



Admitância Bouguer e Isostasia do Norte da Província Borborema (NE do Brasil)

Roberto Gusmão de Oliveira, CPRM-Serv. Geol. do Brasil; Walter Eugênio de Medeiros, DFTE/CCET/UFRN

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica. Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.

Resumo

O emprego do método espectral da admitância Bouguer revelou que a condição isostática do norte da Província Estrutural da Borborema (PB) é compatível com um modelo em que ocorrem carregamentos combinados na superfície e na base da crosta, com a carga da base sendo 15 vezes maior que a do topo. Em adição, a PB possui uma crosta inferior anormalmente densa. A correlação desses resultados com os eventos de epirogenia e magmatismo durante o Cenozóico sugere que esse modelo isostático é compatível com um processo de *underplating* magmático na base da crosta.

Introdução

Neste trabalho foi empregada a técnica espectral da admitância Bouguer (Dorman & Lewis 1970) para a avaliação das condições isostáticas da região norte da Província Estrutural da Borborema, localizada no Nordeste do Brasil (Figura 1). Os resultados obtidos foram comparados com modelos teóricos de carregamentos combinados na superfície e na base da crosta (Forsyth 1985), e integrados com informações sobre a epirogenese do Planalto da Borborema e o magmatismo cenozóico. As conclusões obtidas sugerem que um evento de *underplating* magmático na base da crosta durante o Cenozóico explicaria a alta razão entre os carregamentos (15 x maior para o da base da crosta) e o soerguimento do Planalto da Borborema.

Contexto Geotectônico

A Província Borborema é um domínio geológico-estrutural localizado no Nordeste Oriental do Brasil, limitado a sul pelo Cráton do São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a norte e leste pelas bacias sedimentares da margem costeira (Figura 1). O seu arcabouço tectônico foi estruturado durante a Orogênese Brasiliana (em torno de 0,6 Ga) no final do Neoproterozóico (Almeida *et al.* 1977). No Mesozóico, ocorreu a separação do Supercontinente Pangea, que formou a margem continental e as bacias interiores e marginais. Após a separação entre a América do Sul e a África, já na fase de deriva continental, dois importantes eventos ocorreram no Cenozóico: o Vulcanismo Macau e o soerguimento do Planalto da Borborema.

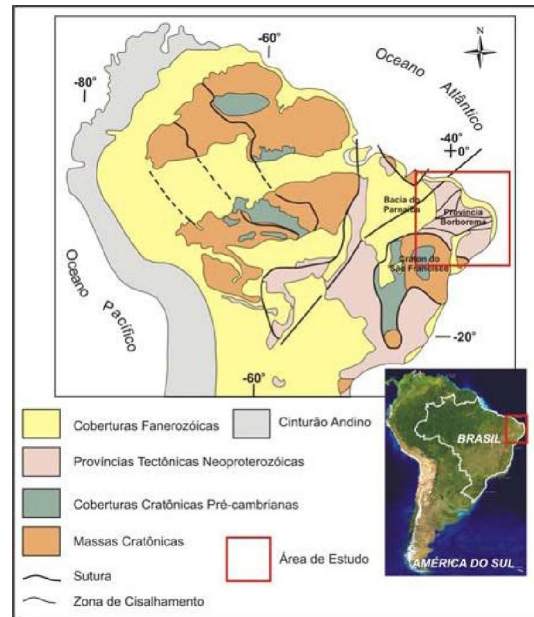


Figura 1: Localização geográfica e geotectônica da Província Borborema.

Dados Gravimétricos e Topográficos

O banco de dados gravimétricos da área continental utilizado neste trabalho foi construído a partir de informações originadas em várias organizações de pesquisa (UFRN/UFPA/UFOP, PETROBRÁS/ANP, CPRM/DNPM/ON, UFPE, USP e IBGE). Na área oceânica foram empregados dados processados dos satélites altimétricos GEOSAT e ERS-1 (Sandwell & Smith 1997). A interpolação da anomalia Bouguer em uma malha de 10 km x 10 km está apresentada na Figura 2. Os dados topográficos foram obtidos do SRTM (no continente), e dos satélites altimétricos GEOSAT e ERS-1 no oceano (Sandwell & Smith 1997). Foram interpolados em uma malha de 5 km x 5 km e estão apresentados na Figura 3.

