



## Relevo do embasamento e da Moho na borda norte da Bacia do Paraná através de dados gravimétricos.

Vanderlei C. Oliveira Jr., IAG/USP, Brasil

Yára R. Marangoni, IAG/USP, Brasil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> 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 11<sup>th</sup> 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

This paper presents the results from an iterative inversion that considers all Bouguer anomaly signal and different mass sources at each step. Results are compared with independent geophysical and geological information. Relief from mantle-crust and basement interfaces are provided. The study area shows Moho going deeper towards E, with depths from 38 to 42 km. Basement has two grabens of 4 and 3 km deep with a horst in between.

### Introdução

Há uma década atrás, um levantamento gravimétrico na borda norte da Bacia do Paraná apontou uma feição gravimétrica com sinal negativo, alongada na direção NS, de difícil correlação com as camadas sedimentares observadas em superfície. Na modelagem direta de perfis cortando essa estrutura Vidotti et al. (1998) consideraram as hipóteses de graben no embasamento ou a presença de rochas menos densas dentro do embasamento.

Nos últimos três anos o estudo da estrutura da crosta sob estações sismográficas dentro da bacia usando a função do receptor forneceu informações sobre a profundidade do embasamento (Costa, 2006) e da Moho (Bianchi, 2008). Essas informações independentes e novos levantamentos gravimétricos, que permitiram definir outra feição negativa a leste da estudada anteriormente, possibilitaram a inversão 3D em uma tentativa de responder onde as massas anômalas estão alojadas.

Inicialmente foram gerados modelos que descrevem fontes de massa conhecidas com base em informações a priori. A contribuição gravimétrica desses modelos foi removida da anomalia Bouguer e a anomalia resultante foi separada em uma componente regional e outra residual. A primeira foi associada ao relevo da interface crosta-manto e a outra ao da interface bacia-embasamento. O cálculo dos modelos que descrevem essas interfaces foi feito por inversão 3D. Várias informações geofísicas e geológicas, como a profundidade do embasamento e da Moho em alguns locais na área, espessura dos sedimentos e da camada de basaltos, serviram para controlar os resultados obtidos.

Os critérios de aceitação dos modelos obtidos são: (1) a soma da anomalia gravimétrica associada a cada modelo gerado por inversão ou por informações a priori deve reproduzir a anomalia Bouguer observada e (2) a geometria dos modelos deve ser validada pelas informações a priori. Quando algum desses critérios falha é necessário procurar modelos alternativos para explicar a discrepância. Dois modelos alternativos foram propostos neste trabalho: variação do contraste de densidade na Moho e espessamento dos basaltos da formação Serra Geral. O primeiro modelo está relacionado com a idéia de underplating proposta por Molina et al. (1988) para explicar um alto gravimétrico local a sul da área estudada. O outro modelo concorda com o que foi proposto recentemente por Bologna et al. (2008) como forma de explicar resultados de levantamentos magnetotélúricos na borda NE da bacia do Paraná.

Neste trabalho todos os comprimentos de onda da anomalia Bouguer são explicados considerando-se as várias fontes. As informações geofísicas e geológicas não são usadas como vínculos na inversão, mas como controle na aceitação dos resultados. Como elas estão presentes em várias escalas do modelo, os resultados obtidos apresentam menor ambigüidade.

### Informações geofísicas e geológicas da área de estudo

*Dados gravimétricos:* A área de estudo compreende parte da borda norte da bacia do Paraná. A região está recoberta por 4590 estações gravimétricas obtidas ao longo de várias décadas, pelo IAG-USP e pelo IBGE. Os dados gravimétricos estão ligados à Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RBGF; Escobar, 1980). Foi utilizada a fórmula internacional de gravidade de 1967 (GRS67; Heiskanen e Moritz, 1967) para a correção de latitude e a densidade de 2,67 g/cm<sup>3</sup> para a correção de Bouguer. O erro máximo na anomalia Bouguer é de 0,5 mGal. A figura 1 mostra o mapa de anomalia Bouguer com a localização das estações gravimétricas. Neste mapa nota-se duas feições alongadas, na direção NS, com amplitude de 20 a 30mGal abaixo do nível médio de -60mGal para a bacia.

