



Mapeamento de Gradiente Geotérmico do Município de Teófilo Otoni no Estado de Minas Gerais

Antonio Jorge de Lima Gomes (antonio.gomes@ufvjm.edu.br) e Carlos Henrique Alexandrino (chalex@on.br)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Resumo

Apresentamos neste trabalho mapeamento de resultados de gradientes geotérmicos inéditos, obtidos através de perfilações térmicas de temperatura, realizadas em quatro poços no Município de Teófilo Otoni, situados no Vale do Mucuri, Estado de Minas Gerais. Este mapeamento é parte de um programa de pesquisa de Energia Geotérmica dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri realizado pela UFVJM – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Todas as perfilações térmicas foram realizadas em conjunto com a equipe do Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional/MCT do Rio de Janeiro. Todos os poços foram perfurados com objetivo de abastecimento de água para a população do Município de Teófilo Otoni. Destes, três poços são de propriedade da Copasa e um da empresa JBS. Os mesmos estavam parados e sem bombeamento há vários meses e facilitou a realização dos perfis térmicos. Os valores dos gradientes geotérmicos foram obtidos pelas metodologias dos tipos CVL (convencional) e CBT (temperatura estável do fundo do poço). Em dois poços os dados analisados utilizaram o modelo CVL e os restantes utilizaram o método CBT. Os dados indicaram que os valores dos gradientes geotérmicos se encontram no intervalo de 10,7 a 19,2 °C/km, resultando num valor médio do Município de Teófilo Otoni de $18,3 \pm 1,7$ °C/km. O mapeamento final aponta que os valores obtidos indicam que esta região é caracterizada por gradientes geotérmicos relativamente baixos. Devido à baixa densidade de dados deve-se continuidade para o aumento da base de dados geotérmicos regionais do Estado de Minas Gerais. O mapeamento resultante indica que o Município de Teófilo Otoni apresenta comportamento correspondente a regiões geológicas estáveis do tipo pré-cambrianas.

Introdução

Como parte de um programa de pesquisa de Energia Geotérmica do Estado de Minas Gerais, a equipe de Geotermia da UFVJM – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, realizou perfilações térmicas inéditas em poços, no Município de Teófilo Otoni. Todas as medidas geotérmicas foram realizadas em conjunto

com a equipe do Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional/MCT do Rio de Janeiro, que forneceu os equipamentos para a realização das perfilações térmicas.

Um dos objetivos principais deste estudo é realizar uma avaliação de recursos geotérmicos em escala regional dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri e também do Estado de Minas Gerais. Este projeto foi iniciado em 2010 pelo Laboratório de Geotermia da UFVJM – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Campus do Mucuri em Teófilo Otoni, cujo laboratório se encontra em fase de implementação.

Na Figura (1) apresenta-se a localização do Município de Teófilo Otoni em relação ao Estado de Minas Gerais e ao Brasil. O pequeno contorno em vermelho representa a região aonde foram realizadas as medidas geotérmicas, cujo local está situado na região nordeste do Estado de Minas Gerais.

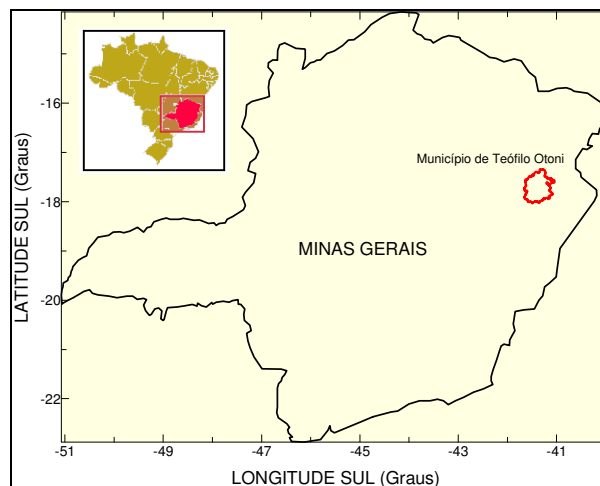


Figura 1 – Mapa regional com a localização do Município de Teófilo Otoni na região nordeste de Minas Gerais com contorno em vermelho.

