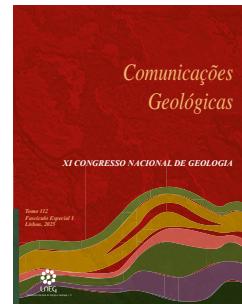


Fluxo de calor em Portugal Continental – Resultados após 40 anos de trabalho

Geothermal heat flow in mainland Portugal – Results after 40 years of work

M. R. Duque^{1*}



DOI: <https://doi.org/10.34637/g0zv-x724>

Received em 27/09/2023 / Accepted em 10/05/2024

Published online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

**Artigo original
Original article**

Resumo: As primeiras medições, em Portugal continental, de fluxo de calor que chega à superfície da Terra por condução, foram feitas no início da década de 80. Atualmente é possível apresentar um conjunto de 69 valores de fluxo de calor obtidos em Portugal continental, por medição direta em furos (36 valores), utilizando dados obtidos durante a realização de furos para prospecção de petróleo ou gás (16 valores), e através de modelos numéricos em algumas regiões sem medições (17 valores). A interpretação dos valores obtidos é feita considerando fontes de calor na crusta, valores de condutividade térmica e de gradientes de temperatura obtidos e localização das medições. As diferenças entre os valores obtidos deve-se principalmente à distribuição de fontes radioativas na crusta. Valores baixos de fluxo de calor aparecem associados aos Maciços de Bragança e de Moraes. Na Faixa Piritosa Ibérica, no Alentejo, foram obtidos valores elevados de fluxo de calor.

Palavras-chave: Fluxo de calor, condutividade térmica, gradiente geotérmico, fontes de calor, estrutura da crusta

Abstract: The first measurements of geothermal heat flow density arriving at the Earth's surface by conduction, in mainland Portugal, began in the early 1980s. After 40 years it is possible to present a set of 36 heat flow density values obtained in boreholes drilled for mining or water prospecting and 16 values from data obtained in wells drilled for oil and gas prospecting in sedimentary basins. Due to the reduced number of measurements in some regions of the country, numerical models were elaborated to obtain 17 heat flow density values that completed the set of data containing a total of 69 heat flow density values. The interpretation of the obtained values is made considering heat sources in the crust, thermal conductivity and temperature gradient values obtained and the location of the measurement sites. The differences obtained between the heat flow values are mainly due to radioactive sources distribution in the crust. An additional source of heat due to exothermic chemical reactions was considered in the Iberian Pyrite Belt. The heat flow from the mantle was considered the same in all the territory studied. Low values of heat flow are associated to Bragança and Moraes Massifs. High values of heat flow were obtained in the Iberian Pyrite belt in Alentejo. The heat flow values decrease from the Northern and Central western parts of the territory to the Southern parts.

Keywords: heat flow, thermal conductivity, geothermal gradient, heat sources, crustal structure

1. Introdução

Os trabalhos para medição do fluxo de calor por condução através da crusta, em Portugal Continental (Figura 1), começaram no início da década de 80, tendo sido publicados os primeiros resultados no Boletim Informativo do INMG (Mendes-Victor *et al.*, 1982). Passados 40 anos, é possível apresentar um conjunto formado por 37 valores de fluxo obtidos em furos feitos para prospecção mineira ou de águas e 16 valores obtidos em bacias sedimentares com base em dados registados em trabalhos realizados nos furos feitos para prospecção de petróleo ou gás durante pausas dos trabalhos de perfuração. Atendendo ao número reduzido de medições em algumas regiões do país, e tendo em conta trabalhos, desenvolvidos por outros grupos, que permitiram a obtenção do calor gerado por fontes de calor de origem radioativa bem como a estrutura e espessura das diferentes camadas da crusta, foi possível obter, através de modelos numéricos (Duque, 2020), 17 valores de fluxo de calor em regiões sem medições. No total existem atualmente 69 valores de fluxo de calor. Para além dos dados de fluxo de calor existem também, em cada local de medição, dados da condutividade térmica dos materiais atravessados na perfuração e o gradiente de temperatura medido. Utilizando os trabalhos referidos é possível hoje entender e explicar a origem dos dados de fluxo de calor obtidos.

Para além de apresentar uma visão global do trabalho realizado, o objetivo deste trabalho consiste em mostrar os problemas encontrados, bem como o modo como foram sendo resolvidos ao longo do intervalo de tempo referido.