*Espessura do embasamento e da Moho:* As ondas sísmicas de um terremoto distante trazem informações sobre a fonte, o percurso pelo manto da Terra, e a estrutura local sob a estação registradora. As ondas P de um sismo distante incidem nas camadas abaixo da estação com um ângulo próximo da vertical. A deconvolução da componente radial pela componente vertical remove quase todos os efeitos da fonte e do percurso no manto. O traço correspondente a esta função

de transferência, chamada “função do receptor” (FR), contém essencialmente todas as conversões de P para S nas várias interfaces abaixo da estação (Langston, 1979; Ammon, 1991; Wilson & Aster, 2003). Na área de estudo tem-se dados da função do receptor de 12 estações que permitem estabelecer a profundidade da descontinuidade de Moho (9 estações, círculos vermelhos na Fig. 1) e do embasamento (11 estações, triângulos pretos na Fig. 1). Os resultados estão na tabela 1.

*Informações de furo de sondagem:* A descrição geológica dos três furos de sondagem na área de estudo, 2-JA-1-GO, 2-RA-1-MS e TL (localizados na Fig. 1), mostrou que os furos JA e RA atravessam vários sills de diabásio. O poço RA alcançou o embasamento em 3475 m e atravessou cerca de 600 m de material ígneo no total. Os furos JA, com 2107 m, e TL, com 4983 m, não encontraram o embasamento cristalino.

*Isópacas da formação Serra Geral:* A formação Serra Geral, segundo mapa de Melfi et al. (1988), apresenta espessuras que variam de 1500 a 0 m do sul para o norte na área de estudo, desaparecendo próximo à borda norte.

*Outras informações geológicas usadas neste trabalho:* O conjunto de rochas sedimentares e vulcânicas que constituem a bacia foi depositado em ambientes tectônicos resultantes da evolução do Gondwana ao longo do tempo geológico e apresentam idades que variam do Neo-Ordoviciano ao Cretáceo. Segundo mapas de Zalan et al. (1990) as seqüências sedimentares que vão do Siluriano até o Jurássico Inferior parecem ter sofrido influência de uma antiga estrutura na direção N-S durante o período de deposição.

As informações sobre a profundidade do embasamento, da Moho e presença de rochas básicas servem para testar as várias etapas da separação das fontes de massa e inversão e também servir como informações a priori.

### Metodologia

Uma interface que separa dois meios homogêneos (com densidades distintas) pode ser observada em vários cenários geológicos, tais como derrames de lava (interface entre o derrame e a rocha encaixante), bacias sedimentares (interface entre a bacia e o embasamento), Moho (interface entre a crosta e o manto), entre outras. Essas interfaces podem ser representadas por um modelo de prismas retos, retangulares e justapostos, tal que a atração gravitacional destas pode ser aproximada pela soma da atração de cada prisma. A atração gravitacional desses prismas possui soluções analíticas, que são preferíveis em relação a aproximações numéricas, uma vez que estas podem falhar nas proximidades ou dentro dos prismas (Li & Chouteau, 1998). Dentre os métodos utilizados na solução desse problema, dois grupos se destacam. O primeiro resolve como um problema de otimização, onde, a partir de uma solução inicial dada pelo intérprete, a função a ser minimizada (função objetivo) é norma do resíduo entre os dados preditos pelo modelo e os dados observados (anomalia gravimétrica). O segundo grupo de métodos parte de uma estimativa inicial, que é feita com base nos

dados. Essa estimativa é refinada de forma iterativa, tal que a correção na profundidade de um prisma depende apenas do resíduo entre o modelo e os dados calculado sobre o seu topo (Bott, 1959; Rao et al. 1990).