Metodologia

Dorman & Lewis (1970) desenvolveram uma técnica espectral que permite quantificar o grau da compensação isostática associada com a topografia, mediante o fato de que a relação entre a topografia e a gravimetria pode ser

modificada em função do comprimento de onda, bem como, essa relação é diferente para diferentes modelos isostáticos. Por isso, ao analisar o conteúdo de frequência dos dados sobre uma determinada feição geológica e comparar o seu espectro com a previsão do modelo isostático (local ou regional), é possível determinar o esquema de compensação. Assim, Dorman & Lewis (1970), ao considerarem apenas cargas topográficas compensadas em profundidade, determinaram a componente gravitacional devida unicamente à compensação isostática da topografia. Nessa técnica, a Transformada de Fourier da anomalia gravimétrica $\Delta g(k)$ é relacionada com a Transformada de Fourier da topografia $H(k)$:

$$Z(k) = \frac{\text{Saída}}{\text{Entrada}} = \frac{\Delta g(k)}{H(k)}$$

O resultado $Z(k)$ é denominado função resposta isostática, ou simplesmente admitância, a qual é a função (em número de onda k) que modifica a topografia para produzir a anomalia gravimétrica.

No continente, por meio da admitância Bouguer é possível derivar dois modelos simples de flexura: um modelo onde o carregamento ocorre a partir da superfície; e o outro onde o carregamento poderá estar enterrado na crosta, na base da crosta, ou no manto litosférico (Forsyth 1985). É possível também fazer uma abordagem em que há uma combinação de carregamentos na superfície e enterrado. Para esse tipo de carregamentos, Forsyth (1985) derivou uma expressão da admitância Bouguer, que leva em conta a possibilidade dos dois tipos de carregamentos poderem estar fora de fase, ou seja, deslocados um em relação ao outro. Além disso, ele introduziu o conceito de taxa de carregamento (f_i), que define a razão entre o peso da carga enterrada na litosfera em relação ao peso da carga aplicada na superfície.

A maneira mais comum de abordar o problema da estimativa de $Z(k)$ é dividir a Transformada de Fourier da função de saída pela Transformada de Fourier da função de entrada. Porém, esse método ignora a presença de ruídos. Desse modo, uma melhor aproximação é obtida pela divisão dos espectros cruzados das funções de entrada e saída pela potência da função de entrada. Então, ao empregar a técnica do espectro cruzado (McKenzie & Bowin 1976), a admitância complexa para um número de onda qualquer será dada por:

$$Z(k) = \frac{C_c}{E_i}$$

onde C_c é espectro cruzado da anomalia gravimétrica e da topografia, e E_i é a potência da topografia. C_c e E_i são dados por:

$$C_c = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \Delta g_m(k) H_m^*(k)$$

$$E_i = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N H_m(k) H_m^*(k)$$

em que o asterisco denota o complexo conjugado e $\Delta g(k)$ e $H(k)$ são as Transformadas de Fourier dos dados de

anomalia ar-livre e da topografia/batimetria, respectivamente. N é o número de perfis.

O método de cálculo da admitância Bouguer descrito acima foi efetuado nos perfis P1, P2 e P3, que cruzam a região centro-norte do Planalto da Borborema e a faixa centro-sul do alinhamento vulcânico Macau-Queimadas (figuras 2 e 3). Não foram empregados perfis localizados muito próximos da Margem Equatorial porque os resultados são prejudicados pelo efeito do afinamento crustal na anomalia Bouguer. Também não foram empregados perfis localizados ao sul do paralelo 7°S por causa da contaminação dos dados por fontes intracrustais, sobretudo por aquelas associadas com as bacias sedimentares interiores. O espalhamento inerente à estimativa espectral foi suavizado por meio de um filtro de *spline* cúbico.

