

A Superfície de Curie na Região Bahia Sul – Análise Espectral sobre dados Aeromagnéticos de Alta Resolução

Glauco Bragança (MCT-O.N. - PETROBRÁS) e Luiz F.S. Braga (MCT-O.N.)

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Bahia, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 9th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

In this study we used spectral analyses over the High Resolution Airborne Magnetic (HRAM) data, acquired by Fugro-Lasa over the offshore Brazilian basins located in southern region of Bahia State. Depths do the Curie Surface were estimated and they allowed an investigation on the present thermal state of the various compartment of the studied area. Special care was taken on the investigation of the minimum size of the data window that may be used without compromising the reliability of the estimates. Additionally, we compared the regional behavior of the depths to the Curie Surface with the known structural setting of the Camamu-Almada, Cumuruxatiba and Jequitinhonha basins which brought insights on the correlation between the present thermal gradients and the Oil and gas potential in those basins.

Introdução

Neste trabalho apresentamos um análise das estimativas de profundidades da Superfície Curie, obtidos por análise espectral dos dados aeromagnetométricos do Projeto Bahia Sul adquiridos pela Fugro-LASA. O levantamento recobriu as bacias de Camamu, Almada, Jequitinhonha e Cumuruxatiba (Figura 1), abrangendo uma faixa entre as cidades de Salvador e Caravelas. Apresentamos os resultados em forma de mapa e analisamos a correlação da Superfície de Curie com interpretações geológicas disponíveis na literatura sobre o arcabouço estrutural da bacia. O Mapa Bouguer da área estudada é também utilizado na busca de um melhor entendimento da correlação entre a estrutura de densidade da crosta e seus limites mais profundos de magnetização.

As estruturas magnéticas são limitadas no topo pela superfície da Terra, e na base pela superfície do ponto Curie apropriado para uma particular mineralogia magnética. Em temperaturas acima da temperatura Curie (aproximadamente 580°C para magnetita), as rochas perdem completamente seu magnetismo. A obtenção dos dados pertinentes à profundidade da superfície

Curie, baseou-se no estudo detalhado do comportamento dos espectros de potência dos dados magnéticos agrupados em janelas quadráticas de 60 x 60 km, cujo tamanho foi definido após análise do seu efeito sobre a banda espectral utilizada na estimativa da profundidade das fontes profundas.

As estimativas da profundidade da Superfície de Curie estão ligadas às fontes crustais profundas que produzem anomalias magnéticas de longo comprimento de onda comparadas às fontes mais rasas. Com essas considerações, uma técnica usada para o cálculo das

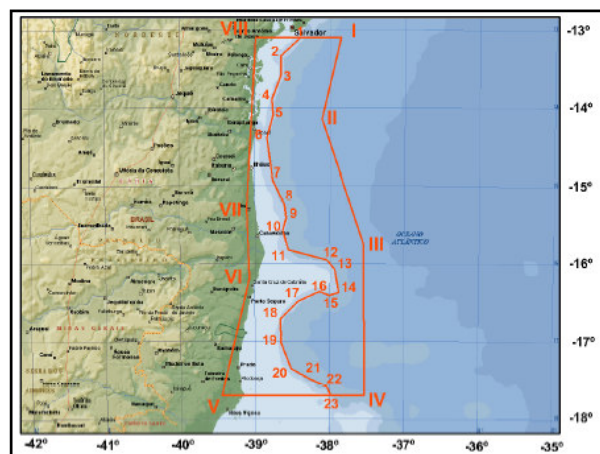


Figura 1: Mapa de localização da área de trabalho Bahia Sul

profundidades se baseia na análise de Fourier. O nível mais profundo na crosta acima da qual os materiais criam assinaturas perceptíveis em um mapa de anomalia magnética é geralmente interpretado como a profundidade da superfície do ponto Curie. Aplicamos esta técnica aos dados aeromagnéticos da região Bahia Sul, objetivando estimar a profundidade basal das fontes magnéticas nessa região. O método usa a propriedade estatística de grupos.

