

LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO NA REGIÃO DO ALTO ESTRUTURAL DE PITANGA

Mariana Aparecida FERNANDES
Maximilian FRIES
Walter MALAGUTTI FILHO

RESUMO

O levantamento gravimétrico regional e o conhecimento geológico e estrutural prévio da área do Alto Estrutural de Pitanga, situado na porção centro-leste do Estado de São Paulo, forneceram informações essenciais para formular hipóteses, criar, confirmar e/ou refinar modelos propostos sobre a evolução da área. Os resultados permitiram identificar assinaturas gravimétricas lineares de direções preferenciais NW-SE, possivelmente associadas a zonas de fraqueza preexistentes no embasamento. Feições lineares de menor extensão, de direções NE-SW, E-W e N-S, são correlacionadas às reativações mais recentes ocorridas na bacia. A modelagem dos valores observados está em conformidade com o arcabouço lito-estrutural. A aplicação do método DGPS (*Differential Global Positioning System*) mostrou-se uma ferramenta importante para a melhor precisão dos dados.

Palavras-chave: Geofísica, gravimetria, modelagem, altos estruturais, anomalia Bouguer

ABSTRACT

A regional gravimetric survey, combined with previous geological and structural knowledge provided the necessary information for formulating hypotheses, creating, confirming or improving models, that may have contributed importantly to the evolution of the region of the Pitanga structural high. The study area is located in the lower Corumbatai valley, between the cities of Rio Claro, Ipeúna, Charqueada and Piracicaba (SP) in central-eastern state of São Paulo. Aligned gravimetric signatures and NW-SE trends were identified by Bouguer anomaly and are possibly related to preexisting zones of weakness in basement rocks. Less extensive alignments with NE-SW, E-W and N-S directions are also recognized and related to more recently reactivated faults in the basin. The modeling of the observed values satisfactorily conforms to the known lithostructural framework. The application of the Differential Global Positioning System (DGPS) method proved to be an important tool for assuring the precision of the data.

Keywords: geophysics, gravimetry, modeling, structural highs, Bouguer anomaly

1 INTRODUÇÃO

A porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná apresenta vários altos estruturais, como Pitanga, Artemis, Pau d'Alho e Anhembi, próximos às cidades de Rio Claro e Piracicaba, que vêm despertando o interesse de geocientistas pelo fato de constituírem testemunhos da evolução tectônica regional.

Se por um lado, boa parte das associações litológico-estruturais de superfície desses altos já é conhecida, por outro, há carência de informações

de sub-superfície que venham complementar ou corroborar as primeiras.

Desse modo, utilizando-se a técnica gravimétrica de semi-detalhe, são apresentados neste trabalho mapas de Anomalia Bouguer e *Free-Air*, bem como um modelo geológico estrutural para o Alto Estrutural de Pitanga. O estudo busca aprimorar o conhecimento geológico dessa área, bem como estabelecer sua relação com a evolução da Bacia Sedimentar do Paraná.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de pesquisa cobre um total de 900 km² e localiza-se no flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, (porção centro-leste do Estado de São Paulo), no baixo vale do Rio Corumbataí, entre as cidades de Rio Claro, Ipeúna, Charqueada e Piracicaba (SP) (Figura 1).

A Bacia Sedimentar do Paraná fica localizada na porção centro-leste da América do Sul. No Brasil ocupa porções do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio

Grande do sul, ocupando uma área de 1.000.000 km². Seu embasamento é formado por blocos cratônicos limitados por extensas faixas móveis, que, segundo MILANI (1997), são suturas tectônicas de idade neoproterozóica-eopaleozóica. Observa-se um arcabouço de lineamentos com direção predominante NE-SW nas porções centro-sul e norte da bacia, N-S junto ao atual flanco oeste, e NW-SE na parte nordeste.

Assim, a existência de blocos cratônicos limitados por extensas faixas móveis demonstra um comportamento heterogêneo da crosta sob a bacia,

