



Estrutura Termal da Crosta na Região do Nordeste Setentrional

Fábio P. Vieira e Valiia M. Hamza, Observatório Nacional – ON/MCT, Rio de Janeiro

Copyright 2009, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th 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.

Abstract

We present here results of an integrated analysis of geothermal gradients in northeast Brazil based on bottom-hole temperature data of deep wells in the continental platform area as well as geothermal data from continental areas in the states of Ceará, Rio Grande do Norte and Paraíba. The results indicate the presence of an east-west trending belt of relatively high gradients, with values in excess of 30°C/km, in the continental platform area. It seems to be contiguous with the northeast – southwest trending belt of high gradients in the adjacent continental area, extending from Canindé to Fortaleza, reported in earlier studies. We advance the hypothesis that the occurrence of regions of high gradients in oceanic and continental areas of northeast Brazil are related the tectonic activities of the Fernando Noronha Lineament. Results of model studies indicate that conditions for thermal maturation of hydrocarbons occur at depths of 2 to 4 km in the oceanic segments of Potiguar and Ceará basins. In continental areas high gradients imply existence of low to medium enthalpy geothermal resources at depths of less than 3 km.

Introdução

Nordeste Setentrional é uma das regiões de atividades tectônicas marcantes no território Brasileiro. Progressos alcançados nos estudos geofísicos, das últimas décadas, limitaram-se principalmente aos levantamentos gravimétricos e magnéticos. Com exceção do trabalho realizado por Carneiro et al. (1990) não foram efetuados estudos sobre o campo térmico da crosta desta região.

No transcorrer da confecção do mapa de fluxo geotérmico regional Hamza et al. (1985) observou a existência de zonas de anomalias geotérmicas na região nordeste. O presente estudo tem como objetivo uma avaliação integrada dos dados geotérmicos coletados nas últimas décadas visando mapeamento de feições geotérmicas dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e das áreas de margem continental adjacente.

Os estudos geotérmicos na região Nordeste tiveram início na década de 1980, com medições em Currais Novos (RN) por Vitorello et al. (1980) e em Itatiaia (CE) por Hamza et al. (1980). Medições posteriores por Becker e Hamza (1984) indicaram presença de gradientes térmicos elevados ao longo de uma faixa que estende de Fortaleza a Quixadá.

Contexto Tectônico

A delimitação norte e leste da Província Borborema pela margem continental nordestina está diretamente relacionada à abertura do Atlântico Sul no Cretáceo inferior. Neste período o sistema de rifteamento do Atlântico evoluiu com ramificações sul e equatorial. A separação dos continentes Sul-Americano e Africano iniciou-se, na ramificação sul, no período Neocomiano-Barremiano (144 - 119 Ma), evoluindo de sul para norte. Já na abertura do Atlântico Equatorial, o sistema de rifteamento ocorreu de oeste para leste em direção à Província Borborema, sendo assim mais tardia (Aptiano - Albiano) do que na porção sul (Matos, 1992a).

Segundo Almeida et al. (1955), o processo de abertura e formação da crosta oceânica no Atlântico Sul pode ser dividido em 3 estágios de rifteamento. O Nordeste Setentrional do Brasil sofreu maior influência dos dois estágios finais, quando ocorreram a reativação das extensas zonas de cisalhamento brasileiras e a fase principal de estiramento e ruptura crustal. Este período é marcado por intensa deformação extensional com o eixo principal de estiramento na direção NW-SE, culminando na formação de uma série de bacias tipo rifte (Potiguar, Araripe, Iguatu, Rio do Peixe, entre outras), alinhadas segundo o *trend* NE, designado de "Cariri-Potiguar" (Matos, 1992a,b). A evolução do sistema de rifteamento conduziu ao contexto geológico de margem continental passiva, com afinamento crustal nos limites norte e leste da Província Borborema e transição da crosta continental para a crosta oceânica nas áreas costeiras adjacentes.