O conjunto de dados utilizado para análise do gradiente geotérmico consistiu de dados experimentais, medidos em poços de água de abastecimento em quatro localidades, situadas dentro do Município de Teófilo Otoni no Estado de Minas Gerais. Todos os poços estavam sem utilização, parados e sem bombeamento há vários meses. Neste contexto, não teremos resultados afetados por perturbação de circulação de fluidos.

Apresenta-se na Figura (2) mapa com o contorno do Município de Teófilo Otoni com os locais de medida, onde foram realizadas as perfilações térmicas.

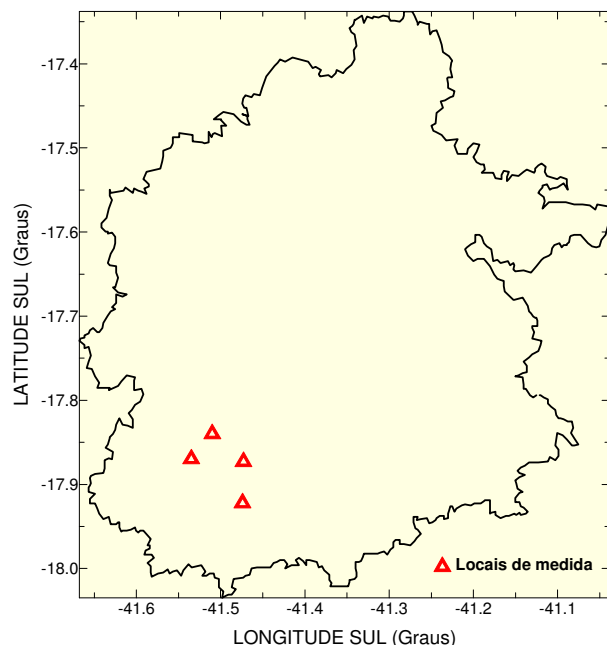


Figura 2 – Mapa do contorno do Município de Teófilo Otoni com os locais de medida onde foram realizadas as perfilações térmicas.

Metodologia

Mapas geotermiais são geralmente empregados para visualizar as características do campo térmico e observar suas correlações com as estruturas geológicas. A elaboração dos mapas de gradiente térmicos e de fluxo de calor, em escalas apropriadas, é uma das melhores formas de se examinar as variações regionais do campo térmico, sendo que se constitui numa das fases importantes na análise e interpretação de dados coletados (Gomes e Hamza, 2009).

As informações sobre as temperaturas em subsuperfície constituem o acervo básico para avaliação de recursos geotermiais. Temos dois conjuntos de dados sobre as medidas de temperatura em profundidade e que respectivamente, são: medidas diretas e estimativas indiretas (Bolditzar, 1958; Bullard, 1965; Bodvarsson, 1974; Jessop et al, 1976; Haenel e Mongelli, 1988; Fournier, 1991).

Na determinação dos gradientes geotérmicos do Município de Teófilo Otoni, utilizamos dois métodos distintos, que foram respectivamente, o método convencional (CVL) e o de temperatura estável do fundo de poço (CBT).

Os dados obtidos são resultados de medições experimentais inéditas e permitiram a determinação dos parâmetros geotérmicos da área de estudo. As medidas

de temperatura foram efetuadas com o uso de sensores tipo termistor.

O método convencional (CVL) é utilizado para determinação do gradiente geotérmico através de ajuste linear dos dados de perfilação para um intervalo selecionado. O intervalo deve estar preferencialmente livre de qualquer processo de perturbação que seja capaz de afetar o regime geotérmico local. O uso deste método é adotado para casos onde as camadas geológicas são lateralmente homogêneas, de propriedades térmicas constantes e possuem dimensões físicas bem definidas em relação aos intervalos das medidas. Desta forma, a profundidade foi considerada como variável independente e a temperatura como variável dependente.

No presente caso, para um conjunto de N pares de dados (z_i , T_i) os coeficientes são o gradiente térmico (Γ) e o intercepto (T_0), dada por:

$$\Gamma = \frac{N \sum z_i T_i - \sum z_i \sum T_i}{N \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2} \quad (1)$$

$$T_0 = \frac{\sum z_i^2 \sum T_i - \sum z_i \sum z_i T_i}{N \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2} \quad (2)$$

O método de temperatura estável de fundo do poço (CBT) é utilizado para casos, em que os fluxos de fluidos no interior do poço, perturbam o regime térmico condutivo, impossibilitando desta forma a determinação pelo método convencional do gradiente geotérmico. Nesses casos, uma variante do procedimento conhecido como 'método de fundo do poço' (BHT), proposto por Carvalho e Vacquiers (1977) e Carvalho (1981) e foi utilizado por Hamza e Muñoz (1996), Gomes e Hamza, (2004, 2005, 2006, 2007, 2008 e 2009), Hamza et al, (2004), Hamza et al, (2005), Alexandrino e Hamza (2008), Hamza et al (2010).