Foi desenvolvida uma metodologia similar (Oliveira, 2008) àquela proposta por Bott (1959) e Rao et al. (1990) considerando prismas retos justapostos com densidade conhecida e topo fixo. Nessas condições, a profundidade dos prismas é ajustada iterativamente até que haja convergência dentro de limites estabelecidos pelo intérprete. Essa metodologia foi utilizada para modelar as três interfaces: a interface entre as rochas ígneas da formação Serra Geral e os sedimentos, entre os sedimentos e o embasamento e entre a crosta e o manto. Os procedimentos utilizados são descritos abaixo:

**Passo 1:** Usando mapas de isópacas e a coluna estratigráfica da área de estudo (Milani, 1997; Zalán et al. 1990), construíram-se modelos da formação Bauru (Bau) e Serra Geral (SG). O topo do primeiro é fixo na superfície e o contraste de densidade utilizado foi de  $-0,13 \text{ g/cm}^3$  em relação ao embasamento. A base do modelo Bau serviu como topo para o modelo SG, cujo contraste de densidade é de  $0,22 \text{ g/cm}^3$  (Cônego, 2008). Calculou-se a anomalia gerada por Bau (ABau) e SG (ASG) e estas foram removidas da anomalia Bouguer (AB). A anomalia resultante foi denominada AB-ABau-ASG.

**Passo 2:** A anomalia AB-ABau-ASG foi continuada para cima até 100 km e a anomalia resultante foi utilizada na inversão para calcular o modelo da interface crosta-manto (M). Este tem o topo fixo em um nível de referência a uma profundidade de 36 km e o contraste de densidade utilizado entre a crosta inferior e o manto é de  $+0,5$  ou  $-0,5 \text{ g/cm}^3$ , dependendo se a base do prisma está acima ou abaixo do nível de referência, respectivamente. Esses valores foram definidos com base nos trabalhos de Molina et al. (1988) e Vidotti et al. (1998).

**Passo 3:** A anomalia do modelo M foi calculada (AM) e removida da anomalia AB-ABau-ASG, resultando na anomalia AB-ABau-ASG-AM. Essa foi utilizada na inversão para gerar um modelo da interface bacia-embasamento (MB) (fig. 3), com o topo delimitado pela base do modelo SG e contraste de densidade  $-0,12 \text{ g/cm}^3$ .

**Passo 4:** Observou-se uma grande discrepância entre o modelo MB e as informações a priori na parte sul da área de estudo. Essa discrepância foi minimizada removendo-se de AB-ABau-ASG-AM uma anomalia AD (fig. 4) e calculando-se um novo modelo de bacia (MB2) (fig. 7).

Por fim, a anomalia produzida por todos os modelos foi removida da anomalia Bouguer e algumas feições gravimétricas que restaram foram atribuídas a um espessamento do derrame de lavas na borda leste da bacia, tal como proposto por Bologna et al. (2008).

O erro associado às profundidades estimadas para todos os modelos foi calculado por meio de simulação de Monte Carlo, que consiste em perturbar os dados com um ruído aleatório e analisar estatisticamente o efeito dessa perturbação nos parâmetros. Os ruídos aleatórios

utilizados são amostras de uma população com distribuição de probabilidade normal (ou gaussiana), média zero e desvio padrão igual a 0,5, visto que essa é a estimativa máxima do erro na anomalia Bouguer.

### Resultados

O modelo do relevo da interface crosta-manto, M, (fig. 2) concorda com a maioria das informações a priori dentro do limite de erro. Além disso, vê-se que o modelo não é sensível a uma perturbação média de 0,5 mGal nos dados.

O modelo de embasamento MB (fig. 3) apresenta grande discrepância em relação às informações a priori, principalmente na região sul. Para contornar esse problema foi calculada uma anomalia AD (fig. 4) que deve ser removida de AB-Abau-ASG-AM para que a discrepância entre o modelo MB e as informações a priori diminua. Para a anomalia AD foram atribuídas duas possíveis causas: (1) aumento da espessura do derrame de lavas, (2) variação do contraste de densidade entre a crosta e o manto. Pela fig. 5 nota-se que seria necessário um grande espessamento do derrame de lavas, alcançando valores de até 5200 m, para que a anomalia fosse ajustada. Na fig. 6 observa-se que seria necessária uma variação máxima em torno de  $0,24 \text{ g/cm}^3$  na densidade do modelo M, o que corresponde a um contraste de densidade entre a crosta e o manto de  $-0,26 \text{ g/cm}^3$ . Essa variação pode ser interpretada como resultado da contaminação crustal devido à intrusão de material proveniente do manto e da diminuição da densidade do manto residual nesse processo. A remoção da anomalia AD resultou em um novo modelo de embasamento MB2 (fig. 7) que se mostra de acordo com a maioria das informações a priori.