Base de Dados Utilizados

No presente trabalho foram selecionados apenas dados de medições experimentais que permitem a determinação direta do gradiente geotérmico. Desta forma foram utilizados resultados obtidos pelos métodos designados por Hamza e Muñoz (1996) de convencional (CVL), temperatura estável de fundo de poço (CBT), temperatura de fundo de poço (BHT) e geoquímico (GCL). No método convencional (CVL) o gradiente geotérmico é determinado com base em dados de perfilação térmica. O método de temperatura estável de fundo de poço (CBT) foi utilizado para casos em que o campo térmico do poço é alterado pelo fluxo de fluidos no seu interior. O método de temperatura de fundo de poço (BHT) foi adotado de gradientes geotérmicos em poços de petróleo. O método geoquímico (GCL) foi adotado para estimar a magnitude do fluxo geotérmico em locais de surgimento de fontes termais.

As bases de informações utilizadas incluem dados de temperatura dos poços de exploração da PETROBRÁS da área da Plataforma continental (Zembruscki, comunicação pessoal) e dados de perfilações térmicas que constam nos estudos anteriores das áreas

continentais (Viorello et al., 1980; Hamza et al., 1980; Hamza e Muñoz, 1996). Constam ainda, dados de perfis térmicos de algumas localidades nas áreas costeiras do Rio Grande do Norte e Paraíba, que ainda não foram publicados (comunicações pessoais de Costa, T. B. e Santos, J.). Desta foram reunidos dados geotérmicos obtidos em 90 localidades. A distribuição geográfica desses dados é ilustrada na figura (1).

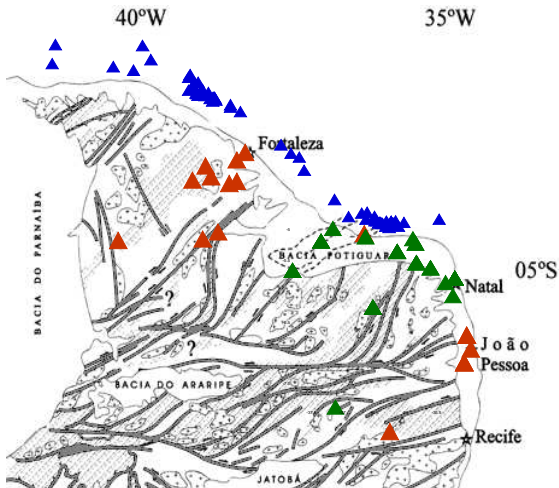


Figura 1: Locais de medidas geotérmicas nos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco (▲), e na área da plataforma continental adjacente (▲).

Apresenta-se nas Tabelas (1), (2), (3) e (4) os valores de gradientes térmicos obtidos nas áreas da Plataforma e nas áreas continentais adjacentes (Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco).

Tabela 1 - Valores de gradientes térmicos médios na plataforma continental do Rio Grande do Norte e Ceará

Plataforma	Nº de Poços	Gradiente Médio (°C/km)
CE Bloco Oeste	6	33.65 +/- 6.90
CE Bloco Central	26	42.58 +/- 5.04
CE Bloco Leste	4	56.54 +/- 7.04
RN Bloco Oeste	23	52.01 +/- 5.38
RN Bloco Leste	4	38.34 +/- 5.14

Tabela 2 – Valores de gradientes térmicos em poços rasos na área continental do Estado do Ceará

Identificação	Coordenadas		Gradiente (°C/km)
	Latitude	Longitude	
F 83 (ITATAIA)	-39.3075	-5.1992	67.40
NUTEC-06	-38.8686	-4.3397	50.53
NUTEC-10/14	-39.4781	-4.2894	76.23
NUTEC-8/9	-39.1703	-4.2381	99.94
NUTEC-15/21	-40.7067	-5.2211	86.28
NUTEC-01	-38.6056	-3.8594	99.84
NUTEC-2/4	-38.7436	-4.3058	54.90
NUTEC-5	-38.7436	-3.9761	55.10
NUTEC-7	-39.2597	-4.0689	79.10
NUTEC-22/23	-39.0531	-5.0917	82.74

Tabela 3 - Valores de gradientes térmicos na área continental do Estado do Rio Grande do Norte.