O gradiente obtido pelo método CBT é determinado pela seguinte relação:

$$T_{CBT} = T_0 + q \sum_{i=1}^N R_i h_i \quad (3)$$

onde R_i é a resistividade térmica da camada i . O termo do somatório se refere à resistência térmica cumulativa das formações presentes até o fundo do poço onde foi efetuada a medida de temperatura.

Para o mapeamento do gradiente geotérmico diversos métodos são utilizados na confecção dos mapas geotermiais. A maioria dos softwares gráficos gera mapas com base em valores interpolados em uma malha de pontos equi-espaciais e projetados sobre a área de estudo. Neste trabalho utilizou-se um gride com uma interpolação do tipo inverso da distância.

Resultados Obtidos das Perfilagens Térmicas

Os poços onde foram realizadas as perfilagens térmicas estão todos localizados no Município de Teófilo Otoni. Todos estes locais estão devidamente georreferenciados e são apresentados na Tabela (1), onde consta o número do poço, local e suas respectivas coordenadas geográficas.

Tabela 1 – Poços perfilados em Teófilo Otoni.

Poço	Local	Coordenadas Geográficas	
		Latitude	Longitude
C3-COPASA-TEO	Potón	17° 55' 19"	41° 28' 27"
C5-COPASA-TEO	São José	17° 52' 11"	41° 32' 06"
C11-COPASA-TEO	Bela Vista	17° 50' 23"	41° 30' 35"
P01-JBS-TEO	JBS	17° 52' 23"	41° 28' 22"

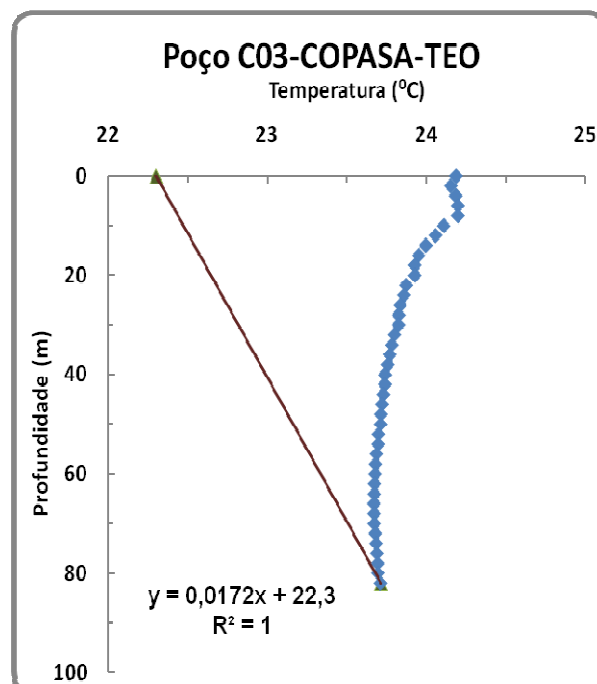


Figura 3 – Perfil térmico do poço C03 em Teófilo Otoni.

Resultados do Gradiente Geotérmico

Os valores dos gradientes geotérmicos obtidos por tipo de método e para cada poço são apresentados a seguir na Tabela (2).

Tabela 2 – Gradientes geotérmicos obtidos com o seu respectivo tipo e desvio padrão.

Poço	Gradiente Geotérmico (°C/km)		
	Tipo	Valor	Desvio Padrão
C3-COPASA-TEO	CBT	17,2	0,17
C5-COPASA-TEO	CVL	19,2	0,71
C11-COPASA-TEO	CVL	10,7	1,29
C1-JBS-TEO	CBT	18,6	0,48

As perfilagens térmicas realizadas em Teófilo Otoni permitiram determinar os valores do gradiente geotérmico de cada poço e os perfis obtidos são apresentados a seguir nas Figuras (3), (4), (5) e (6).