A fig. 8 mostra a anomalia Bouguer observada menos a anomalia gerada por todos os modelos (Bauru (Bau), Serra Geral (SG), Moho (M), embasamento (MB) e AD). Nota-se que os valores oscilam em torno de zero, exceto nas bordas leste e oeste da bacia, onde aparecem feições positivas. À leste, Bologna et al. (2008) sugerem um espessamento do derrame de lavas, podendo atingir até  $\sim 1,5 \text{ km}$  de profundidade. A fig. 9 apresenta um modelo SG2 para esse espessamento comparado ao modelo para o Serra Geral SG. A inserção do modelo SG2 no lugar do modelo SG resultou no quase desaparecimento de feições positivas residuais na borda leste, como pode ser observado na comparação entre as figs. 8 e 10.

### Conclusões

A metodologia desenvolvida por Oliveira (2008) e utilizada aqui se mostrou adequada para estimar o relevo do embasamento (fig. 7) e da Moho (fig. 2) na área de estudo, a partir da anomalia Bouguer. A discrepância entre esses modelos e as informações a priori podem ser explicadas por um espessamento dos basaltos e/ou uma variação lateral da densidade na Moho, contudo se faz necessário estimar a contribuição de cada uma dessas fontes.

A interface entre crosta e manto atinge profundidades da ordem de 43 km na área (fig. 2). Os valores maiores na borda leste precisam ainda ser entendidos, mas é

possível que isso seja um efeito de borda resultante da continuação para cima. O embasamento (fig. 7) mostra ótima concordância com os dados da função do receptor, com dois baixos, de  $\sim 4000$  e  $\sim 2500$  m, concordantes com os baixos de anomalia Bouguer da fig. 1 e um alto estrutural entre eles. O modelo prevê valores maiores do embasamento em direção a sul, semelhante aos dados de FR.

### Agradecimentos

Apoio financeiro da FAPESP, processos n. 06/00584-9 e 05/51035-2.

### Referências

- Ammon, C.**, 1991, The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 2504-2510.
- Bianchi, M.B.**, 2008, Variações da estrutura da crosta, litosfera e manto para a Plataforma Sul Americana através de funções do receptor para ondas P e S, Tese, IAG-USP, São Paulo, 134f..
- Bologna, M.S., Padilha, A.L., Vitorello, I., e Pádua, M.B.**, 2008, Unraveling crustal and upper mantle electrical structures beneath the northeastern border of the Paraná basin, SE Brazil, with magnetotellurics, 19th Inter. Workshop on EM Induction in the Earth, Beijing.
- Bott, M.H.P.**, 1959, The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 3, 63-67.
- Cônego Jr., D., e Marques, L.S.**, 2008, Determinação das densidades de rochas básicas intrusivas e extrusivas da província magmática do Paraná. XIII Simp. IC, IAG-USP, 92.
- Costa, T.N.**, 2006, Estudo de espessura sedimentar na Bacia do Paraná com função do receptor de alta frequência, Dissertação, IAG-USP, São Paulo, 92f.
- Escobar, I.P.**, 1980, Métodos de levantamentos e ajustamento de observações gravimétricas visando a implantação da rede gravimétrica fundamental brasileira, Rio de Janeiro, ON, 57 p.
- Heiskanen, W.A., e Mortz, H.**, 1967, *Physical Geodesy*, Freeman, San Francisco, 364 pp
- Langston, C.A.**, 1979, Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, *J. Geophys. Res.*, 85, 4749-4762.
- Li, X., e Chouteau, M.**, 1998, Three-dimensional gravity modeling in all space, *Surveys in geophysics*, 19, 339-368.
- Melfi, A.J., Piccirillo, E.M., e Nardy, A.J.R.**, 1988, Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin – An introduction. In: Piccirillo, e Melfi, (eds.), *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin – petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico Publishers, 1-13.
- Milani, E.J., e Thomaz Filho, A.**, 2000, Sedimentary basins of South America. In: Cordani et al. (eds.),

Tectonic Evolution of South America, Rio de Janeiro, 389-449.