Identificação	Coordenadas		Gradiente (°C/km)
	Latitude	Longitude	
SOLEDADE	-37.7989	-5.6642	46.92
537	-36.5147	-6.2606	22.60
FAZ. MACAIBO	-36.1281	-5.3564	25.81
Poço Pólo Cerâmico	-35.3539	-5.8583	21.66
ALCA NORTE	-36.6344	-5.1150	18.87
Rodov. - Poço Nº 12	-37.3442	-5.1875	33.46
Sede Parazinho	-35.8383	-5.2231	15.58
4 PG-01	-35.8789	-5.1503	27.74
Tibau - Poço nº 1	-37.1547	-4.9797	32.47
CABEÇO PRETO	-35.8197	-5.5375	30.26
Campo Novo - II	-35.2094	-5.7950	25.12
Fazenda Ingá - IV	-35.5967	-5.6217	51.37

Tabela 4 – Valores de gradientes térmicos na área continental dos Estados da Paraíba e Pernambuco.

Identificação	Coordenadas		Gradiente (°C/km)
	Latitude	Longitude	
GA-BT-1-PB	-34.9358	-6.6883	115.14
GA-LU-1-PB	-34.8689	-6.9003	141.68
TA-SR-1-PB	-34.9781	-7.1139	155.76
1-Fonte-PB	-37.1167	-7.8833	7.00
1-Fonte-PE	-36.2111	-8.1778	51.00

Distribuição Regional de Gradientes Geotérmicos

Dados apresentados na Tabela (1) apontam para variações sistemáticas nos gradientes térmicos na margem continental do Ceará e do Rio Grande do Norte. Na parte do Ceará a tendência geral é aumento de gradientes térmicos no sentido oeste para leste. Por outro lado na margem continental do Rio Grande do Norte a direção de aumento é contrária, de leste para oeste.

Na parte continental do Estado do Ceará os resultados indicam que há duas zonas geotermicamente anômalas: a primeira nas regiões próximas a Fortaleza até Quixadá, passando por Canindé e a segunda nas proximidades de Cratêus. A primeira anomalia geotérmica está localizada numa região de ocorrência de vulcanismo alcalino durante o Oligoceno. Este contexto geológico indica uma provável existência de um sistema geotermal de alta entalpia, nas regiões sul e sudeste de Fortaleza. A segunda anomalia está localizada dentro do complexo nordestino com predominância de rochas graníticas em uma área próxima ao vulcanismo Parapuí. Os gradientes térmicos obtidos nestas áreas estão na faixa de 50 a 100°C/km. Utilizando-se um valor médio de condutividade térmica para rochas cristalinas de 3,0 W/m°C, obteve-se valores de fluxo geotérmico na faixa de 165 a 300mW/m².

No Estado do Rio Grande do Norte a faixa de gradientes geotérmicos foi relativamente baixa, com valores em torno de 15 a 50°C/km. Nesta região não há indicação de anomalias geotérmicas.

Já no Estado da Paraíba, regiões próximas à Baía da Traição, Lucena e Santa Rita apresentam fortes variações no gradiente geotérmico. A faixa de variação é

de 50 a 150°C/km, indicando bolsões isolados de anomalias térmicas na área próximo da margem continental.

Apresenta-se na Figura (2) uma análise comparativa das distribuições verticais de temperaturas nas áreas da plataforma e continental. O gradiente térmico médio da área continental é 23.74 +/- 1.2 °C/km, significativamente inferior ao valor médio de 31.43 +/- 2.7 °C/km das áreas da Plataforma.

