; 78, 79-104.
- Godinho, M. M. (1975) - Programa FORTRAN IV para cálculo de matrizes de substituíbilidade. Idem; 79, 101-111.
- Godinho, M. M. (1975) - Sequências de grãos no granodiorito filoniano de Mançores (Caramulo - Portugal). Idem, 79; 69-85.
- Godinho, M. M. e Jaleco, J. M. P. (1975) - Feldspatos potássicos de granitóides da região de Castro-Daire (Viseu - Portugal). III - Parâmetros da célula elementar e distribuição intra-estrutural do alumínio. Idem; 80, 1-16.
- Pinto, A. F. F. e Godinho, M. M. (1975) - Sobre o quimismo do arco Libombos-Chirua (África Oriental). Idem; 80, 17-31.
- Godinho, M. M. (1975) - Partilha de Al, Fe, Mg, Ti, K e Na entre moscovite e biotite em granitóides da região de Guardão (Caramulo - Portugal). Idem; 80, 33-52.
- Godinho, M. M. (1975) - Fórmulas para determinação da composição de plagioclases de rochas graníticas a partir de dados difractométricos. Idem; 80, 67-73.

- Godinho, M. M. (1976) - Ensaio de classificação químico-mineralógica de granitóides da região de Guardão (Caramulo - Portugal). *Idem*; 81, 1-27.
- Godinho, M. M. (1976) - Programas FORTRAN IV para análise de sequências geológicas. *Idem*; 81, 29-50.
- Marques, L. M. F., Godinho, M. M. e Soares, A. F. (1977) - Contribuição para o estudo do Cretácico Superior em Portugal - Sedimentação da formação carbonatada em Antanho e Marmeleira do Botão. *Comunic. Serv. Geol. Port.*; 61, 245-262.
- Godinho, M. M. (1977) - Grupos reaccionais de elementos químicos petrogenéticos em complexos granitóides hercínicos da Península Ibérica. *Idem*; 62, 291-306.
- Marques, J. A. C., Godinho, M. M. e Soares, A. F. (1978) - Contribuição para o estudo da distribuição do urânio na região do Olival (Leiria). *Idem*; 64, 299-309.
- Marques, J. A. C., Cajão, M. M., Soares, A. F., Godinho, M. M. e Dias, J. M. M. (1978) - Contribuição para o estudo da distribuição hidrogeoquímica do urânio na Orla Meso-Cenozóica ocidental de Portugal. *Idem*; 64, 151-176.
- Soares, A. F. e Godinho, M. M. (1978) - Sobre a ocorrência de copiapite na Orla Meso-Cenozóica ocidental de Portugal. *Ciências da Terra (UNL)*; 4, 179-190.
- Godinho, M. M. (1978) - Algumas considerações sobre a petrogénese dos granitóides grosseiros porfíróides da região de Viseu (Portugal). *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab, Mineral. Geol., Univ. Coimbra*; 85, 43-49.
- Oliveira, J. M. S. e Godinho, M. M. (1979) - Um caso de aplicação da análise de tendências à prospecção mineira. *Comunic. Serv. Geol. Port.*; 66, 143-149.

- Godinho, M. M. (1980) - O plutonito do Caramulo. Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra; 89/90, XXVII+269 p.
- Godinho, M. M. (1982) - Estudos de mineralogia e geoquímica sobre os granitóides da região de Guardão (Caramulo - Portugal). I - Os feldspatos potássicos e o seu estado estrutural. Idem; 93, 3-33.
- Godinho, M. M. (1982) - Estudos de mineralogia e geoquímica sobre os granitóides da região de Guardão (Caramulo - Portugal). II - O ângulo 2V e sua relação com o estado estrutural nos feldspatos potássicos. Idem; 93, 35-55.
- Godinho, M. M. (1982) - Uma sugestão preliminar sobre o uso do índice de triclinicidade como estimador do grau de ordenamento estrutural nos feldspatos potássicos. Idem; 94, 3-10.
- Godinho, M. M. (1982) - O coeficiente de correlação e a sua variação espacial - o plutonito do Caramulo como caso exemplar. Idem; 94, 11-19.
- Godinho, M. M. (1982) - Relação entre recursos e abundância de elementos químicos na crosta continental. Gráfica de Coimbra, Coimbra, 58 p. (edição do INIC).
- Almeida, F. F., Almeida, P. F., Almeida, N. M. F., Moura, A. R., Silva, K. G., Paiva, J. A. R., Nogueira, I. M., Soares, A. F., Reis, R. P. B. P., Godinho, M. M. e Oliveira, J. M. P. (1983) - Aspectos faunísticos, florísticos, geológicos e geográficos do Paul de Arzila. Cienc. Biol. Ecol. Syst. (Portugal); 5, 43-78.
- Godinho, M. M. e Silva, F. G. (1983) - Nota sobre a geoquímica do zinco em granitóides da região de Guarda (Caramulo-Portugal). Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra; 96, 75-81.
- Godinho, M. M. (1983.) - Geoquímica do flúor no plutonito do Caramulo. Idem; 96, 131-157.
- Godinho, M. M., Soares, A. F. e Lapa, M. L. R. (1984) - Sobre a geoquímica dos sedimentos do fundo da Lagoa de Óbidos. Idem; 98, 151-164.