Na figura 2 apresenta-se a localização dos valores do fluxo de calor bem como a origem dos dados. As medições feitas em furos estão representadas a azul, as medições obtidas durante trabalhos de perfuração para prospecção de petróleo ou gás estão representadas a laranja e os valores obtidos por métodos numéricos estão a verde.

2. A região em estudo

O território denominado Portugal Continental localiza-se na parte Oeste da Península Ibérica sendo banhado a Oeste e a Sul pelo Oceano Atlântico. Do ponto de vista tectónico ele faz parte da chamada Placa Ibérica constituinte da parte Ocidental da Placa Euro-Asiática. A Sudeste e muito próximo da fronteira Sul do território em estudo encontra-se o estreito de Gibraltar fazendo a ligação com a parte Oeste do Mar Mediterrâneo permitindo a interação com água/matéria proveniente dessa região (Figura 1).

¹ Departamento de Física, ECT, Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho 59, 7000-671 Évora, Portugal.

* Autor correspondente / Corresponding author: mrad@uevora.pt

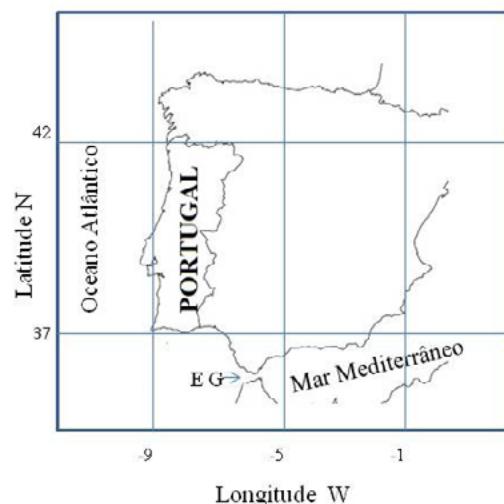


Figura 1. Localização do território em estudo. E G – Estreito de Gibraltar.

Figure 1. Location of the territory studied. EG – Strait of Gibraltar

A região é caracterizada por valores relativamente elevados de altura do geóide, estando inserida na anomalia positiva do geóide existente no Hemisfério Norte (Yoshida *et al.*, 2020). Estes valores aumentam de sul para Norte na região em estudo. A Carta Radiométrica da região (Batista *et al.*, 2013) mostra grande heterogeneidade no conteúdo de radioatividade apresentado, salientando-se os valores bastante elevados associados aos maciços graníticos que se encontram na parte Centro-Este e na parte Noroeste do território (Figura 3a). Devemos ainda salientar uma região com valores relativamente baixos de radioatividade, localizada na parte Nordeste do território, correspondendo ao material constituinte dos maciços de Bragança e de Mora. Na parte Sul do território os valores de radioatividade são menos elevados que na parte Norte, estando os valores mais elevados associados a rochas graníticas. Na parte sul encontra-se parte da chamada Faixa Piritosa Ibérica caracterizada por valores de porosidade muito baixos, condutividades térmicas elevadas e anomalias gravíticas locais geralmente associadas a depósitos de sulfuretos. No bordo Sul do território podemos identificar acidentes tectónicos (dobras), geralmente associadas a fenómenos relacionados com a interação com a placa africana, bem como o maciço de Monchique e intrusões e depósitos de sal que alteraram a distribuição de temperatura e de fontes de calor, dificultando grandemente os trabalhos de determinação de fluxo de calor na Bacia do Algarve.

Na região Centro e Norte do território existe um número relativamente elevado de nascentes termais com temperaturas de água muito diferentes, sendo a temperatura de emergência mais elevada obtida em Chaves, no Norte do território, próximo da fronteira com Espanha. Na parte Sul do território existem poucas nascentes termais, no entanto estão identificados vários aquíferos subterrâneos de dimensão apreciável.

3. Medidas do fluxo de calor

Os valores de fluxo de calor por condução, na direção vertical, são obtidos pelo produto da condutividade térmica das formações estudadas pelo gradiente de temperatura adquirido com base em medições de temperatura realizadas em furos.

