

MODELAGEM GRAVIMÉTRICA NO LINEAMENTO GUAPIARA, SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO

Mariana Aparecida FERNANDES
Walter MALAGUTTI FILHO
João Carlos DOURADO
César Augusto MOREIRA

RESUMO

O Lineamento Guapiara é uma importante feição geológica no Estado de São Paulo, Brasil, associada ao vulcanismo mesozoico na Bacia do Paraná. O presente trabalho teve por finalidade a interpretação e modelagem de dados gravimétricos coletados entre as cidades de Capão Bonito e Apiaí (SP), em escala de semi-detilhe, para reconhecimento da geometria da compartimentação crustal ao longo desse lineamento. Os mapas da anomalia Bouguer na área revelam uma notável anomalia gravimétrica positiva de direção NW-SE, que coincide com a orientação da maior concentração de diques associados ao Lineamento Guapiara. O modelo crustal elaborado a partir das anomalias caracteriza um significativo afinamento da crosta na área e corrobora trabalhos anteriores. Esse afinamento seria decorrência da subida do manto, reflexo da atividade epigenética gerada pela propagação dos esforços tectônicos divergentes que ocorreram na margem da Placa Sul-Americana durante o Cretáceo.

Palavras-chave: gravimetria, Lineamento Guapiara, anomalia Bouguer, modelagem crustal.

ABSTRACT

The Guapiara Lineament is an important geological feature of the State of São Paulo, Brazil, associated with Mesozoic volcanism in the Paraná Basin. This paper aims at the interpretation and modeling of gravity data collected at a semi-detailed scale between Capão Bonito and Apiaí to identify the geometry of crustal partitioning along this lineament. Maps of Bouguer anomaly in the area show a remarkable positive gravimetric anomaly oriented NW-SE, which coincides with the orientation of the greater concentration of dikes associated with the Guapiara Lineament. The crustal model developed from anomalies shows a significant thinning of the crust in the area and corroborates previous studies. The crustal thinning was caused by mantle rise, reflecting the epigenetic activity generated by the propagation of the divergent tectonic forces that occurred at the margin of the South American Plate during the Cretaceous.

Keywords: gravimetry, Guapiara Lineament, Bouguer anomaly, crustal modeling.

1 INTRODUÇÃO

O levantamento gravimétrico e o conhecimento geológico/estrutural em superfície fornecem parâmetros para se formular hipóteses, confirmar e/ou refinar modelos de evolução geológica de uma determinada área. A gravimetria é um método geofísico que pode ser aplicado para subsidiar a interpretação de estruturas em sub-

superfície e contribuir para o conhecimento de compartimentos, arranjos e relações das massas crustais.

Nesse sentido, este trabalho tem por finalidade avaliar o potencial do método geofísico gravimétrico no estudo dos aspectos estruturais relacionados à evolução do Lineamento Guapiara, uma feição geológica expressiva de direção NW-SE que ocorre no Estado de São Paulo. Se

por um lado, boa parte das associações litológico-estruturais de superfície e a cinemática das falhas dessa megaestrutura sejam conhecidas, por outro, há carência de informações de subsuperfície que possam complementar ou corroborar as primeiras.

De acordo com FERREIRA *et al.* (1981), o Lineamento Guapiara é um dos principais condutos de lavas do vulcanismo mesozoico ocorrido na Bacia Sedimentar Paraná-Etendeka. Ele é representado por soleiras, derrames e inúmeros diques de rochas básicas a intermediárias, bem como pelos complexos alcalinos eocretácicos Jacupiranga e Juquiá (ALMEIDA 1983). Tais fei-

ções poderiam estar condicionadas a uma zona de distensão crustal NW, onde se deu a mobilização de magmas de composição alcalina e toleítica durante o Cretáceo Inferior. Os alinhamentos estruturais de Guapiara (limite setentrional), São Jerônimo-Curiúva-Rio Alonzo (região central) e Rio Piquiri (limite meridional) configuram, segundo FERREIRA (1982), o Arco de Ponta Grossa.

Os diques que compõem esse lineamento afloram inicialmente na margem continental sudeste do Brasil, atravessam os terrenos pré-cambrianos e penetram, por fim, na Bacia do Paraná (Figura 1).