**Molina, E.C., Ussami, N., Sá, N.C., Blitzkow, D., e Miranda Filho, O.F., 1988,** Deep crustal structure under the Paraná Basin (Brazil) from gravity study. In: Piccirillo, e Melfi, (eds.). The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin – petrogenetic and geophysical aspects. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico Publishers, 271-283.

**Oliveira Jr., V.C., 2008,** Modelagem gravimétrica 3D da borda norte da Bacia do Paraná. Trabalho de Graduação, IAG-USP.

**Rao, B., Prakash, M.J., e Babu, N.R., 1990,** 3D and 21/2D modeling of gravity anomalies with variable density contrast, Geophysical Prospecting, 38, 411-422.

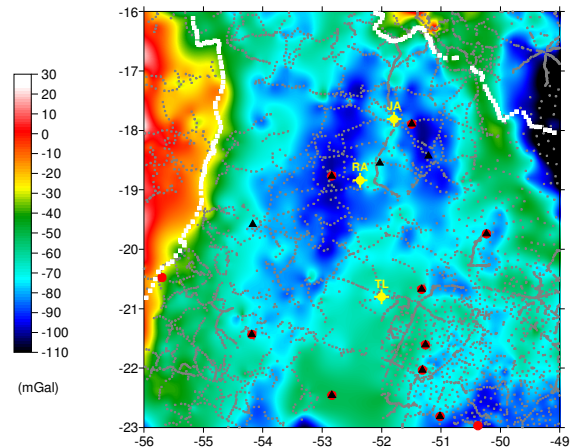
**Vidotti, R.M., Ebinger, C.J., e Fairhead, J.D., 1998,** Gravity signature of the western Paraná basin, Brazil, Earth and Planetary Science, 159, 117-132.

**Wilson, D., e Aster, R., 2003,** Imaging crust and upper mantle seismic structure in the southwestern United States using teleseismic receiver functions, The Leading Edge, 22, 232-237.

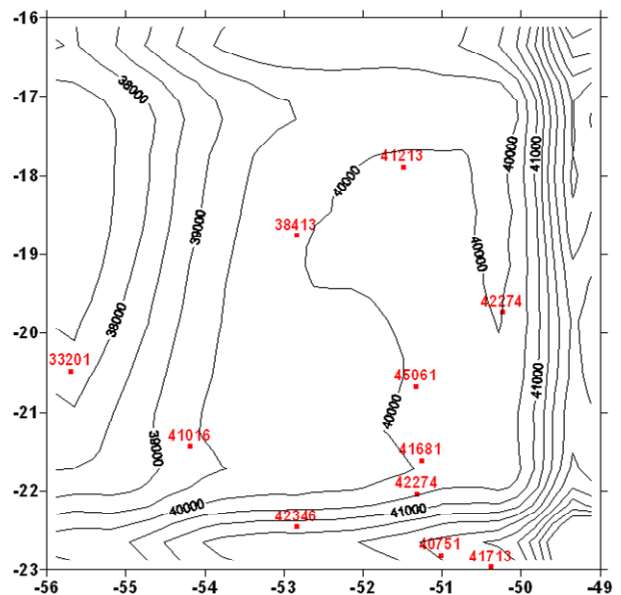
**Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C., Marques, A., Astolfi, M.A.M, Vieira, I.S., e Appi, V.T., 1990.** Bacia do Paraná. In: Origem e evolução de Bacias Sedimentares, Petrobrás, Rio de Janeiro, 135-164.

