

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL GEOTÉRMICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JEQUITINHONHA

André Froede¹
Carlos Henrique Alexandrino²
Carlos Alberto Mírez Tarrillo³

Resumo: Resultados desse estudo admitiram análises geotermiais da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, presente no Estado de Minas Gerais e Bahia. Dados disponíveis de 182 perfis poços, permitiram avaliar, através da aplicação métodos geotermiais, o potencial geotérmico no local. Reavaliações de estudos prévios e aquisição de dados complementares possibilitaram avanços no estudo regional térmico da região, cujos limites estão em área de domínio do Orógeno Araçuaí, e uma faixa ao sul, e, outra estreita faixa ao nordeste da área, sob influência do Cráton São Francisco. Foram observadas variações de 8 a 40 °C/km de gradiente térmico regional e valores de fluxo geotérmico variando entre 25 e 115 mW/m². Anomalias elevadas foram verificadas nas regiões centro-norte e noroeste da Bacia, com fluxos geotérmicos variando entre 70-115 mW/m², valores superiores à média global. Essas regiões são as mais propícias para realização de estudos mais aprofundados, a fim de geração de energia geotérmica para a localidade.

Palavras-chave: Geotermia. Geofísica. Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha. Orógeno Araçuaí. Geologia.

JEQUITINHONHA'S RIVER WATERSHED GEOTHERMAL POTENTIAL EVALUATION

Abstract: Results of this study admitted geothermal analyses of the Jequitinhonha River Watershed, present in the State of Minas Gerais and Bahia. Available data from 182 well profiles, allowed to evaluate, through the application of geothermal methods, the geothermal potential on site. Reassessments of previous studies and acquisition of complementary data allowed advances in the regional thermal study of the region, whose limits are in the area of domain of the Orógeno Araçuaí, and a strip to the south, and another narrow strip to the northeast of the area, under the influence of the San Francisco Cráton. Variations of 8 to 40 °C/km of regional thermal gradient and geothermal flow values ranging between 25 and 115 mW/m² were observed. High anomalies were observed in the North-Central and Northwest regions of the watershed, with geothermal flows ranging between 70-115 mW/m², values higher than the global average. These regions are the most conducive to conducting more in-depth studies in order to generate geothermal energy for the locality.

Keywords: Geothermal. Geophysics. Jequitinhonha River Watershed. Orógeno Araçuaí. Geology

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, ICET, Teófilo Otoni, Brasil, andre.froede@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1986-0110>

² Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, ICET, Teófilo Otoni, Brasil, carlos.alexandrino@ufvjm.edu.br, <https://orcid.org/0000-0001-9408-4644>

³ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, ICET, Teófilo Otoni, Brasil, carlos.mirez@ufvjm.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-3024-915X>

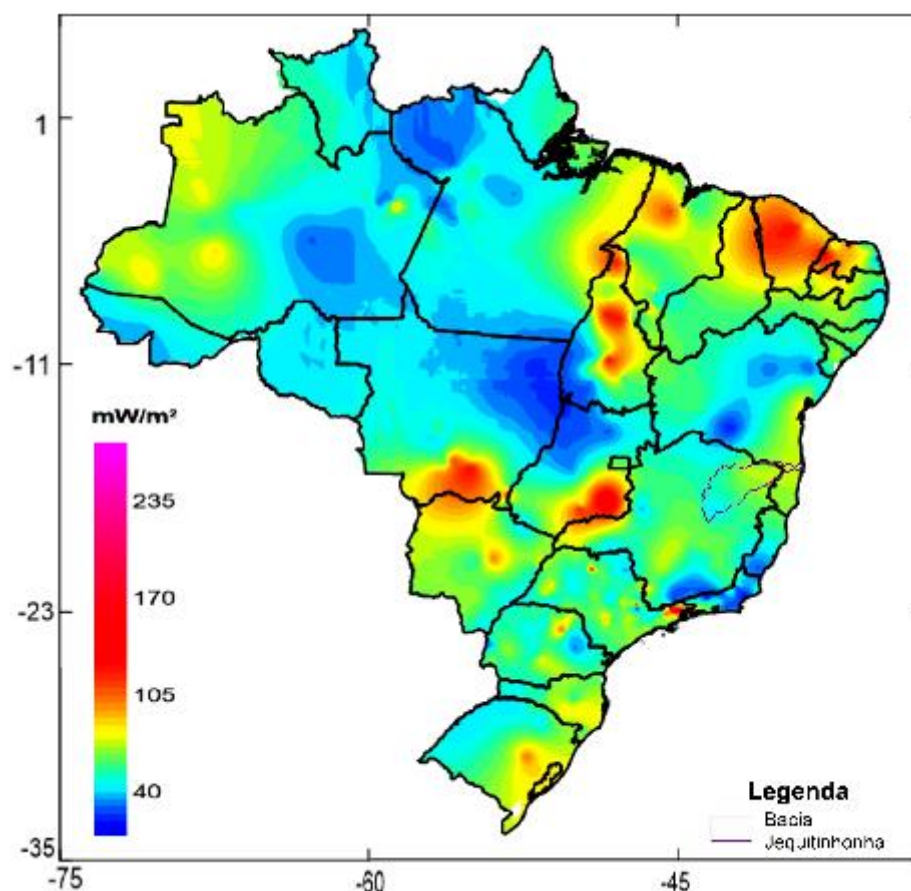
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO JEQUITINHONHA (YEQUITIÑOÑA)

Resumen: Los resultados de este estudio admitieron análisis geotérmicos de la cuenca del río Jequitinhoña, presente en los estados brasileños de Minas Gerais y Bahía. Los datos disponibles son los perfiles de 182 pozos, que permitieron evaluar mediante la aplicación de métodos geotérmicos, el potencial geotérmico en la región. Las reevaluaciones de los estudios anteriores y la adquisición de datos complementarios permitieron avanzar en el estudio térmico regional de la región, cuyos límites se encuentran en la zona del Orógeno de Araçuaí, y una franja al sur, y otra franja estrecha al noreste de la zona, bajo la influencia del Cráton de São Francisco. Se observaron variaciones de 8 a 40 °C / km de gradiente térmico regional y valores de flujo geotérmico que variaban entre 25 y 115 mW / m². Se observaron elevadas anomalías en las regiones centro-norte y noroeste de la cuenca, con flujos geotérmicos que varían entre 70 a 115 mW / m², valores superiores al promedio mundial. Estas regiones son las más adecuadas para realizar estudios posteriores más profundos con el fin de generar energía geotérmica para la localidad.

Palabras clave: Geotérmica. Geofísica. Cuenca del río Jequitinhonha. Orógeno Araçuaí. Geología.

Introdução

A Geotermia é uma ciência que tem como um dos objetivos compreender os vários processos de transferência de calor que operam no interior da Terra. Nos últimos anos, um número considerável de estudo geotérmicos no território brasileiro tem surgido, contribuindo muito para o conhecimento da evolução geológica ocorrida, geologia econômica, e para estudos sobre fontes de energia geotérmica. Recentemente, Hamza et. al., (2020) realizou uma revisão dos diversos estudos sobre os fluxos de calor no território brasileiro, gerando um mapa atualizado (Figura 01) do fluxo de calor no país.

Figura 01 – Mapa de fluxo de calor do Brasil atualizado

Fonte: HAMZA *et. al.* (2020). Org.: Elaborado por Hamza (2020):
Disponível em: < <https://doi.org/10.31214/ijthfa.v3i1.42> >. Acesso em: 20 jan. 2021.

A Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, demarcada na Figura 01, engloba o nordeste mineiro e uma pequena faixa no sudeste baiano. Ela está inserida no contexto geotectônico do Orógeno Araçuai, em sua maior parte, havendo em um trecho no sudoeste da área, rochas pertencentes ao Cráton São Francisco, que também influencia uma pequena faixa no nordeste da área, região sul da Bahia (Figura 02).

A fim de contribuir para os estudos geotérmicos em território brasileiro, principalmente, voltado para o estudo de áreas com potencial para aproveitamento de energia geotérmica, este trabalho destacou essa bacia para uma avaliação dos recursos geotérmicos em maior detalhe. A escolha da área foi baseada no fato da região estar em uma zona de valores de fluxo geotérmico entre 40 e 105 mW/m², conforme indicado na Figura 01.

O objetivo deste estudo é de estimar o fluxo e o gradiente geotérmico da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, baseando-se nos dados de temperaturas

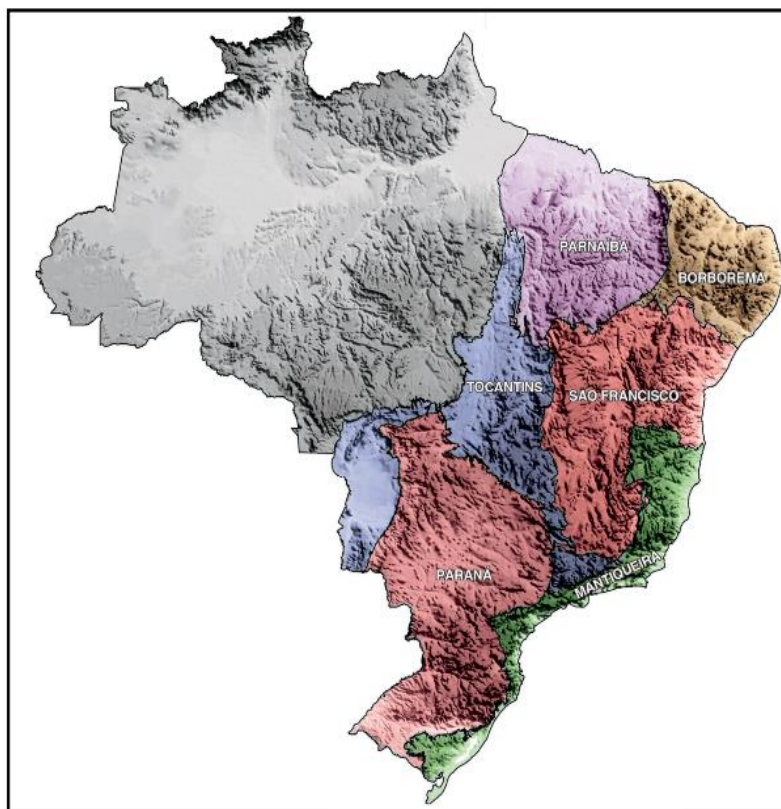
estimados principalmente pelo método geoquímico, com complemento de dados dos métodos convencional (CVL), temperatura do fundo do poço (CBT) e condutividade térmica regional. Através dessa avaliação, é possível disponibilizar uma base de dados com as informações necessárias para a calcular a possibilidade de aproveitamento geotérmico local, além de sua importância para conhecimento da geologia em subsuperfície, e suas correlações com a evolução geológica existente.