O cálculo mais simples consiste em considerar homogeneidade na região e utilizar o valor médio dos valores de condutividade medida multiplicado pelo valor do gradiente de temperatura obtido pelo ajuste de uma reta aos valores de temperatura medidos em função da

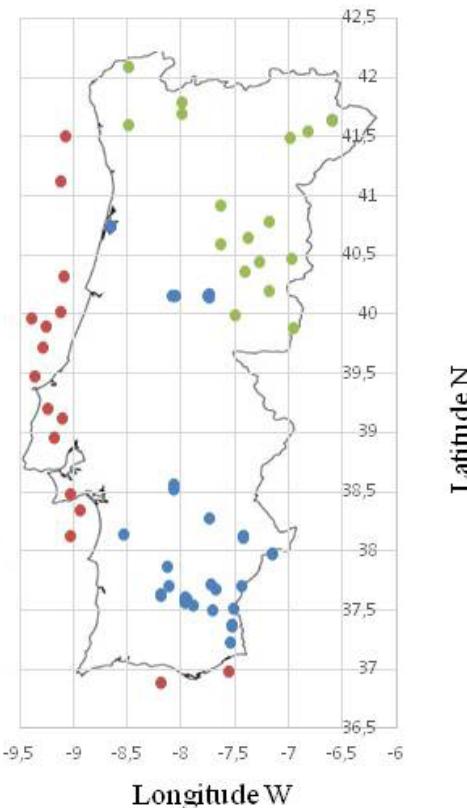


Figura 2. Localização dos furos e/ou pontos com valores de densidade de fluxo de calor. Azul-Medidação direta em furos. Vermelho-Furos feitos para prospecção de petróleo/gás. Verde-valores obtidos por métodos numéricos.

Figure 2. Location of the boreholes and/or points with heat flow density values. Blue-Measurements in boreholes. Red-Holes drilled for oil/gas prospecting. Green-Values obtained using numerical methods.

profundidade. Este método não é aconselhável em regiões onde existem camadas com condutividades térmicas diferentes originando gradientes de temperatura diferentes. Nestes casos é conveniente dividir o intervalo de profundidades onde se fazem as medições em pequenos intervalos onde se possa considerar valores constantes de condutividade térmica e de gradiente de temperatura. O fluxo de calor é calculado em cada intervalo, sendo o valor final obtido pela média dos valores do fluxo.

Nos casos onde existem valores muito diferentes de condutividade térmica é comum utilizar-se o Método de Bullard ou método das resistências térmicas (Beardmore *et al.*, 2001). Neste método o valor do fluxo de calor é dado pelo declive da reta obtida quando se representa graficamente o valor da temperatura em função da resistência térmica (inverso da condutividade térmica).

Na primeira medição de fluxo de calor em Portugal (Mendes-Victor *et al.*, 1982) feita na região de Portel, no Alentejo, foram utilizados os três métodos referidos tendo sido obtidos os valores $133 \pm 8 \text{ mW/m}^2$, $127 \pm 8 \text{ mW/m}^2$ e $126 \pm 22 \text{ mW/m}^2$, respectivamente. Comparando os 3 valores obtidos vemos que existe sobreposição associada aos intervalos de erro apresentados. Os valores de fluxo são relativamente elevados face ao valor esperado na altura, atendendo à idade das formações geológicas. Fazendo um exame mais detalhado concluímos que tanto a condutividade térmica como o gradiente de temperatura apresentavam valores relativamente elevados face ao valor esperado (considerando os dados existentes noutras regiões da Europa), sendo necessário realizar mais medições e perceber o porquê do aparecimento destes valores.

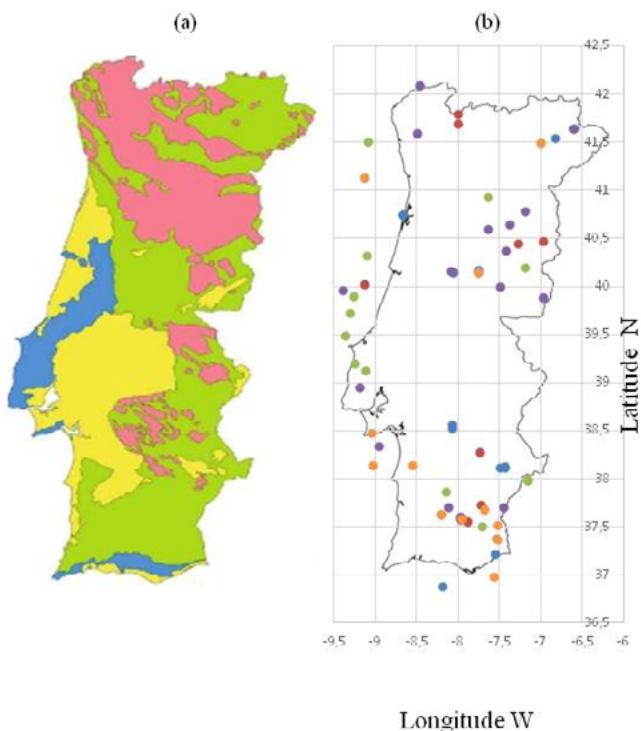


Figura 3.(a). Mapa geológico simplificado. Amarelo-Rochas sedimentares cenozoicas. Azul- Rochas sedimentares mesozoicas. Rosa- Granitos paleozoicos. Verde-Rochas metamórficas.

