

Modelo do limite Crosta-Manto através do uso de Gravimetria aérea da região Central na Bacia Sedimentar do Paraná, Parte Meridional do Brasil.

Carreira, V. R. 1, La Terra, E. F. 2, Fontes, S. L. 3 ; 1, 2, 3 Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil.

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3 – 6, 2015. Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo delimitar o limite entre a crosta continental e a manto da região central da Bacia do Paraná, em complementação aos estudos magnetotélúricos que estão sendo promovidos pela Agência Nacional do Petróleo - ANP. O estudo das grandes estruturas do embasamento de bacias sedimentares são de suma importância tanto para o entendimento de sua evolução tectônico-estratigráfica, quanto para o estudo dos sistemas petrolíferos. A Bacia do Paraná, em especial, é uma bacia rasa, com depocentro estimado em 6.000m. Grandes derrames de lava são representados pela Formação Serra Geral, que, fornece a energia necessária para a maturação da matéria orgânica, existente nos principais *plays* exploratórios. E, estas intrusões aproveitaram os determinados grupos de lineamentos estruturais pretéritos para poderem se instalar. Foram utilizados dados potenciais gravimétricos pré-existentes neste estudo, tendo em vista que sua aplicação é bem consolidada na análise de grandes estruturas do embasamento de bacias sedimentares. Como principais resultados deste trabalho, destacam-se a delimitação da MOHO na área do levantamento, bem como a identificação do alto gravimétrico Paranapanema.

Introdução

A Bacia do Paraná é classificada como uma bacia cratônica marginal com domínio flexural de crosta. Está localizada no centro-sul da América do Sul. O seu formato é ovalado e irregular, a sua extensão, em área, abrange cerca de 1.100.000 Km² (Milani and Ramos, 1998a).

A maior porção de sua área está contida no Brasil. Contudo, a bacia abrange os países Paraguai, Uruguai e Argentina. A porção brasileira abrange os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, e Minas Gerais (Milani and Ramos, 1998b).

A geologia delimita tectonicamente a bacia na borda nordeste pelo arco do Alto Parnaíba que possui direção NW-SE; na borda leste pelo Arco de Ponta-Grossa; na borda Sul o Arco do Rio Grande, que une-se com em sua extensão noroeste com o Arco de Assunção, dando origem a borda oeste; a borda noroeste é limitada

pelo Arco de São Vicente. (Zalan and Wolf, 1987). Dentre os principais grupos de estruturas são notáveis três grupos de lineamentos: NW-SE, E-W, NE-SW. Cada grupo representante de um evento termo-tectônico distinto. O conjunto de lineamentos NW-SE são os mais antigos e estão relacionados ao evento termo-tectônico do Transamazônico, e, as zonas de falhas geológicas associadas a este evento foram reativadas durante o rifteamento do Atlântico Sul, no Cretáceo. Os lineamentos E-W, tiveram início a partir do Triássico e são paralelos às zonas de fratura oceânica, o que sugere uma ligação com o desenvolvimento do Atlântico Sul. Os lineamentos NE-SW são derivados do evento termo-tectônico Brasileiro e de seus cinturões móveis associados. Este último conjunto de lineamentos são isentos de diques de basalto (Borghi, 2002) *apud* (Milani and Zalan, 1999).

Em termos de sistemas petrolíferos convencionais, os principais *plays* exploratórios são bem conhecidos na literatura científica. São estes: o sistema petrolífero Ponta Grossa - Itararé/Rio Bonito; e o sistema petrolífero Irati - Rio Bonito/Pirambóia. As rochas geradoras desses sistemas são, respectivamente o folhelho Ponta Grossa e o folhelho Irati. E, seus reservatórios são, respectivamente os diamictitos do Grupo Itararé e os arenitos da Formação Rio Bonito e, no segundo sistema petrolífero, novamente os arenitos da Formação Rio Bonito e os arenitos da Formação Pirambóia. Por fim, a os basaltos e diabásios da Formação Serra Geral encerram as principais rochas que compõem os sistemas petrolíferos da Bacia. (Zalan and Wolf, 1987) (Franca and Potter, 1991)

