

## Alteração de temperatura do solo associada a variações de intensidade de fontes internas

### Soil temperature changes associated with intensity source variations

DOI:10.34117/bjdv10n1-045

Recebimento dos originais: 08/12/2023

Aceitação para publicação: 10/01/2024

**Maria Rosa Duque**

Phd em Física

Instituição: Universidade de Évora

Endereço: Departamento de Física da Universidade de Évora, ECT, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671 Évora, Portugal

E-mail: mrad@uevora.pt

#### RESUMO

A temperatura medida no solo abaixo da superfície, resulta das transferências de energia térmica proveniente do Sol propagando-se por condução até ao ponto onde é feita a medição, e energia térmica proveniente do interior da Terra que se propaga por condução, em sentido oposto, até à superfície. O presente trabalho fala apenas desta última transferência de energia. As fontes térmicas no interior da Terra são essencialmente energia proveniente de zonas mais internas, relacionada com o processo de formação e desenvolvimento do planeta, reações químicas e fontes radioativas. Sabendo a concentração dos isótopos radioativos responsáveis pela libertação de energia térmica,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , é possível obter-se a “produção de calor” associada ao decaimento radioativo. A diminuição secular do fluxo de calor proveniente do manto pode ser obtida através de uma lei exponencial com uma constante de decaimento de  $3 \text{ G ano}^{-1}$ . Utilizando a informação referida, tendo em conta os fluxos de calor proveniente do manto nos tempos atuais, podemos obter informação sobre o fluxo de calor e a temperatura no passado. O presente estudo remonta até há 4 milhões de anos (idade atribuída aos Australopithecus) terminando cerca de 300 000 anos atrás (idade dos vestígios mais antigos de Homo Sapiens). As diferenças entre o fluxo atual na superfície e o fluxo no passado permitem inferir a sua influência na camada de ar junto ao solo e também junto ao fundo oceânico.

**Palavras-chave:** calor, temperatura, fontes térmicas, radioatividade, evolução térmica.

#### ABSTRACT

The temperature measured on the ground below the surface results from the transfer of thermal energy coming by conduction from the Sun to the point of the measurement and thermal energy from the Earth's interior to the surface, by conduction, in the opposite direction. The present work speaks only about this last transfer of energy. Thermal sources in the Earth's interior are essentially energy from the innermost areas, related to the process of formation and development of the planet, chemical reactions and radioactive sources. When the concentration of radioactive isotopes responsible for the release of thermal energy ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ) is known, it is possible to obtain the “heat production” associated with the radioactive decay. The secular decrease in the heat flow from the mantle can be obtained by an exponential law with a decay constant of  $3 \text{ G year}^{-1}$ . Using this information, taking into account the heat flow values from the mantle

in current times, it is possible to obtain information about the heat flow and temperature in the past. The present study goes back to 4 million years ago (Australopithecus times) ending about 300 000 years ago (age of the oldest remains of Homo Sapiens). The differences between the actual heat flow value at the surface and the heat flow in the past allow us to infer their influence on the temperature of the air layer near the surface of the ground and near the ocean floor.

**Keywords:** heat, temperature, thermal sources, radioactivity, thermal evolution.

## 1 INTRODUÇÃO

Os vulcões em atividade, as manifestações geotérmicas e as fumarolas, são evidências de temperaturas elevadas dos materiais no interior da Terra. Vamos falar das fontes térmicas no interior da Terra e vermos como elas influenciam o fluxo de calor por condução vindo de zonas internas para a superfície da Terra. As fontes térmicas nas zonas mais profundas do planeta estão relacionadas com energia associada ao processo de formação e evolução do planeta Terra, calor associado a reações químicas ocorrendo em regiões delimitadas do planeta e calor associado ao decaimento de isótopos radioativos de vida longa, localizados principalmente nas zonas mais externas (crusta) do planeta. No presente trabalho iremos considerar apenas que a temperatura superficial resulta da sobreposição da energia proveniente do Sol com a energia proveniente de zonas mais internas, por condução, sem considerarmos componentes anômalas associadas, por exemplo, a vulcões em atividade ou sismos de grande magnitude. Os valores medidos na época atual vão ser utilizados para obtermos informação relativa à época em que apareceram os primeiros primatas (há 13 milhões de anos) ao tempo dos Australopithecus (há 4 milhões de anos) e ao aparecimento do Homo Sapiens (há 300 milhares de anos).