O estudo geotérmico feito na bacia do Jequitinhonha contou com dados de um total de 182 poços, disponibilizados pela plataforma do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Foi possível através destes dados, gerar mapas de gradiente geotérmico, condutividade térmica e fluxo de calor, permitindo uma avaliação do potencial geotérmico do local.

Evolução Geológica

O contexto geológico da região de estudo faz parte (em quase toda sua totalidade) da chamada: Província Mantiqueira, tal como definida por Almeida et al. (1977, 1981). Esta Província é uma entidade geotectônica instalada a leste dos crátons São Francisco e Rio de La Plata/Paraná, ao final do Neoproterozóico e início do Paleozóico (Figura 2). Possui continuidade por cerca de 3.000 km com orientação NNE–SSW ao longo da costa atlântica, de Montevideu (Uruguai) ao sul do Estado da Bahia. Faz limite com as províncias Tocantins, São Francisco e Paraná, e é bordejada, à leste, pela margem continental e pelas bacias costeiras do Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas (Heilbron et al., 2017).

A província Mantiqueira possui registros de uma longa e complexa evolução do Neoproterozóico na América do Sul (idade de 900 a 520 M.a., Heilbron et al., 2017) preservando ainda remanescentes de unidades paleotectônicas arqueanas, paleoproterozóicas e mesoproterozóicas. Juntamente à extremidade meridional da Província Tocantins, constitui o arcabouço pré-cambriano do sudeste brasileiro desenvolvido sob a ótica do “Ciclo Brasileiro” de Almeida (1967).

Figura 02 – Províncias estruturais do Escudo Atlântico

Fonte: ALMEIDA *et. al.* (1977). Org.: Elaborado por ALMEIDA *et. al.* (1977): Adaptado por SMITH e SANDWELL (1997). Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/294860719>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

O “Ciclo Brasileiro” ou Orogênese Brasileira é o termo utilizado para designar o amplo período orogenético neoproterozóico-cambriano, essencialmente diacrônico de uma a outra região, que engloba o conjunto de colagens responsável pela estruturação do embasamento da Plataforma Sul-Americana (Brito-Neves *et al.*, 1999). A Orogênese Brasileira ocorre em processos estritamente acrescionários, como a edificação do arco-de-ilhas São Gabriel no Rio Grande do Sul, colisões continente-continente, a exemplo da estruturação principal do Orógeno Ribeira e sua Zona de Interferência com o Orógeno Brasília, e tem seu término com o colapso extensional de partes dos orógenos, a exemplo do Orógeno Araçuaí, de modo geral, o Sistema Orogênico Mantiqueira é constituído pelos orógenos Araçuaí, Ribeira, Dom Feliciano e São Gabriel, e pela zona de interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira (Heilbron *et al.*, 2017).

Por definição, Orógeno, no sentido geotectônico, significa um produto da interação convergente de placas litosféricas. Tal produto pode se materializar em arco-de-ilhas (i.e., arco magmático intra-oceânico do tipo Japão e Indonésia), ou na forma de arcos magmáticos de margem continental ativa (do tipo andino), ou

também como uma cadeia de montanhas intracontinental (exemplo atual: os Alpes e o Himalaia).

De acordo com as reconstruções paleogeográficas os crátons do São Francisco e Congo em dado momento estavam parcialmente unidos desde 2 Ga até ocorrer a abertura do Oceano Atlântico Sul. A união entre os dois crátons se dava através da ponte Bahia-Gabão, a qual limitou a abertura da bacia percussora do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. De modo que esta bacia teria se estruturado como uma bacia marinha interior (inland-sea basin) como um grande golfo articulado, a norte, com os aulacógenos Santo Onofre e Sangha. Este golfo teria se mantido ensialico a norte do paralelo 17° S. No entanto, uma abertura oceânica de extensões laterais menores ocorreu a sul do paralelo (oceano Adamastor). O golfo Araçuaí desembocaria num amplo oceano que, tem os seus registros geológicos impressos em rochas deformadas dentro do Orógeno Ribeira e outros ramos do sistema orogênico brasileiro-panafricano (CPRM, 2003). O fechamento desta bacia teria sido induzido por colisões à distância, contra os crátons do São Francisco e Congo, e seguiria um mecanismo similar a um quebra-nozes (Alkmim et al. 2006, 2007).

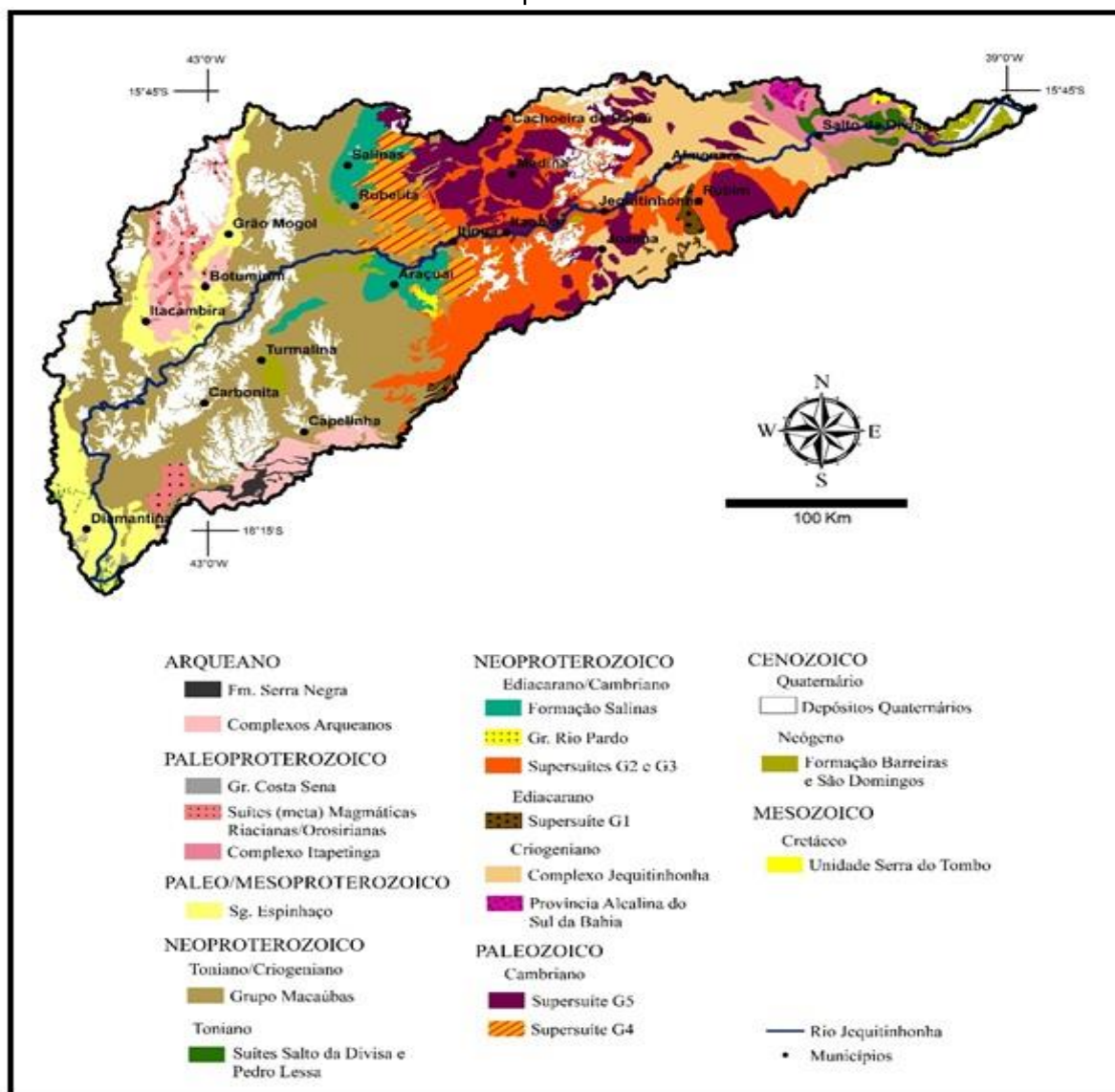
Geologia Local

A geologia da região de estudo é bastante diversificada, uma vez que a área abrange grandes extensões. Sendo este contexto dominado pelo Orógeno Araçuaí, e uma faixa na porção sudoeste da bacia e outra no Nordeste (já no sul da Bahia) com algumas unidades pertencentes ao Cráton São Francisco. As unidades litológicas presentes têm suas idades no passado geológico como desde o éon Arqueano até a era Cenozoica.