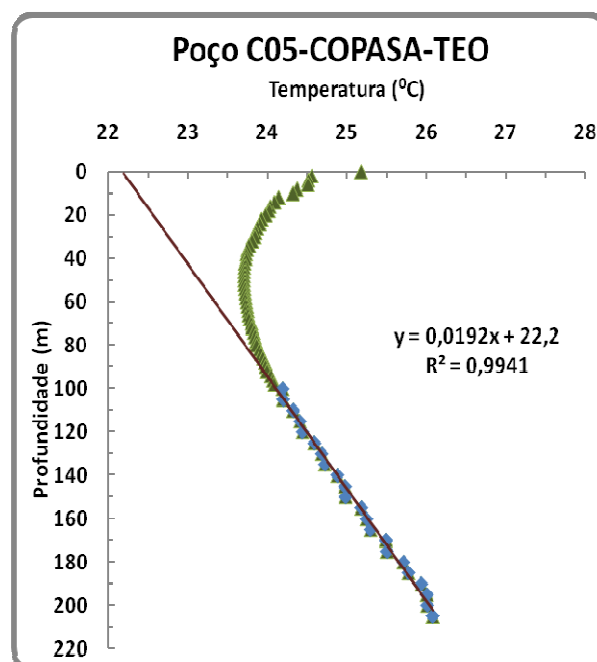


Figura 4 – Perfil térmico do poço C05 em Teófilo Otoni.

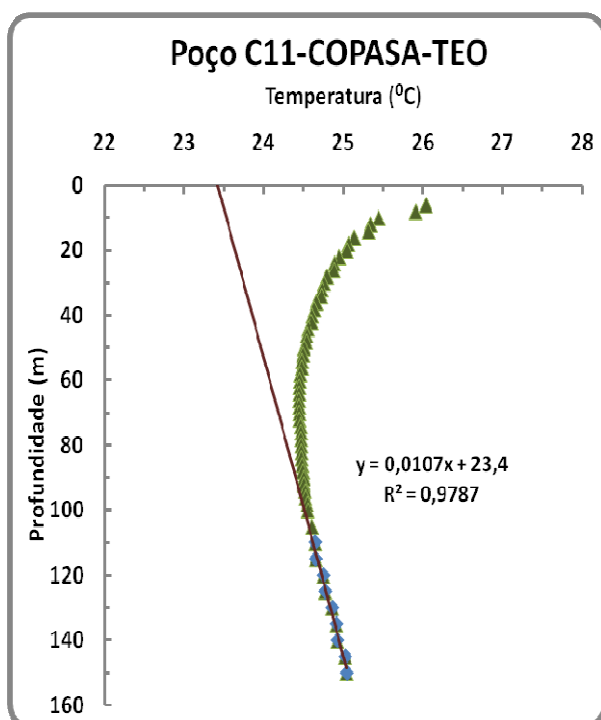


Figura 5 – Perfil térmico do poço C11 em Teófilo Otoni.

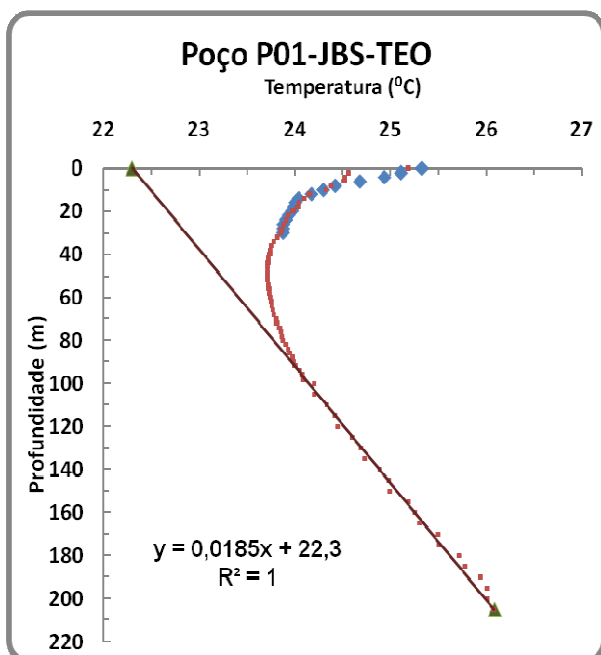


Figura 6 – Perfil térmico do poço C01 em azul sobreposto ao poço C05 em vermelho.