Figura 3.(b). Dados de fluxo de calor, Q obtidos nos pontos marcados na Figura2. Azul- $Q < 64 \text{ mW m}^{-2}$. Laranja- $65 < Q < 75 \text{ mW m}^{-2}$.Verde- $76 < Q < 83 \text{ mW m}^{-2}$. Vermelho- $Q > 94 \text{ mW m}^{-2}$.

Figure 3.(a). Simplified geologic map. Yellow-Cenozoic sedimentary rocks. Blue-Mesozoic sedimentary rocks. Pink- Paleozoic granites. Green-Metamorphic rocks. Figure 3.(b). Heat flow density values, Q obtained for points presented in Figura2. Blue- $Q < 64 \text{ mW m}^{-2}$. Orange- $65 < Q < 75 \text{ mW m}^{-2}$. Green- $76 < Q < 83 \text{ mW m}^{-2}$.Red- $Q > 94 \text{ mW m}^{-2}$.

3.1. Condutividade térmica

O número relativamente elevado de medições de condutividade térmica realizadas em amostras retiradas dos furos onde eram feitas as medições de temperatura permitiu obter valores suficientes para concluir que os valores encontrados eram superiores aos valores tabelados para formações idênticas noutros locais do planeta. Tal facto poderá estar relacionado com a baixa porosidade das amostras utilizadas (amostras obtidas em profundidade) bem como à existência de possíveis conteúdos de minerais (por vezes difíceis de identificar sem ajuda microscópica) que são suficientes para aumentar o valor da condutividade térmica da amostra, tendo sido estabelecida em algumas regiões, uma relação entre a condutividade térmica e anomalias magnéticas na região (Duque *et al.* 1993).

3.2. Gradiientes de temperatura

Os valores deste parâmetro aparecem associados a fontes de calor existentes na crusta. A sua variação pode estar associada a alteração na condutividade térmica da camada atravessada.

A análise e explicação dos resultados obtidos, só foi possível com a utilização da Carta Radiométrica de Portugal Continental (Batista *et al.*, 2013), a determinação de calor gerado por decaimento de elementos radioativos, obtida através de amostragem e trabalho

laboratorial realizado na região norte e centro do país (Lamas *et al.*, 2015; Lamas *et al.*, 2017) e os avanços verificados no conhecimento da estrutura e da espessura das diferentes camadas constituintes da crusta (Veludo *et al.*, 2017; Dundar *et al.*, 2016).

Para além das Fontes de calor de origem radioativa já mencionadas foi necessário utilizar na Faixa Piritosa Ibérica, no Alentejo, reações químicas exotérmicas associadas, por exemplo, a oxidação da pirite ao reagir com água, fazendo com que o gradiente de temperatura seja elevado (Duque, 2018).

3.2.1. Movimentação de fluidos/massa

Este problema pode originar diferentes tipos de anomalia. As anomalias mais frequentes podem originar aumento de fluxo de calor com a profundidade. Esta anomalia aparece associada a movimentos horizontais de fluido/massa, por vezes com velocidades relativamente elevadas, que movimentam energia térmica diminuindo o fluxo de calor na direção vertical.

Por vezes podem ocorrer gradientes de temperatura de valor reduzido /elevado ou variações tão irregulares da temperatura que é impossível obter um valor de gradiente. Estas anomalias aparecem associadas a escoamentos subterrâneos, por vezes sazonais. Também podem ser observadas anomalias deste tipo sobre aquíferos de dimensão apreciável que não são atingidos pela perfuração.

3.3. Furos de prospeção de petróleo ou gás

A informação relativa às bacias sedimentares localizadas offshore foi obtida exclusivamente nestes furos. Existe ainda informação relativa a 4 furos localizados “onshore”, com dados do tipo referido. Apesar de as medições de temperatura serem realizadas em número reduzido e durante os intervalos de perfuração (este facto obriga a fazer correções na temperatura devido a perturbações associadas à perfuração e introdução de lamas), a existência destes furos com profundidades elevadas, relativamente aos outros furos existentes, permitiu fazer o estudo de variações de fluxo com a profundidade e, em alguns casos, entender a origem de valores diferentes de fluxo em furos relativamente próximos.