**Tabela 1:** Coordenadas (longitude/latitude), profundidades do embasamento, da Moho e os respectivos erros obtidos pela FR, em metros.

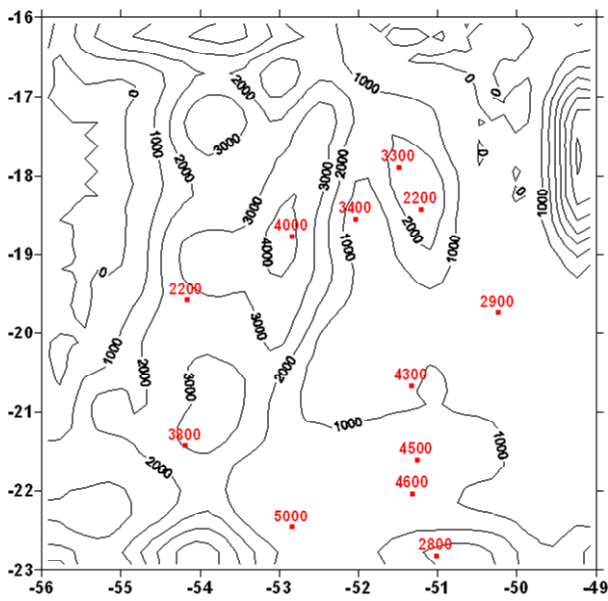
estação	coordenadas	Moho	embasamento
AGVB	-50,2/-19,7	42274±500	2900±200
AQDB	-55,7/-20,5	33201±1000	
APOB	-52,0/-18,6		3400±200
CANB	-50,4/-23,0	41713±2400	
CAPB	-51,0/-22,8	40751±500	2800±200
CCUB	-51,2/-18,4		2200±200
CDSB	-52,8/-18,8	38413±1000	4000±200
CMPA	-54,2/-19,6		2200±200
JATB	-51,5/-17,9	41213±2900	3300±200
NAVb	-54,2/-21,4	41016±1900	3800±200
PACB	-51,3/-21,6	41681±1500	4500±200
POPB	-52,8/-22,5	42346±300	5000±200
PPDB	-51,3/-22,0	42274±1500	4600±200
TRIB	-51,3/-20,7	45061±500	4300±200



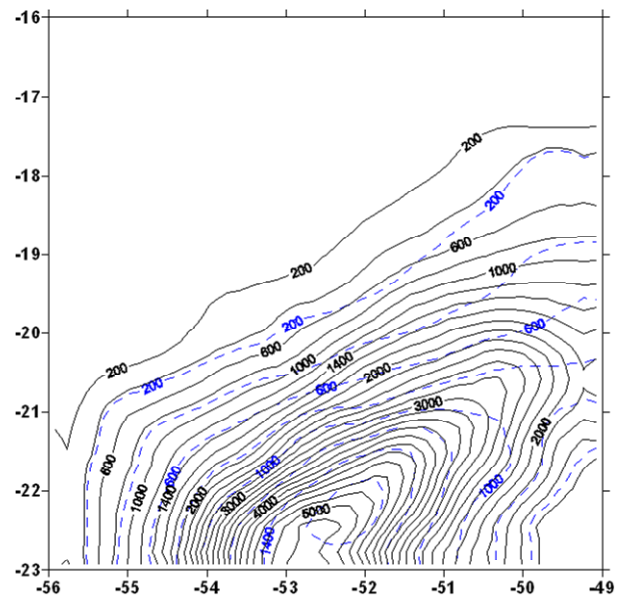
**Figura 1:** Mapa Bouguer (em mGal) e localização das informações a priori (poços, profundidades do embasamento, profundidades da Moho).