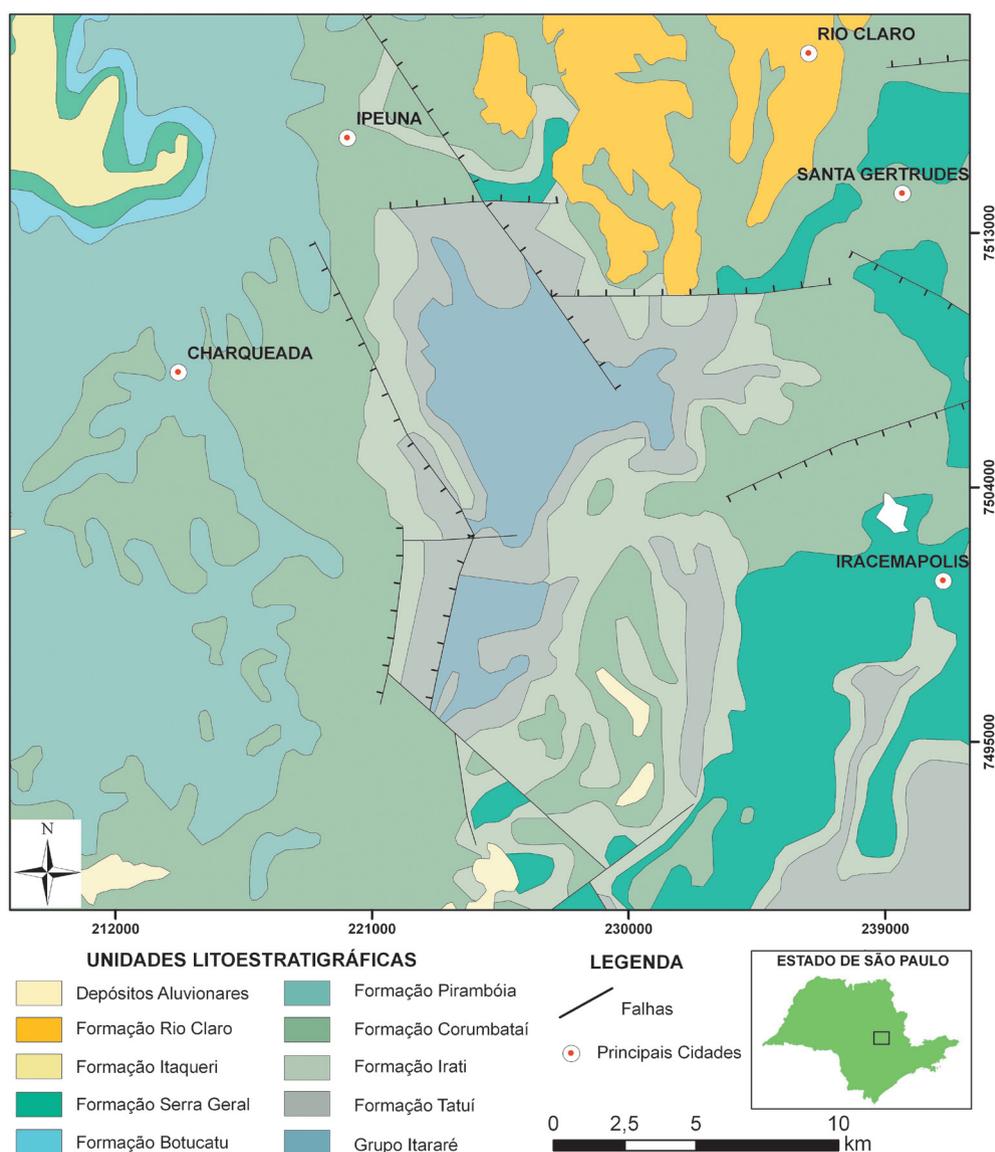


FIGURA 1 - Mapa geológico da área de estudo com a localização das principais cidades (CPRM 2001).

associada aos diversos campos de tensões a que esteve submetida, traduzido numa compartimentação baseada em taxas de subsidência durante a história da bacia (MILANI 1997).

Segundo PIRES NETO (1996), o desenvolvimento da Bacia do Paraná foi influenciado predominantemente por estruturas de direção NW-SE, que acabaram gerando outras de maior porte, refletindo feições antigas do embasamento, como as falhas de Itú, Pirai, Curucu e Cachoeira. A partir dessas estruturas, se desenvolveram os altos estruturais, que ocorrem na borda leste da Bacia do Paraná, representados no Estado de São Paulo pelos altos de Pitanga, Ártemis, Pau d'Alho e Jibóia (SOUSA 2002).

SOARES (1974) apresenta duas hipóteses para a origem destes altos estruturais, uma tectônica e outra atectônica. A hipótese tectônica teria como base os esforços horizontais ou verticais associados à reativação neojurássica-eocretácea, que ocorreu juntamente ou logo após o vulcanismo básico. A atectônica sugere o arqueamento das estruturas provocado por compactação diferencial sobre irregularidades paleotopográficas e por rochas intrusivas concordantes.

FULFARO *et al.* (1982) sugere que os altos estruturais sejam contemporâneos ao soerguimento jurássico - cretáceo da região costeira adjacente à Bacia de Santos; considera também a existência de fase tectônica compressiva ativa no final do Permiano, originando a Estrutura de Pitanga e as falhas inversas associadas, reativadas no Neojurássico – Eocretáceo.