Investigamos o grau de confiabilidade dos dados sobre a qual aplicamos a análise espectral e as incertezas no cálculo das profundidades, associadas aos erros inerentes ao modelo utilizado. Os resultados obtidos são comparados a informações geológicas disponíveis para a área estudada e possibilitam novos *insights* sobre a

estrutura térmica atual dos seus diversos compartimentos tectônicos.

Método

Utilizamos os programas computacionais desenvolvidos pela GEOSOFT para a análise dos espectros radiais de potência. Os espectros foram obtidos com a aplicação da transformada rápida de Fourier sobre janelas de dados magnetométricos da área de pesquisa.

O modelo matemático na qual a análise é baseada considera uma coleção de amostras aleatórias e uma distribuição uniforme de prismas retangulares (conveniência geométrica), cada prisma tendo uma magnetização constante. Se as susceptibilidades magnéticas dos prismas são suficientemente aleatórias, então a população dos prismas pode ser tratada estatisticamente. Nesse caso, o logaritmo do espectro radial de potência resultante da resposta magnética das fontes é uma linha reta, cuja inclinação (coeficiente angular) negativa é proporcional à profundidade das fontes. O espectro de potência da combinação de fontes prismáticas compreende duas partes; a primeira corresponde às fontes profundas, relacionadas à pequenos números de onda e é usada para o cálculo da profundidade do centro do corpo prismático, e a segunda, relaciona-se às fontes rasas, usada para o cálculo do topo do prisma (Figura 2).

Para este estudo, foram utilizados cerca de 133.000 km de perfis aeromagnéticos de alta resolução, recobrando uma área de aproximadamente 75.229 km² no litoral sul do estado da Bahia, sobre os quais se procedeu a análise espectral. Um conjunto apropriado de janelas de dados foram selecionados sobre o grids dos dados de campo total magnético e os respectivos espectros de potência radial foram computados. A análise espectral forneceu estimativas das profundidades médias da base dos blocos crustais, associados a cada janela de dados, através do declive de segmentos lineares do espectro. Para estimar a profundidade média do conjunto de dados do grid, foram adotadas metodologias já bem aceitas para estudos com o mesmo propósito deste (Spector & Grant, 1970; Okubo et al., 1985). Primeiramente, foi realizado o preparo do grid para a posterior retirada do espectro radial, através do uso do software Oásis Montaj. O pré-processamento do grid consistiu das seguintes etapas:

- Remoção do trend de um grid, baseado nos pontos do limite do grid, na qual foi utilizado um filtro de primeira ordem;
- Expansão das dimensões de um grid, nesse caso teve-se uma expansão de 10% do grid, assumindo nas áreas limites do grid valores dummy para produzir uma expansão quadrada;
- Transformação de todos os valores dummies em um grid com valores interpolados das partes válidas do mesmo, através do método de máxima entropia;
- Com o grid pré-processado, foi então aplicada a transformada Fourier para o trabalho com os dados no domínio da frequência espacial. A partir daí, foram obtidos os gráficos cartesianos do logaritmo do espectro de potência média radial versus as frequências espaciais, sobre os quais procedemos os cálculos das profundidades médias z_t do topo dos blocos crustais magnéticos.

Com isso, seguiram-se as seguintes fases:

- Estimativa, sobre cada espectro individual, da profundidade do centróide do prisma z_0 utilizando-se a banda espectral de comprimentos de onda mais longos. Nesta fase, os espectros foram computados a partir do grid da integral vertical do campo anômalo de modo a permitir melhor resolução da referida banda;
- Estimativa da profundidade da base dos blocos crustais magnéticos (profundidade do ponto Curie) utilizando-se a fórmula $z_b=2Z_0 - z_t$.