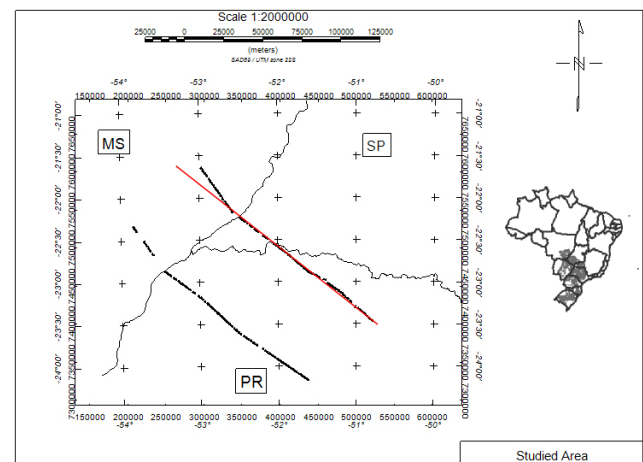


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. Os pontos pretos indicam a localização das estações MT, e, a linha em vermelho indica a localização do perfil modelado da MOHO.

A região de estudo, mostrada na Fig. 1, ocupa a porção central da Bacia do Paraná, entre os paralelos geográficos 25°30' e 21°00' S, 55°30' e 50° 30' W. Os dados são oriundos do aerolevanteamento magnetométrico 9.123/08-ANP-004.952 realizado entre 6 de abril de 2009 até 23 de maio de 2010.

O objetivo deste trabalho é contribuir com informações importantes sobre as principais elementos estruturais da área de estudo. Bem como, modelar uma seção 2D da MOHO na região de estudo.

Metodologia

A metodologia utilizada seguiu o *workflow* apresentado na Fig. 2, onde os principais passos são apresentados. Esta metodologia teve como objetivo principal organizar e extrair informações relevantes para sua comparação com a geologia da região.

A gravidade observada é a atração do elipsóide de referência acrescida dos efeitos da elevação acima do nível do mar (Free-air), do efeito da massa normal acima do nível do mar (Bouguer e Terreno), dos efeitos da variação de maré (Longman), dos efeitos de uma plataforma móvel (eötvös), dos efeitos das raízes dos orógenos (isoestática), e dos efeitos das variações de densidades (geologia) (Blakely, 1995). A metodologia utilizada no presente trabalho visou reduzir os efeitos descritos acima da gravidade normal.

A Fig. 2 descreve as etapas de processamento dos dados aerogravimétricos.

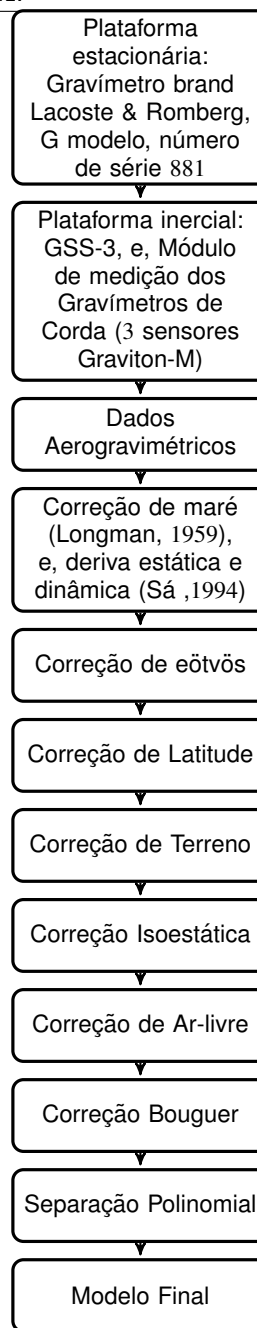


Figura 2: Organograma do fluxo seguido no processamento do dado gravimétrico.

As medidas adquiridas pelas plataforma móvel instalada nos aviões operavam a taxa de medição de $\frac{1}{3}s$. Os dados do aerolevanteamento foram compilados na tabela 1.

Tabela 1: Levantamento Aerogravimétrico

Característica	Distância (m)	Azimute
Taxa de amostragem $\frac{1}{5}$ s		
Espaçamento das linhas de vôo	6000	—
Espaçamento das linhas de controle	18000	—
Azimute de vôo	—	N-S
Azimute das linhas de controle	—	E-W
Média da altura de vôo	1800	—

A aquisição dos dados foram realizadas através de uma plataforma móvel aerolevantada, cujas linhas de vôo encontram-se equidistantes umas das outras. O mapa ilustrado na Fig. 3 aponta a distribuição espacial das linhas de aquisição gravimétricas.