Nos perfis anteriores são mostrados os ajustes lineares e também estão especificamente traçados os limites de temperatura com a equação correspondente do gradiente geotérmico e seu intercepto na superfície local.

Mapeamento do Gradiente Geotérmico:

Utilizamos no presente trabalho mapas de contorno automatizados com o uso de softwares computacionais, onde optamos pela interpolação do tipo inverso da distância, a qual se mostrou com resposta mais adequadas de ajuste de suavidade.

As feições representadas por mapas estão diretamente relacionadas com a densidade e a distribuição geográfica dos dados (Gomes e Hamza, 2009).

Na Figura (2) apresentam-se os locais de medida dos poços com o respectivo contorno do Município de Teófilo Otoni.

Devido à baixa densidade de dados medidos adicionamos à interpolação os resultados de diversos locais de Minas Gerais, apresentados nos trabalhos de Gomes e Hamza, (2007, 2008 e 2009), Alexandrino e Hamza (2007 e 2008) e Hamza et al (2010).

O Mapeamento do Gradiente Geotérmico é apresentado no final nas Figuras (7) e (8), onde respectivamente temos uma comparação dos dados existentes antes e após as novas perfilagens. Ambos comprovam que a região apresentam baixos valores de gradiente.

Destacam-se em ambos os mapas, altos valores de gradiente na região da Bacia do São Francisco, comuns a locais onde estão situadas Bacias Sedimentares. Mesmo com a baixa densidade de dados, constata-se que a região da província Mantiqueira apresenta valores de gradientes geotérmicos inferiores a 20 °C/km, resultado considerado comum em todas as regiões pré-cambrianas.

Conclusões:

Os valores dos gradientes geotérmicos obtidos se encontram num intervalo de 10,7 a 19,2 °C/km, resultando num valor médio de $18,3 \pm 1,7$ °C/km para o Município de Teófilo Otoni.

Nos resultados obtidos constatou-se que o poço C05 apresentou o maior valor de gradiente geotérmico e que resultou em $19,2 \pm 0,71$ °C/km. Este também foi o poço de perfilagem com maior profundidade e onde foi utilizado o método CVL. Em contrapartida, o mais baixo valor de gradiente geotérmico obtido foi do poço C11, cujo resultado de $10,7 \pm 1,9$ °C/km, sendo indicativo de zonas de recarga.

A baixa densidade de dados permitiu observar que os valores obtidos indicam que esta região é caracterizada por gradientes geotérmicos relativamente baixos. A região onde foram realizadas as medidas consistem de

unidades geológicas pertencentes ao Complexo Juiz de Fora, considerado um período geológico pertencente ao Arqueano.

Como a baixa densidade de dados permite identificação apenas de feições de grande comprimento de onda, ou seja, as anomalias regionais, contata-se, neste contexto, que o resultado observado para o conjunto de valores do gradiente geotérmico é considerado como normal e correspondente a regiões geológicas consideradas estáveis.

A província Mantiqueira apresenta valores de gradientes geotérmicos inferiores a 20 °C/km o que é comum a todas as regiões pré-cambrianas, estando inseridos neste contexto, os resultados obtidos neste trabalho no Município de Teófilo Otoni.

Agradecimentos:

Agradecemos à equipe do Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional/MCT, que participou das perfilações e cedeu os equipamentos. Em especial ao Dr. Valiia Manathal Hamza, Fábio Fabio Pinto Vieira e Suze Nei Pereira Guimarães. Agradecemos à Fapemig e ao MEC pelas bolsas de iniciação científica de Augusto dos Santos Petzold e Julhia Maria Pinto da Silva, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

Alexandrino, C., H. ; Hamza, V., M. 2007. Estrutura Termal da Litosfera nos segmentos cratônicos de Salvador e São Francisco.. In: 10 Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2007, Rio de Janeiro. Anais do 10 CISBGf. Rio de Janeiro.

Alexandrino, C., H.; Hamza, V. M., 2008. Estimates of heat flow and heat production and a thermal model of the São Francisco craton. *International Journal of Earth Sciences*, Volume 97, Number 2, 289-306.

Bodvarsson, G., 1974, *Geothermal resource energetics, Geothermics*, vol. 3, pp. 83-92.