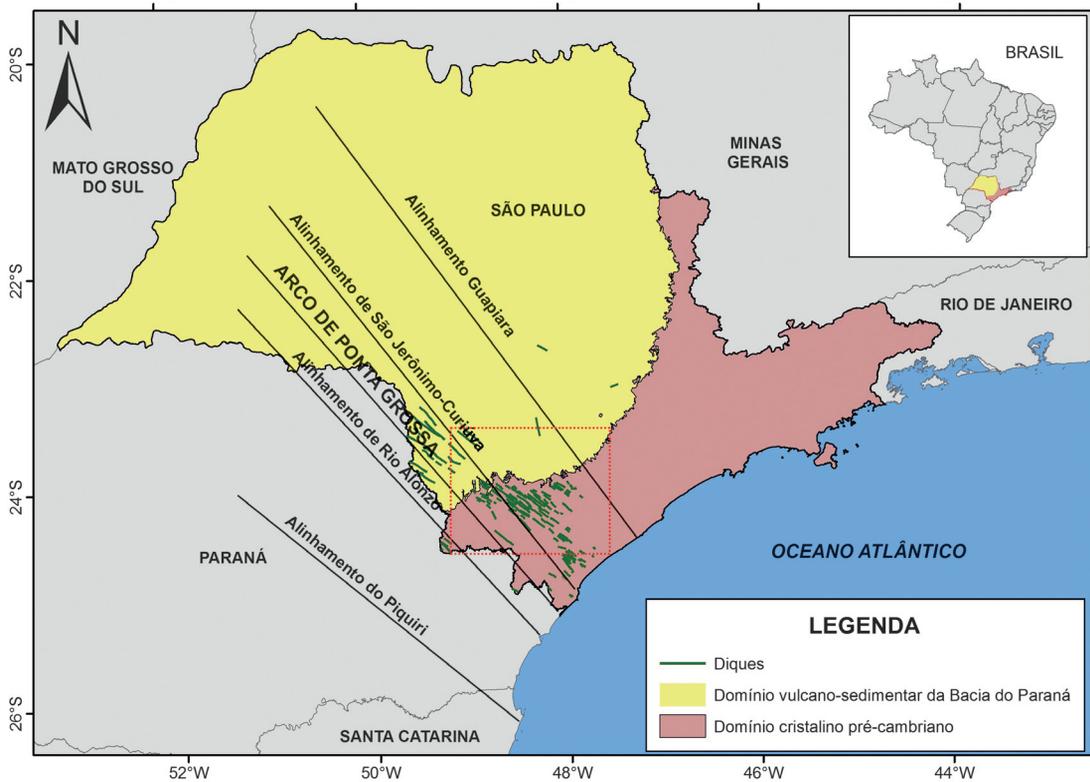


FIGURA 1 – Localização dos diques nos domínios cristalino pré-cambriano e da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo (Modificado de CPRM 2001). Em pontilhado vermelho, área de estudo.

A continuidade do Lineamento Guapiara nos domínios da Bacia do Paraná é representada pela Falha da Serra da Fartura (VIEIRA 1973), palco de intenso diastrofismo. Sua continuidade até o Rio Paraná é evidenciada por uma faixa tectônica NW, posicionada na porção sul de Aguapeí e relacionada com o Arco de Ponta Grossa.

Em termos de idade, PINESE (1989) verificou que os diques exibem um valor médio de 132 ± 10 Ma (método radiométrico K-Ar), com intervalo de 114-144 Ma. Esta idade é concordante com aquela atribuída à fase de maior atividade vulcânica da Bacia do Paraná, 130-135 Ma, que se insere no intervalo de 112-155 Ma para todo o vulcanismo da bacia (ROCHA CAMPOS *et al.* 1988).

FERREIRA (1982), estudando a gravimetria da região central do Arco de Ponta Grossa, caracterizou um alto gravimétrico com orientação NW-SE, delimitado ao norte pelo Alinhamento São Jerônimo-Curiúva e, ao sul, pelo Alinhamento do Rio Alonzo. Esta estrutura corresponde à tendência de maior concentração de diques de diabásio, associada à região central do Arco de Ponta Grossa.

USSAMI *et al.* (1991) aplicaram a aeromagnetometria a fim de elucidar o comportamento dos diques e observaram que os mesmos continuariam para noroeste do Arco de Ponta Grossa, em direção ao eixo central da bacia, cortando discordantemente as espessas sequências de derrames basálticos. Em vista disso, os autores reforçaram as evidências geoquímica e paleomagnética de que os diques da borda leste da Bacia do Paraná estão associados a um evento tectono-magmático tardio ou subsequente ao derrame basáltico principal da Formação Serra Geral nas partes sul e central da bacia.

Para alcançar o propósito desse trabalho, foi necessário adensar a malha de pontos da região de interesse, tendo como base a Carta Gravimétrica do Estado de São Paulo (GALLI *et al.* 1987), que, apesar de regional, possibilitou a observação prévia das anomalias gravimétricas associadas às estruturas de subsuperfície na área do Lineamento Guapiara. Elaborou-se um mapa de anomalia Bouguer que, após as filtrações, permitiu realçar as estruturas do Lineamento Guapiara, bem como fundamentar duas propostas de modelo geológico.