Quanto à litoestratigrafia, regionalmente, as rochas encontradas na Bacia do Paraná apresentam idades que vão desde o Ordoviciano até o Cretáceo, incluindo as rochas básicas e os sedimentos cenozóicos. Na área estudada observam-se as seguintes unidades litoestratigráficas, da base para o topo: Grupo Itararé, Formação Tatuí, Formação Irati (Membros Taquaral e Assistência), Formação Corumbataí, Formação Pirambóia, Formação Rio Claro e rochas básicas intrusivas, compreendidas no intervalo entre o Permocarbonífero e o Cretáceo, além de sedimentos colúvio-aluviais cenozóicos (Figura 1).

2.1 Estrutura de Pitanga

SOUSA (1997) descreve a estrutura de Pitanga como uma feição assimétrica, com o flanco oeste marcado por falhas e o leste, caracterizado por uma ligeira inclinação de camadas. Em seu interior

ocorrem baixos intercalados, também marcados por falhas e camadas inclinadas. Foram reconhecidas pelo menos três etapas para o desenvolvimento das falhas que formaram essa estrutura: (1) falhas normais com distensão aproximada E-W, (2) falhas sin-deposicionais à Formação Rio Claro com indicação de tectônica distensiva e (3) falhas que deformam a Formação Rio Claro, inversas e transcorrentes.

Os sistemas de falhas mais importantes e expressivos na área da Estrutura de Pitanga são marcados pelos alinhamentos dos rios Passa Cinco, Cabeça e Ipeúna e Piracicaba (ANDRADE & SOARES 1971). Este sistema é formado por um arranjo de falhas normais de direção preferencial NW-SE e ainda, por falhas isoladas com orientação próxima a N-S e NNE-SSW (SOUSA 2002).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foi utilizado o método da gravimetria, o qual consiste em investigar a geologia de subsuperfície com base nas variações do campo gravitacional da Terra, causadas pelas diferenças de densidade das rochas. Essa variação é causada por uma fonte, que é uma unidade de rocha de densidade diferente daquelas que as circundam, causando perturbação local ou até mesmo regional.

Entretanto, estas variações são de magnitude muito pequena e foram quantificadas por aparelhos especiais, denominados gravímetros, conforme descrito nas etapas abaixo.

Para a quantificação da variação do campo gravitacional foram realizadas campanhas de campo para instalação de 239 estações gravimétricas, com espaçamento médio de dois quilômetros. A leitura gravimétrica (combinação do contador e do *dial*) foi feita no gravímetro Lacoste & Romberg, modelo G 987, e a posição geográfica obtida a partir do uso de um GPS Diferencial Pathfinder Pro-XR (DGPS), que possibilita maior precisão, tanto no posicionamento vertical, quanto horizontal.

Adotou-se o método de linha gravimétrica fechada, para permitir a correção da deriva que o instrumento sofre durante o período de aquisição dos dados. Sendo assim, o gravímetro foi aferido em locais cuja gravidade é conhecida (base), antes e depois de efetuado o trabalho.

A estação base utilizada 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. Localiza-se ao

lado do obelisco da Praça da Liberdade, em frente à Igreja Matriz de São João Batista na cidade de Rio Claro – SP.

A técnica DGPS (*differential global positioning system*) requer dois ou mais receptores, sendo um o da estação base, que consiste num ponto conhecido, com a finalidade de determinar os erros do GPS e calcular suas correções. A estação base utilizada na correção diferencial localiza-se nas dependências do Laboratório de Estudo de Bacias no *campus* da UNESP em Rio Claro – SP.

Receptores GPS móveis capturam dados em posições desconhecidas dentro da zona da estação base. Os erros comuns dos receptores base e móvel foram corrigidos durante o pós-processamento.

Com os dados adquiridos em campo, passou-se então para os procedimentos de tratamento e processamento dos dados para a elaboração de mapas.

A correção diferencial das coordenadas foi feita através do software GPS Pathfinder Office que possibilita gerenciar um projeto de coleta e corrigir, editar e visualizar dados adquiridos em campo.

Com as coordenadas corrigidas foi finalmente possível reduzir os dados gravimétricos a partir da utilização de rotinas próprias da plataforma OASIS MONTAJ da Geosoft, cujo *software* permite a redução e cálculo dos valores da anomalia *Free-Air* e Bouguer, além da geração de um *grid* para elaboração dos mapas e posterior processamento e refinamento dos dados.

A partir da geração e interpretação dos mapas, sob auxílio do *software* GM-SYS da Northwest Geophysical Associates (NGA), foi feita a modelagem da crosta, com base nos gradientes gravimétricos. O modelo criado corresponde à realidade da área em questão, tanto no contexto geológico, quanto nas densidades das estruturas e feições que compõem o perfil gravimétrico.

4 RESULTADOS

O mapa com a localização das 239 estações gravimétricas pode ser visualizado na figura 2.