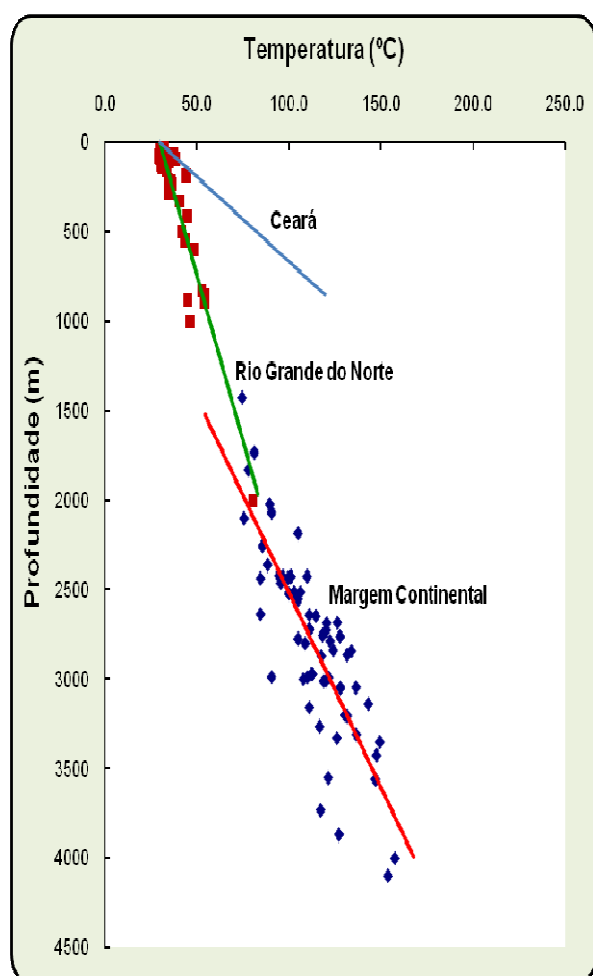


Figura 2: Relação entre profundidade e temperatura nos poços das regiões continentais e das margens continentais adjacentes.

Mapas Geotermiais

Os mapas geotermiais foram elaborados a fim de obter melhor visualização da distribuição espacial dos gradientes térmicos na área de estudo.

A região selecionada para mapeamento se limita a uma área entre as latitudes 2 e 10 graus Sul e longitudes de 34 a 42 graus oeste. O mapa desta faixa, apresentado na figura (3), indica que os gradientes térmicos com valores maiores que 40°C/km ocorrem ao longo de faixas estreitas, tanto na margem continental como na área continental.

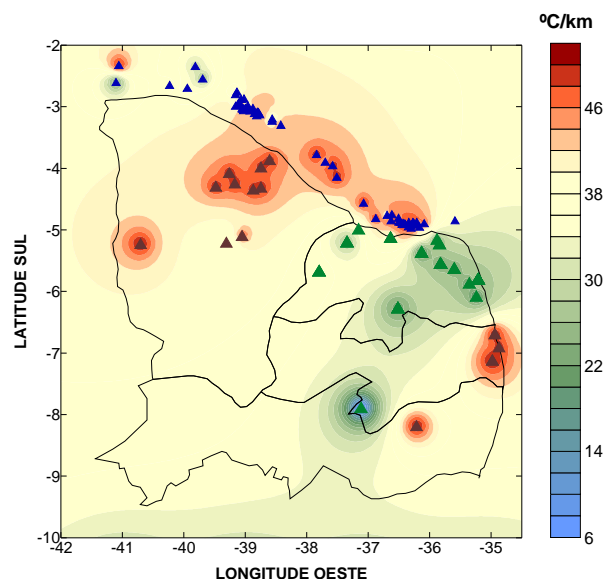


Figura 3: Distribuição do gradiente geotérmico das principais regiões continentais e nas áreas de plataforma.

Estrutura Termal da Crosta

Os resultados alcançados no presente trabalho também permitem inferências sobre o campo de temperaturas da crosta na área de estudo. Neste caso, foram utilizados modelos térmicos da crosta elaborados por Hamza (1981) e Alexandrino e Hamza (2008). Como exemplo ilustrativo apresenta-se na Figura (4) a distribuição de temperaturas na área de bacias sedimentares da margem continental leste, em profundidades de até 5km.