## 2 DIMINUIÇÃO SECULAR DO FLUXO DE CALOR DO MANTO

A diminuição secular do fluxo de calor proveniente do manto pode ser estudada através de uma expressão do tipo

$$[ Q_m(t) = Q_{m0} e^{(-\alpha t)} ] \quad (1)$$

sendo  $t$  o intervalo de tempo considerado desde o instante inicial e  $\alpha$  é a constante de decaimento. No nosso estudo iremos considerar  $\alpha = 3 \times 10^{-9}$  anos [1]. Analisando esta expressão podemos concluir que, há aproximadamente  $1 \times 10^9$  anos, o fluxo de calor

proveniente do manto seria aproximadamente 20 vezes mais elevado que o valor atual. Na Tabela 1 são apresentados valores de fluxo de calor na fronteira superior do manto que terão ocorrido em diferentes épocas associadas ao aparecimento de diferentes antecessores do Homo Sapiens, em regiões onde nos tempos atuais temos valores  $Q_m = 30$  e  $35 \text{ mW m}^{-2}$ . Como seria de esperar o valor do fluxo de calor mais elevado, ao nível da parte superior do manto, terá ocorrido na época em que apareceram os primeiros primatas. O aparecimento do Homo Sapiens terá acontecido com valores de  $Q_m$  muito próximos dos atuais.

Tabela 1: Valores de fluxo de calor  $Q_m$  em diferentes épocas considerando que os valores atuais são 30 e  $35 \text{ mW m}^{-2}$

$\Delta t$ (anos)	Espécie	$Q_m = 30 \text{ mW m}^{-2}$	$Q_m = 35 \text{ mW m}^{-2}$
$13 \times 10^6$	Primeiros primatas	31,19	36,39
$4 \times 10^6$	Australopithecus	30,36	35,4233
$3333 \times 10^5$	Homo Sapiens	30,03	35,03

Fonte: Autora

Na litosfera continental (mais espessa que a litosfera oceânica), o intervalo de tempo para o transporte de calor até à superfície é da ordem de grandeza das meias vidas do Urânio, Tório e Potássio. Por este facto as temperaturas medidas próximo da superfície da Terra não estão em equilíbrio com a taxa instantânea de geração de calor na fonte, sendo a espessura da litosfera um fator muito importante quando se estuda a propagação das perturbações de temperatura.

### 3 DIMINUIÇÃO DAS FONTES RADIOATIVAS NA CRUSTA

A distribuição de fontes de calor na crosta é muito difícil de obter devido a problemas de heterogeneidade química, dimensão de grãos, tipos de fronteira, etc. No presente trabalho não falaremos do calor associado a reações químicas, devido à sua especificidade e pouco conhecimento dos locais onde ocorrem. Iremos falar apenas do calor associado ao decaimento de isótopos radioativos de vida longa,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ . Os elementos radioativos transformam-se espontaneamente noutros elementos, emitindo radiações. A taxa de produção de calor das rochas depende do conteúdo dos radioelementos naturais, U, Th e K numa dada amostra e das constantes de produção de calor associadas a cada um. O número de núcleos radioativos numa dada amostra varia ao longo do tempo, segundo uma lei de decaimento [2]

$$[ N = N_0 e^{-\lambda t} ] \quad (2)$$

sendo  $N_0$  o número de núcleos radioativos no instante inicial, e  $\lambda$  é a constante de decaimento radioativo. O intervalo de tempo necessário para o número de núcleos radioativos passar a metade do seu valor inicial designa-se por meia vida,  $T_{1/2}$  [2].

$$[N/N_0 = 1/2 = e^{-\lambda T_{1/2}}] \quad \text{ou} \quad [T_{1/2} = \ln 2 / \lambda] \quad (3)$$

Na Tabela 2 encontram-se os isótopos radioativos considerados no estudo das fontes térmicas, as suas meias vidas e o calor associado ao decaimento dos isótopos radioativos considerados. O Urânio é o elemento a que está associada maior libertação de calor por unidade de massa, sendo o menor valor associado ao potássio.

Tabela 2 : Principais isótopos radioativos existentes nas rochas da Terra, meias vidas e produção de calor por unidade de massa de isótopo/ elemento.