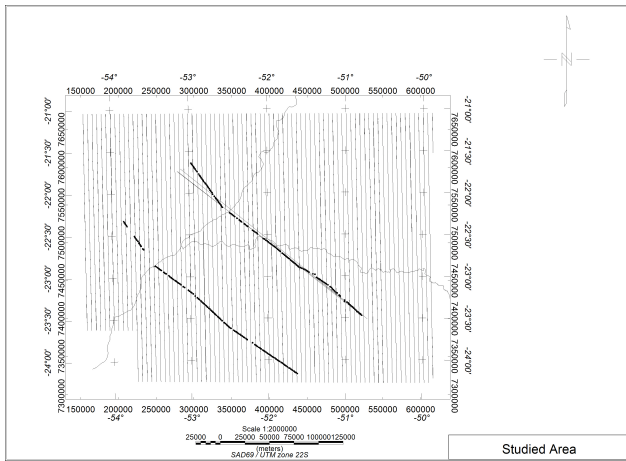


Figura 3: Distribuição espacial das linhas de vôo.

A metodologia utilizada foi a de modelagem direta através do método de lâminas empilhadas (Talwani, 1959). O algoritmo de inversão utilizado foi o de mínimos quadrados descrito por Marquardt (Marquardt, 1963).

Anomalias de gravidade medidas em corpos aonde o seu formato é desconhecido podem ser modeladas através de ajuste, por tentativa e erro, por densidades de polígonos, cujos vértices são variáveis. Casos as anomalias sejam oriundas de superfícies batimétricas ou topográficas conhecidas o procedimento de tentativa e erro é grandemente simplificado. Sendo assim, o procedimento reside em um ajuste dessa lâmina poligonal de acordo com a digitalização dos contornos de uma superfície topográfica conhecida.¹

¹No método de Talwani e Ewing, as massas são aproximadas para um conjunto de lâminas finas. Ploff deriva a atração gravitacional de uma camada de espessura finita com lados na vertical, e, cujos os topos e bases não superfícies aproximadas por polígonos. Analogamente ao método de Talwani e Ewing essas camadas poligonais podem ser posicionadas uma no topo da outra de maneira a aproximar a corpos de 3 dimensões com dimensões arbitrárias. Ploff, usa o método para calcular o efeito gravitacional do terreno e removê-lo do levantamento gravimétrico (Blakely, 1995).

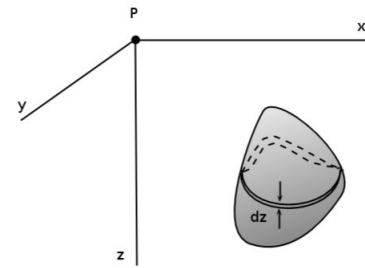


Figura 4: Aproximação de um corpo 3D para uma um conjunto de lâminas empilhadas. Cada lâmina é aproximada para um polígono.

A aproximação do cálculo da gravidade de um corpo 3D em uma seção 2D é descrita pela seguinte equação 1.

$$g = 2\gamma\rho \sum_{n=1}^N \frac{\beta_n}{1 + \alpha_n^2} \left[\log \frac{r_{n+1}}{r_n} - \alpha_n(\theta_{n+1} - \theta_n) \right] \quad (1)$$

Onde γ é a constante da gravitação universal, ρ é a densidade do polígono. α e β são coeficientes angular e linear da reta que liga a origem do sistema cartesiano de coordenadas, que está centrado na origem, até os vértices dos polígonos. r_n é a distância entre o vértice e a origem do sistema de coordenadas, e, θ é o ângulo formado entre a reta, que liga os vértices e o ponto (0,0) e o eixo x.

Resultados

Primeiramente foi realizado um teste controlado com o intuito de estudar a resposta da metodologia a uma situação geológica mais simples com duas camadas. A primeira delas possui densidade de $3,3g/cm^2$, e, a outra densidade de $0g/cm^2$ (Uieda et al., 2013, 2014).

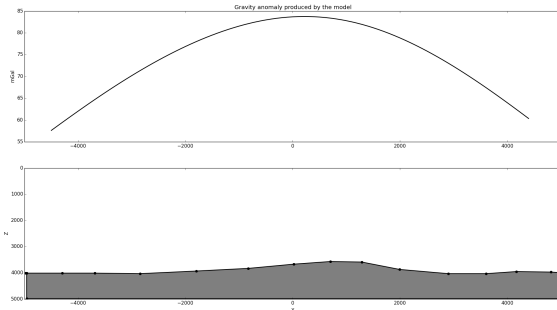


Figura 5: Modelagem direta de um dado sintético composto por duas camadas simples duas camadas simples.