Atendendo às diferentes camadas atravessadas por estes furos e ao valor reduzido do número de medições de temperatura, não foi considerado um gradiente de temperatura constante. Com a informação relativa à espessura das diferentes camadas e materiais encontrados foram feitos modelos para cada furo e realizados ajustes, por métodos numéricos, até ser obtido o valor de fluxo correspondente ao melhor ajuste com as temperaturas medidas (Camelo, 1987; Duque, 1988).

3.4. Valores obtidos por métodos numéricos

Este método foi utilizado em algumas regiões onde não foi possível medir o fluxo de calor pelos métodos descritos. Para obter os valores referidos considerou-se (Duque, 2020) que o fluxo de calor à superfície da Terra resulta da adição do fluxo originado por fontes de calor na crusta com o fluxo proveniente de zonas mais profundas (Q_m). As diferentes camadas constituintes da crusta foram obtidas através de resultados de modelos para a região utilizando ondas sísmicas (Veludo *et al.*, 2017; Dundar *et al.*, 2016).

4. Discussão

O trabalho ainda não está concluído, mas os resultados obtidos permitem-nos dizer que os valores do fluxo de calor em Portugal continental traduzem características da crusta perto da superfície e das fontes de calor que nela existem. A heterogeneidade observada nas diferentes espessuras das camadas com as fontes térmicas (radioativas)

mostra a necessidade de analisar os dados de fluxo de calor tendo em conta as características da região onde foram obtidos. Se excluirmos os dados obtidos na Faixa Piritosa concluímos facilmente que os valores mais elevados de fluxo de calor se localizam na zona das Beiras onde se encontram maciços graníticos com elevado conteúdo de radioatividade (Lamas *et al.*, 2015; 2017).

Relativamente aos valores do fluxo de calor obtidos nas bacias sedimentares da costa oeste do território, foram obtidos valores inferiores a 75 mW/m² na costa alentejana (furo Pescada 1) e na costa norte (furo 5A-1), marcados a laranja, com gradientes de temperatura de 21 e 22°C/km respetivamente (Figura 3b). Nos restantes valores, obtidos “offshore” e “onshore”, os gradientes de temperatura localizam-se entre 23°C/km e 36°C/km, verificando-se que os valores mais baixos de gradiente de temperatura aparecem associados a valores relativamente elevados de condutividade térmica (Figura 3b).

O trabalho apresentado recentemente sobre a região de Monchique (Camargo *et al.*, 2022) onde se conclui que a anomalia gravítica detetada nas medições feitas na região está relacionada essencialmente com a altitude do maciço não apresentando anomalias significativas de densidade, está de acordo com os valores de radioatividade obtidos na região (Batista *et al.*, 2013) permitindo clarificar os resultados do fluxo de calor obtidos na parte Este da bacia do Algarve. Atendendo às características da intrusão vulcânica onde se encontra o furo “GOLFO de CADIZ 6 Y1” com uma profundidade de 3520 m e um gradiente de temperatura de 22°C/km (Fernandez *et al.*, 1998), tendo em conta os valores de densidade e radioatividade obtidos em Monchique, o valor da condutividade térmica deverá ser alterado. Atendendo aos valores de condutividade térmica medidos em Portugal e ao valor do gradiente de temperatura publicado (Fernandez *et al.*, 1998), o valor do fluxo de calor deverá ser (73 – 75 mW/m²) ligeiramente superior ao obtido no furo Algarve 1. Tal facto poderá ser explicado pela ausência de sedimentos na parte superior do furo, não se verificando ou sendo menos acentuada a inversão de fluxo detetada em outros furos na região devido a transferência horizontal de calor associada a movimento de massa (Mulder *et al.*, 2006).

5. Conclusões

Os valores de fluxo de calor obtidos em Portugal Continental estão associados ao conteúdo e distribuição de fontes radioativas na crusta. Na região da Faixa Piritosa devem ser adicionadas às fontes radioativas fontes de origem diferente (reações químicas exotérmicas). Os valores de fluxo de calor proveniente de zonas mais profundas, Q_m , foram considerados idênticos em todo o território (~35 mW/m²).

Os dados obtidos permitem concluir que no bordo Sul da placa ibérica, no intervalo de longitudes estudado, os valores do fluxo de calor são superiores aos obtidos no bordo Norte da placa africana (Rimi *et al.*, 1991), no mesmo intervalo de longitudes.