Resultados, Discussões e Conclusões

Na Figura 4 o resultado do cálculo da admitância Bouguer é comparado com o modelo teórico de carregamento combinado na superfície e na base da crosta (Forsyth 1985). Nesse caso, foi empregada uma taxa de carregamento $f_i = 15$. Ou seja, se estimou que a carga enterrada na base da crosta é 15 vezes maior do que a carga na superfície (a topografia). Os modelos foram construídos para crostas com espessuras (Z_t) de 26, 30, 33 e 35 km. Os resultados apresentaram uma concordância muito boa entre os dados observados, para a posição do pico e dos flancos, em relação a um modelo de crosta com espessura de 33 km e espessura elástica efetiva (T_e) igual a 10 km.

O conceito de isostasia permite inferir que os eventos tectônicos, tais como soerguimento e vulcanismo (associado ou não com anomalias térmicas no manto) são as principais causas ou, alternativamente, reflexos de desequilíbrio do sistema litosfera-manto astenosférico, ou crosta-manto litosférico. O norte da **PB** foi muito afetado por eventos tectônicos e magmáticos recentes (Almeida *et al.* 1988, Jardim de Sá 2001). Também, nessa região o fluxo térmico e a atividade sísmica são expressivos. Além disso, na região nordeste da província ocorre uma anomalia positiva de geóide significativa. Ussami *et al.* (1999) interpretaram os resultados da modelagem dos dados de geóide na **PB** e sugeriram a existência ainda de uma anomalia térmica presente na parte norte da província. Também Jardim de Sá (2001), com base em dados estruturais que indicaram a ação de uma tectônica distensional de grande amplitude, propôs na região nordeste da **PB** a atuação de um domeamento térmico intraplaca, associado com o vulcanismo cenozóico. Os resultados apresentados por Oliveira (2008) descartam o modelo de pluma, e indicam que o magmatismo cenozóico pode ter sido gerado por um mecanismo de convecção em pequena escala produzido por contraste de propriedades físicas na interface da raiz litosférica fria com o manto adjacente quente.

O vulcanismo cenozóico da Província Borborema apresenta um pequeno volume de rochas na superfície. No entanto, na região oceânica, em torno da província, a

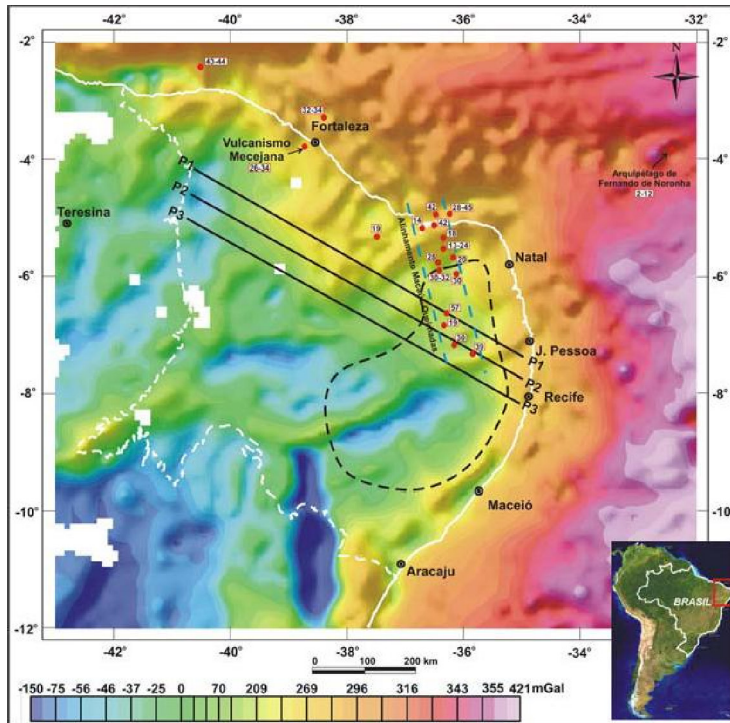


Figura 2: Anomalia Bouguer em malha interpolada com dimensão de 10 km x 10 km. Imagem sombreada (Inc. = 35°, Dec. = 315°Az). Os traços pretos correspondem aos perfis P1, P2 e P3, amostrados com espaçamento de 10 km, e empregados nos cálculos da admitância Bouguer. A linha branca tracejada é o limite da Província Borborema na definição clássica de Almeida *et al.* (1977). Estão indicados o limite do Planalto da Borborema (linha preta tracejada) e as ocorrências de vulcanismo cenozóico (pontos vermelhos, com as respectivas datações). Observa-se uma concentração ao longo do alinhamento vulcânico Macaú-Queimadas.