Boldizar, 1958 T. Boldizar, The distribution of temperatures in flowing wells, *Am. J. Sci.* 256 (1958), pp. 294–298.

Bullard, E. C., 1965, Historical introduction to terrestrial heat flow, *American Geophysics Union, Geophys. Mon. Ser.*, in Lee, W. H. K. (ed.), *Terrestrial Heat Flow*, vol. 8, pp. 1-6.

Carvalho, H. S., and Vacquiers, V., 1977, Method for determining terrestrial heat flow in oil fields: *Geophysics*, v. 42, no. 3, p. 584-593.

Carvalho, H. S., 1981, Métodos para determinação de fluxo geotérmico com aplicação às bacias sedimentares petrolíferas do Recôncavo Baiano (Brasil) e Sumatra (Indonésia). Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador (BA).

Fournier, R. O., 1991, Water geothermometers applied to geothermal energy, ed. D'Amore F., UNITAR-UNDP, New York, 253-273.

Gomes, A.J.L. e Hamza, V.M., 2004. Mapeamento de Gradientes Geotérmicos no Estado de São Paulo, In: 1º Simpósio Regional de Geofísica, Anais, Cd-rom, São Paulo, 26-28 de setembro, 4p.

Gomes, A. J. L. and HAMZA, V.M., 2005. Gradiente e Fluxo Geotérmico do Estado de Santa Catarina, 9º International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 6p., Cd-rom, Salvador, Brasil.

Gomes, A.J.L. e Hamza, V.M., 2006. Gradiente e Fluxo Geotérmico no Estado do Paraná, In: 2º Congresso Internacional da SBGf, Anais, Cd-rom, Natal, 21-23 de setembro, 6p.

Gomes, A.J.L. e Hamza, V.M., 2007. Gradiente e Fluxo Geotérmico nas Bordas Norte e Noroeste da Bacia do Paraná, In: 10º Congresso Internacional da SBGf, Anais, Cd-rom, Rio de Janeiro, 19-22 de Novembro, 6p.

Gomes, A.J.L. e Hamza, V.M., 2008. Distribuição Regional de Gradiente e Fluxo Geotérmico no Estado do Rio Grande do Sul incluindo também áreas vizinhas do Uruguai e da Argentina, In: 3º Simpósio Brasileiro de Geofísica da SBGf, Anais, Cd-rom, 26-28 de Novembro, 6p. Natal.

Gomes, A.J.L. e Hamza, V.M., 2009. Gradiente e Fluxo Geotérmico da Bacia do Paraná, 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in August 24-28, 2009, Salvador, Brazil.

Gomes, A.J.L., 2009. Avaliação de Recursos Geotermiais da Bacia do Paraná, Tese de Doutorado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brazil.

Haenel, R., Mongelli, F., 1988. Thermal exploration methods, *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*, p.353-389.

Hamza, V.M., Silva Dias, F.J.S., Gomes, A.J.L. and Terceros, Z.G.D., 2005. Numerical and Functional Representations of Regional Heat Flow in South America, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volume 152, 4, p.223-256.

Hamza, V.M. and Muñoz, M., 1996. Heat Flow map of South America, *Geothermics*, Vol. 25, nº 6, pp. 599-646.

Hamza, V.M., Cardoso, R.R., Gomes, A.J.L. and Alexandrino, C.H., 2010. Brazil: Country Update, *Proceedings World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010

Hurter, S.J. and Pollack, H.N., 1996. Terrestrial heat flow in the Paraná basin, Southern Brazil, *J. Geophys. Res.*, 101, p.8659-8672.

Meister, E.M., 1973. Gradientes geotérmicos nas bacias sedimentares Brasileiras, *Boletim Técnico Petrobrás*, 16 (4), 221-232.

Vitorello, I., Hamza, V.M.; Pollack, H.N. and Araújo, R.L.C., 1978. Geothermal Investigations in Brazil, *Rev. Brasil. Geociências*, vol. 8, pp. 71-89.

Vitorello, I., Hamza, V.M. and Pollack, H.N., 1980. Terrestrial Heat Flow in the Brazilian Highlands, *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, pp. 3778-3788.