Como indicado na Figura 03, as litologias presente na Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha são caracterizadas, da base para o topo, da esquerda para direita, pelas seguintes unidades: Formação Serra Negra e Complexos Arqueanos de idade arqueana, Grupos Costa Sena, Suítes (Meta)Magmáticas Riaccianas/Orosirianas e Complexo Itapetinga do paleoproterozoico, Supergrupo Espinhaço do paleo/mesoproterozoico, Grupo Macaúbas, Suítes Salto da Divisa e Pedro Lessa, Formação Salinas, Grupo Rio Pardo, Supersuítes G2 e G3 do neoproterozoico, Complexo Jequitinhonha, Província Alcalina do Sul da Bahia e

Supersuíte G1 do Paleozoico, Supersuítes G4 e G5 do paleozoico, Depósitos Quaternários, Formação Barreiras e São Domingos de idades cenozoicas, e Unidade Serra do Tombo do mesozoico

Figura 03 – Mapa geológico simplificado da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha



Fonte: DALTON DE SOUZA *et. al.* (2003). Org.: Elaborado por DALTON DE SOUZA *et. al.* (2003); Adaptado por PINTO E SILVA (2014). Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/294860719>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

Metodologia e Base de Dados

A base de dados deste trabalho é resultado de medidas indiretas de temperatura em subsuperfície, dados dos gradientes térmicos (calculados e estimados), resultados de medidas experimentais de condutividade térmica das principais formações geológicas da região e valores de fluxo geotérmico

As temperaturas em subsuperfície são a base para realizar a avaliação de recursos geotermiais. Para tanto, comumente utilizam-se dois conjuntos de

informações sobre as temperaturas em profundidade: as medidas diretas de temperaturas em subsuperfície e estimativas indiretas de temperaturas em subsuperfície (Bullard, 1939; Swanberg e Morgan, 1978; Haenel e Mongelli, 1988; Hamza, et al, 2005).

O método de estimativa indireto ou apenas método indireto, geralmente é utilizado para obter-se informações sobre as temperaturas em profundidades que estão fora do alcance de perfurações. Destes, o método mais difundido e utilizado é a geotermometria que se baseia na concentração de solutos dissolvidos em fluidos subterrâneos (Fournier e Truesdell, 1973; Fournier e Potter, 1982; Alexandrino e Hamza, 2018).

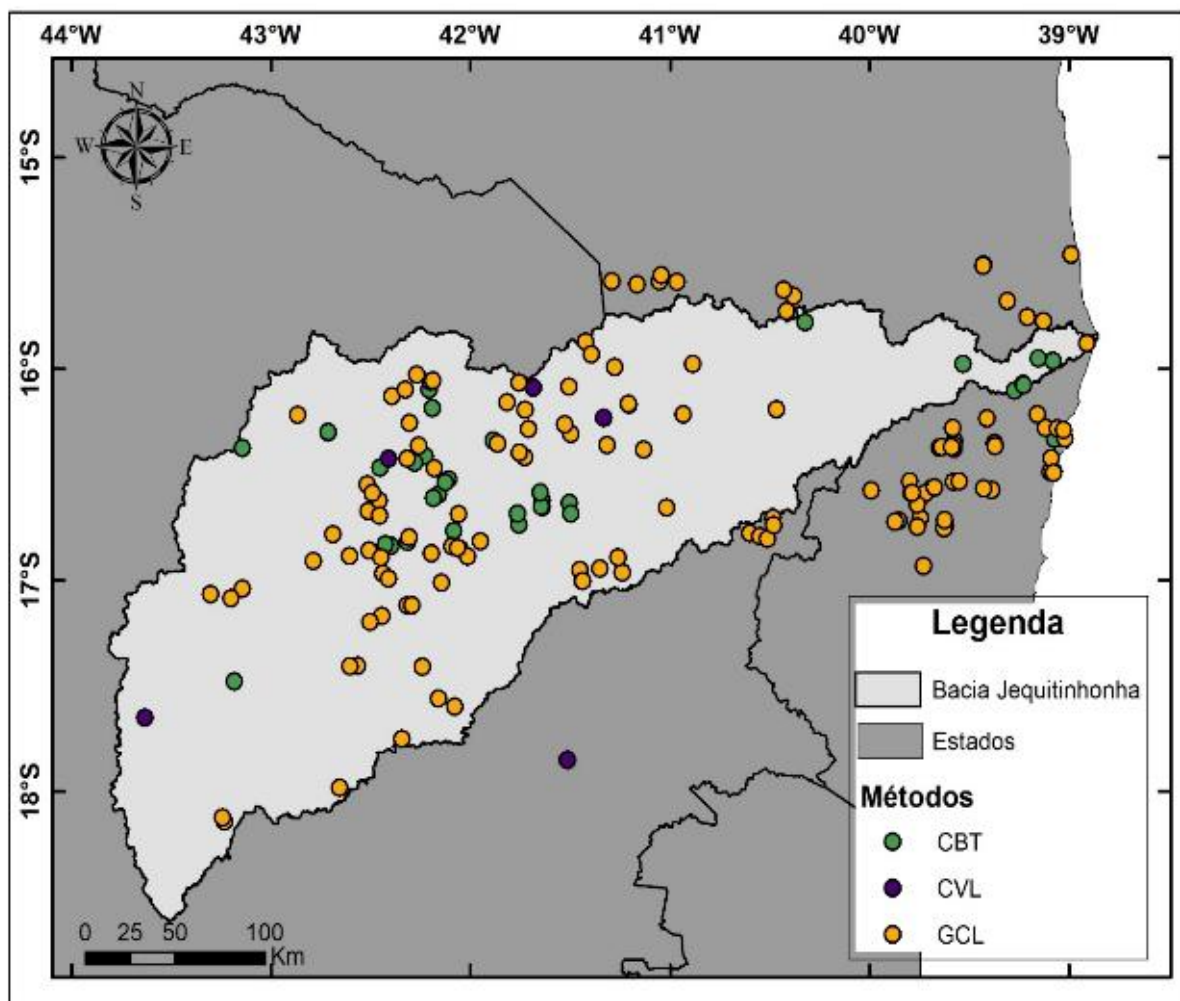
Base de Dados

A base de dados é um resultado da aplicação do método indireto em um total de 182 poços distribuídos pelos Estados de Minas Gerais e Bahia, conforme ilustrado na Figura 04. As concentrações dos solutos foram fornecidas pela plataforma SIAGAS.

Os valores encontrados de gradiente geotérmico na região estudada foram resultado da utilização de três métodos, são eles: convencional (CVL ou ITL), temperatura estável do fundo de poço (CBT), e o geoquímico (GCL). Cada método foi utilizado a partir da natureza dos dados experimentais (Hamza e Muñoz, 1996; Hamza et al, 2005).

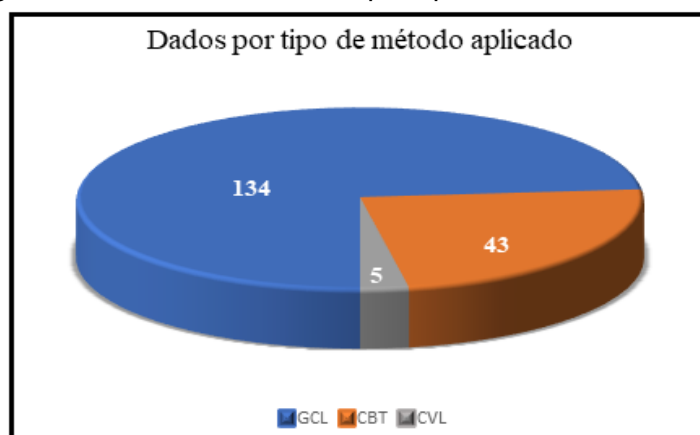
Dentre os 182 perfis, 5 utilizam o método CVL, 43 o método CBT e 134 o GCL (Figura 05).

Figura 04 – Distribuição espacial dos perfis classificados e o método utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 05 – Número de dados por tipo de método



empregado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados utilizados para construção desse banco de dados estão dispostos na Tabela 01, logo abaixo:

Tabela 01 – Tabela com as informações utilizadas para construção de banco de dados