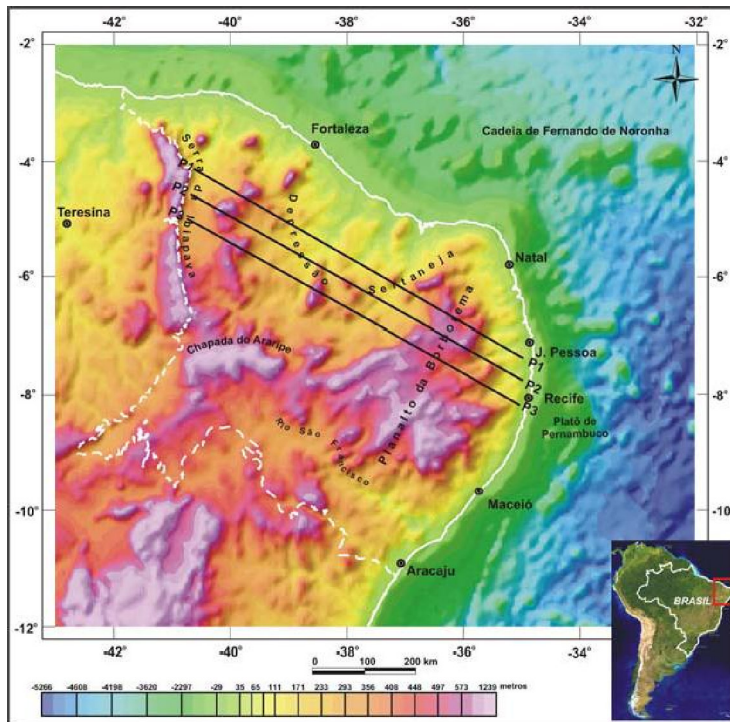


Figura 3: Superfície digital da elevação em malha interpolada com dimensão de 5 km x 5 km. Imagem sombreada (Inc. = 35°, Dec. = 315°Az). Os traços pretos correspondem aos perfis P1, P2 e P3, amostrados com um espaçamento de 10 km e empregados nos cálculos da admitância Bouguer. A linha branca tracejada é o limite da Província Borborema na definição clássica de Almeida *et al.* (1977).

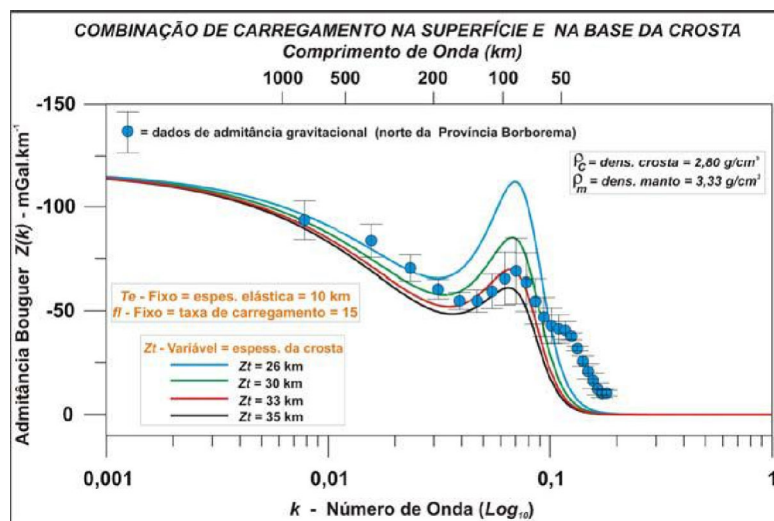


Figura 4: Comparação da admitância Bouguer estimada a partir dos perfis P1, P2 e P3 (figuras 7.2 e 7.3) com as curvas teóricas para um modelo de carregamento combinado na superfície e na base da crosta, com taxa de carregamento $f_l = 15$. Observa-se que ocorre uma boa concordância com a curva teórica para uma crosta com espessura de 33 km em uma litosfera com espessura elástica efetiva (T_e) de 10 km. A barra de erro corresponde a um desvio padrão.