2 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

Neste trabalho foi empregado o método da gravimetria terrestre, com a finalidade de investigar a geologia de subsuperfície com base nas variações do campo gravitacional da Terra. As anomalias detectadas pelo método podem refletir o comportamento de uma unidade de rocha de densidade diferente daquela que a circunda ou o efeito de estruturas geológicas em profundidade.

Dados preexistentes da Carta Gravimétrica do Estado de São Paulo (GALLI *et al.* 1987) foram utilizados neste trabalho e complementados com campanhas de campo para a implantação de 94 novas estações gravimétricas. As estações de leitura foram espaçadas a cada quilômetro, ao longo da rodovia SP-250 (Rodovia Sebastião Ferraz de Camargo Pentead), no trecho entre

as cidades de Capão Bonito e Apiaí, ambas no Estado de São Paulo.

As medições de valores relativos de gravidade constituem o procedimento padrão nos levantamentos gravimétricos. Essas medidas foram obtidas com um gravímetro de marca Lacoste & Romberg, modelo G 987, equipado com um sistema massa-mola, que permite avaliar a aceleração da gravidade em um ponto.

A posição geográfica de cada estação de leitura foi obtida com um aparelho de posicionamento global do tipo GPS Differential Pathfinder Pro-XR (DGPS), que fornece precisão sub-métrica (inferior a 1 m) tanto na vertical quanto na horizontal (Figura 2).

A técnica DGPS (*Differential Global Positioning System*) requer dois ou mais receptores; um deles representa a estação base, que fica localizada na cidade de Curitiba/PR. Esta estação é utilizada para diagnosticar erros e aferir as correções do GPS, enquanto o receptor móvel captura dados em posições desconhecidas dentro da zona da estação base e corrige as imprecisões comuns de ambos os receptores durante e após o processamento das leituras.

Na execução de um levantamento gravimétrico, a precisão de leitura no gravímetro e no posicionamento das estações (coordenadas X, Y e Z) é de extrema importância para a qualidade e exatidão dos valores calculados de gravidade absoluta e da anomalia Bouguer. O receptor GPS Diferencial usado neste trabalho possui a capacidade de calcular posições muito precisas a cada segundo; após o processamento e a correção de dados, a precisão horizontal e vertical de cada posição chegou a 0,6 m.



FIGURA 2 – Levantamento gravimétrico e coleta do posicionamento (DGPS).

O trabalho baseou-se no método de linha gravimétrica fechada, para que fosse possível corrigir a deriva que o instrumento sofre durante o período da aquisição. Sendo assim, o gravímetro foi aferido em locais cuja gravidade é conhecida (base), antes e depois de efetuado o trabalho. A estação base para a aquisição foi a estação de referência pertencente à rede gravimétrica secundária do Estado de São Paulo, implantada pelo Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG/USP) no ano de 1977. Ela está localizada na soleira da Igreja Matriz da cidade de Capão Bonito, no lado esquerdo da porta principal, no ângulo formado entre a porta e a parede.

Os valores de gravidade absoluta das estações de medição foram obtidos na Rede Gravimétrica Fundamental do Brasil - RGFB, sob o planejamento e coordenação do Observatório Nacional.

Após a aquisição dos dados em campo, passou-se para os procedimentos de tratamento e processamento. A correção diferencial das coordenadas foi feita com o programa GPS *Pathfinder Office* v. 3, que possibilita gerenciar um projeto de coleta e corrigir, editar e visualizar os dados adquiridos no campo.

De posse das coordenadas corrigidas, efetuou-se a redução dos dados gravimétricos com rotinas próprias da plataforma *Oasis Montaj* v. 6.5 da GEOSOFT INCORPORATED (2005), que permite o processamento dos dados e cálculo dos valores das anomalias Bouguer, bem como a geração de uma grade para elaboração dos mapas. Esta grade (X, Y e Z – anomalia Bouguer) foi estabelecida a partir do método de interpolação da mínima curvatura, com espaçamento de 1.000 m. Adotou-se o sistema de coordenadas UTM, Zona 23 Sul do Meridiano de *Greenwich* e o elipsóide de referência SAD 69 para a América do Sul (IBGE). Para a obtenção dos valores da anomalia Bouguer nos cálculos de redução foi usado o valor médio da densidade da crosta de $2,67 \text{ g/cm}^3$.