Poço	Local	Lat.	Long.	Prof.(m)	Mét. Grad.	To (°C)	Grad (°C)	Cond. Térm. Wm/°C	Fluxo (mW/m ²)
P06	Cachoeira de pajeu (MG)	-15,9311	-41,3942	80	CBT	21,80	80,0	2,8	126,0
P07	Comercinho (MG)	-16,3975	-41,7558	102	CBT	21,90	102,0	2,8	90,6
P08	Itaobim (MG)	-16,6347	-41,5044	120	CBT	24,30	120,0	2,8	53,7
P09	Itaobim (MG)	-16,6847	-41,4975	95	CBT	24,30	95,0	2,8	82,5
P10	Jequitinhonha (MG)	-16,1658	-41,2083	100	CBT	23,50	100,0	2,8	109,2
P11	Itinga (MG)	-16,3386	-41,8856	80	CBT	24,30	80,0	2,8	31,5
P12	Itinga (MG)	-16,6236	-41,6403	152	CBT	24,30	152,0	2,8	48,8
P13	Itinga (MG)	-16,6531	-41,6400	105	CBT	24,30	105,0	2,8	55,0
P14	Itinga (MG)	-16,7367	-41,7581	88	CBT	24,30	88,0	2,8	59,4
P15	Itinga (MG)	-16,6864	-41,7653	85	CBT	24,30	85,0	2,8	80,9
P16	Itinga (MG)	-16,6511	-41,6453	124	CBT	24,30	124,0	2,8	119,8
P17	Cachoeira de pajeu (MG)	-16,0833	-41,5069	84	CBT	21,80	84,0	2,3	93,1
P18	Josenopolis (MG)	-16,5497	-42,5153	126	CBT	21,80	126,0	2,6	61,9
P19	Carbonita (MG)	-17,4803	-43,1828	100	CBT	21,80	100,0	2,8	36,4
P20	Coronel Murta (MG)	-16,5239	-42,1100	123	CBT	24,00	123,0	2,8	31,9
P21	Coronel Murta (MG)	-16,5950	-42,1611	100	CBT	24,00	100,0	2,8	86,8
P22	Coronel Murta (MG)	-16,5369	-42,1269	72	CBT	24,00	72,0	2,8	116,7
P23	Coronel Murta (MG)	-16,6119	-42,1867	70	CBT	24,00	70,0	2,8	132,0
P24	Grão Mogol (MG)	-16,3003	-42,7142	120	CBT	21,00	120,0	2,8	84,0
P25	Grão Mogol (MG)	-16,3758	-43,1431	102	CBT	21,00	102,0	2,8	118,0
P26	Grão Mogol (MG)	-16,2989	-42,7147	108	CBT	21,00	108,0	2,8	129,6
P27	Itinga (MG)	-16,5847	-41,6497	66	CBT	24,30	66,0	2,8	114,5
P28	Ruberita (MG)	-16,4681	-42,4531	112	CBT	23,00	112,0	2,8	55,0
P29	Ruberita (MG)	-16,4144	-42,2264	123	CBT	23,00	123,0	2,8	86,5
P30	Ruberita (MG)	-16,4444	-42,2797	100	CBT	23,00	100,0	2,8	114,8
P31	Salinas (MG)	-16,0981	-42,2092	100	CBT	23,00	100,0	2,8	50,4
P32	Salinas (MG)	-16,1878	-42,1922	70	CBT	23,00	70,0	2,8	92,0
P33	Salinas (MG)	-16,0611	-42,2014	149	CBT	23,00	149,0	2,8	47,0
P34	Virgem da Lapa (MG)	-16,8369	-42,3992	70	CBT	23,10	70,0	2,8	68,0
P35	Virgem da Lapa (MG)	-16,8181	-42,3164	72	CBT	23,10	72,0	2,8	120,6
P36	Araçuai (MG)	-16,7669	-42,0853	80	CBT	24,40	80,0	2,3	28,5
P37	Araçuai (MG)	-16,8519	-42,0525	92	CBT	24,40	92,0	2,3	47,1

P38	Berilo (MG)	-16,8311	-42,4289	115	CBT	23,20	115,0	2,3	43,6
P39	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,3311	-39,0733	120	CBT	24,10	49,0	2,8	137,7
P40	Canavieiras (BA)	-15,4597	-38,9917	84	CBT	24,10	23,0	2,3	52,0
P41	Canavieiras (BA)	-15,6781	-39,3092	124	CBT	24,10	48,0	2,6	123,7
P42	Maiquinique (BA)	-15,7794	-40,3244	103	CBT	23,70	40,0	2,3	92,0
P43	Belmonte (BA)	-15,9636	-39,0803	115	CBT	24,20	19,0	2,3	43,6
P44	Belmonte (BA)	-16,1039	-39,2747	86	CBT	24,20	21,0	2,3	47,7
P45	Belmonte (BA)	-15,9500	-39,1556	126	CBT	24,20	24,0	2,3	54,3
P46	Belmonte (BA)	-16,0717	-39,2311	84	CBT	24,20	29,0	2,3	65,1
P47	Belmonte (BA)	-16,0775	-39,2292	83	CBT	24,20	29,0	2,3	65,9
P48	Itapebi (BA)	-15,9767	-39,5328	162	CBT	23,40	10,0	2,3	23,9
P95	Diamantina (MG)	-17,6503	-43,6333	-	CVL	23,20	12,0	4,6	55,7
P96	Medina (MG)	-16,2331	-41,3333	-	CVL	23,40	19,1	2,7	51,0
P99	C. do Pajeu (MG)	-16,0883	-41,6853	-	CVL	24,20	11,6	4,4	51,4
P101	Teofilo Otoni (MG)	-17,8506	-41,5136	-	CVL	23,20	19,2	2,9	56,5
P102	Teofilo Otoni (MG)	-16,4243	-42,4129	-	CVL	23,20	10,7	2,9	30,7
120	Belmonte (BA)	-15,8800	-38,9108	97	GCL	24,20	19,9	2,6	51,7
121	Canavieiras (BA)	-15,4597	-38,9917	84	GCL	24,10	14,8	2,3	34,1
122	Canavieiras (BA)	-15,6781	-39,3092	124	GCL	24,10	16,9	2,6	44,1
123	Canavieiras (BA)	-15,7747	-39,1297	150	GCL	24,10	12,7	2,6	32,4
124	Canavieiras (BA)	-15,7547	-39,2103	54	GCL	24,10	34,8	2,6	90,4
127	Encruzilhada (BA)	-15,5850	-41,2928	108	GCL	22,20	20,9	2,7	56,5
128	Encruzilhada (BA)	-15,5994	-41,1667	100	GCL	22,20	29,7	2,8	83,2
129	Encruzilhada (BA)	-15,5856	-41,0531	90	GCL	22,20	22,6	2,6	58,7
130	Encruzilhada (BA)	-15,5872	-40,9661	120	GCL	22,20	28,1	2,6	73,1
131	Encruzilhada (BA)	-15,5561	-41,0439	108	GCL	22,20	32,4	2,6	84,2
132	Eunapolis (BA)	-16,3414	-39,5758	45,6	GCL	23,80	15,9	2,3	36,5
133	Eunapolis (BA)	-16,3783	-39,5775	48,6	GCL	23,80	15,9	2,3	36,5
134	Eunapolis (BA)	-16,3728	-39,6506	80	GCL	23,80	11,0	2,6	28,7
135	Eunapolis (BA)	-16,3606	-39,5767	60	GCL	23,80	24,6	2,6	64,0
136	Eunapolis (BA)	-16,3703	-39,6403	120	GCL	23,80	36,1	2,6	93,7
137	Eunapolis (BA)	-16,3697	-39,5897	73	GCL	23,80	27,5	2,5	68,7
138	Eunapolis (BA)	-16,2797	-39,5842	56	GCL	23,80	22,1	3,5	77,3
139	Guaratinga (BA)	-16,5314	-39,7981	90	GCL	24,50	29,2	2,7	78,1
140	Guaratinga (BA)	-16,5667	-39,6892	90	GCL	24,50	28,4	2,6	75,1
141	Guaratinga (BA)	-16,5892	-39,7239	-	GCL	24,50	19,9	2,3	45,8
142	Guaratinga (BA)	-16,5878	-39,7922	-	GCL	24,50	27,2	2,3	62,5
143	Guaratinga (BA)	-16,7072	-39,7464	-	GCL	24,50	28,8	2,3	66,1
144	Guaratinga (BA)	-16,7186	-39,8544	-	GCL	24,50	29,1	2,3	67,0
145	Guaratinga (BA)	-16,5761	-39,9917	-	GCL	24,50	30,2	2,3	69,5
146	Guaratinga (BA)	-16,7242	-39,8733	-	GCL	24,50	30,6	2,3	70,5
147	Guaratinga (BA)	-16,6425	-39,7600	-	GCL	24,50	30,6	2,3	70,5

148	Guaratinga (BA)	-16,5872	-39,7897	-	GCL	24,50	31,2	2,3	71,8
149	Guaratinga (BA)	-16,5864	-39,7861	-	GCL	24,50	32,8	2,3	75,4
162	Itabela (BA)	-16,7436	-39,6200	84	GCL	24,20	29,2	2,3	67,2
163	Itabela (BA)	-16,5603	-39,6756	84	GCL	24,20	31,4	2,3	72,1
164	Itabela (BA)	-16,7556	-39,6269	84	GCL	24,20	36,8	2,3	84,6
165	Itabela (BA)	-16,7156	-39,6244	84	GCL	24,20	25,8	2,6	67,2
167	Itabela (BA)	-16,5342	-39,5786	60	GCL	24,20	32,0	2,6	83,3
168	Itabela (BA)	-16,5317	-39,5503	84	GCL	24,20	22,4	2,5	56,1
169	Itamaraju (BA)	-16,9344	-39,7300	102	GCL	24,60	31,3	2,5	78,1
176	Itamaraju (BA)	-16,7483	-39,7619	102	GCL	24,60	31,3	2,5	78,2
193	Macarani (BA)	-15,6544	-40,3806	120	GCL	23,70	32,8	2,5	80,8
194	Macarani (BA)	-15,7253	-40,4161	80	GCL	23,70	17,1	2,9	49,9
195	Macarani (BA)	-15,6250	-40,4319	80	GCL	23,70	25,8	3,1	79,0
196	Mascote (BA)	-15,5061	-39,4297	70	GCL	23,90	17,4	2,5	43,1
197	Mascote (BA)	-15,5128	-39,4308	61	GCL	23,90	21,0	2,6	54,1
225	Porto seguro (BA)	-16,4828	-39,0850	208	GCL	24,40	20,6	2,2	45,4
226	Porto seguro (BA)	-16,4875	-39,0772	141	GCL	24,40	21,3	2,2	46,8
227	Porto seguro (BA)	-16,4875	-39,0961	104	GCL	24,40	12,9	2,2	28,5
228	Porto seguro (BA)	-16,4217	-39,0914	202	GCL	24,40	11,9	2,5	29,7
231	Porto seguro (BA)	-16,4922	-39,0783	199	GCL	24,40	27,6	2,6	71,7
234	Porto seguro (BA)	-16,5731	-39,3894	101	GCL	24,40	19,3	2,3	44,4
236	Porto seguro (BA)	-16,5650	-39,4306	130	GCL	24,40	25,1	2,5	62,8
243	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,2917	-39,0281	70	GCL	24,10	26,4	2,2	58,1
244	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,2144	-39,1608	99	GCL	24,10	13,1	2,2	28,9
245	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,2786	-39,1194	126	GCL	24,10	35,1	2,2	77,2
246	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,2828	-39,0608	126	GCL	24,10	37,2	2,2	81,8
247	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,3292	-39,0211	98	GCL	24,10	15,9	2,3	36,5
248	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,2889	-39,0289	163	GCL	24,10	25,5	2,9	74,0
249	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,3508	-39,3756	100	GCL	24,10	28,9	2,8	80,9
250	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,3664	-39,3725	180	GCL	24,10	30,9	2,6	80,3
251	Santa Cruz Cabralia (BA)	-16,2353	-39,4131	70	GCL	24,10	29,8	2,6	77,3
262	Almenara (MG)	-15,9778	-40,8878	153	GCL	25,10	11,2	2,8	30,8
263	Almenara (MG)	-16,2164	-40,9344	120	GCL	25,10	11,0	2,8	30,8
264	Araçuaí (MG)	-16,8411	-42,0944	153	GCL	24,40	8,8	3,5	30,8
265	Araçuaí (MG)	-16,6881	-42,0614	54	GCL	24,40	15,8	2,5	39,6
266	Araçuaí (MG)	-16,8881	-42,0144	60	GCL	24,40	16,2	2,7	44,3
267	Araçuaí (MG)	-17,0128	-42,1453	56	GCL	24,40	16,7	2,7	45,5