Análise dos Resultados

A investigação inicial sobre a dimensão ótima da janela de dados para a estimativa da Superfície de indicou janelas de 60 km x 60 km para a área estudada. As janelas foram selecionadas com sobreposição de 50% entre suas áreas. A análise do espectro radial de potência, obtido para cada janela, forneceu a profundidade do centróide do prisma. Neste caso, as janelas foram obtidas sobre o grid da integral vertical do campo magnético anômalo. Procedimento similar, aplicado sobre o grid original do campo magnético anômalo, forneceu a profundidade do topo dos referidos prismas. De posse destes dois conjuntos de valores, a profundidade da base dos prismas ou seja, as estimativas da Superfície de Curie, foram computadas e utilizadas na construção de um mapa de contorno (Figura

3). Para a área de estudo foram estimados cerca de 114 valores de profundidade da Superfície de Curie, distribuídos sobre uma malha regular de 30 x 30 km. Os valores, indicadas em km, referem-se a profundidades abaixo do nível do mar. A profundidade Curie da área calculada está compreendida aproximadamente entre 9,8 e 31,1 km (Tabela 1). Objetivando avaliar a incerteza dos valores de profundidade, obtidos a partir do ajuste de retas sobre segmentos lineares do espectro, computamos o erro resultante no ajuste por mínimos quadrados. Podemos observar através da plotagem dos gráficos (Figura 3) que, em relação à média das energias radiais da componente profunda, o ajuste da linha de tendência apresentou um coeficiente de determinação (R^2) com valores acima de 0,8 ou próximos de 1, mostrando que os segmentos dos espectros das diferentes populações apresentam um comportamento linear, validando o modelo matemático empregado na região dos dados. A mesma análise foi aplicada aos espectros do campo total sobre os quais computamos as profundidades dos topos dos prismas (fontes rasas). É importante destacar que, sobre os resultados relacionados aos ajustes dos segmentos, puderam-se distinguir verdadeiramente duas populações de fontes distintas na região, validando o modelo utilizado neste trabalho.

Discussão e Conclusão

O estudo geotérmico de uma bacia constitui-se importante ferramenta auxiliar na determinação da janela atual de maturação de hidrocarbonetos, movimentação dos fluidos existentes, etc. Considerando o fluxo de calor ao longo da margem continental brasileira (bacias do Mesozóico/Cenozóico), os gradientes geotérmicos refletem predominantemente a influência dos valores de condutividade térmica da seqüência sedimentar. Onde há espessas seqüências de carbonatos e/ou evaporitos, como nas bacias de Campos, Santos, Amapá e Pará-Maranhão, os valores do gradiente geotérmico são baixos (menores que 23 °C/km) e, nas unidades ricas em clásticos finos, os gradientes podem ultrapassar os 35 °C/km. Nestas bacias, o grau de compactação da seqüência sedimentar deve refletir as principais fases de evolução das bacias. A camada sedimentar menos compacta da fase pós-rift traz maior retenção de calor e, portanto, gradientes geotérmicos mais elevados. Na seqüência rift ocorre o contrário, os sedimentos mais compactados são melhores condutores de calor, apresentando baixos valores de gradiente (ZEMBRUSCKI & KIANG, 1989).

A partir das profundidades de Curie (Figura 4) estimadas e admitindo-se que a magnetita, cujo ponto de Curie ocorre a de 580 °C, é o principal mineral responsável pela magnetização das rochas, foi estimada a distribuição espacial do gradiente geotérmico para a área de pesquisa (Figura 5). Segundo OKUBO et al. (1985), gradientes geotérmicos médios em áreas continentais variam de 30 °C/km a 50 °C/km. Gradientes calculados com base nas menores profundidades da Superfície de Curie são anormalmente altos, entre 59 °C/km e 86 °C/km, relativos à média mundial. Estes gradientes são comparáveis àqueles obtidos para a área dos bancos vulcânicos do Complexo de Royal Charlotte e Sulphur Minerva, e aos altos de Olivença e Porto Seguro.

A partir das estimativas do gradiente geotérmico e admitindo-se uma condutividade média de $2,5 \text{ Wm}^{-1}/^{\circ}\text{C}$ para as rochas ígneas (STACEY, 1977), o valor do fluxo térmico na área da Bahia Sul foi calculado, apresentando uma distribuição estatística sumarizada na Tabela 1. O fluxo de calor médio em uma região continental termicamente "normal" é aproximadamente 60mW/m². Valores maiores que aproximadamente 80-100 mW/m² indicam condições geotérmicas anômalas (JESSOP et al., 1976). Em sua grande parte, nossos resultados são consistentes com algumas modelagens de potencial de geração de hidrocarbonetos realizadas na área, como no entorno do Alto de Olivença em direção a águas profundas, onde temperaturas para a maturação das vitrinitas alcançaram o máximo de 80 °C (inf. verbal), condizentes com o fluxo térmico de 50 a 70 mW/m² inferidos para esta porção.