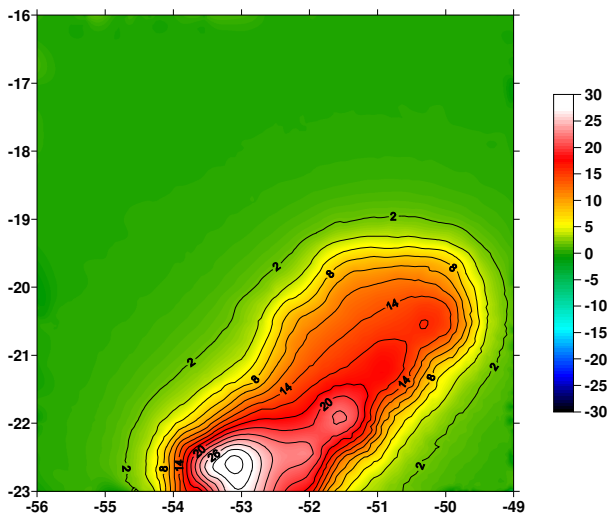
**Figura 2:** Modelo M para a Moho. Os valores estão em metros. Pontos vermelhos são as estações com determinações da FR.



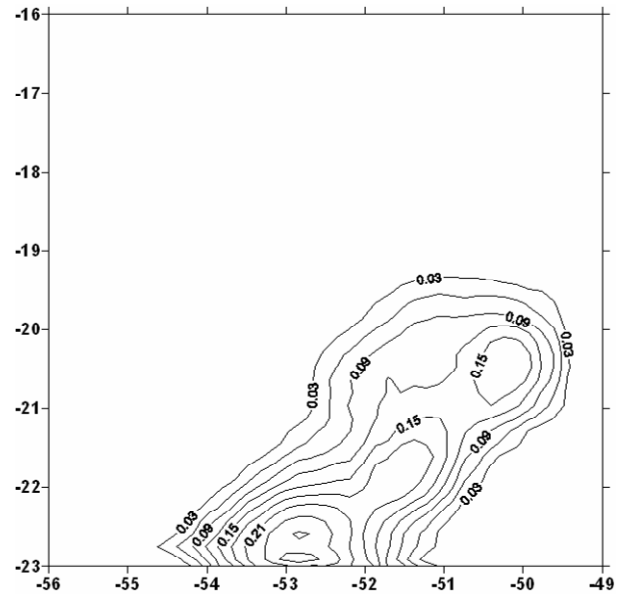
**Figura 3:** Modelo MB do embasamento. Os valores estão em metros. Pontos vermelhos são as estações com determinações da FR.



**Figura 5:** Espessura do derrame de lavas para que a anomalia AD seja ajustada (linhas cheias). Modelo SG (linhas pontilhadas em azul). Os valores estão em metros.



**Figura 4:** Anomalia AD removida dos dados para que a discrepância entre o modelo MB e as informações a priori diminua. Os valores estão em mGal.



**Figura 6:** Variação no contraste de densidade entre a crosta e o manto para que a anomalia AD seja ajustada. Os valores estão em  $\text{g/cm}^3$ .



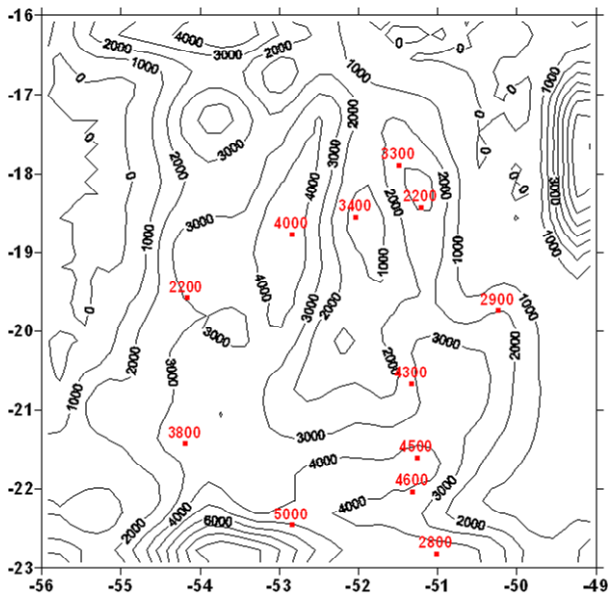


Figura 7: Modelo MB2. Os valores estão em metros.