268	Araçuaí (MG)	-16,8158	-41,9503	80	GCL	24,40	17,8	2,7	48,6
269	Araçuaí (MG)	-16,8464	-42,0661	80	GCL	24,40	15,0	3,5	52,4
270	Berilo (MG)	-16,8600	-42,5094	100	GCL	23,20	10,0	2,8	27,6
271	Berilo (MG)	-16,9686	-42,4389	48	GCL	23,20	12,9	2,5	32,2
272	Berilo (MG)	-16,9928	-42,4103	80	GCL	23,20	14,6	2,7	39,8
273	Berilo (MG)	-16,8925	-42,4494	78	GCL	23,20	17,9	2,5	44,8
274	Botumirim (MG)	-16,9106	-42,7883	150	GCL	20,60	8,8	3,5	30,8
275	Botumirim (MG)	-17,0417	-43,1444	50,65	GCL	20,60	29,6	2,6	76,9
276	Cachoeira de Pajeú (MG)	-15,8717	-41,4231	104	GCL	21,80	11,2	2,8	30,8
277	Cachoeira de Pajeú (MG)	-15,9311	-41,3942	80	GCL	21,80	13,2	2,8	37,0
278	Cachoeira de Pajeú (MG)	-16,0833	-41,5069	84	GCL	21,80	19,9	2,3	45,8
279	Capelinha (MG)	-17,7519	-42,3450	120	GCL	20,50	11,4	2,7	30,8
281	Chapada do Norte (MG)	-17,1703	-42,4444	89	GCL	23,00	9,4	3,6	33,4
282	Comercinho (MG)	-16,1578	-41,8164	-	GCL	21,90	16,0	2,3	36,8
283	Comercinho (MG)	-16,3531	-41,8653	64	GCL	21,90	20,4	2,3	46,8
284	Comercinho (MG)	-16,4186	-41,7283	82	GCL	21,90	23,8	2,3	54,7
285	Comercinho (MG)	-16,2847	-41,7092	50	GCL	21,90	22,1	2,5	55,3
286	Comercinho (MG)	-16,1928	-41,7264	90	GCL	21,90	24,8	2,3	57,1
287	Comercinho (MG)	-16,3975	-41,7558	102	GCL	21,90	23,5	2,8	65,9
288	Cristalia (MG)	-16,7831	-42,6911	60	GCL	21,60	12,2	2,5	30,4
289	Felício dos santos (MG)	-18,1428	-43,2350	60	GCL	21,30	14,8	3,5	51,8
290	Felício dos santos (MG)	-18,1225	-43,2444	112	GCL	21,30	16,6	3,5	58,1
291	Felisburgo (MG)	-16,7772	-40,6008	120	GCL	22,60	11,8	2,6	30,8
292	Fruta de leite (MG)	-16,1286	-42,3942	100	GCL	20,40	15,6	3,5	54,7
293	Grão Mogol (MG)	-16,6744	-42,5139	114	GCL	21,00	11,9	3,5	41,7
294	Grão Mogol (MG)	-16,2167	-42,8667	69,6	GCL	21,00	29,3	2,3	67,3
295	Itacambira (MG)	-17,0861	-43,2000	54	GCL	21,90	9,7	2,6	25,3
296	Itacambira (MG)	-17,0675	-43,3019	90	GCL	21,90	17,0	2,6	44,2
297	Itamarandiba (MG)	-17,9817	-42,6564	180	GCL	20,90	11,0	2,8	30,8
298	Jacinto (MG)	-16,1914	-40,4667	239	GCL	24,80	11,0	2,8	30,8
299	Jenipapo de Minas (MG)	-17,1200	-42,3186	90	GCL	23,50	10,8	2,7	29,1
300	Jenipapo de Minas (MG)	-17,1183	-42,2944	90	GCL	23,50	11,6	3,6	41,1
301	Jequitinhonha (MG)	-16,3825	-41,1325	100	GCL	23,50	13,0	2,5	32,0
302	Jequitinhonha (MG)	-16,1692	-41,2064	102	GCL	23,50	14,8	2,8	41,4
303	Jequitinhonha (MG)	-16,1658	-41,2083	100	GCL	23,50	15,5	2,8	43,3

304	Jequitinhonha (MG)	-16,3603	-41,3167	84	GCL	23,50	20,6	2,8	56,5
305	Joaima (MG)	-16,6569	-41,0186	47	GCL	24,50	22,5	2,5	56,4
306	Jose Gonçalves de Minas (MG)	-16,8856	-42,6061	120	GCL	22,40	14,2	2,5	35,4
307	Josenopolis (MG)	-16,6228	-42,4592	132	GCL	21,80	8,9	3,5	31,2
308	Josenopolis (MG)	-16,5478	-42,5181	81	GCL	21,80	8,4	4,0	33,7
309	Josenopolis (MG)	-16,5872	-42,4925	72	GCL	21,80	11,5	3,5	40,4
310	Medina (MG)	-16,3078	-41,4978	153	GCL	22,40	11,2	2,8	30,8
311	Medina (MG)	-16,2625	-41,5286	90	GCL	22,40	19,6	2,6	50,9
313	Minas novas (MG)	-17,4103	-42,2406	112,9	GCL	22,80	9,4	3,4	32,0
314	Minas novas (MG)	-17,4044	-42,5658	112,9	GCL	22,80	11,5	3,3	37,4
315	Minas novas (MG)	-17,1992	-42,5050	100,8	GCL	22,80	13,4	3,2	43,4
316	Monte formoso (MG)	-16,9650	-41,2394	90	GCL	21,90	16,1	2,8	44,2
317	Monte formoso (MG)	-16,8939	-41,2611	102	GCL	21,90	16,4	2,7	44,8
318	Novo cruzeiro (MG)	-17,5978	-42,0792	95,3	GCL	21,10	11,6	3,6	41,9
319	Novorizonte (MG)	-16,0983	-42,3267	59	GCL	20,20	16,6	2,5	41,4
320	Pedra azul (MG)	-15,9903	-41,2789	120	GCL	22,60	16,8	2,3	38,6
321	Ponto dos Volantes (MG)	-16,9533	-41,4531	153	GCL	23,60	10,3	3,0	30,8
322	Ponto dos Volantes (MG)	-17,0047	-41,4408	154	GCL	23,60	11,2	2,8	30,8
323	Ponto dos Volantes (MG)	-16,9450	-41,3525	153	GCL	23,60	11,2	2,8	30,8
324	Ponto dos Volantes (MG)	-17,0047	-41,4389	150	GCL	23,60	11,8	2,6	30,8
325	Rio do Prado (MG)	-16,7075	-40,4844	154	GCL	24,00	11,0	2,8	30,8
326	Rio do Prado (MG)	-16,7925	-40,5514	154	GCL	24,00	11,8	2,6	30,8
327	Rio do Prado (MG)	-16,8050	-40,5133	154	GCL	24,00	11,8	2,6	30,8
328	Rio do Prado (MG)	-16,7411	-40,4819	120	GCL	24,00	11,8	2,6	30,8
329	Rubelita (MG)	-16,4706	-42,1831	60	GCL	23,00	14,1	2,3	32,3
330	Rubelita (MG)	-16,3636	-42,2603	86	GCL	23,00	14,2	2,5	35,6
331	Rubelita (MG)	-16,4256	-42,3192	51	GCL	23,00	10,2	3,5	35,6
332	Salinas (MG)	-16,0264	-42,2708	100	GCL	23,00	13,3	2,5	33,1
333	Salinas (MG)	-16,2567	-42,3058	60	GCL	23,00	14,4	2,5	36,1
334	Salinas (MG)	-16,0561	-42,1889	67	GCL	23,00	17,1	2,3	39,4
335	Santa Cruz de Salinas (MG)	-16,0644	-41,7583	44	GCL	21,50	12,8	2,3	29,5
336	Setubinha (MG)	-17,5614	-42,1603	90	GCL	21,60	8,9	4,0	35,6
337	Turmalina (MG)	-17,4081	-42,6044	200	GCL	21,90	16,6	3,5	58,1
338	Virgem da lapa (MG)	-16,6944	-42,4569	100	GCL	23,10	10,4	2,5	26,0
339	Virgem da lapa	-16,7969	-42,3083	55	GCL	23,10	16,9	2,5	42,2

	(MG)								
340	Virgem da lapa (MG)	-16,8728	-42,1956	115	GCL	23,10	21,8	2,3	50,1

Gradiente Geotérmico

A taxa de variação da temperatura por unidade de profundidade no sentido ao centro da Terra (medido da superfície terrestre) é conhecida como gradiente geotérmico. Este, varia de acordo com a localidade, dependendo do fluxo regional de calor, da condutividade térmica das rochas, entre outros fatores geológicos. Os Gradientes térmicos deste estudo foram determinados com base nos métodos: convencional (CVL), temperaturas do fundo do poço (CBT) e geoquímico (GCL).