2.1 Filtragens dos dados gravimétricos

Com a intenção de realçar as anomalias profundas relacionadas às baixas frequências, eliminar os ruídos e melhorar a visualização dos gradientes gravimétricos, foi utilizado o filtro passa-baixa. As filtragens também foram executadas na plataforma *Oasis Montaj*. Adotou-se uma faixa de frequência específica para a filtragem e, posteriormente, utilizou-se a frequência de corte para que os resultados fossem satisfatórios em relação à consistência e

realce dos gradientes, permitindo delimitar as estruturas da área.

O valor de corte (*cutoff*) adotado para a aplicação do filtro passa-baixa foi estabelecido de acordo com o espectro de potência radial (Figura 3), eliminando-se somente as frequências que representam a energia de fontes rasas e intermediárias, mantendo as profundas (regionais). O valor de corte determinado foi 0,042 (número de ondas por unidade de medida).

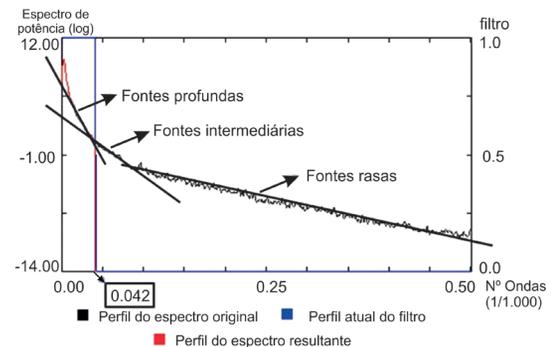


FIGURA 3 – Espectro de potência radial das frequências no domínio do número de ondas com os valores de corte adotados para os valores da anomalia Bouguer (linha azul).

Para quantificar a influência dos diques na região, com o intuito de separar os efeitos de feições mais profundas das mais rasas, foi aplicado um método de separação regional-residual do campo gravimétrico - o mais conhecido é o de ajuste polinomial pelo método dos mínimos quadrados. Este método utiliza superfícies de tendência de graus variados e o campo residual resulta da diferença entre a superfície selecionada e os dados originais. Essa superfície é expressa matematicamente por um polinômio bidimensional. À medida que o grau do polinômio se eleva, mais o campo calculado assemelha-se ao observado. O ajuste polinomial é flexível para a determinação do campo gravimétrico e o processo de escolha do grau que melhor caracteriza a área é subjetivo.

Por fim, a partir da geração e interpretação dos mapas no programa GM-SYS da *Northwest Geophysical Associates* (NGA), foi possível realizar a modelagem da crosta. Para a elaboração dos modelos foi necessário considerar para os cálculos de gravidade um modelo da Terra bi-dimensional e plano no programa GM-SYS. Cada unidade estrutural ou bloco prolonga-se para o infinito, tanto na direção positiva como negativa dos eixos de um

determinado perfil. Para a Terra assume-se uma topografia existente e não uma curvatura. Os modelos estendem-se 30 km nas direções positivas e negativas do perfil, a fim de eliminar os efeitos de borda.

É importante salientar que os modelos não são únicos, podendo haver diversos para uma mesma resposta geofísica. Além disso, as medidas para avaliação da densidade dos materiais não foram realizadas nesse estudo, adotando-se aquelas apresentadas por TELFORD *et al.* (1990). De modo semelhante, utilizou-se as espessuras do manto e da crosta superior e inferior do Orógeno Ribeira calculadas por ASSUMPÇÃO *et al.* (2002), que estabeleceram uma espessura da crosta inferior entre 35 e 41,7 km.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O mapa da anomalia Bouguer sem aplicações de filtros (Figura 4) mostra que os maiores valores de anomalia positiva concentram-se exatamente na região de ocorrência dos diques. O mapa retrata ainda a dimensão dessas anomalias e um alto gravimétrico orientado na direção NW-SE, que corresponde à tendência de maior concentração de diques de diabásio correlacionada ao Lineamento

Guapiara (FERREIRA & ALGARTE 1979, FERREIRA 1982, ALMEIDA 1983).

RICCOMINI (1995) analisou o padrão de fraturamento do Maciço Alcalino de Cananéia e apontou a ocorrência de duas fases de deformação: a primeira é caracterizada por uma distensão NE-SW de idade cretácea superior, enquanto a segunda, por uma transcorrência sinistral de direção E-W (compressão NE-SW e distensão NW-SE) de idade paleogênica, provavelmente eocênica. A primeira fase estaria associada ao Alinhamento Guapiara, que integra o Arco de Ponta Grossa, e a segunda, aos eventos de instalação e deformação das bacias do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil.