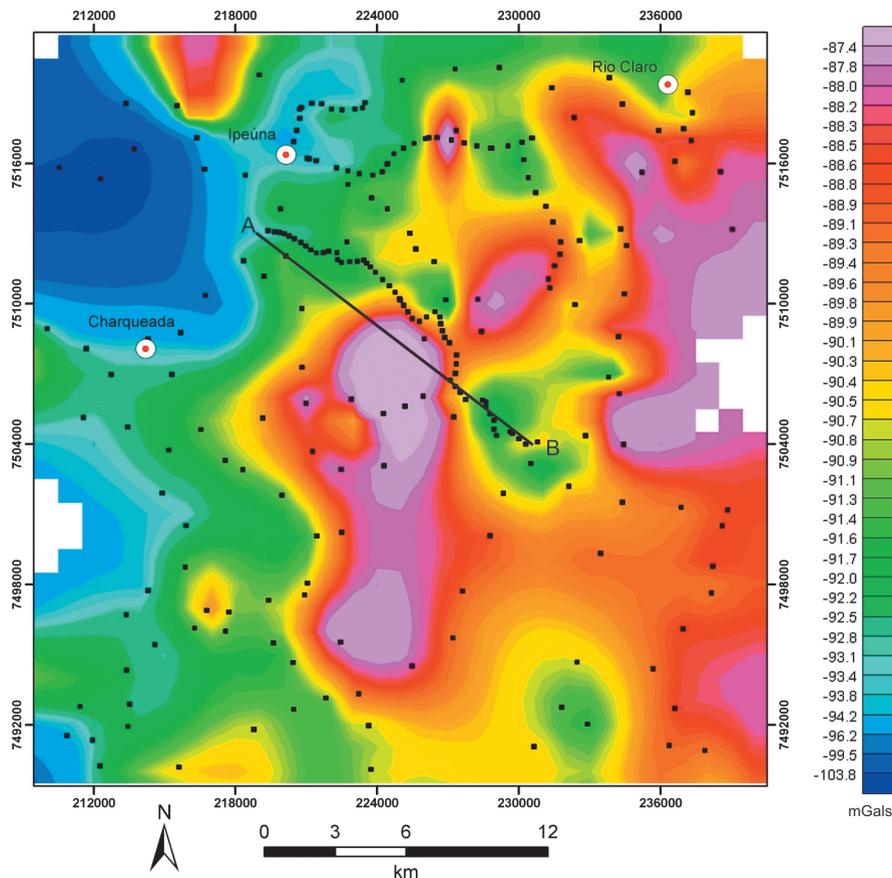


FIGURA 2 - Mapa de localização das estações gravimétricas e da seção modelada A-B.

Os mapas das anomalias *Free-Air* (Figura 3) e Bouguer (Figura 4) foram derivados de um *grid* gerado pelo método da mínima curvatura por interpolação *log* linear; a partir da aplicação das duas correções (Bouguer e *Free-Air*) em conjunto, restou apenas o efeito da atração gravitacional, eliminando-se o efeito causado pela diferença de altitude dos materiais situados abaixo do nível do mar.

Cada célula do *grid* possui 1 km e as curvas isogálicas representam os valores da anomalia *Free - Air* e Bouguer. Para a correção dos valores, foi adotado o valor da densidade média da crosta de 2,67 g/cm³.

O mapa gravimétrico, isento de qualquer tipo de tratamento, como filtragens ou qualquer outro que vise ressaltar estruturas, evidencia características interessantes no comportamento das estruturas em estudo. Em virtude do espaçamento utilizado entre as estações gravimétricas, somente os efeitos

das grandes estruturas localizadas nas zonas profundas podem ser observados.

De modo geral, as anomalias são delimitadas por contornos isogálicos alongados crescentes e por uma variação do gradiente horizontal (contornos crescentes largamente espaçados, passando a bem menos espaçados e voltando a largamente espaçados) e estão relacionadas a falhas e mudanças litológicas.

Como pode ser observado, o mapa apresenta baixos e altos valores de anomalia de gravidade. Os baixos gravimétricos indicam camadas de rochas com menor densidade e menor contraste entre os pacotes. Já os altos gravimétricos evidenciam contrastes maiores de densidades nos pacotes rochosos. Esses contrastes são de origem tanto superficial como profunda e ocorrem quando o valor medido é maior do que os previstos, não acompanhando uma tendência regional.