Os dados de temperatura média anual do solo/superfície utilizados foram obtidos do Atlas climatológico do Brasil e os que constam no sítio web do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Método Convencional (CVL) ou Incremental Temperature Logger (ITL)

Este é o método mais tradicional aplicado na determinação de gradiente geotérmico (Γ). É utilizado para os casos em que as camadas geológicas são lateralmente homogêneas, possuem propriedades térmicas constantes e possuem espessuras grandes em relação aos intervalos de medidas. Para a implementação deste método são usualmente necessárias três partes distintas. Na primeira parte, efetua-se a escolha do intervalo de profundidade apropriado para a determinação do gradiente térmico, levando-se em consideração o número de dados de temperatura e informações de perfil litológico do poço estudado. O intervalo de profundidade apontado para a determinação do gradiente tem de estar livre de qualquer evento que possa causar alguma perturbação, que pode afetar o regime geotérmico local. O valor do gradiente é então obtido pelo método de ajuste linear aos dados de profundidade (z_i) e temperatura (T_i), obtidas nas perfilagens térmicas. Para um conjunto de N pares de dados, os coeficientes, ou seja, o gradiente térmico (Γ) e o intercepto (T_0), são dados por:

$$\Gamma_{CVL} = \frac{N \sum z_i T_i - \sum z_i \sum T_i}{N \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde N é o número de medições, z_i e T_i a profundidade e temperatura, respectivamente.

O método convencional possui suas limitações em seu uso, isso ocorre devido às variações verticais e laterais do campo geotermal, no entanto, é o mais confiável dentre os demais métodos conhecidos (Hamza e Muñoz, 1996). No presente trabalho o método convencional (CVL) foi utilizado na determinação de gradientes geotérmicos em 5 localidades.

Método de Temperatura Estável de Fundo de Poço ou Conventional Bottom Hole (CBT)

O método CBT é bem próximo ao método conhecido como bottom-hole temperature (BHT), extremamente utilizado para determinação de gradientes térmicos em campos de petróleo (Carvalho e Vacquiers, 1977). O princípio deste método CBT baseia-se na suposição de que as perturbações térmicas decorrente dos movimentos de fluidos induzidos pelo poço trabalhado tornam-se quase nulas na parte inferior do poço (Ribeiro e Hamza, 1987). Consequentemente, as medidas de temperaturas estáveis no fundo do poço podem ser utilizadas na determinação do gradiente geotérmico, utilizando como referência a temperatura média anual em superfície. Para estes casos, a relação entre a temperatura do fundo do poço (TCBT) e a temperatura da superfície (T₀) é dada por:

$$T_{CBT} - T_0 = \sum_{i=1}^N (dT/dz)_i h_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que (dT/dz)_i é o gradiente térmico da camada i, a espessura da cama é dada por h_i e o N é o número de camadas. O termo da somatória refere-se à resistência térmica cumulativa das formações presentes até o fundo do poço em que se efetuou a medida da temperatura.

No presente trabalho o método CBT foi utilizado em um total de 43 localidades para determinação do gradiente térmico.

Método de Estimativas Geoquímicas (GCL)

O método de estimativa geoquímica (GCL) é um método indireto para determinar a temperatura dos reservatórios geotermiais, em locais de ocorrência das águas termais. A temperatura é estimada com base nas concentrações dos elementos químicos, dissolvidos na água, que são coletados de fontes termais ou minerais.

De acordo com Truesdell (1975), os termômetros geoquímicos, obedecem de modo geral à seguinte equação:

$$T_r(C) = \left[\frac{A}{B - \ln(C)} \right] - 273.15 \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que T_r é a temperatura do reservatório, C remete a concentração de sílica (SiO_2), sódio e potássio (Na, K) ou sódio, potássio e cálcio (Na, K e Ca, respectivamente). A e B são constantes determinadas através de ajustes matemáticos.

No Brasil, este método foi utilizado primeiramente por Huter (1987), a fim de estimar o gradiente geotérmico dos locais de fontes termais no país. No presente estudo, o método GCL foi utilizado para determinação do gradiente térmico em 134 localidades, porém utilizamos a metodologia proposta por Alexandrino e Hamza (2018) para estimar as temperaturas pelo método GCL.

Condutividade Térmica

As propriedades térmicas dos variados tipos de formações geológicas em subsuperfície são informações importantes para a avaliação do fluxo geotérmico de determinada região. Vez que, a principal propriedade física de interesse para avaliação de temperaturas e recursos geotermiais é a condutividade térmica. Além disso, deve-se compreender o comportamento da difusividade térmica e calor específico.

Para tanto, existem três etapas distintas no processo de determinação experimental: 1 – Coleta de testemunhos de sondagem (ou na ausência destas amostras de afloramentos representativas das formações geológicas);

2 – Preparação das amostras para medições experimentais. Incluindo o polimento de superfície, para amostras sólidas. Para de sedimentos não consolidados e amostras de calha utiliza-se recipiente para condicionamento das amostras;

3 – Escolha do método experimental apropriado, que depende do estado físico das amostras.

Como não foi possível obter amostras por testemunhos de sondagem dos poços analisados no presente trabalho, optou-se pela utilização de dados de

amostras de afloramentos, representativas das formações geológicas locais em trabalhos anteriores, isso inclui dados obtidos por Vitorello et al. (1980), Araújo (1978), e Del Rey (1989). Hamza et al. (1987), e, Gomes e Hamza (2005).

Fluxo Geotérmico

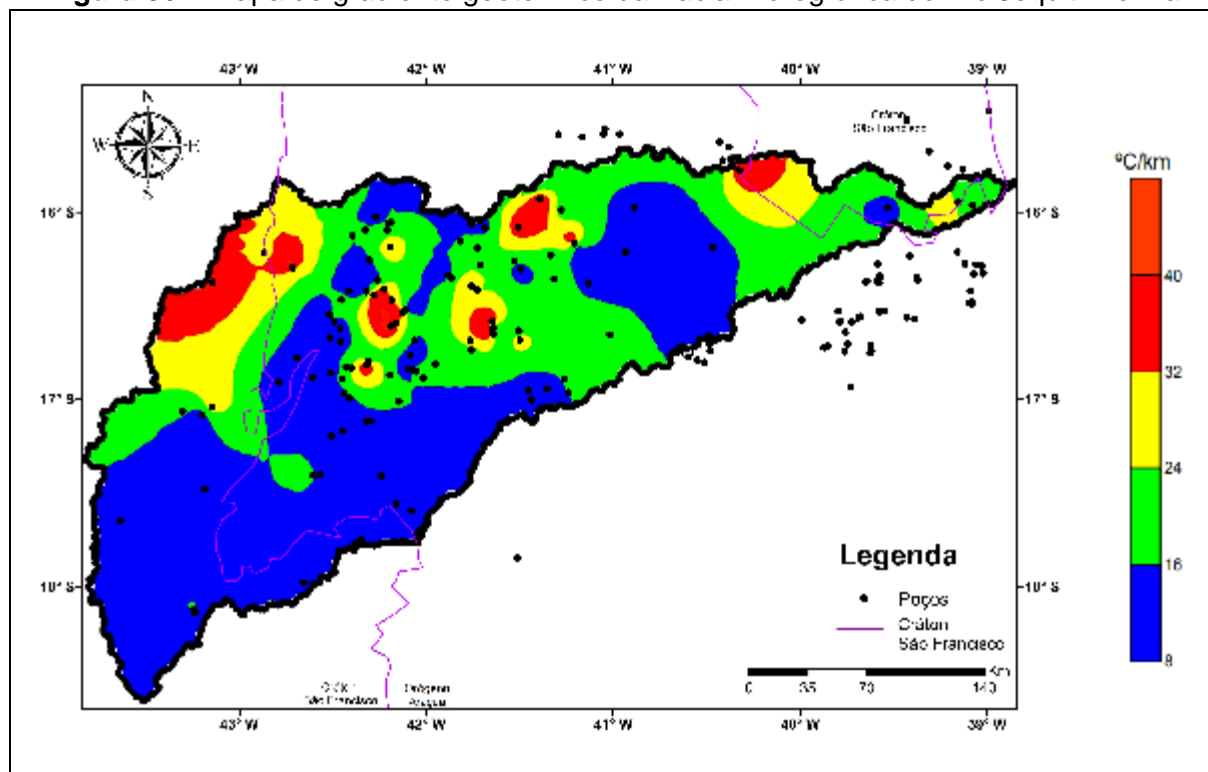
Para determinar o fluxo geotérmico existe uma equação básica utilizada, denominada de equação de Fourier:

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que λ é a condutividade térmica e (dT/dz) representa a variação de temperatura (T) em função da profundidade (z), portanto, o gradiente térmico. Entende-se que na aplicação desta equação o regime térmico está no estado estacionário. Entretanto, há indícios de que ocorreram variações no campo térmico da Terra durante o tempo geológico. De modo que, é provável que o campo térmico terrestre se encontre em estado transiente. Apesar disso, entende-se que o tempo em escala geológica se dá em uma proporção muito desigual ao período de observações humanas. Justificando então a utilização da eq. 4 para profundidades relativamente rasas na crosta da Terra

Resultados e Discussões

Na Figura 06 é apresentado o mapeamento regional do gradiente geotérmico. O conjunto de valores calculados com base nos métodos CVL, CBT e GCL permitiram avaliar a variação regional dos gradientes geotérmicos na região da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, os valores estão entre 8 até 40°C/Km. Valores de gradiente superiores a 32°C/km foram encontrados principalmente na porção centro noroeste da bacia, além de uma pequena faixa no extremo nordeste. O mapa em sua maior parte é dominado por temperaturas abaixo de 24°C/km, como verifica-se em toda porção sul, sudoeste e sudeste do mapa.