O mapa da anomalia Bouguer gerado com o filtro passa-baixa (Figura 5) comprova o caráter profundo das anomalias, ou seja, as frequências relacionadas com as fontes profundas foram mantidas, mostrando que as respostas das mesmas permanecem no mapa filtrado.

O realce das fontes residuais foi possível utilizando-se o método de separação regional-residual, com aplicação do ajuste polinomial por superfícies de tendência, para separar o sinal regional das respostas residuais (diques) de interesse.

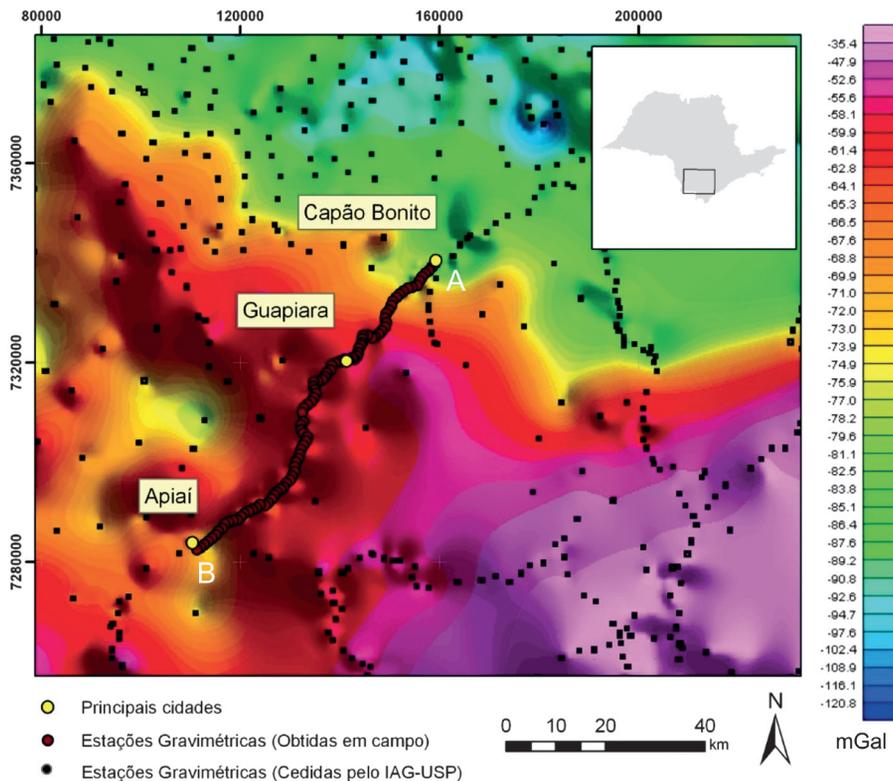


FIGURA 4 – Mapa de contorno sombreado da anomalia Bouguer isento de filtros, com a localização das estações implantadas (ao longo da estrada Apiaí – Capão Bonito/SP) e dos modelos de crosta gerados (A-B).

Após a geração das superfícies de tendência de 1ª a 9ª ordem e consequente subtração da anomalia Bouguer, considerou-se o perfil de sexta

ordem como o mais representativo do campo gravimétrico residual (Figura 6).

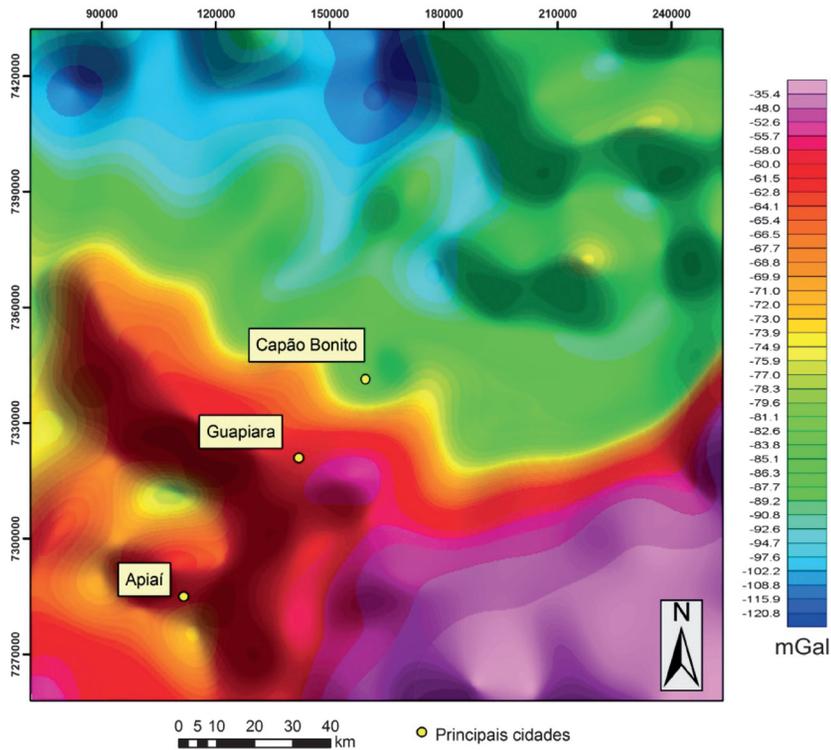


FIGURA 5 – Mapa com os valores calculados da anomalia Bouguer submetidos à filtragem passa-baixa.