Isótopo	Meia-vida (anos)	Produção de calor por unidade de massa de isótopo (W/Kg)
$^{238}\text{U}$	$4,46 \times 10^9$	$9,17 \times 10^{-5}$
$^{235}\text{U}$	$7,04 \times 10^8$	$5,75 \times 10^{-4}$
U natural	-----	$9,52 \times 10^{-5}$
$^{232}\text{Th}$	$1,40 \times 10^{10}$	$2,56 \times 10^{-5}$
$^{40}\text{K}$	$1,26 \times 10^9$	$2,97 \times 10^{-5}$
K natural	-----	$3,48 \times 10^{-9}$

Fonte: Adaptado de Jaupart, C., and Mareschal, J.-C. , Heat Generation and Transport in the Earth, 357-378, New York, Cambridge University Press.

A produção atual de calor devido ao decaimento destes isótopos numa dada amostra de rocha, pode obter-se por [1]

$$[H = 10^{-11}(9,52 [U] + 2,56 [Th] + 3,48 [K])] \quad (4)$$

sendo [U] e [Th] as concentrações do Urânio e do Tório, expressas em p.p.m. (partes por milhão), e [K] é a concentração de Potássio, expressa em % (percentagem). A produção de calor por unidade de volume da rocha obtém-se multiplicando H por  $\rho$  (a densidade / massa volúmica da rocha).

### 3.1 ESTUDANDO DUAS AMOSTRAS DE ROCHAS DIFERENTES

Na Tabela 3 apresentam-se valores do calor originado por duas amostras de materiais da crosta terrestre, com diferentes concentrações de elementos radioativos, mas 2 é 2,4 vezes mais elevada que a obtida na amostra 1.

Tabela 3 : Concentrações de elementos radioativos e produção de calor em 2 amostras

Amostra	[U] (p.p.m.)	[Th] (p.p.m.)	[K] (%)	H ( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ )
1	2,9	13,2	2,8	1,92
22	9,9	22,4	5,0	4,56

Fonte: Autora

Se considerarmos camadas homogêneas, constituídas por materiais das amostras estudadas, o fluxo de calor originado numa camada com 5 km de espessura, pelas fontes referidas, será  $9,6 \text{ mW}/\text{m}^2$  no caso 1 e  $22,8 \text{ mW}/\text{m}^2$  no caso 2. Teremos assim uma diferença de fluxo de calor de  $13,2 \text{ mW}/\text{m}^2$ , originada apenas por diferentes concentrações de elementos radioativos numa camada com 5 km de espessura.

Utilizando as expressões (1), (3) e (2) é possível obter a concentração de elementos radioativos no passado e o calor originado nas amostras estudadas. Na tabela 4 podemos ver os resultados obtidos para as duas amostras estudadas considerando intervalos de tempo  $\Delta t_1 = 13 \times 10^6$  anos (idade em que apareceram os primeiros primatas) e  $\Delta t_2 = 4 \times 10^6$  anos (época em que viveram os Australopithecus).  $Q_1$  e  $Q_2$  são os fluxos de calor originados pelos elementos radioativos considerados numa camada com 5 km de espessura há  $13 \times 10^6$  e  $4 \times 10^6$  anos, respetivamente.

Tabela 4. Calor originado nas amostras estudadas há  $13 \times 10^6$  anos e há  $4 \times 10^6$  anos

Amostra	$\Delta t_1 = 13 \times 10^6$ anos		$\Delta t_2 = 4 \times 10^6$ anos	
	$H_1$ ( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ )	$Q_1$ ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )	$H_2$ ( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ )	$Q_2$ ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )
1	1,925	9,62	1,922	9,61
2	4,572	22,86	4,566	22,83

Fonte: Autora

### 3.2 DOIS MODELOS DE CRUSTA

Nas aplicações seguintes, os valores correspondentes ao fluxo de calor proveniente de zonas mais profundas que a base da crosta,  $Q_m$  são retirados da Tabela 1.