- Godinho, M. M. (1985) - Modelagem dos teores de lítio no plutonito do Caramulo. *Idem*; 100, 73-97.
- Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S. C. e Godinho, M. M. (1986) - Notícia sobre um banco de dados de rochas ígneas do território continental português. *Idem*; 101, 1-9.
- Godinho, M. M., Pereira, A. J. S. C. e Neves, L. J. P. F. (1986) - Análise geoquímica comparada dos plutonitos de Caramulo, Avô e Zebreira (Portugal Central). *Idem*; 102, 43-68.
- Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1987) - Nota sobre o comportamento geoquímico da biotite de rochas granitóides face à alteração. *Idem*; 103, 49-64.
- Pereira, A. J. S. C. & Godinho, M. M. (1987) - Modelagem duma série de diferenciação nos corpos ígneos da região da Zebreira (Castelo Branco, Portugal Central). *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*; 104, 31-40.
- Godinho, M. M., Neves, L. J. P. F. e Pereira, A. J. S. C. (1988) - A diversidade de rochas do espectro gabro-granodiorito na região de Farminhão-Portela (Viseu, Portugal Central) - um modelo integrado de diferenciação. *Idem*; 106, 155-166.
- Godinho, M. M., Neves, L. J. P. F. e Pereira, A. J. S. C. (1989) - Distribuição espacial de elementos maiores num cristal de biotite - um caso de geometria fractal. *Idem*; 108, 101-115.
- Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1990) - Nota sobre o ordenamento Al/Si em feldspatos potássicos de granitos e sienitos do maciço eruptivo de Sintra. *Idem*; 109, 179-184.
- Reavy, R. J., Stephens, W. E., Fallick, A. E., Halliday, A. N. & Godinho, M. M. (1991) - Geochemical and isotopic constraints on petrogenesis - the Serra da Freita pluton, a typical granite body from the Portuguese Hercynian collision belt. *Geol. Soc. America Bull.*; 193 (3), 392-401.

- Godinho, M. M., Neves, L. J. P. F. e Pereira, A. J. S. C. (1991) - Um modelo factorial para os dados químicos referentes aos granitóides hercínicos da parte portuguesa do Maciço Hespérico. Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra; 111, 1-13.
- Godinho, M. M., Pereira, A. J. S. C. e Neves, L. J. P. F. (1991) - Potencial térmico das rochas graníticas num segmento do Maciço Hespérico (Portugal Central). Idem; 112(B), 469-483.
- Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1991) - Geometria fractal do relevo geoquímico num plutonito granítico do Maciço Hespérico. I Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa (III Congresso Brasileiro de Geoquímica), S. Paulo (Brasil). Actas, 291-293.
- Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1992) - Geologia da região de Torredeita (Viseu, Portugal Central), com especial ênfase nos granitóides. Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra; 113, 1-28.
- Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1993) - Nota sobre o uso da matriz de correlação de Spearman em geologia: um novo algoritmo de cálculo. Idem; 115, 51-56.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M. e Legoinha, P. F. R. (1993) - Índice de distorção, parâmetros celulares e composição química de cordierite de granitóides e corneanas da região de Tondela - Oliveira do Hospital (Portugal Central). Idem; 116, 49-62.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1993) - Nota sobre a matéria isotrópica de alteração da cordierite. Idem; 116, 77-81.
- Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S. C. e Godinho, M. M. (1993) - A distribuição intra-estrutural do Al no feldspato potássico como indicador da velocidade de arrefecimento dum corpo granítico. II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa (VIII Semana de Geoquímica), Memórias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Porto; 3, 143-144.

- Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1993) - Distribuição intra-estrutural de Al no feldspato potássico de granitóides do território português. II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa (VIII Semana de Geoquímica), Memórias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Porto; 3, 141-142.
- Simões, L. M. S., Godinho, M. M. e Neves, L. J. P. F. (1994) - Introdução à geologia da região de Mangualde (Portugal Central). Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra; 117, 63-80.
- Simões, L. M. S. e Godinho, M. M. (1994) - Heterogeneidade geológica dum plutonito granítico – caracterização numérica. Idem; 117, 1-6.
- Godinho, M. M. (1994) - A saga dos elementos químicos na crosta continental. Colóquio/Ciências, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa; 15, 31-51.
- Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1995) - Estimação expedita do ordenamento Al-Si do feldspato potássico: uma reapreciação. Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra; 120, 15-24.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1995) - Assimilação e história de arrefecimento como factores de zonamento em plutonitos graníticos - o caso do granito de Tábua. Idem; 120, 1-14.
- Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S. C., Godinho, M. M., Dias, J. M. e Stephens, W.E. (1995) - A heterogeneidade do fundo radioactivo natural como um factor de risco ambiental: o caso exemplar da região de S. Pedro do Sul. IV Congresso Nacional de Geologia, Memórias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Porto; 4, 195-196.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M. e Castro, J. A. M. (1995) - Modelagem numérica da evolução térmica de corpos ígneos e auréolas metamórficas envolventes. I - O caso do plutonito de Avô (Portugal Central). IV Congresso Nacional de Geologia, Porto Memórias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Porto; 4, 383-385.

- Pereira, A. J. S. C., Godinho, M. M. e Castro, J. A. M. (1996) - Modelagem bidimensional do arrefecimento do plutonito de Tábua (Portugal Central). *Comunic. Inst. Geol. e Mineiro*; 82, 15-30.
- Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S. C., Godinho, M. M. e Dias, J. M. (1996) - A radioactividade das rochas como um factor de risco ambiental no território continental português: uma síntese. *Actas da V Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente*, Eds. C. Borrego, C. Coelho, L. Arroja, C. Boia e E. Figueiredo; 1, p. 641-649.
- Pereira, A. J. S. C., Godinho, M. M., Neves L. J. P. F. e Castro J. A. A. M. (1997) - Modelagem numérica 3D da evolução térmica de plutonitos graníticos do Maciço Hespérico. I - O plutonito de Avô (Portugal Central). *Comun. Inst. Geol. e Mineiro*; 83, 17-28.
- Neves, L. J. P. F., Stephens, W. E., Pereira, A. J. S. C., Godinho, M. M. e Fallick, A.E. (1997) - The São Pedro do Sul pluton (Central Portugal): a Th-rich HHP granite of the Hesperian Massif. *II International Symposium on Granites and Associated Mineralizations, Salvador (Brasil)*. *Actas*, 64-66.
- Pereira, A. J. S. C. e Godinho, M. M. (1997) - Numerical simulation of the metamorphic aureole as a tool to constrain the thermal model of a cooling pluton: a 3-D conduction model of Avô pluton (Central Portugal) as a case study. *II International symposium on granites and associated mineralizations, Salvador, Brasil*. *Actas*, 226-227.
- Costa, L. A. P. A., Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S. C. e Godinho, M. M. (1997) - Alguns dados geoquímicos sobre as rochas da região de Seia, com especial ênfase no urânio e no tório. *X Semana de Geoquímica e IV Congresso dos Países de Língua Portuguesa, Braga*. *Actas*, 377-379.
- Figueiredo, J. M. S., Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1997) - Distribuição de U e Th em rochas graníticas e metassedimentares da área urbana de Castelo Branco (Portugal Central). *X Semana de Geoquímica e IV Congresso dos Países de Língua Portuguesa, Braga*. *Actas*, 385-388.

- Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S. C., Carter, A., Godinho, M. M., Dias, J. M. M. e Hurford, A. J. (1997) - Evidência de mobilização recente do urânio num granito da região de Torredeita (Viseu): um estudo por traços de fissão. X Semana de Geoquímica e IV Congresso dos Países de Língua Portuguesa, Braga. Actas, 401-403.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Soares, A. F., Godinho, M. M. e Marques, J. F. (1997) - Distribuição de U e Th em rochas da região de Coimbra (Portugal Central). X Semana de Geoquímica e IV Congresso dos Países de Língua Portuguesa, Braga. Actas, 405-408.
- Gomes, C. L., Neves, L. J. P. F., Nunes, J. E. L. e Godinho, M. M. (1997) - Caracterização das amazonites pegmatíticas de granitos pós-tectónicos do Norte de Portugal. I – Modo de ocorrência, estado estrutural e geoquímica. Actas da XIV Reunião de Geologia do Oeste Peninsular, 91-96.
- Neves, L. J. P. F., Pereira, L. C. G., Pereira, A. J. S. C., Stephens, W. E. e Godinho, M. M. (1998) - Scorzalite-bearing granitic rocks of the Pedrógão Grande pluton (Central Portugal): mineralogical and geochemical characterization. *Acta Universitatis Carolinae*; 42 (1), 83-85.
- Pereira, A. J. S. C., Carter, A., Hurford, A.J., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1998) - Evidence for the unroofing history of hercynian granitoids in Central Portugal derived from late Palaeozoic and Mesozoic sedimentary zircons. *In* "Advances in fission-track geochronology", P. Van der Haute e F. De Corte (eds.), Kluwer Academic Publ., 173-186.
- Pereira, A. J. S. C., Godinho, M. M., Neves, L. J. P. F. e Castro, J. A. A. M. (1998) - Numerical simulation of cooling as a tool in modelling the intrusion sequence of composite granitic plutons. *Proceedings da IV Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology*, A. Buccianti, G. Nardi e R. Potenza (eds.), editorial De Frede, Nápoles; 859-864.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1998) - Understanding the variability of soil gas radon concentrations: the importance of small scale geological studies for radon risk mapping.

- Actas do IV International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping, I. Barnet e M. Neznal (eds.), Czech Geological Survey, Prague; 98-105.
- Salgado, L. M., Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1998) – Distribuição de U e Th em rochas da região de Tondela (Portugal Central). V Congresso Nacional de Geologia, Lisboa, Comun. Inst. Geol. e Mineiro; 84 (1), B122-E125.
- Costa, L. A. P. A., Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S. C. e Godinho, M. M. (1998) - Distribuição do radão nos solos da região urbana de Seia - uma primeira abordagem. V Congresso Nacional de Geologia, Lisboa, Comun. Inst. Geol. e Mineiro; 84 (1), B126-E129.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M., Soares, A. F. e Marques, J. F. (1998) - Distribuição do radão em solos da região de Coimbra (Portugal Central). V Congresso Nacional de Geologia, Lisboa, Comun. Inst. Geol. e Mineiro; 84 (2), E110-E113.
- Figueiredo, J. M. S., Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1998) - Distribuição do radão em solos da área urbana de Castelo Branco. V Congresso Nacional de Geologia, Lisboa, Comun. Inst. Geol. e Mineiro; 84 (2), E114-E117.
- Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1999) - Structural state of K-feldspar of some Hercynian granites from Iberia: a review of data and controlling factors. *The Canadian Mineralogist*; 37, 691-700.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Costa, L. A. P. A. e Godinho, M. M. (1999) - Soil-gas radon concentrations in two urban areas of central Portugal. *Il Nuovo Cimento*; 22 (C), 615-620.
- Neves, L. J. P. F., Stephens, W. E., Pereira, A. J. S. C., Godinho M. M. e Fallick, A. E. (1999) - The São Pedro do Sul granite (Central Portugal): an HHP Th-rich rock of the Hesperian Massif. *An. Acad. Bras. Ci.*; 71 (1), 51-65.
- Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M. e Pereira, A. J. S. C. (1999) - O filão leucogranítico de Borralhal-Salgueiral (Viseu, Portugal Central): uma