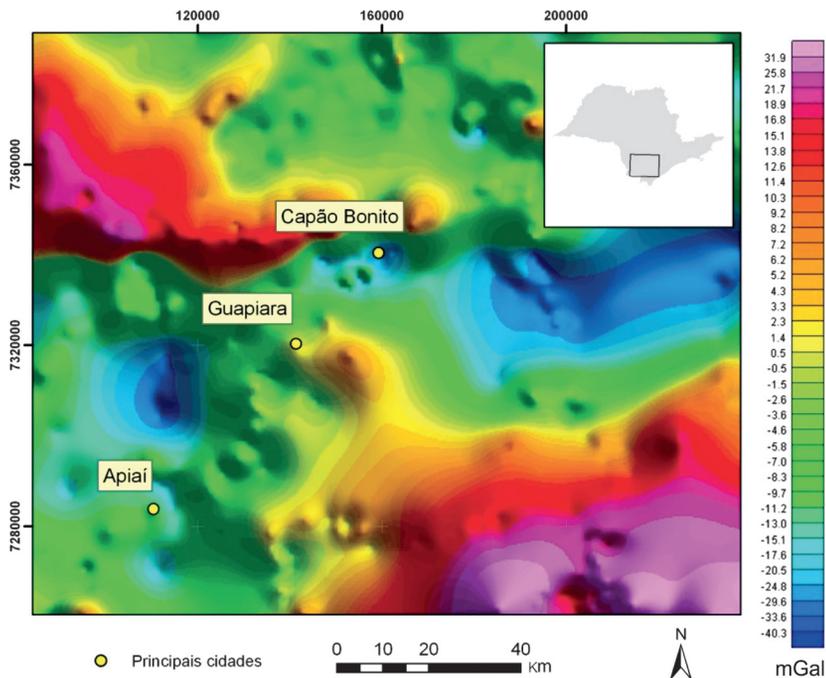


FIGURA 6 – Mapa de contorno sombreado da anomalia Bouguer residual de grau 6.

Os modelos gerados a partir das anomalias Bouguer caracterizam o alto gradiente gravimétrico identificado na área do feixe de diques, pos-

sibilitando reconhecer a influência de estruturas profundas em sua origem. Dois modelos foram propostos para a área de estudo (Figuras 7 e 8).

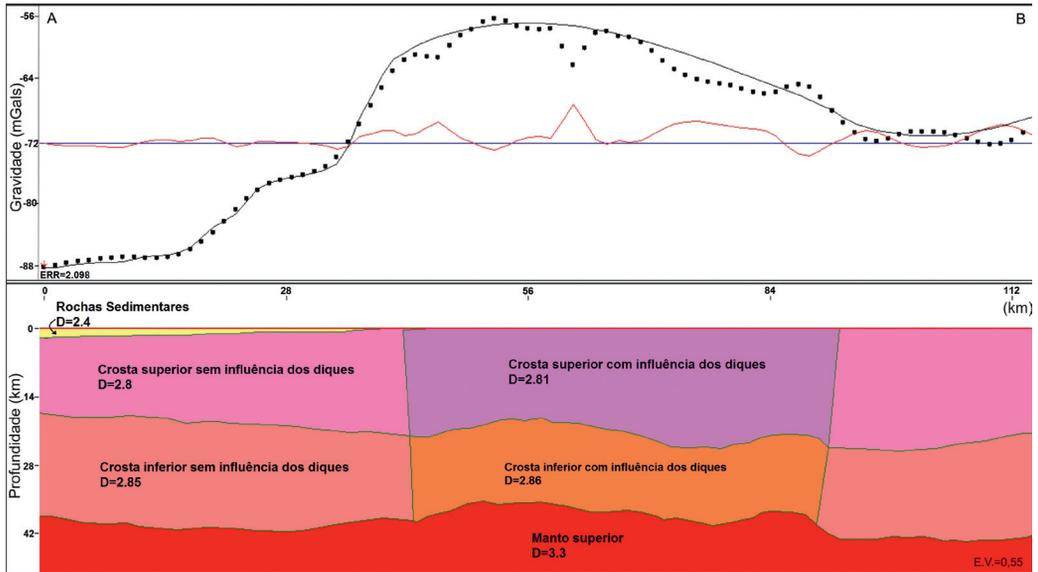


FIGURA 7 – Modelagem gravimétrica da seção AB (NE-SW), caracterizando a influência do conjunto de diques. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha contínua a curva calculada. A curva em vermelho representa o desajuste.