Figura 06 – Mapa de gradiente geotérmico da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha

Fonte: Elaborado pelo autor.

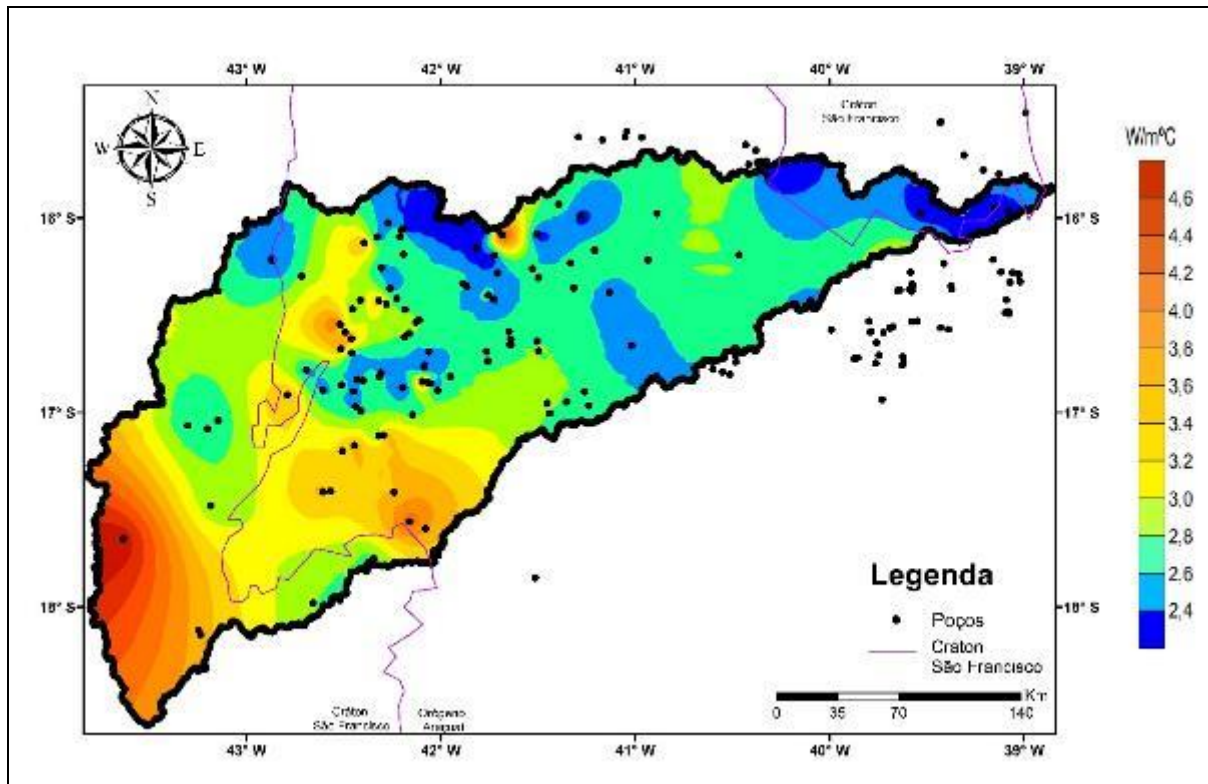
Como é possível verificar na Figura 03. Nota-se que as rochas mais antigas, pertencem a uma pequena faixa no extremo sudoeste de Minas, região em que se encontra o Cráton São Francisco. Ressalta-se aqui que, estudos anteriores (Vieira e Hamza, 2014) demonstram que regiões cratônicas tendem a possuir valores de gradientes geotérmicos menores que bacias sedimentares, portanto esse baixo valor de gradiente verificado no sudoeste possui interferência da área.

Em relação à distribuição da condutividade térmica na bacia de estudo (Figura 07), a variação dela na região vai de 2,4 a 4,6 W/m °C. Destaca-se no mapa a grande divisão entre a porção oeste e a leste, em que a porção oeste contém as rochas mais antigas, datadas do pré-cambriano, do arqueano até o neoproterozóico. A porção leste contém as rochas mais novas.

Verifica-se que, há um decréscimo gradual nos valores de condutividade, sendo que, nas proximidades da divisa sul entre o Cráton São Francisco e o Orógeno Araçuaí há uma linha bem delineada de valores de condutividade mais elevados, da ordem de 4,6 W/m°C, que decresce progressivamente. Esses valores relativamente mais elevados estão relacionados aos corpos rochosos graníticos e granodioríticos. Alexandrino (2008) apresentou em seu estudo valores de condutividade da ordem de 3,5 W/m°C até valores superiores a 4,0 W/m°C para esta

mesma região do norte-nordeste mineiro, não havendo correlatos para a parte do sul baiano.

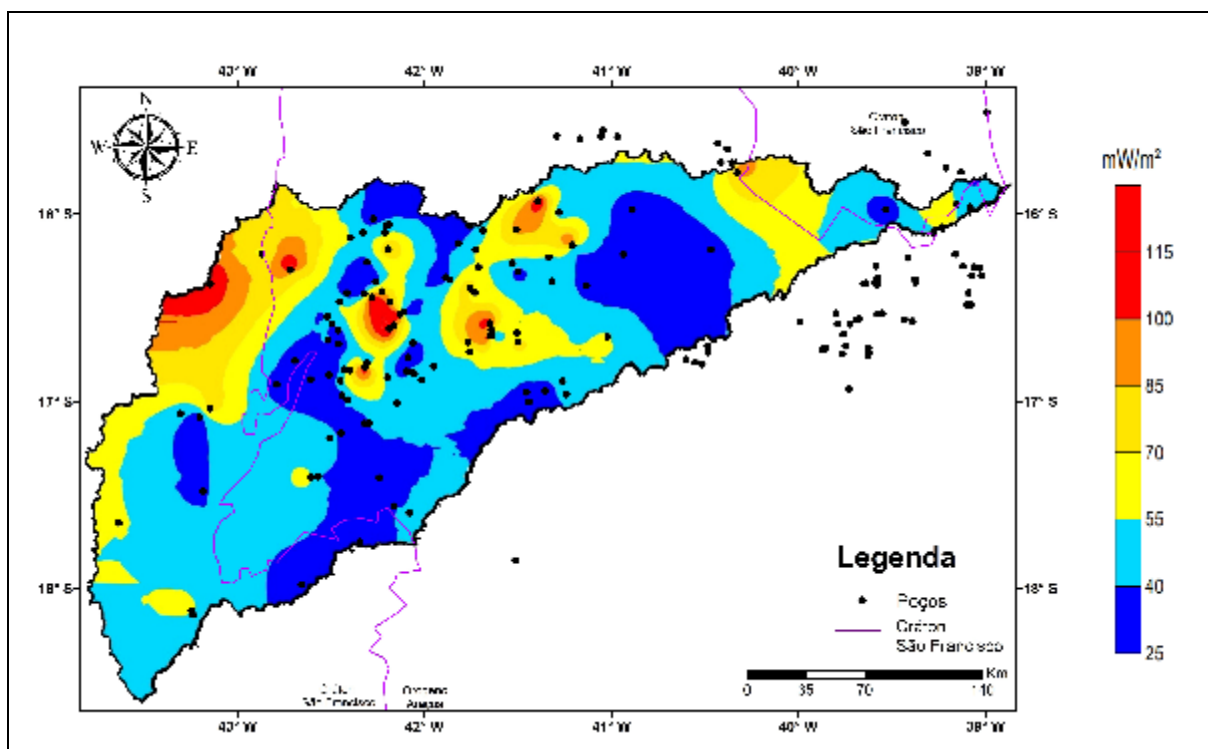
Figura 07 – Distribuição da Condutividade Térmica na Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 06 apresenta o mapa de distribuição regional de fluxo geotérmico na Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, verifica-se semelhança entre o comportamento das anomalias deste mapa com o de gradiente geotérmico. Sendo que, os locais de fluxo geotérmico mais elevados concentram-se principalmente na região noroeste do mapa, na região sob influência do Cráton São Francisco, com valores variando entre 70 e 115 mW/m². Considerando que a média global está entre 58 a 63 mW/m², de acordo com Vieira e Hamza (2018), pode-se dizer que estes valores estão bem elevados.

Na porção central e centro-norte, existem dois pontos de concentração de fluxos anômalos elevados também. Além destes, há uma região na porção nordeste do mapa, já no sul da Bahia, em que há valores relativamente mais elevados do que a maior parte da bacia, entretanto seus valores estão entre 55 a 70 mW/m².