Iremos considerar dois exemplos de crosta continental, formada por 3 camadas distintas designadas por crosta superior (C.S.), crosta média (C.M.) e crosta inferior (C.I.). A crosta superior (C.S.) é constituída por 2 sub-camadas (C.S.1) e (C.S.2). Na realidade a grande diferença entre os dois modelos reside na camada mais externa da crosta superior (C.S.1) que apresenta um conteúdo mais elevado de elementos radioativos no modelo 2. O fluxo de calor proveniente de regiões abaixo da crosta  $Q_m$  será  $30 \text{ mW}/\text{m}^2$  no modelo 1, e  $35 \text{ mW}/\text{m}^2$  no modelo 2.

#### Modelo 1:

Na tabela 5 podemos ver as características da crosta considerada no modelo 1. Para além da espessura e densidade das diferentes camadas consideradas, ainda podemos ver as concentrações de Urânio, Tório e Potássio

Tabela 5: A crosta continental do modelo 1 e concentração de elementos radioativos

Camada	Espessura (Km)	Densidade (kg/ m <sup>3</sup> )	[U] (p.p.m.)	[Th] (p.p.m.)	[K] (%)
c.s.1	5	2700	2,9	13,2	2,8
c.s.2	6	2700	3,0	14,0	3,0
c.m.	11	2750	1,5	7,0	1,5
c. i.	10	2770	0,2	1,0	0,2

Fonte: Autora

Na Tabela 6 mostra-se o calor gerado pelo decaimento dos elementos radioativos da crosta considerada na época atual ( H ) e o fluxo de calor a elas associado ( Q ). Os valores ( H<sub>1</sub> ) e ( Q<sub>1</sub> ) foram calculados para a época do aparecimento dos primeiros primatas, há 13 x 10<sup>6</sup> anos, e ( H<sub>2</sub> ) e ( Q<sub>2</sub> ) são os valores que terão existido na época dos Australopithecus, há 4x10<sup>6</sup> anos.

Tabela 6: Calor originado por fontes radioativas e fluxo de calor na crosta do modelo 1

Camada	H (μW/m <sup>3</sup> )	Q (mW/m <sup>2</sup> )	H <sub>1</sub> (μW/m <sup>3</sup> )	Q <sub>1</sub> (mW/m <sup>2</sup> )	H <sub>2</sub> (μW/m <sup>3</sup> )	Q <sub>2</sub> (mW/m <sup>2</sup> )
c.s.1	1,920	9,60	1,925	9,63	1,922	9,61
c.s.2	2,000	12,00	2,022	12,13	2,019	12,11
c.m.	1,030	11,33	1,031	11,34	1,030	11,33
c. i.	0,140	1,40	0,14	1,40	0,140	1,4
Crusta	---	34,33	----	34,50	---	34,45

Fonte: Autora

Para obtermos os valores do fluxo de calor à superfície, nas diferentes épocas, temos que somar os valores de Q<sub>m</sub> ,retirados da Tabela 1, aos valores da última linha da Tabela 6. Os valores obtidos para o fluxo à superfície são 64,33 mW/m<sup>2</sup> para a época atual, 65,69 mW/m<sup>2</sup> na época dos primeiros primatas e 64,81 mW/m<sup>2</sup> na época dos Australopithecus.

### Modelo 2:

Na Tabela 7 mostra-se a estrutura da crosta no Modelo 2. A diferença relativamente ao modelo 1 reside principalmente na concentração de elementos radioativos da camada c.s.1 e na espessura das camadas c.m. e c.i.. O valor do fluxo de calor proveniente das regiões abaixo da crosta é 35 mW/m<sup>2</sup>.

Tabela 7: A crosta continental do modelo 2 e concentração de elementos radioativos

Camada	Espessura (Km)	Densidade (kg/ m <sup>3</sup> )	[U] (p.p.m.)	[Th] (p.p.m.)	[K] (%)
c.s.1	5	2700	9,9	22,4	5,0
c.s.2	6	2700	3,0	14,0	3,0
c.m.	10	2750	1,5	7,0	1,5
c. i.	9	2770	0,2	1,0	0,2

Fonte: Autora

Na Tabela 8 mostra-se o calor gerado pelo decaimento dos elementos radioativos da crosta e o fluxo de calor, nas três épocas consideradas na Tabela 6, para o modelo 1.