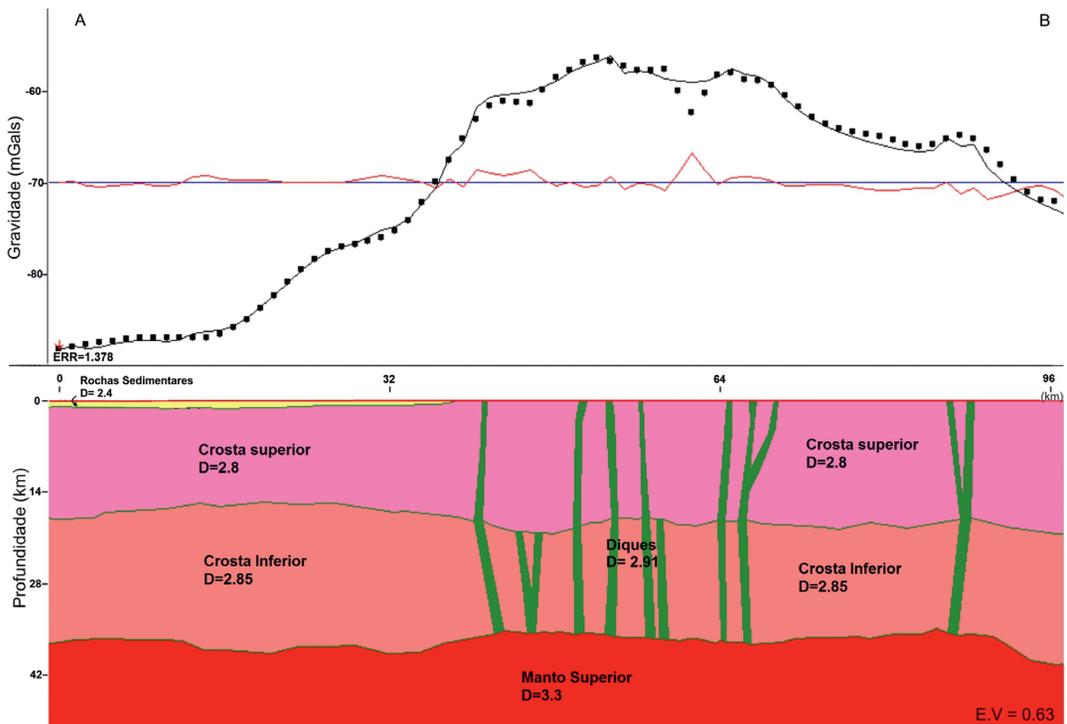


FIGURA 8 – Modelagem gravimétrica da seção AB (NE-SW), caracterizando a influência dos diques individualmente. Os pontos representam os valores observados no campo e a linha contínua a curva calculada. A curva em vermelho representa o desajuste.

O primeiro modelo considerou o enxame de diques como um único corpo e atribuiu às suas rochas encaixantes uma densidade relativa maior do que a das rochas adjacentes. O segundo modelo considerou cada dique individualmente, buscando reconhecer a sua influência no contexto local e regional.

4 CONCLUSÕES

O mapa da anomalia Bouguer isento de qualquer tipo de filtragem evidencia claramente um alto gravimétrico relacionado ao Lineamento Guapiara, uma vez que mostra feições contrastantes, lineares e com aparente continuidade. Essas anomalias resultam da diferença de densidade entre as rochas dos níveis rasos, associadas a corpos intrusivos, e aquelas posicionadas em níveis mais profundos, associadas às rochas do embasamento e do limite crosta/manto. A direção preferencial NW-SE das anomalias é concordante com a direção das estruturas de diques mapeadas em campo por FERREIRA & ALGARTE (1979), FERREIRA (1982) e ALMEIDA (1983).

A confirmação de que este lineamento ocorre como uma feição profunda é atestada pela análise e interpretação do mapa da anomalia Bouguer submetido à filtragem passa-baixa, que ressalta anomalias gravimétricas associadas às estruturas profundas, conforme já constatado por FERREIRA *et al.* (1989).