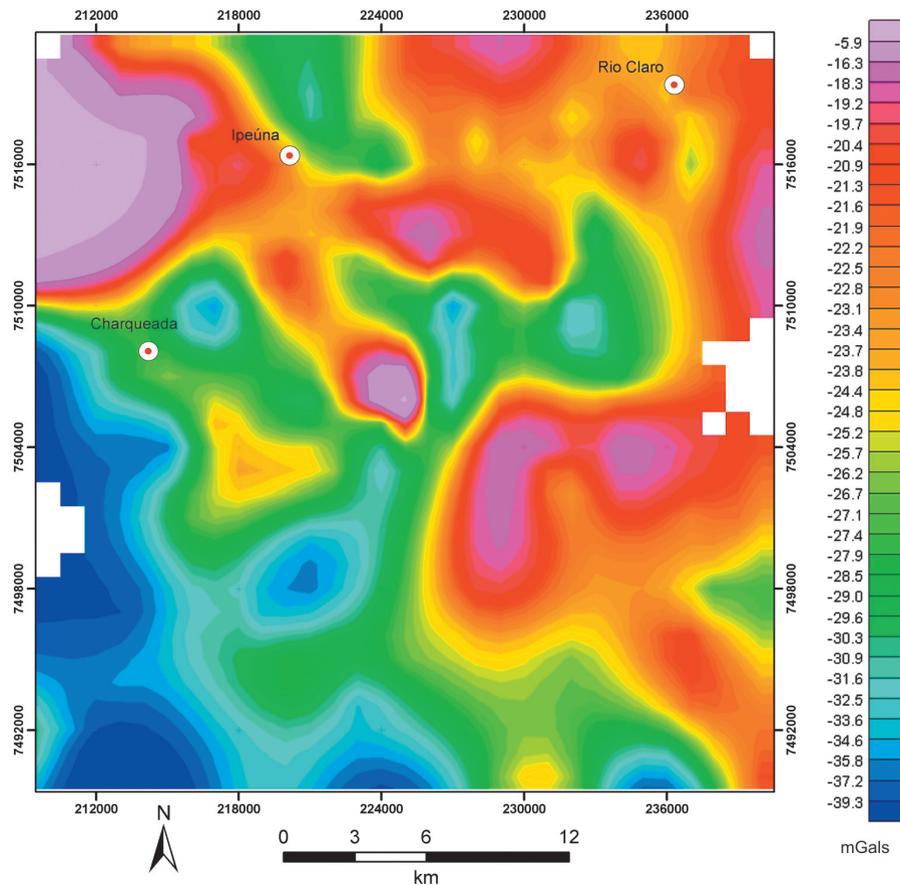


FIGURA 3 - Mapa de curvas de contorno com os valores da anomalia *Free-Air*.

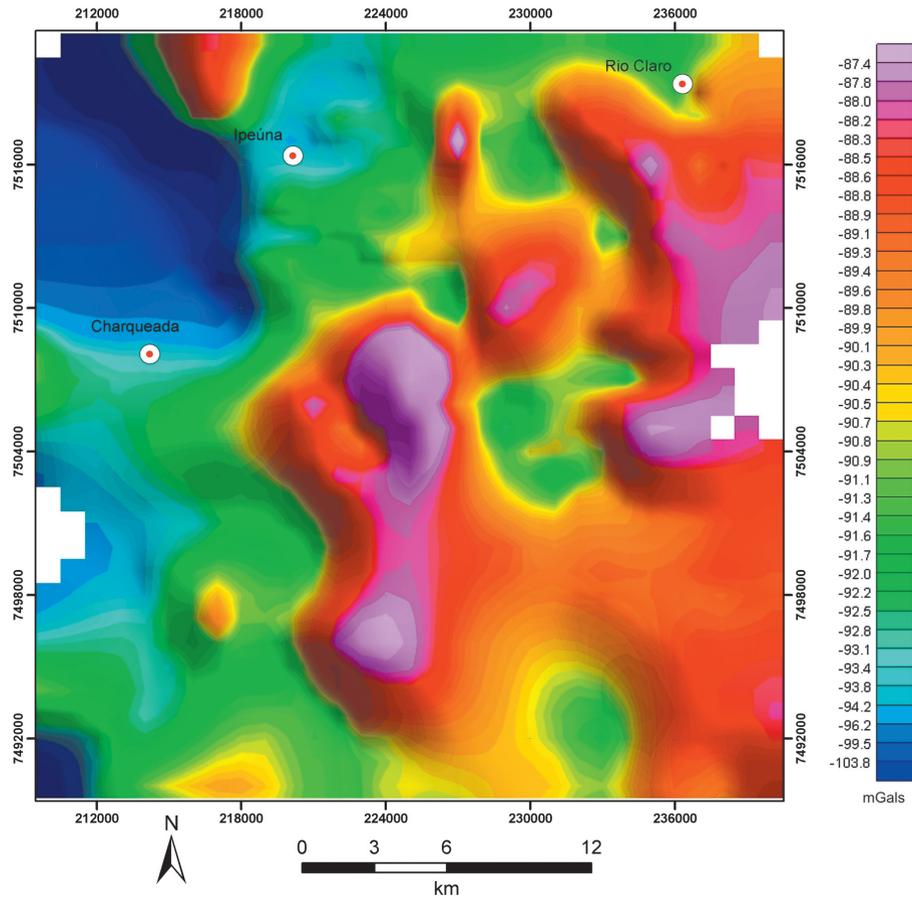


FIGURA 4 - Mapa gravimétrico de curvas de contorno com os valores da anomalia Bouguer.