Figura 08 – Mapa de Fluxo de Calor da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em trabalhos anteriores, Vitorello, Hamza e Pollack (1980) estimaram o fluxo de 42 mW/m^2 para o Cráton São Francisco, e em trabalhos mais recentes, Hamza e Muñoz (1996) estimaram valores próximos de 30 mW/m^2 . Alexandrino e Hamza (2008), também estimaram os valores para o Cráton São Francisco, apresentando a faixa de valores entre $28\text{-}53 \text{ mW/m}^2$. No presente trabalho, verifica-se uma grande variação, que vai desde 25 até 115 mW/m^2 .

De acordo com o mapa de fluxo geotérmico proposto por Hamza (2020), os valores mais elevados de fluxo deveriam estar na região do nordeste mineiro e sul da Bahia, entretanto, o que os resultados desse estudo nos mostram sobre o fluxo aproxima-se mais ao trabalho de Alexandrino (2008). Neste trabalho, o fluxo de calor no Estado de Minas Gerais aumenta consideravelmente na porção norte do Estado, chegando até 80 mW/m^2 . A região de estudo possui proximidade geográfica com esta região de fluxos de calor elevados. A porção noroeste da área de estudo do presente trabalho apresenta os valores de fluxo mais elevados, chegando até a 115 mW/m^2 , indo ao encontro do trabalho anterior supracitado, visto que, quanto mais para o norte do Estado, mais próximas as anomalias de fluxo elevadas citadas.

Conclusão

O presente trabalho permitiu avanços importantes na avaliação em escala regional dos recursos geotermiais no Estado de Minas Gerais e Bahia, região de importante contexto geológico, em que há a presença de regiões sob a influência do Cráton São Francisco e também do Orógeno Araçuaí.

Utilizando-se de métodos indiretos (CVL, CBT e GCL), foi possível gerar uma base de dados do regime termal da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha. Os valores de gradiente geotérmico na região estão variando entre 8-40°C/km, com os valores mais elevados concentrados na porção noroeste e centro norte da região da bacia.

Os valores determinados para condutividade térmica são relativamente mais elevados a região norte, nordeste de Minas em concordância ao demonstrado por Alexandrino (2008). A redução dos valores em direção às margens da plataforma continental pode ser atribuída à elevada espessura de rochas sedimentares da margem passiva que, por definição, apresentam condutividade térmica inferior aquelas determinadas para rochas graníticas e granodioríticas que compõe o embasamento da plataforma continental no escudo atlântico.

Os dados de fluxo geotérmico demonstraram que em alguns pontos, principalmente nas regiões centro-norte e noroeste da Bacia, os valores de fluxo superam ao da média global, sendo estes locais, pontos de interesse de estudo. Os valores anômalos elevados variam entre 70-115 mW/m². A análise do fluxo geotérmico confirma o comportamento das anomalias segundo Alexandrino (2008), que aponta que os maiores valores de fluxo geotérmico em Minas gerais estão concentrados no norte do Estado.

De modo geral, os estudos realizados neste trabalho permitiram a avaliação quantitativa dos Recursos Geotermiais da Bacia Hidrográfica do Jequitinhonha. Tais estimativas devem servir como referência para trabalhos futuros, visando a exploração e a utilização da energia geotérmica na região.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRINO, C. H., HAMZA, V.M. **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, April 2008, pp. 289-306. 2008.

ALEXANDRINO, C., H.; HAMZA, V. M. **Terrestrial Heat Flow in Non-Thermal Ground Water Circulation Settings of Brazil**. International Journal of Terrestrial Heat Flow and

Applied Geothermics VOL. 1, NO. 1 (2018); P. 46-51. ISSN: 2595-4180, 2018. DOI: <https://doi.org/10.31214/ijthfa.v1i1.19>

ALKMIN, F.F., MARSHAK, S., PEDROSA-SOARES, A.C., PERES, G.G., CRUZ, S.C.P., WHITTINGON, A. **Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in and Africa: Nutcracker during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. Precambrian Research.** 149: 43-64, 2006.

ALKMIM, F. F.; PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; CRUZ, S. **Sobre a Evolução Tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental.** Geonomos. 15: 25-43, 2007.

ALMEIDA F.F.M. 1967. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. Boletim 241. **DNPM - Divisão de Geologia e Mineralogia.** Rio de Janeiro, Boletim, nº 241, 36 p.

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências.** 7: 349–364, 1977

ALMEIDA, F.F.M. de et al. **Brazilian Structural Provinces: An Introduction. Earth-Science.** Rev. 17:1-29. 1981.

BRITO-NEVES B.B., CAMPOS-NETO M.C., FUCK R. **From Rondinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan African cycle and orogenic collage.** Episodes. 22, 155-199, 1999.

BULLARD, E. C. **Heat flow in South Africa.** In Proc. R. Soc. Lond. A (Vol. 173, No. 955, pp. 474-502). The Royal Society. December, 1939.

CARVALHO, H., & VACQUIER, V. **Method for determining terrestrial heat flow in oil fields.** Geophysics, 42(3), 584-593. 1977.

DALTON DE SOUZA, J.; KOSIN, M.; MELO, R.C.; SANTOS, R. A.; TEIXEIRA, L.R.; SAMPAIOS, A. R.; GUIMARÃES, J. T.; VIEIRA BENTO, R.; BORGES, V. P.; MARTINS, A. A. M., ARCANJO J. B., LOUREIRO H. S. C., ANGELIM L. A. A.. **Mapa Geológico do Estado da Bahia – Escala 1:1.000.000.** Versão 1.1. Programas Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo e Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). Convênio de Cooperação e Apoio Técnico-Científico CBPM-CPRM. Salvador: CPRM, 2003.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil:** texto, mapas & SIG. Brasília, 2003. 692 p.

DEL REY, A.C., 1989, **Estudo hidrogeotérmico da região de Águas de Lindóia, Amparo e Socorro: Nordeste do estado de São Paulo,** Mestrado, Universidade de São Paulo.

FOURNIER, R. O., & TRUESDELL, A. H. **An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters.** Geochimica et Cosmochimica Acta, 37(5), 1255-1275. 1973.

FOURNIER, R. O., & POTTER, R. W. **Revised and expanded silica (quartz) geothermometer.** Bull., Geotherm. Resour. Counc.(Davis, Calif.)(United States), 11(10). 1982.

GOMES, A. J. L., HAMZA, V. M., 2005, **Geothermal Gradient and heat Flow in the State of Rio de Janeiro.** Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 325-347, 2005.

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

HAMZA, V.M., ESTON, S.M., ARAUJO, R.L.C., VITORELLO, O I. E USSAMI, N. **Levantamento de dados de geothermal brazilian Series-1,** Instituto de Pesquisas Tecnológicas fazem Estado de São Paulo - IPT, publicação no. 1109, 1978.

HAMZA, V.M., MUÑOZ, M., **Heat Flow map of South America, Geothermics** Vol. 25, nº 6, pp. 599-646, Inglaterra. 1996

HAMZA, V.M., SILVA DIAS, F.J.S., GOMES, A.J.L. E TERCEROS, Z.G.D. **Numerical and Functional Representations of Regional Heat Flow in South America**. PEPI, Volume 152, 4, p.223-256. 2005.

Hamza, V. M., & Vieira, F. **Global Heat Flow: New Estimates Using Digital Maps and GIS Techniques**. *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applications*. (2018).

HAMZA, V., VIEIRA, F., GOMES, J., GUIMARAES, S., ALEXANDRINO, C., GOMES, A.. Update of Brazilian Heat Flow Data, within the framework of a multiprong referencing system. *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics* 3 (1), 45–72, 2020.

HEILBRON, M., CORDANI, U., ALKMIM, F. (Eds.),. **São Francisco Craton, Eastern Brazil**. Springer International Publishing, Switzerland, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01715-0> (326 pp.).

HURTER S. J. **Aplicação dos geotermômetros químicos em águas de fontes brasileiras na determinação de fluxo geotérmico**. USP, Dissertação/Tese de Mestrado. 1987.

RIBEIRO, F.B. E HAMZA, V.M. **Stabilization of bottom-hole temperature in the presence of formation fluid flows**. *Geophysics*, 51, 410–3. 1986.

SWANBERG, C. A., & MORGAN, P. **The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and regional heat flow: a new heat flow map of the United States**. *Pure and Applied Geophysics*, 117(1-2), 227-241, 1978.

TRUESDELL, A.H. **Geochemical techniques in exploration**. *Proc. Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, California. Edited by Lawrence Berkley Laboratory, University of California. pp. 53 - 79., 1975.

VIEIRA, F. P., & HAMZA, V. M. (2014). **Advances in assessment of geothermal resources of South America**. *Natural Resources*, 5(14), 897.

VITORELLO, I.; HAMZA, V. M.; POLLACK, H. N., 1980, **Terrestrial Heat Flow in the Brazilian Highlands**, *Journal of Geophysics Review*, vol. 85, pp. 3778- 3788.

NOTAS DE AUTOR

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

André Froede Silva - Concepção. Coleta de dados, análise de dados, elaboração do manuscrito, revisão.
Carlos Henrique Alexandrino – Revisão e aprovação da versão final do trabalho.
Carlos Alberto Mirez Tarrillo – Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

FINANCIAMENTO

Não se aplica.

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica.

APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica.

CONFLITO DE INTERESSES

Não se aplica

LICENÇA DE USO

Este artigo está licenciado sob a [Licença Creative Commons CC-BY](#). Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, desde que atribua a autoria da obra.

HISTÓRICO

Recebido em: 07-02-2021

Aprovado em: 01-11-2022