Tabela 8: Calor originado por fontes radioativas e fluxo de calor na crosta do modelo 2

Camada	H (μW/m <sup>3</sup> )	Q (mW/m <sup>2</sup> )	H <sub>1</sub> (μW/m <sup>3</sup> )	Q <sub>1</sub> (mW/m <sup>2</sup> )	H <sub>2</sub> (μW/m <sup>3</sup> )	Q <sub>2</sub> (mW/m <sup>2</sup> )
c.s.1	4,563	22,82	4,572	22,86	4,566	22,83
c.s.2	2,000	12,00	2,022	12,13	2,019	12,11
c. m.	1,030	10,30	1,031	10,31	1,030	10,30
c. i.	0,140	1,26	0,14	1,26	0,140	1,26
Crusta	---	46,38	----	46,56	---	46,50

Fonte: Autora

Os valores obtidos para o fluxo à superfície são 81,38 mW/m<sup>2</sup> para a época atual, 82,95 mW/m<sup>2</sup> na época dos primeiros primatas e 81,92 mW/m<sup>2</sup> na época dos Australopithecus.

#### 4 ALGUNS COMENTÁRIOS

O aumento do fluxo de calor e de temperatura na crosta em épocas passadas tem duas componentes distintas. A componente de valor mais elevado é a associada aos valores de Q<sub>m</sub> (calor de zonas mais profundas). Apesar de os valores associados ao início da época do Homo Sapiens e dos Australopithecus serem relativamente pequenos, os valores associados à época de vida dos primeiros primatas são superiores a 1 mW/m<sup>2</sup> para os dois valores de Q<sub>m</sub> considerados (ver tabela 1). Relativamente à diminuição de produção na crosta com o seu envelhecimento, o valor obtido vai depender da concentração de elementos radioativos e da espessura da camada onde se encontram.

A heterogeneidade na composição e distribuição dos vários tipos de rochas (com diferentes concentrações de elementos radioativos) faz com existam atualmente, e tenham **existido no passado, fluxo de calor na direção horizontal, que tenderá a diminuir a** diferença entre os valores de fluxo máximo e fluxo mínimo de fluxo vertical de calor, medido à superfície da Terra.

O aumento do fluxo de calor à superfície do solo terá influência nas propriedades do ar muito próximas. Se considerarmos uma camada de ar com 5 cm de espessura, junto ao solo num dia sem vento, o aumento de fluxo obtido para a época em que viveram os primeiros primatas seria responsável por um aumento de temperatura do ar ligeiramente superior a 1°C. uma diminuição na densidade do ar originaria um aumento de temperatura, considerando o mesmo fluxo de calor. Os valores obtidos para a época dos *Australopithecus* poderiam originar uma subida de temperatura do ar junto ao solo (espessura de 5 cm) de cerca de 0,4°C.

No trabalho apresentado não foram consideradas fontes de calor associadas a reações química exotérmicas /endotérmicas a que se podem associar fontes /sumidouros de calor. Estas fontes são, geralmente, de origem local, não se conhecendo exatamente a sua real dimensão e localização na Terra. Existem, no entanto, vários exemplos locais conhecidos, em que a variação de temperatura associada é superior à encontrada no presente trabalho, para as fontes radioativas.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem-nos deduzir que , no passado, as fontes de calor na crosta e em zonas mais profundas teriam sido mais elevadas que as atuais, originando temperaturas e fluxos verticais de calor à superfície da Terra , mais elevados que os atuais.

O conteúdo e distribuição heterogênea das fontes de calor faz com que seja difícil determinar com rigor a influência da sua variação. Valores diferentes de fluxo de calor em regiões próximas originam transferência horizontal de calor, que tende a diminuir a diferença obtida e os gradientes horizontais de temperatura a elas associados.

Os valores obtidos nos exemplos apresentados permitem-nos concluir que as camadas de ar junto ao solo, sofreriam aquecimento passível de alterar a sua densidade, principalmente em dias sem vento.



## REFERÊNCIAS

- [1] Jaupart, C., and Mareschal, J.-C. , Heat Generation and Transport in the Earth, 357-378, New York, Cambridge University Press.
- [2] Fowler, C. (2007), Na Introduction to Global Geophysics, 234-239, New York, Cambridge University Press.
- [3] Haenel, R., Rybach, L. and Stegena, L. (eds), (1988), Handbook of Terrestrial Heat Flow Density Determination, 125-142, Holland, Kluwer Academic Publishers.