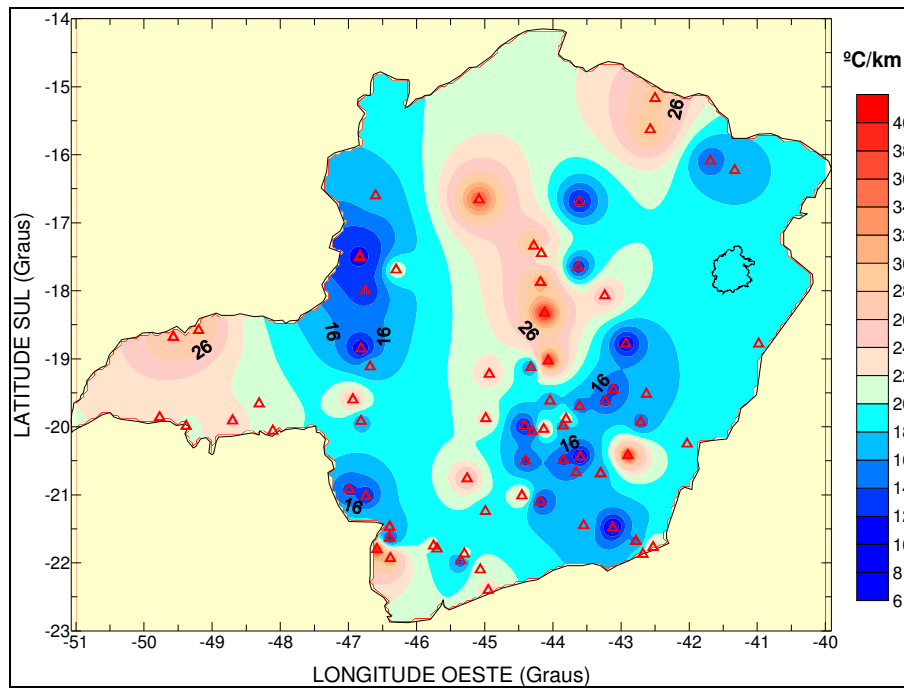


Figura 7 – Mapa de Gradiente Geotérmico do Estado de Minas Gerais sem a inclusão dos novos valores de gradientes apresentados neste trabalho.

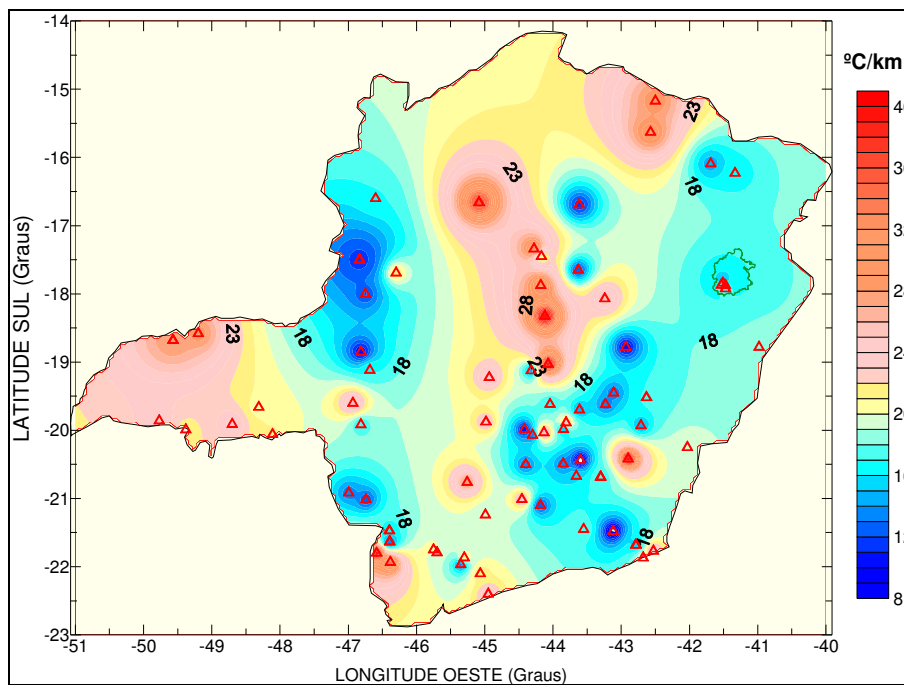


Figura 8 – Mapa de Gradiente Geotérmico do Estado de Minas Gerais com a inclusão dos novos dados de Teófilo Otoni. Os novos dados apresentam baixo valor e estão localizados na região sudoeste do município conforme contorno em verde.