Por outro lado, o mapa da anomalia Bouguer com o método de filtragem de separação regional-residual permitiu realçar anomalias relacionadas a estruturas mais rasas ou próximas da superfície, possivelmente associadas às rochas básicas que compõem os diques do Lineamento Guapiara.

Em geral, os modelos gravimétricos permitiram prever um possível comportamento do relevo do embasamento em toda a seção modelada. As anomalias ajustam-se às feições geológicas que ocorrem nesta região (diques aflorantes) e a espessura determinada da crosta, entre 35 a 42 km, é compatível com os estudos de ASSUMPÇÃO *et al.* (2002) e FERREIRA *et al.* (1989).

Finalmente foi possível confirmar que na região do Lineamento Guapiara ocorre um afinamento da crosta em decorrência da subida do limite crosta/manto, devido à provável elevação do manto.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-americana. *Revista Brasileira de Geociências*, 13: 139-158.
- ASSUMPÇÃO, M.; JAMES, D.; SNOKE, A. 2002. Crustal thicknesses in SE Brazilian Shield by receiver function analysis: Implications for isostatic compensation. *Journal of Geophysical Research*, 107(B1), 10.1029/2001JB000422.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. 2001. Mapa Geológico do Brasil. Escala 1:5.000.000. CPRM, Brasil.
- FERREIRA, F.J.F. 1982. Alinhamentos estruturais-magnéticos da região centro-oriental da Bacia do Paraná e seu significado tectônico. *In: Consórcio CESP-IPT (Paulipetro). Bacia Do Paraná - Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos*. São Paulo, CESP-IPT, p. 143-166.
- FERREIRA, F.J.F.; ALGARTE, J.P. 1979. O comportamento aeromagnetométrico-cintilométrico das principais rochas alcalinas dos estados de São Paulo e Paraná. *In: SBG, SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA*, 2, Rio Claro, *Atas*, 2: 195-208.
- FERREIRA, F.J.F.; MORAES, R.A.V.; FERRARI, M.P.; VIANNA, R.B. 1981. Contribuição ao Estudo do Alinhamento Estrutural de Guapiara. *In: SBG, SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA*, 3, Curitiba, *Atas*, 1: 226-240.
- FERREIRA, F.J.F.; MONMA, R.; CAMPANHA, G.A.C.; GALLI, V.L. 1989. An estimate of the degree of crustal extension and thinning associated with the Guapiara Lineament based on aeromagnetic modelling. *Boletim IG-USP, Série Científica*, 20: 69-70.
- GALLI, V.; BLITZKOW, D.; SÁ, N.C. 1987. Carta gravimétrica do Estado de São Paulo. São Paulo, IPT (Relatório nº 25.645).
- GEOSOFT INCORPORATED. 2005. Montaj MAGMAP filtering; 2-D frequency domain of potential field data extension for Oasis Montaj v 6.1. Toronto, Ontario, Canada.

- PINESE, J.P.P. 1989. Caracterização geoquímica e petrológica dos diques do Arco de Ponta Grossa. São Paulo. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 197 p.
- RICCOMINI, C. 1995. Padrão de fraturamentos do Maciço Alcalino de Cananéia, Estado de São Paulo: relações com a tectônica mesozóico-cenozóica do sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 15: 79-84.
- ROCHA-CAMPOS, A.C.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; SONOKI, H.M.; SONOKI, I.K. 1988. Age of the Paraná flood volcanism. In: E.M Piccirillo & A.J. Melfi (eds.) The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. São Paulo, IAG/USP, p. 25-46.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. 1990. Applied Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.
- USSAMI, N.; KOLYSNIK, A.; RAPOSO, M.I.B.; FERREIRA, F.; MOLINA, E.C.; ERNESTO, M. 1991. Detectabilidade magnética de diques do Arco de Ponta Grossa: um estudo integrado de magnetometria terrestre/aérea e magnetismo de rocha. *Revista Brasileira de Geociências*, 21: 317-327.
- VIEIRA, A.J. 1973. Geologia do centro e nordeste do Paraná e centro sul de São Paulo. In: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Aracaju, *Anais*, 3: 259-77.

Endereço dos autores:

Mariana Aparecida Fernandes, Walter Malagutti Filho, João Carlos Dourado, César Augusto Moreira – Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Campus de Rio Claro, Avenida 24-A, 1515, Bela Vista, Caixa Postal 178, CEP 13.506-900, Rio Claro, SP, Brasil. *E-mails:* mariana.fernandes03@gmail.com, malagutti@rc.unesp.br, jdourado@rc.unesp.br, moreirac@rc.unesp.br

Artigo submetido em 9 de maio de 2013, aceito em 17 de outubro de 2013.