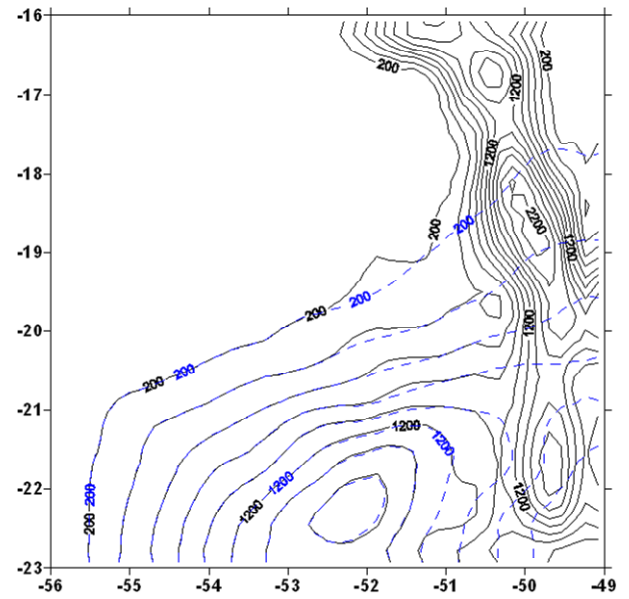


Figura 9: Aumento na espessura dos basaltos para explicar a feição positiva na borda leste (linhas cheias). Modelo SG (linhas pontilhadas). Os valores estão em metros.

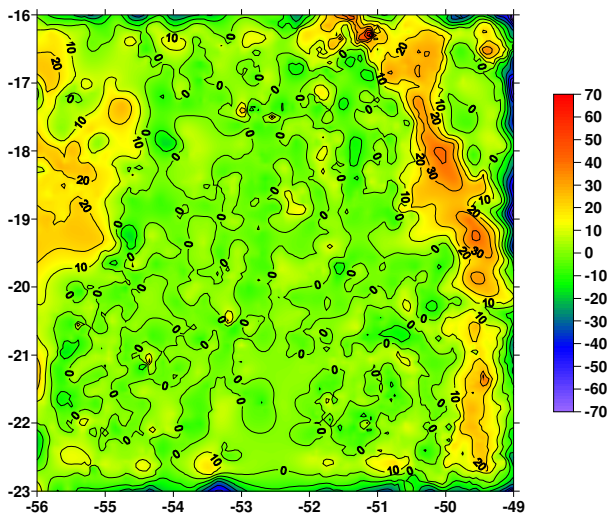


Figura 8: Diferença entre a anomalia Bouguer e a anomalia gerada por todos os modelos. Observam-se feições positivas nas bordas da bacia. Os valores estão em mGal.

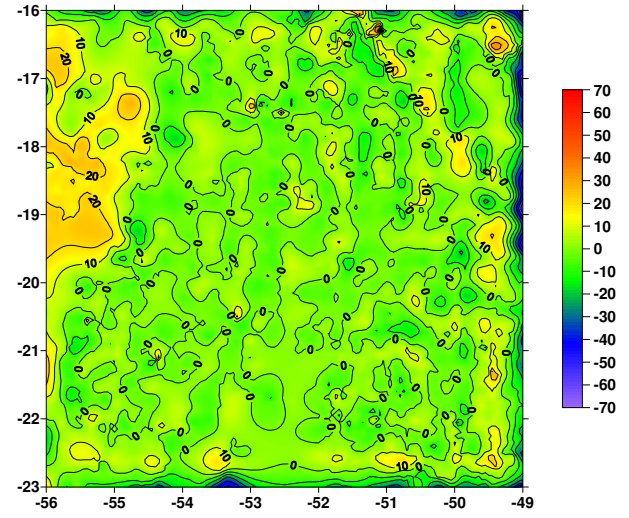


Figura 10: Diferença entre a anomalia Bouguer e a anomalia gerada por todos os modelos, incluindo o espessamento dos basaltos na borda leste. Os valores estão em mGal.