Comparando-se o relevo da superfície de Curie com o arcabouço estrutural (Figura 4), verifica-se que as feições mais rasas da profundidade Curie encontradas na área, em torno de 9,0 km abaixo do nível do mar, podem estar vinculados a altos existentes ao longo das bacias, como o material vulcânico intrudido nos sedimentos bacinais da bacia de Jequitinhonha (Complexo de Royal Charlotte), na bacia de Cumuruxatiba, representado por diabásios e basaltos da Formação Abrolhos e do Complexo Sulphur Minerva, e dos altos na bacia de Camamu-Almada. Nesses casos, esses corpos intrudidos nos sedimentos bacinais são mais retentores de calor. O contrário deve-se verificar no local onde a superfície de Curie é mais profunda, ou seja, o componente sedimentar é atuante e possuidor de uma condutividade térmica superior aos dos corpos vulcânicos, conferindo menores gradientes geotérmicos. O mapa Bouguer Residual (Figura 6), obtido a partir da subtração entre o grid do Campo Bouguer continuado a 500 m para cima e o grid Bouguer original, foi visualizado simultaneamente com o contorno

da profundidade Curie, onde foi constatada a boa correlação das zonas de depressão regional com as profundidades Curie rasas descritas anteriormente. Provavelmente esta correlação corresponde a um efeito estrutural secundário, através de um preenchimento nos baixos de material vulcânico de baixa densidade.

Agradecimentos

Agradecemos à PETROBRÁS e à FUGRO-LASA pela cessão dos dados e autorização para publicação deste trabalho.

Referências

Jessop, A.M., Hobart, M.A., e Sclater, J.G., 1976. The World heat flow data collection 1975. *Geothermal Services of Canadá*. Geotherm Ser., Vol.50, pp. 55-77.

Okubo, Y., Graf, R.J., Hansen, R.O., Ogawa, K. & Tsu, H., 1985, Curie Point Depths of the Island of Kyushu and Surrounding areas, Japan, *Geophysics*, v. 53, p. 481-494.

Spector, A., Grant, F.S., 1970, Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data, *Geophysics*, v. 35, n. 2, p. 293-302.

Stacey, F.D., 1977, *Physics of the Earth*: New York, John Wiley and Sons, 2nd ed., 414 pp.

Zembruski, S. G. & Kiang, C. H., 1989, Gradiente geotérmico das bacias sedimentares brasileiras, *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, jul./set, 3 (3):215-227.

Profundidade do Topo da Fonte (Km abaixo do N.M.)	Profundidade do centróide da Fonte (Km abaixo do N.M.)	Profundidade Curie (Km abaixo do N.M.)	Fluxo Térmico (mW/m ²)	Gradiente Geotérmico (°C/k)
0,32	5,1	9,88	142,6	57,00
0,33	11,54	22,76	61,37	24,54
0,48	15,87	31,12	44,6	17,84

Tabela 1: Profundidades da Superfície de Curie e correspondentes fluxos térmicos e gradientes geotérmicos, baseados nas análises espectrais de anomalias aeromagnéticas. Os números apresentados nas três linhas da coluna central da tabela representam, respectivamente de cima para baixo, valor mínimo, valor médio e valor máximo.