Uma seção reta da área de estudo foi amostrada, nas divisas dos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, e, Paraná, na mesma localização do levantamento magnetotelúrico, mapa da Fig. 6.

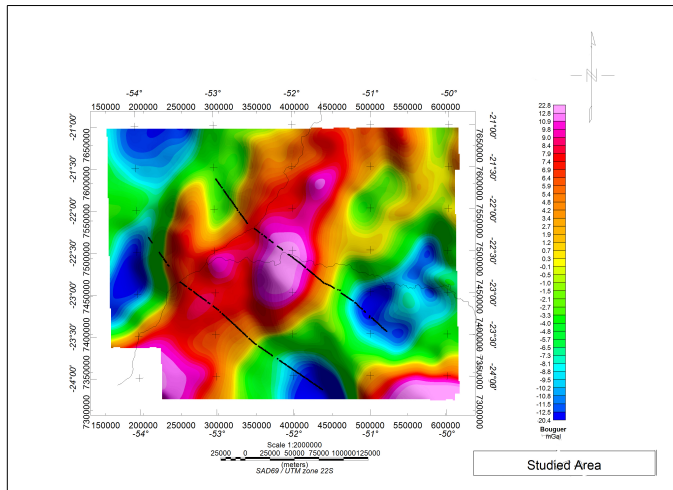


Figura 6: Mapa de anomalia Bouguer da área de estudo.

O mapa de anomalia Bouguer foi gerado através da interpolação bi-direcional dos dados de campo, após o processamento, Fig. 6. Por conseguinte, foi possível realizar uma amostragem dos dados observados de gravidade na mesma localidade do levantamento magnetotelúrico.

Modelo de densidades foi gerado através de uma amostragem, em linha reta, do dado de anomalia Bouguer. Primeiramente, a preocupação foi ajustar o limite-crosta manto. Para tal, foi adotada a metodologia utilizada por Osako (2011), que utiliza um filtro polinomial de separação regional-residual. A escolha da ordem do polinômio do filtro é obtida pela análise qualitativa dos resultados de polinômios de várias ordens e a curva Bouguer, conforme mostrado na Fig. 7. (Cheyney et al., 2011)

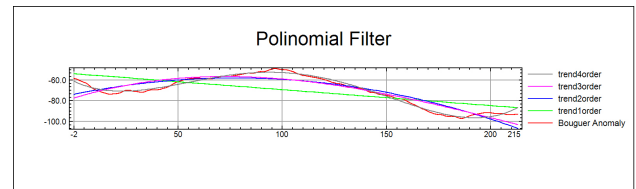


Figura 7: Análise qualitativa da resposta do filtro polinomial da primeira, da segunda, da terceira e quarta ordens, em comparação com a curva de Anomalia Bouguer.

A resposta da filtragem polinomial de 4ª ordem em cinza ajusta-se bem com a anomalia Bouguer, curva em vermelho. Esse regional de 4ª ordem resultante foi utilizado como base para a modelagem da MOHO.

Outra informação utilizada, foi a profundidade da interface crosta-manto de Assumpção (2010). Foi realizado uma compilação com os dados de profundidades da MOHO para a região da Bacia do Paraná (Lloyd et al., 2010). Dessa compilação foi possível determinar um valor médio inicial de 42km para a modelagem da MOHO, como pode ser observado do gráfico da Fig. 8. (França and Assumpção, 2004)

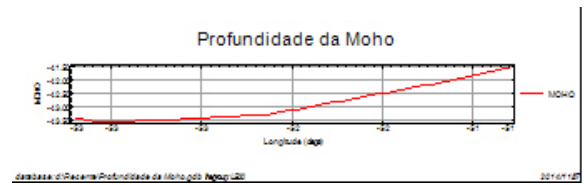


Figura 8: Profundidade de coleta de dados MOHO à Bacia do Paraná, de acordo com Assunção et al. (2010)

Posteriormente, foi gerado um modelo simples de 3 camadas, com o intuito de ajustar os dados calculados com os dados observados. Essas camadas são ilustradas, na Fig. 9, como Bacia Sedimentar, Crosta e Manto.