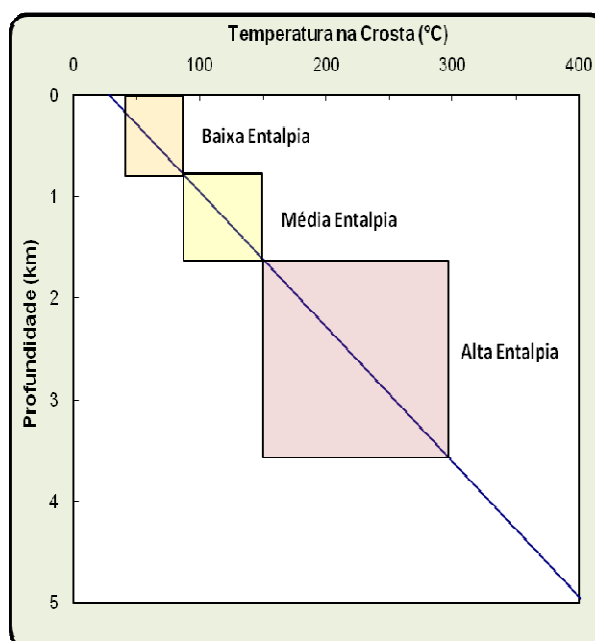


Figura 4: Perspectivas de utilização de recursos geotermiais no estado do Ceará.

Inferências sobre Geração de Petróleo e Gás

Os resultados de gradientes térmicos obtidos no presente trabalho permitem a avaliação do campo de temperaturas das camadas sedimentares. Utilizou-se para esta finalidade modelos térmicos elaborados por Hamza (1984) e informações do domínio público sobre as seqüências de evolução temporal das bacias sedimentares na margem continental da área de estudo.

Como exemplo ilustrativo apresenta-se na Figura (5) a distribuição de temperaturas calculadas para as seqüências sedimentares em profundidades de até 5 km. Também são apresentados nesta figura os limites máximos de profundidades das isothermas, associadas geralmente com a geração de petróleo e gás natural. A suposição fundamental neste procedimento é que o fator predominante no processo de maturação de hidrocarbonetos é a temperatura de soterramento e que o efeito de tempo é apenas secundário. Obviamente, essa suposição constitui uma avaliação simplificada, de primeira ordem, das reações químicas do processo de maturação da matéria orgânica, mas que atende os objetivos primários do presente trabalho. Resultados das simulações numéricas indicam que a inclusão do efeito de tempo levaria a uma redução de cerca de 20% nas estimativas das profundidades.

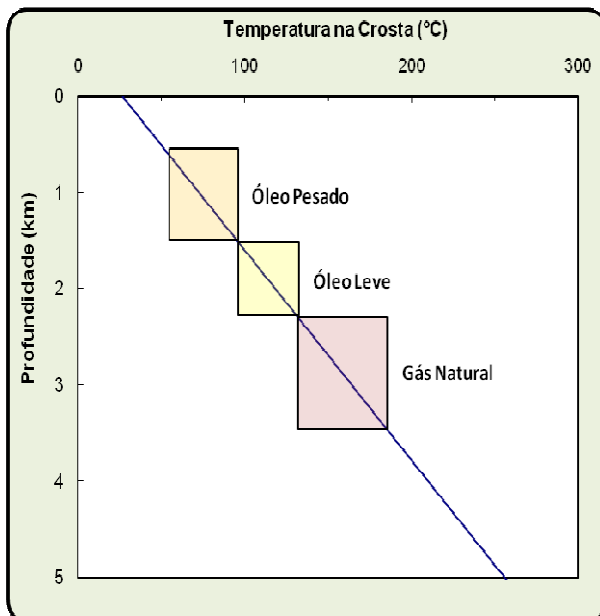


Figura 5: Estimativas de profundidades de ocorrência de hidrocarbonetos na Plataforma continental Nordeste.

Conclusões

As análises dos mapas gerados no presente trabalho revelam perfis geotérmicos de comportamento anômalo em algumas áreas do Estado do Ceará, Paraíba e nas áreas de margem continental adjacentes. Observações preliminares indicam que estas regiões possuem um fluxo geotérmico mais elevado em relação às outras áreas.

No Estado do Ceará constataram-se zonas em que o fluxo de calor está associado a valores elevados de

gradientes de temperatura. A utilização de recursos geotérmicos depende diretamente do sistema geotermal local e em que profundidade este pode ser encontrado conforme figura 6.