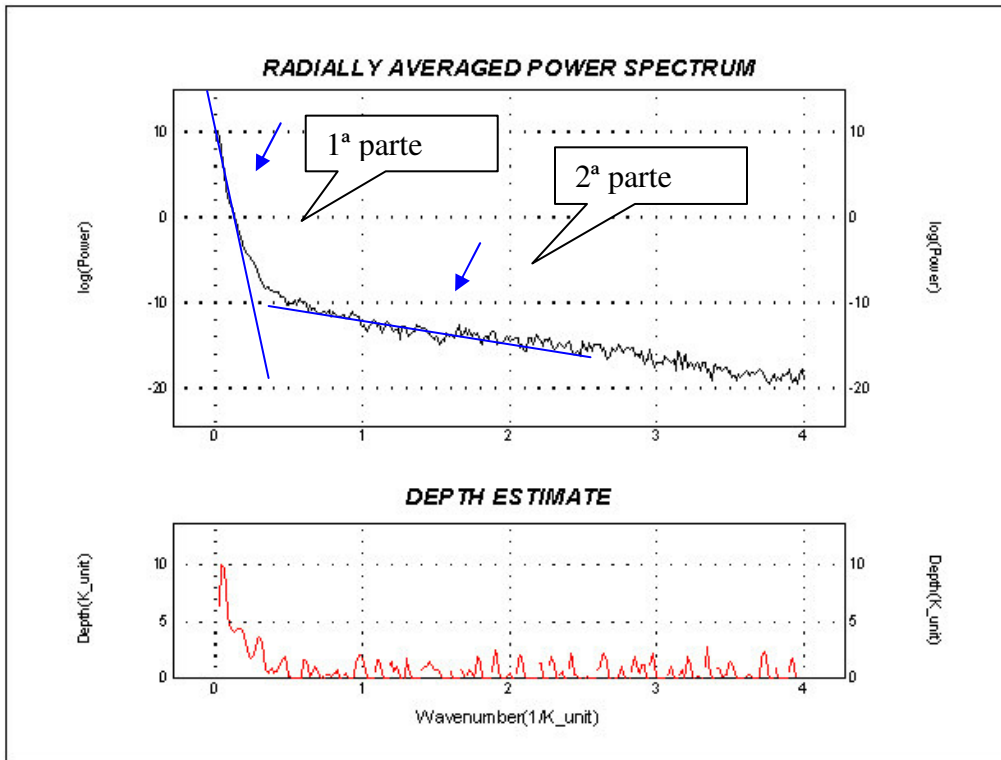


Figura 2: Gráfico exemplo do espectro de potência radial médio das anomalias magnéticas

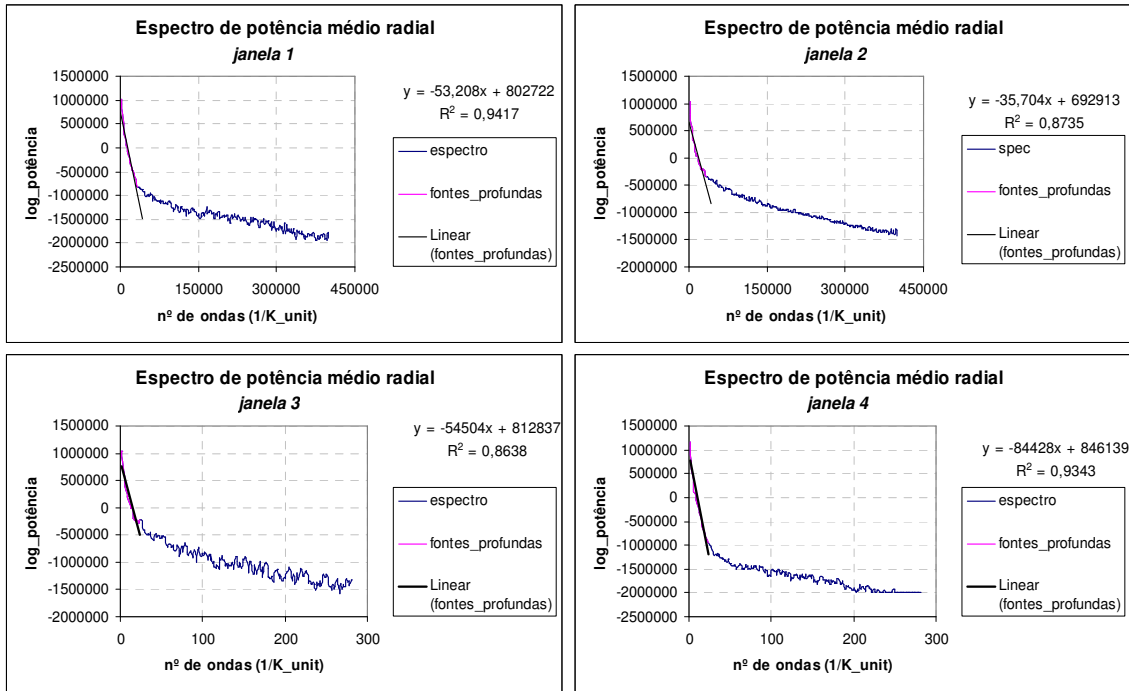


Figura 3: Amostras de espectros de potência das anomalias magnéticas e seus ajustes em relação à profundidade das fontes