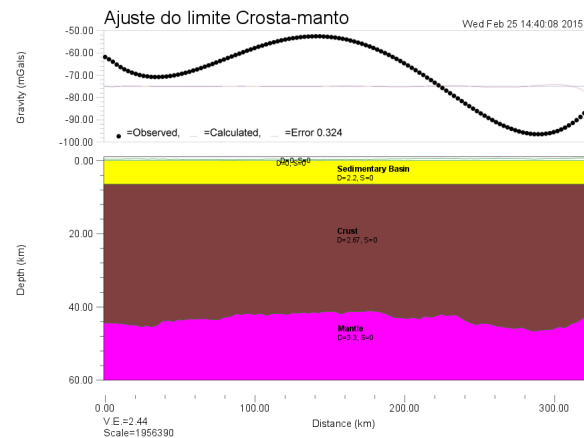


Figura 9: Limite Crosta-Manto.

A primeira camada possui densidade de $2,2g/cm^3$ e

uma profundidade de 7 Km, que representa a Bacia Sedimentar. A segunda camada, vai de 7 – 42 Km aproximadamente, possui densidade de $2,67g/cm^3$, e, representa o embasamento da Bacia Sedimentar. O bloco da Bacia Sedimentar juntamente com o embasamento perfazem a Crosta Continental detalhada, com densidade de aproximadamente $2,45g/cm^3$.

Conclusões

O modelo de ajuste da curva regional estimou um pacote sedimentar com espessura média de 7 km.

A superfície delimitada pela MOHO, na região de estudo encontra-se suavizada, mas com uma pequena elevação na região central do perfil. Esta anomalia também é delimitada pelo mapa de anomalia gravimétrica. O uso das duas técnicas, tanto o de análise e criação do mapa de anomalia Bouguer, e, a modelagem direta em conjunto com a inversão de dados tornaram possível delimitar o alto gravimétrico de Paranapanema.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP por ter cedido os dados, ao Observatório Nacional pelo fornecimento das instalações de pesquisa. Victor Ribeiro Carreira agradece ao CNPq pela concessão bolsa de mestrado, e ao Dr. Sergio Luiz Fontes pela concessão da bolsa de Produtividade em Pesquisa do CNPq.

Referências

- Blakely, R. J., 1995, Potential theory in gravity and magnetic applications., 1 ed. ed.: Cambridge University Press.
- Borghesi, L., 2002, A bacia do paraná: Anuário do Instituto de Geociências - IGEO, Departamento de Geologia.
- Cheyney, S., I. Hill, and N. Linford, 2011, Advantages to using the pseudogravity transformations to aid edge detection of total field archaeomagnetic datasets: Archeological Prospection. Wiley On Line Library., 81–93.
- Franca, A. B., and P. E. Potter, 1991, Stratigraphy and reservoir potential of glacial deposits of the itarare group (carboniferous-permian), parana basin, brazil (1): AAPG Bulletin, **75**, 62–85.
- França, G., and M. Assunção, 2004, Crustal structure of the ribeira fold belt, se-brazil, derived from receiver functions.: South America Earth Science, **16**, 15.
- Lloyd, S., S. Lee, G. França, and M. Assunção, 2010, Moho map of south america from receiver functions and surface waves.: Moho map of South America from receiver functions and surface waves., **115**.
- Marquardt, W. D., 1963, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters: Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, **11**, 11.
- Milani, E. J., and V. A. Ramos, 1998a, Orogenias paleozicas no domnio sul-ocidental do gondwana e os ciclos de subsidncia da bacia do paraná: Brazilian Journal of Geology, **28**, 473–484.
- , 1998b, Orogenias paleozicas no domnio sul-ocidental do gondwana e os ciclos de subsidncia da bacia do paraná: Brazilian Journal of Geology, **28**, 473–484.
- Milani, E. J., and P. V. Zalan, 1999, An outline of the geology and petroleum systems of the paleozoic interior basins of south america: Episodes, **22**, 199–205. (Cited by 0064).
- Talwani, M.; Worzel, J. L. . L. M., 1959, Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the mendocino submarine fracture zone: Geophysical Research, **64**, 49–59.
- Uieda, L., V. C. Oliveira Jr, and V. C. F. Barbosa, 2013, Modeling the earth with fatiando a terra: Presented at the Proceedings of the 12th Python in Science Conference.
- Uieda, L, O. J. V. C., S. H. B. Ferreira, A, and J. F. Caparica Jr, 2014, Fatiando a terra: a python package for modeling and inversion in geophysics: Figshare, doi:10.6084.
- Zalan, P. V., and S. Wolf, 1987, Tectnica e sedimentao da bacia do paraná: Simpsio sul-brasileiro de geologia, SBG, 3, Atas, Curitiba-PR., 441–477.