- rocha HHP rica em fósforo e geoquimicamente especializada. Comun. Inst. Geol. e Mineiro; 86, 15-24.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M. e Dias, J. M. M. (1999) - O gás radão em solos da região central de Portugal: um factor a considerar para o ordenamento do território. Actas da VI Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente; 2, 763-772.
- Pereira, A. J. S. C., Abrantes, L. M. C. B. L., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1999) - Distribuição do radão em áreas radiometricamente anómalas da região de Oliveira do Hospital (Portugal Central). II Congresso Ibérico de Geoquímica (XI Semana de Geoquímica), Lisboa; 127-130.
- Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S. C. e Godinho, M. M. (1999) - Actividade do radão em habitações da região de Coimbra e factores geológicos condicionantes. II Congresso Ibérico de Geoquímica (XI Semana de Geoquímica), Lisboa, 131-135.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1999) - Suportes do urânio no granito das Beiras - implicações para o potencial de emissão do radão. II Congresso Ibérico de Geoquímica (XI Semana de Geoquímica), Lisboa, 137-139.
- Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M. e Pereira, A. J. S. C. (1999) - O filão de Borrhal-Salgueiral (Viseu) como caso de leucogranito peraluminoso, HHP e rico em fósforo. II Congresso Ibérico de Geoquímica (XI Semana de Geoquímica), Lisboa, 349-352.
- Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M. e Pereira, A. J. S. C. (1999) - Influência do processo de meteorização do granito no equilíbrio secular das cadeias de decaimento de ^{238}U e ^{232}Th - estudo dum caso. II Congresso Ibérico de Geoquímica (XI Semana de Geoquímica), Lisboa, 405-408.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Abrantes, L. M. C. B. L. e Godinho, M. M. (1999) - Distribuição de U e Th em áreas radiometricamente anómalas da região de Oliveira do Hospital (Portugal Central). II Congresso Ibérico de Geoquímica (XI Semana de Geoquímica), Lisboa, 409-411.

- Pereira, A. J. S. C., Salgado, A. L. V., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (1999) - Distribuição do radão em solos da região de Tondela (Portugal Central). II Congresso Ibérico de Geoquímica (XI Semana de Geoquímica), Lisboa, 441-444.
- Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S. C. e Godinho, M. M. (2001) - The role of cooling rate on the Al-Si order of K-feldspar in the Hercynian Tábua granite, Central Portugal. *The Canadian Mineralogist*; 39, 85-92.
- Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (2001) - Modelagem da variabilidade espacial de alguns elementos menores em granitos biotíticos do batólito das Beiras – implicações petrogenéticas. *Comun. Inst. Geol. e Mineiro*; 88, 67-78.
- Pereira, A. J. S. C., Dias, J. M. M., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (2001) - O gás radão em águas minerais: avaliação do risco de radiação num balneário (Caldas da Felgueira, Portugal Central). *Memórias e Notícias, Publ. do Dep. Ciên. Terra e do Mus. Mineral. Geol., Univ. Coimbra*; 1 (Nova Série), 73-89.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (2000) - A fracturação das rochas como factor a ter em conta na elaboração de mapas de potencial de radão. II Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, *Actas*, 267-268.
- Neves, L. J. P. F., Pereira, A. J. S.C., Stephens, W. E., Godinho, M. M. e Pereira, L.C.G. (2001) - Geoquímica dos plutonitos graníticos ante-Hercínicos de Figueiró dos Vinhos e Bouçã (Portugal Central). VI Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa e XII Semana de Geoquímica, *Actas*, 223-227.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Salgado, A. L. V. e Godinho, M. M. (2001) - Concentração do radão em habitações da área urbana de Tondela (Portugal Central). VI Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa e XII Semana de Geoquímica, *Actas*, 711-714.
- Godinho, M. M., Neves, L. J. P. F. e Pereira, A. J. S. C. (2001) - O gás radão – um inimigo público... mas não na cidade de Coimbra.