interpretação de dados de anomalia ar-livre sugere que esse vulcanismo pode ser muito volumoso (Oliveira 2008). O emprego da técnica espectral para o cálculo da admitância Bouguer efetuado acima e a sua comparação com modelos isostáticos teóricos revelaram que a região norte da PB é compatível com um modelo isostático em que ocorrem carregamentos combinados na superfície e na base da crosta (Figura 4). A razão entre esses carregamentos (f_l - taxa de carregamento) é 15 vezes maior para o carregamento da base, em relação ao carregamento no topo. Além do mais, os dados apresentam uma tendência a se ajustar com um modelo de crosta que possui uma superfície de compensação mais rasa que a *Moho*, ou com uma transição de densidade larga entre a crosta mais leve e o manto mais denso. Esses dados permitem inferir que um modelo de *underplating* magmático na base da crosta pode explicar o baixo volume de rochas magmáticas identificadas na superfície do continente, ou seja, um grande volume teria ficado aprisionado na base da crosta continental. Além disso, pode explicar, também, a epirogênese do Planalto da Borborema por um processo de carregamento na base da crosta. Esse modelo de *underplating* magmático é corroborado pelos resultados obtidos por França *et al.* (2006), para o estudo da crosta do NE-Brasil com uso da função do receptor, que sugerem uma segunda descontinuidade de velocidade sísmica intracrustal, com razões V_p/V_s altas, na crosta da região do Planalto da Borborema.

Referências

Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B. & Fuck H.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SBG-NE, Simp. Geol. NE, 8^o, Camp. Grande, Boletim 6, p.363-391.

Almeida F.F.M., Carneiro C.D.R., Machado Jr. D.L. & Dehira L.K. 1988. Magmatismo Pós-Paleozóico no

Nordeste Oriental do Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, **18**(4):451-462.

Dorman L.M. & Lewis B.T.R. 1970. Experimental Isostasy. 1. Theory of the determination of the Earth's isostatic response to a concentrated load. *Journal of Geophysical Research*, **75**:3,355-3,365.

Forsyth D.W. 1985. Subsurface Loading and Estimates of the Flexural Rigidity of Continental Lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, **90**(B14):12,623-12,632.

França G.S., Assumpção M. & Ferreira J.M. 2006. O estudo da crosta no NE do Brasil, usando Função Receptor. In: SBGF, Simp. Bras. Geof., 2^o, Natal, Estudo da Crosta, *Resumos Expandidos*, 1 cd-rom.

Jardim de Sá E.F. 2001. Tectônica cenozóica na margem equatorial brasileira da Província Borborema, Nordeste do Brasil (A contribuição da geologia estrutural no continente). In: SBG/NE, SNET, 8^o, Recife, *Boletim de Resumos Expandidos*, p.25-28.

McKenzie D. & Bowin C. 1976. The relationship between bathymetry and gravity in the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, **81**(11):1903-1915.

Oliveira R.G. 2008. *Arcabouço Geofísico, Isostasia e Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de Sua Margem Continental (Nordeste do Brasil)*. Tese de Doutorado, PPGG/CCET/UFRN, Natal.

Sandwell D.T. & Smith W.H.F. 1997. Marine Gravity from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry. *Journal of Geophysical Research*, **102**(B5):10,039-10,054.

Ussami N., Molina E.C. & Medeiros W.E. 1999. Novos vínculos sobre a evolução térmica da margem continental Leste do Brasil In: SBG/BA-SE, SNET, 7^o, Lençóis-BA, *Resumos Expandidos*, Seção 3, p.20-23.