Agradecimentos

São muitos os que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho. A todos a autora envia o seu agradecimento. Sem a ajuda de todos, desde a realização de trabalho de campo até à análise e interpretação dos dados, seria impossível realizar o trabalho apresentado.

A autora agradece aos colegas Luís Manuel Matias e Luís Menezes Pinheiro a revisão deste trabalho e as suas sugestões para melhorar o mesmo.

Referências

- Batista, M. J., Torres, L., Liote, J., Prazeres, C., Saraiva, J., Carvalho, J., 2013. *Carta Radiométrica de Portugal Continental (1:500 000)*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Beardsmore, G. R., Cull, J. P., 2001. Crustal Heat Flow. A Guide to Measurement and Modelling. Cambridge University Press.
- Camargo, G., Neres, M., Bos, M., Martins, B., Custódio, S., Terrinha, P., 2022. Magnetic and gravimetric modelling of the Monchique magmatic intrusion in south Portugal. *Abstract of the EGU General Assembly 2022*, EGU22-2625.
- Camelo, S., 1987. Analysis of bottom-hole temperature and preliminary estimation of heat-flow in Portuguese Sedimentary Basins. *Revista Brasileira de Geofísica*, **5**: 139-142.
- Dundar, S., Dias, N., Silveira, G., Kind, R., Vinnik, L., Matias, L., Bianchi, M., 2016. Estimation of crustal bulk properties beneath Mainland Portugal from P-wave teleseismic receiver functions. *Pure Appl. Geophys.*, **173**: 1949-1970.
- Duque, M.R., Mendes-Victor, L., 1988. Heat flow and thermal gradients in Portugal. *European Geotraverse. Fifth EGT Workshop: The Iberian Peninsula*. European Science Foundation, 131-136.
- Duque, M. R., Mendes-Victor, L., 1993. Heat flow and deep temperature in South Portugal. *Studia Geophysica et Geodaetica*, **37**: 279-292.
- Duque, M. R., 2018. Heat Flow Density, Geotherms and Lithosphere Thickness in SW of Iberia (South of Portugal). *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics*, **1**: 18-22.
- Duque, M. R., 2020. Numerical Simulations of Terrestrial Heat Flow in Beiras Region, Mainland Portugal. *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics*, **3**: 32-37.
- Fernandez, M., Marzáñ, I., Correia, A., Ramalho, E., 1998. Heat flow, heat production, and lithospheric thermal regime in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, **291**: 29-53.
- Lamas, R., Miranda, M., Pereira, A., Ferreira, N., Neves, L., 2015. Distribuição dos elementos radiogénicos nas rochas granitoides aflorantes na Zona Centro- Ibérica (Centro e Norte de Portugal). Proceedings do X Congresso Ibérico de Geoquímica, 173-176.
- Lamas, R., Miranda, M., Pereira, A., Neves, L., Ferreira, N., Rodrigues, N., 2017. 3-D distribution of the radioelements in the granitic rocks of Northern and Central Portugal and geothermal implications. *Journal of Iberian Geology*, **43**: 3-12.
- Mendes-Victor, L. A., Correia, A., Duque, M. R., Maciel, C., Camelo, S., Almeida, L. C., 1982. Primeiras determinações de fluxo de calor em Portugal. *Boletim Informativo do INMG*, **56**: 3-13.
- Mulder, T., Lecroat, P., Hanquiez, V., Marches, E., Gonthier, E., Guedes, J.-C., Thiébot, E., Jaaidi, B., Kenyon, N., Voisset, M., Perez, C., Sayago, M., Fuchey, Y., Bujan, S., 2006. The western part of the Gulf of Cadiz: contour currents and turbidity currents interactions. *Geo-Mar. Lett.*, **26**: 31-41.
- Rimi, A., Lucaleau, F., 1991. Geothermal Atlas of Europe. Catalogue of heat flow density data: Morocco. In: Hurtig, E., Cermak, V., Haenel, R., Zui, V. (Eds.). *Geothermal Atlas of Europe*. Haack.
- Veludo, I., Dias, N., Fonseca, P., Matias, L., Carrilho, F., Haberland, C., Villaseñor, A., 2017. Crustal seismic structure beneath Portugal and Southern Galicia (Western Iberia) and the role of Variscan inheritance. *Tectonophysics*, **717**: 645-664.
- Yoshida, M., Santosh, M., 2020. Energetics of the Solid Earth: An integrated perspective. *Energy Geoscience*, **1**: 28-35.