Os resultados do Estado do Ceará apontam para a possibilidade de se obter energia elétrica em temperaturas superiores a 150°C (geotermia de alta entalpia), ou para aquecimento e produção de água quente em outras atividades, como indústria alimentar, estufas, se a temperatura for entre os 40 a 150°C (geotermia de baixa e média entalpia).

Os resultados nas áreas de margem continental adjacentes apontam para a possibilidade de se obter, havendo reservatório, geração de óleo pesado em profundidades na faixa de 0,8 a 1,5 km e temperatura variando de 80 a 100°C; para óleo leve, em profundidades de 1,5 a 2,5 km e temperatura variando de 100 a 180°C; e para gás natural, em profundidades de 2,5 a 3,5 km e temperatura acima de 180 °C (figura 6).

Agradecimentos

Os autores desejam expressar seus agradecimentos ao Departamento de Geofísica do Observatório Nacional, pelo apoio institucional que tornou possível a realização deste trabalho.

Referências

- Hamza, V.M., Becker, E.A., 1992,** Estudo das Propriedades Termofísicas e do Regime Térmico do Maciço Rochoso no local do Terminal Almirante Barroso, São Sebastião, SP, Relatório Interno, PETROBRÁS.
- Hamza, V.M., Muñoz, M., 1996,** Heat Flow map of South America, *Geothermics Vol. 25, n° 6*, pp. 599-646, Inglaterra.
- Hamza, V.M. and Silva Dias, F. J. S., 2003,** Functional Representation of regional heat flow in South America: Implications for the occurrence of low-temperature geothermal resources, *Geothermal Resources Council Transactions, V. 27*, pp. 615-618.
- Higashi, T.H. and Hamza, V.M., 1996,** Geothermal Investigations in an area of induced seismic activity. *Tectonophysics, Amsterdam, v. 253*, p. 209-225
- Hamza, V. M., Verma, R. K., 1969,** The Relationship of Heat Flow with Age of Basement Rocks, *Bull. Volcan., Vol XXXIII-1*, p. 123-152.
- Del Rey, A. C. and Hamza, V.M., 1989,** Terrestrial Heat Flow Variations in the Northeastern Part of the State of Sao Paulo: A Case for Transport of Geothermal Heat by Inter fracture Fluid Flows. Em: *Hydrogeological Regimes and their subsurface thermal effects*, American Geophysical, v.47, ed. Washington, E.U.A., p. 137-148.
- Hamza, V. M., 1980,** Estimates of Terrestrial Heat Flow and radiogenic heat production in Eastern Brazil, in *Anais do XXXI Congr. Bras. de Geologia, vol. 2*, pp. 1149-1160 American Association of Petroleum Geologists (AAPG), 1976, Basic data file from AAPG Geothermal Survey of North America: Univ. of Oklahoma, Norman.

Hamza, V. M. Eston, S. M., Araújo, R. L. C., 1978, *Geothermal energy prospects in Brazil, Pure and Applied Geophysics, vol. 117,* pp. 180-195

Hurter, S.J., Eston, S.M. e Hamza, V.M., 1983, Coleção Brasileira de Dados Geotérmicos Série 2 – Fontes Termais. Publicação No. 1233, *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo s/a – IPT,* pp. 111

American Association of Petroleum Geologists (AAPG), 1976, Basic data file from AAPG Geothermal Survey of North America, Univ. of Oklahoma, Norman.

Caixeta, J.M., Milhomem, P.S., Witzke, R.E., Dupuy, I.S.S. & Gontijo, G.A., 2007, Bacia de Camamu, *Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2),* 455-461.

Gontijo, G.A., Milhomem, P.S., Caixeta, J.M., Dupuy, I.S.S. & Menezes, P.E.L., 2007, Bacia de Almada, *Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2),* 463-473.

Mercio, S.R., 1996, Análise Estrutural da Porção Emersa da Bacia de Camamu e Universidade Federal de Ouro Preto, dissertação de mestrado, 99p.