- Cadernos de Geografia, vol. Actas do II Colóquio de Geografia de Coimbra, 65-70.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M. e Dias, J. M. M. (2003) - As mineralizações de urânio e a radioactividade natural em Portugal: factores geológicos condicionantes e implicações para o ordenamento do território. Livro de Homenagem ao Prof. João Manuel Coteló Neiva, M. Portugal Ferreira (Ed.), 121-132.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M. e Dias, J. M. M. (2003) - Natural radioactivity in Portugal: influencing geological factors and implications for land use planning. Radioprotecção; 2, (2-3), 109-120.
- Nero, J. M. G., Dias, J. M. M., Pereira, A. J. S. C., Godinho, M. M., Neves, L. J. P. F. e Barbosa, S. V. T. (2003) - Metodologia integrada para caracterização do cenário ambiental actual em explorações de urânio desactivadas. Actas do III Seminário sobre Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território, Vila Real, 91-100.
- Godinho, M. M. (2008) - Erosão química das rochas carbonatadas - Sumidouro de CO₂ em tempo de mudança. In P. M. Callapez et al. (eds.), "A Terra: Conflitos e Ordem", livro de homenagem ao Prof. Ferreira Soares, Museu Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, 41-51.
- Pereira, A. J. S. C., Neves, L. J. P. F. e Godinho, M. M. (2008) - Avaliação do risco de radioactividade natural na região urbana e peri-urbana de Coimbra (Portugal central). A Terra: conflitos e ordem, Livro de Homenagem ao Professor António Ferreira Soares, MMGUC, 253-262.
- Godinho, M. M., Neves, L. J. P. F. e Pereira, A. J. S. C. (2010) - Estado estrutural do feldspato potássico de granitos de sudoeste da Zona Centro-Ibérica - breve síntese. Publicação comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra, "Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História", J.M.C. Neiva, A. Ribeiro, L.M. Victor, F. Noronha e M.M. Ramalho (Eds); I, 43-53.

- Godinho, M. M., Neves, L. J. P. F. e Pereira, A. J. S. C. (2010) - Granitos de SW da Zona Centro-Ibérica revisitados: Modelos numéricos de evolução petrológica e térmica. Publicação comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra, "Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História", J.M.C. Neiva, A. Ribeiro, L.M. Victor, F. Noronha e M.M. Ramalho (Eds); I, 189-200.
- Neves, L. J. P. F., Godinho, M. M. e Pereira, A. J. S. C. (2010) - Geologia do radão na região Centro de Portugal – uma síntese breve. Publicação comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra, "Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História", J.M.C. Neiva, A. Ribeiro, L.M. Victor, F. Noronha e M.M. Ramalho (Eds); II, 249-258.
- Pereira, A. J. S. C., Godinho, M. M. & Neves, L. J. P. F. (2010) - On the influence of faulting on small scale soil-gas radon variability – a case study in the Iberian uranium province. *Journal of Environmental Radioactivity*; 101, 875-882.

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

*Ao geólogo amigo
Manuel M. Godinho*

Irrompe da rocha dura a procura da resposta,
No caminho do aprender, o fulcro do conhecimento.
É preciso reinventar a esperança na aoréola da imaginação,
Deixar intacta a inextinguível claridade do saber,
Para em cada molécula enaltecer a energia que contagia.

Manuel Lapa
Coimbra, Novembro 2010

(Página deixada propositadamente em branco)





O Professor Doutor Manuel Maria Godinho licenciou-se em Ciências Geológicas pela Universidade de Coimbra em 1964, tendo-se aposentado em 2007 como Professor Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da mesma Universidade.

A sua actividade científica tem incidido sobre diferentes domínios das Geociências, das quais se destacam a Mineralogia, Petrologia, Geoquímica, Recursos Geológicos e Ambiente e Ordenamento do Território. Como contributo de referência do homenageado, e transversal à sua obra, pode referir-se o desenvolvimento e aplicação da Geomatemática na compreensão e modelação dos processos geológicos.

Ao longo do seu percurso académico o Doutor Manuel Godinho publicou mais de uma centena de trabalhos

científicos e orientou dezenas de trabalhos de Mestrado e Doutoramento, tendo sido o incentivador do desenvolvimento de novas técnicas de análise laboratorial, como é exemplo o Laboratório de Radioactividade Natural da Universidade de Coimbra.

A par do contributo para o progresso científico, as suas capacidades de reflexão crítica, as qualidades pedagógicas e a dedicação institucional marcaram, e continuam a marcar, gerações.

O Simpósio “Modelação de Sistemas Geológicos”, realizado em Coimbra, em Janeiro de 2011, constitui uma homenagem às qualidades e percurso do Professor Manuel Maria Godinho, tendo os textos que se reúnem neste livro um sentido de tributo e agradecimento por parte da comunidade científica.