4.1 Modelagem gravimétrica

O modelo criado fundamentou-se nos dados da anomalia Bouguer e foi gerado a partir da resposta geofísica dos dados calculados e posteriormente inseridos em um modelo da Terra.

Para tanto foi necessário escolher uma seção (A-B) (Figura 2) que caracterizasse a área, em uma direção que contivesse os altos gravimétricos, já que estes delimitam o Alto Estrutural de Pitanga.

Para a construção do modelo utilizou-se os parâmetros da tabela 1.

Além desses parâmetros, foi necessário quantificar a profundidade de cada pacote rochoso representado no modelo. DOURADO (2004), num estudo da estruturação da bacia a partir da sismologia, forneceu informações sobre a estrutura da crosta. Determinou uma profundidade média de 42 km para Moho e 1 km para a cobertura sedimentar da Bacia do Paraná.

TABELA 1 - Valores de densidade usados na modelagem geofísica (TELFORD *et al.* 1990).

<i>Materiais</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>
Rochas sedimentares	2,40
Embasamento	2,67
Crosta superior	2,85
Crosta inferior	3,00
Manto	4,00

Além desse estudo, foram analisados dados de um projeto executado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT 1980), no qual foram realizadas sondagens elétricas verticais profundas, que apontam uma cobertura sedimentar de 1.000 metros nas proximidades das cidades de Piracicaba e São Pedro. Na área que se prolonga de Charqueada até o Rio Piracicaba a espessura desta cobertura chega a atingir até aproximadamente 1.470 metros.

Feitas as considerações para a construção do modelo, partiu-se para a elaboração da seção geológica (Figura 5), que serviu de base para a modelagem tectônica.

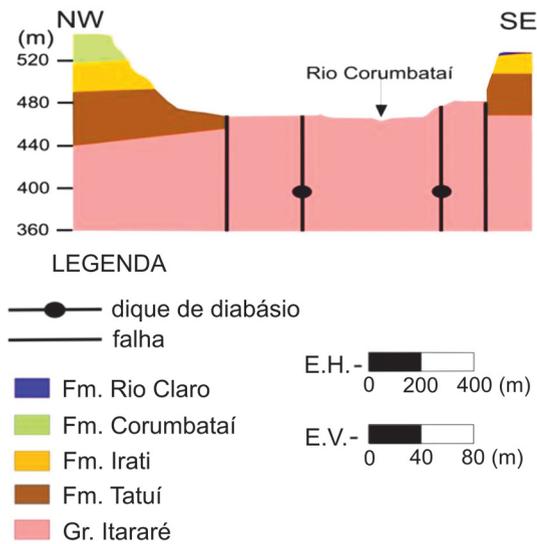


FIGURA 5 - Seção geológica com direção NW - SE usada na construção do modelo gravimétrico A - B.

Depois de feitos os ajustes dos contatos (rochas sedimentares/embasamento) e das características da seção geológica com o modelo geofísico, foi gerado o modelo gravimétrico (Figuras 6 e 7).

A partir de uma mesma resposta geofísica, foram feitos dois modelos geológicos para caracterizar local e regionalmente a articulação do alto estrutural com a bacia e com as porções mais profundas. Para o ajuste das curvas com o mínimo erro possível, de acordo com o perfil geológico proposto, foram inseridos os sistemas de falhamentos que configuram o arcabouço estrutural da área, para verificar sua influência nas anomalias.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Considerando os mapas divididos em quadrantes, os altos valores da anomalia Bouguer (menos negativos, até -87 mGal) são interpretados como altos gravimétricos. Tais valores encontram-se em domínios situados na porção nordeste/central e sudeste do mapa (Figura 4). Essas anomalias são consideradas anomalias de embasamento e estão ligadas à zonas de reativação de estruturas preexistentes no embasamento.