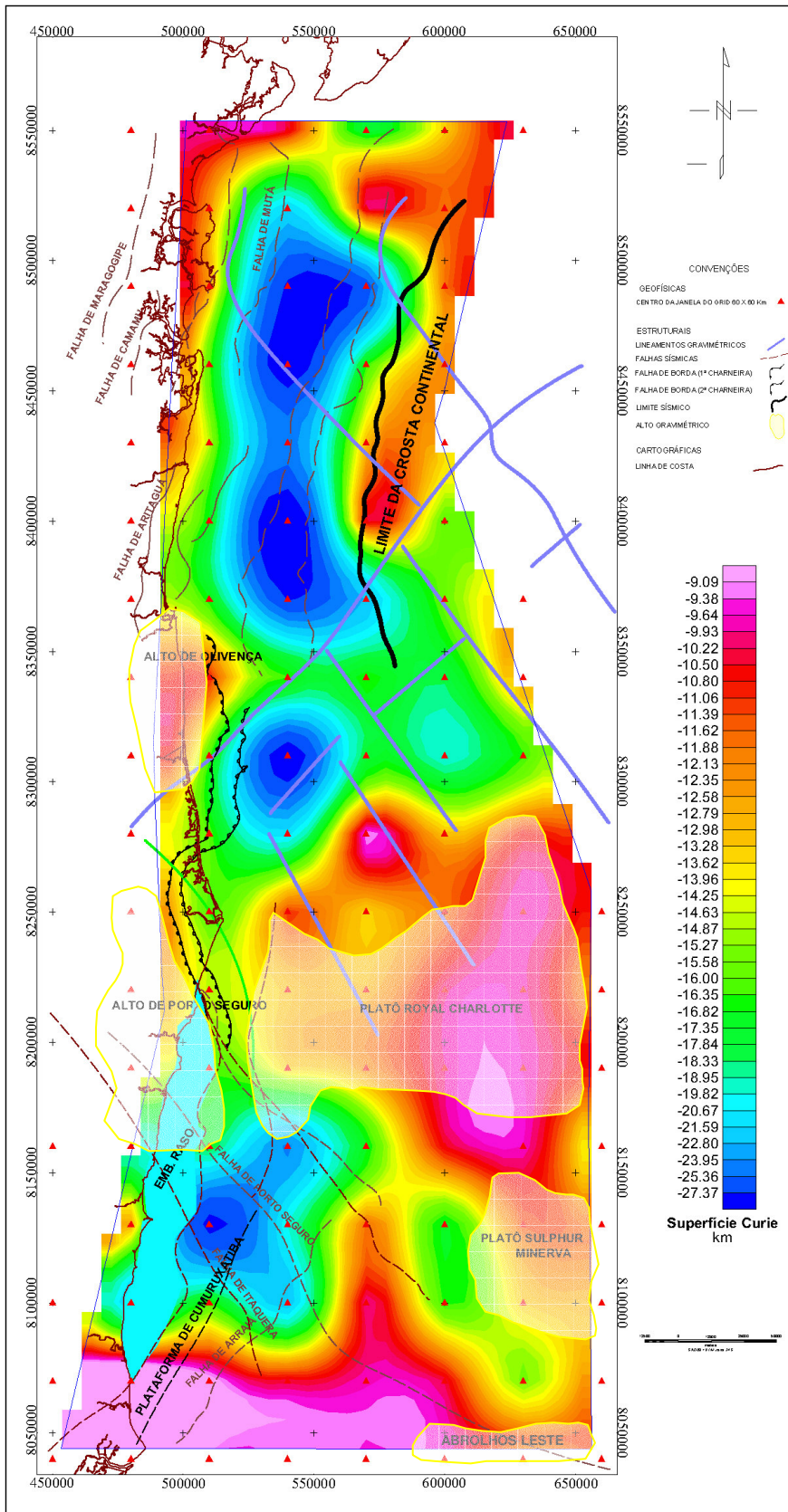


Figura 4: Mapa da Profundidade da Superfície de Curie da região Bahia Sul e arcabouço estrutural da área; ● = Estimativas da profundidade Curie