Netto, A.S.T., Filho, J.R.W. & Feijó, F.J., 1994, Bacias de Jacuípe, Camamu e Almada, *Boletim de Geociências da Petrobras, 8(1),* 173-184.

Rangel, H.D., Oliveira, J.F.L. & Caixeta, J.M., 2007, Bacia de Jequitinhonha, *Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2),* 475-483.

Rodvalho, N., Gontijo, R.C., Santos, C.F. & Milhomem, P.S., 2007, Bacia de Cumuruxatiba, *Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2),* 485-491.

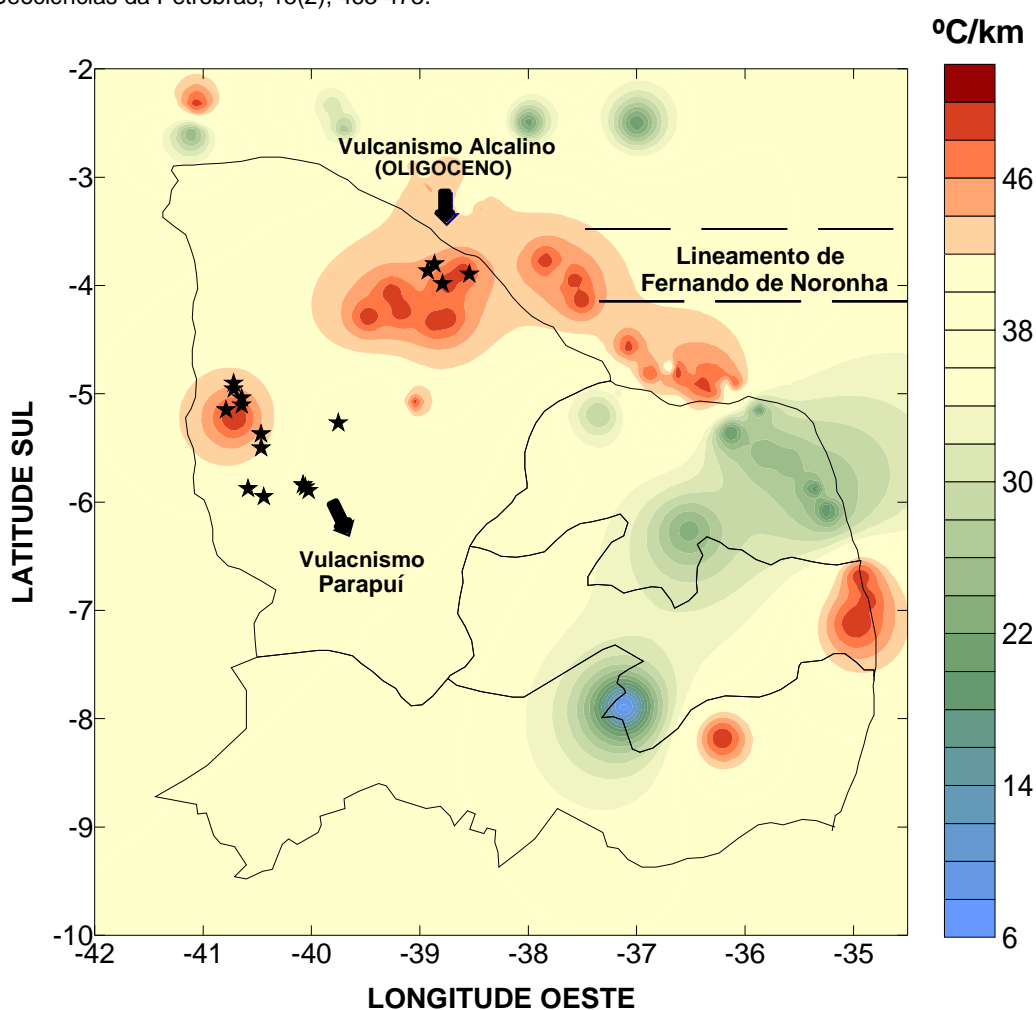


Figura 6: Localização de vulcanismo em regiões geotermicamente anômalas no Estado do Ceará e a representação da cadeia de Fernando de Noronha em direção à costa do Ceará