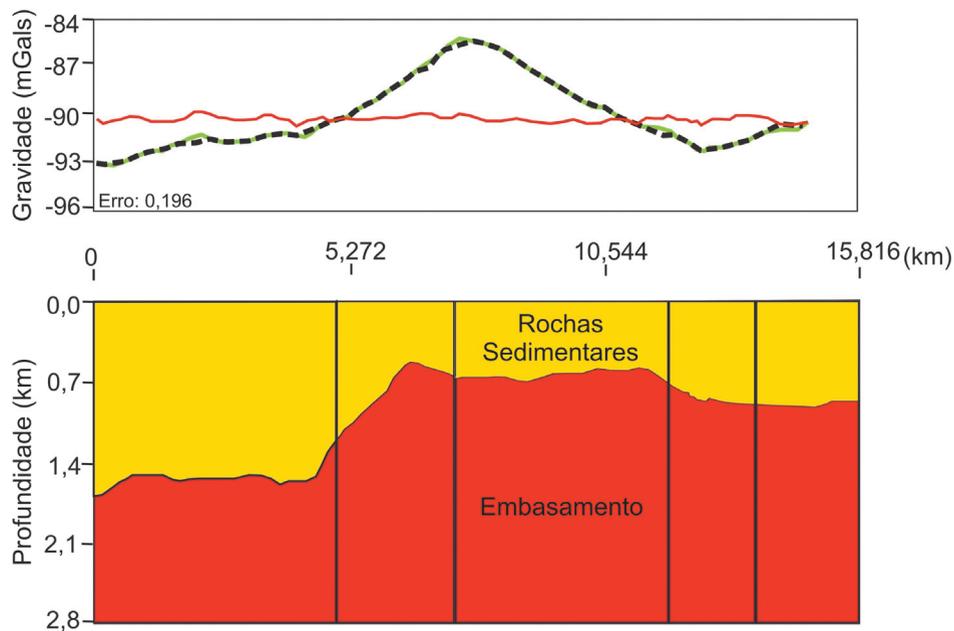


FIGURA 6 - Modelo gravimétrico A-B (local). A linha contínua verde representa a curva calculada pelo programa, a vermelha corresponde ao erro e a tracejada aos dados obtidos em campo.

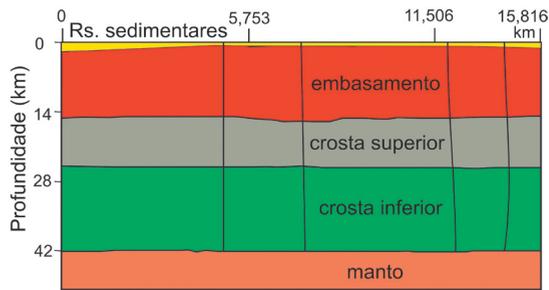


FIGURA 7 - Modelo gravimétrico A-B (regional). A linha contínua verde representa a curva calculada pelo programa, a vermelha corresponde ao erro e a tracejada aos dados obtidos em campo.

Já os valores mais negativos, situados na porção noroeste e sudoeste do mapa (variando de -91 a -104 mGal) correspondem a baixos gravimétricos, evidenciando uma área de densidade baixa.

As feições contrastantes e lineares observadas na região do alto estrutural apresentam con-

tinuidade e são concordantes com lineamentos reconhecidos na bacia em estudos anteriores, de direções NE-SW, NW-SE e, em menor número, E-W e N-S (FÚLFARO *et al.* 1982, APPI *et al.* 1987, ZALÁN *et al.* 1990).

Para efeito de correlação entre a anomalia prevista e o arcabouço estrutural da área, foram traçados os lineamentos tectônicos no mapa da anomalia Bouguer (Figura 8).

Nota-se a existência de uma direção preferencial de lineamentos, que está condizente com sistemas de falhamentos descritos por SOUSA (1997). A de maior ocorrência é a direção NW-SE, reconhecida como sendo o Sistema de Falhas Passa Cinco-Cabeça, cujas falhas se caracterizam por serem normais, inversas e transcorrentes sinistrais, limitando a porção norte do alto estrutural. Dentre outros sistemas, este é considerado o mais importante e ocorre ao longo do rio Passa-Cinco até seu cruzamento com os rios Cabeça e Corumbataí. Aparecem também, porém de maneira isolada, alguns lineamentos N-S e NE-SW.