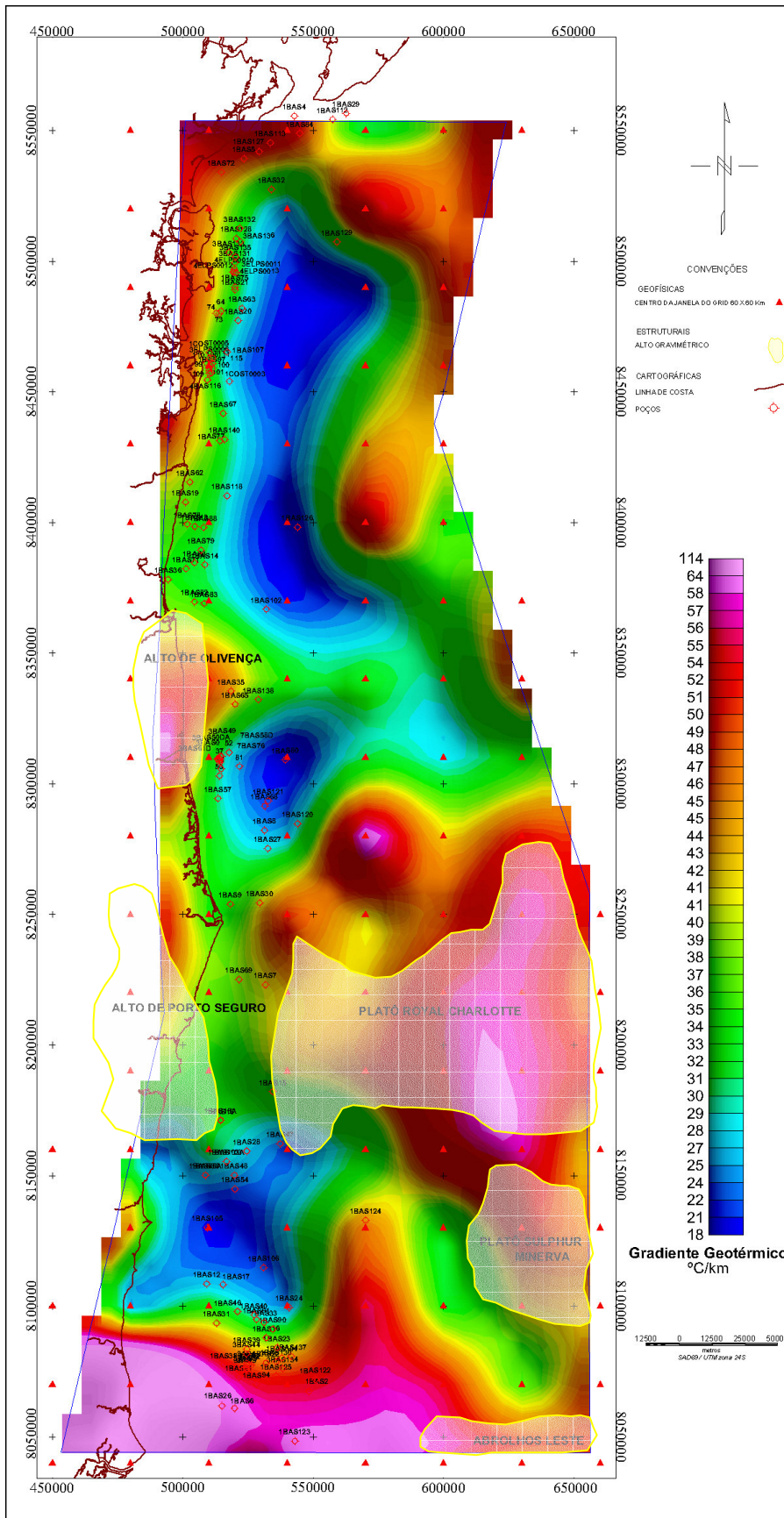


Figura 5: Mapa do Gradiente Geotérmico estimado para região Bahia Sul

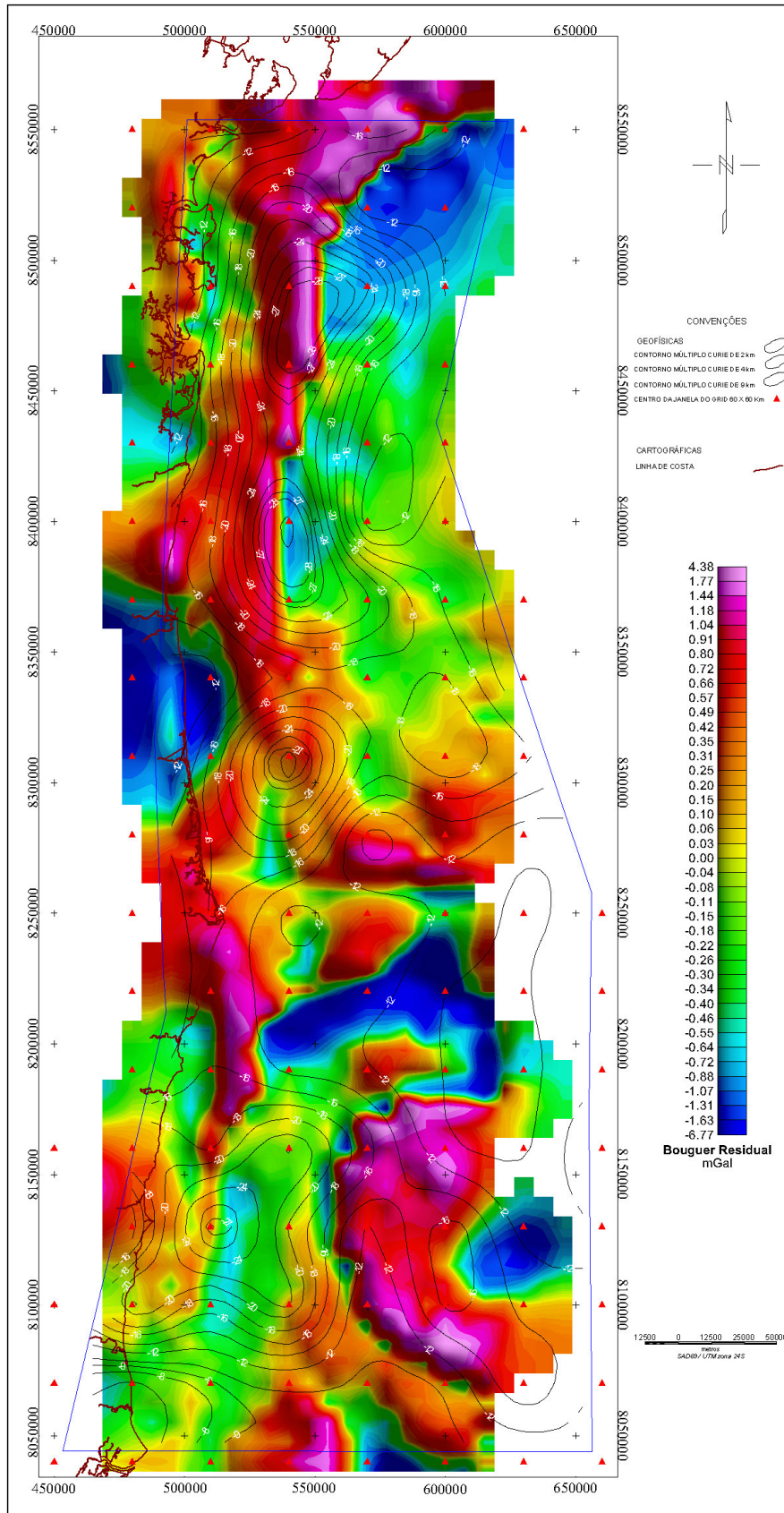


Figura 6 : Mapa de Contorno Curie sobreposto sobre o grid Bouguer Residual