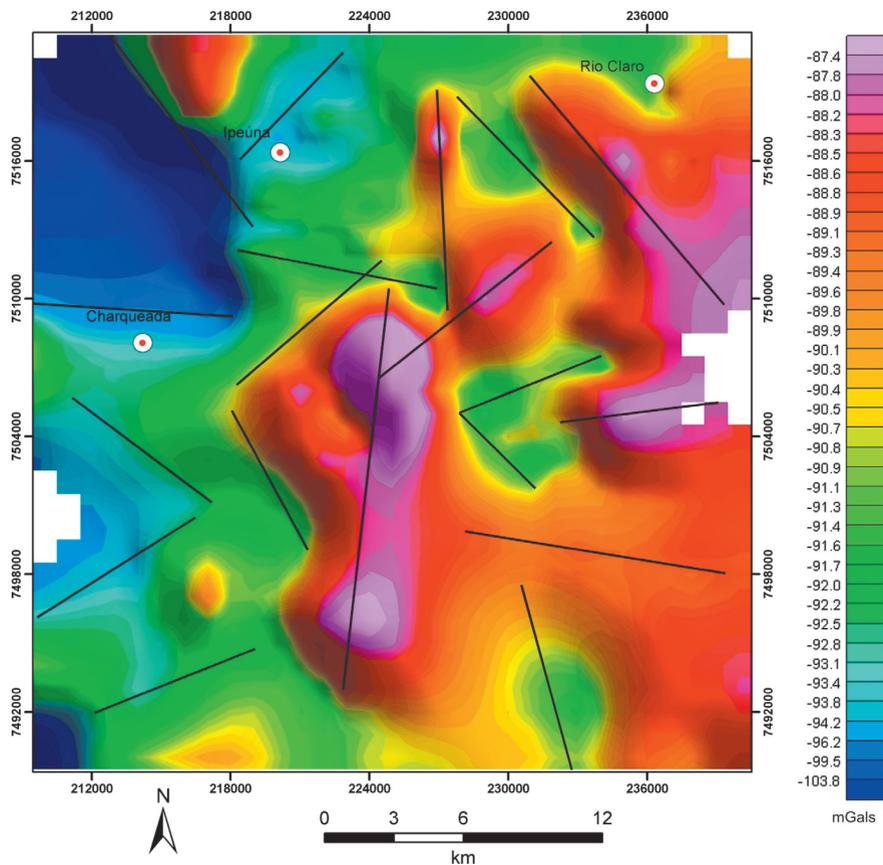


FIGURA 8 - Mapa gravimétrico das curvas de contorno de anomalia Bouguer, com os traçados dos lineamentos tectônicos.

O mapa da anomalia Bouguer, mostrando acentuados gradientes horizontais, juntamente com os perfis geológicos e modelos crustais, auxiliaram no melhor entendimento do arcabouço estrutural da área e também na delimitação e interpretação de estruturas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, S.M. & SOARES, P.C. 1971. Geologia de semi-detalhe no centro leste de São Paulo. Rio de Janeiro, Petrobrás, DESUL, relatório n. 407, 52 p.
- APPI, V.T.; ASTOLFI, M.A.M.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; ZALÁN, P.V.; ZANOTTO, O.A.; WOLFF, S. 1987. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. *In*: SBG, SIMPÓSIO SUL – BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Curitiba, *Atas*, 3, p.441-447.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2001. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas - SIG e mapas na escala 1:2.500.000. Brasília, CPRM, 4 CD-ROMs.
- DOURADO, J.C. 2004. Estruturação crustal da região de Rio Claro através da sismologia. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Livre-Docência, 104 f.
- FÚLFARO, V.J.; SAAD, A.R.; SANTOS, M.V.; VIANNA, R.B. 1982. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 12(4): 590-610.
- IPT. 1980. Prospecção geofísica (sondagens elétricas verticais e magnetometria) em apoio aos estudos geológicos na região de São Pedro e Piracicaba – bloco 47. São Paulo, IPT, Relatório IPT no. 14.481.
- LUIZ, J.G. & SILVA, L.M.C.E. 1995. Geofísica de prospecção. Editora Universitária -UFPA e Editora CEJUP, Belém, v. 1, 311 p.
- MILANI, E. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, 254 p.
- PIRES NETO, A.G. 1996. Estudo morfotectônico das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá e áreas adjacentes no Planalto Atlântico e Depressão Periférica. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Pós-Doutoramento, 70 p.
- SHERIFF, R.E. 1989. *Geophysical Methods*. Prentice Hall, New Jersey, 605 p.
- SOARES, P.C. 1974. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação e Gênese. *In*: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, *Anais*, v. 4, p. 107-121.
- SOUSA, M.O.L. 1997. Caracterização estrutural do Domo de Pitanga – SP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 116 p.
- SOUSA, M.O.L. 2002. Evolução tectônica dos altos estruturais de Pitanga, Ártemis, Pau d'Alho e Jibóia – Centro do Estado de São Paulo. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Doutorado, 206 p.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge University, Cambridge, 860 p.
- ZALÁN P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T. 1990. Bacia do Paraná. *In*: G.P. RAJA GABAGLIA & E.J. MILANI (ed.) *Origem e evolução de bacias sedimentares*. PETROBRAS, Rio de Janeiro, p. 135-164.

Endereço dos autores:

Mariana Aparecida Fernandes - Pós-graduação em Geologia Regional, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, Avenida 24-A, 1515, Bela Vista, Caixa Postal 178, CEP 13506-900, Rio Claro, SP. E-mail: mariana.fernandes03@gmail.com

Maximilian Fries - Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Rua Pedro Anunciação, s/n, CEP 96570-000, Caçapava do Sul, RS. E-mail: maximilianfries@unipampa.edu.br

Walter Malagutti Filho - Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista, Caixa Postal 178, CEP 13506-900 Rio Claro, SP. E-mail: malagutti@rc.unesp.br