

INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS E GEOFÍSICOS, UTILIZANDO TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO (GIS)

KELLERMAN NOVAES ⁽¹⁾
WLADIMIR SHUKOWSKY ⁽²⁾

**⁽¹⁾4D. CONSULTORIA EM
GEOTECNOLOGIAS – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS – SP
kanovaes@ig.com.br**

⁽²⁾INSTITUTO ASTRÔNOMICO E GEOFÍSICO – IAG – USP

ABSTRACT

The Morungaba magmatism is formed for several units of varied granitics e dioricts rocks, defining a complex estructural pattern in surface, indicating subsurface shape and distinct mechanism of magmas laynig and migration. The data of a detailed gravimetric survey in the Morungaba region totalizing 561 new gravimetric location producing a chart of vertical derivative from Bouguer anomaly, showing a complex pattern of lineaments and localized anomalies in close correlation of the geologic mapping of surface. The utilization of the geographical information system (GIS) was used for integration and manipulating the data, wich leading a excellent product, for the facility and agility in elaborating integrated charts in all project fases.

1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento geológico básico de diversas áreas do embasamento cristalino da região Leste do Estado de São Paulo progrediu significativamente nas duas últimas décadas, devido ao mapeamento sistemático de folhas topográficas 1:50.000, fomentado pelo Pró-Minério, e pelo mapeamento sistemático de detalhe de ocorrências granitóides diversas, realizados, em particular, por pesquisadores da USP e da UNESP. Em contrapartida, dados geofísicos de detalhe para as unidades que compõem o embasamento e para as ocorrências graníticas intrusivas são ainda em número reduzido, impossibilitando definir algumas das suas propriedades físicas e estruturais, bem como modelar de forma consistente os processos tectônicos associados à evolução crustal e ao magmatismo granítico associado ao longo do tempo geológico, na região. O presente projeto pretende cobrir parte desta lacuna iniciando o estudo gravimétrico de maior detalhe de uma área selecionada do embasamento cristalino da região Leste do Estado de São Paulo.

2 - OBJETIVO

O projeto tem por objetivo primário a utilização de levantamentos gravimétricos, para avaliar o comportamento estrutural e a forma subsuperficial das diferentes unidades geológicas e descontinuidades tectônicas mais importantes mapeadas na região selecionada, com destaque para as diferentes unidades estratigráficas do magmatismo Morungaba e para os contatos tectônicos entre os terrenos da **FARG** e da **NESG**. Outro objetivo do projeto é o de avaliar a potencialidade da utilização de dados geofísicos conjuntamente com informações de mapeamento geológico de superfície

para a elaboração de modelos interpretativos estruturais, visando a aplicação da técnica a outras áreas do Pré Cambriano de São Paulo.

3 - GEOLOGIA DA REGIÃO

Na região de Morungaba, ocorrem terrenos metamórfico-migmatíticos e granitóides intrusivos e afloram os segmentos ocidentais de duas das mais importantes unidades geotectônicas do Estado: a Faixa Alto Rio Grande (FARG) e a Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé (NESG), além de diversas unidades de rochas graníticas e dioríticas variadas, intrusivas, mapeadas em detalhe por Vlach (1985, 1993) e incluídas no denominado magmatismo Morungaba. O **magmatismo Morungaba** (ca 630-580 Ma), reúne diversas unidades estratigráficas. Os dados estruturais de superfície indicam que a colocação deste magmatismo sucede a justaposição dos terrenos da NESG sobre as litologias da FARG e que está relacionada a importantes zonas crustais distensivas geradas por movimentos inicialmente dextrais e, após, sinistrais das Zonas de Cisalhamento Monte Sião e Campinas-Pedreira (Vlach, 1993). Vlach (1993) identificou sete unidades estratigráficas (Figura 1), constituídas por algumas associações principais, denominadas de : Plúton Areia Branca; Complexo Ouro Verde; Plúton Jaguarí; Plúton Meridional; Plúton Oriental; Ocorrências Meridionais; Plúton Itatiba.

4 - LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO

4.1 - Anomalia Gravimétrica

O método gravimétrico consiste na comparação entre valores da aceleração da gravidade obtidos em diversos pontos de uma área e os valores determinados por um modelo global. As discrepâncias observadas entre este modelo global e os valores efetivamente obtidos são chamadas de anomalias gravimétricas e podem ser associadas a variações na densidade dos materiais em subsuperfície. Como os valores da aceleração da gravidade, são obtidos a diferentes altitudes deve-se corrigir esses valores para o nível do geóide (altitude onde a fórmula internacional da gravidade está definida). Neste trabalho adotou-se como modelo global a fórmula internacional da gravidade definida em 1967 pela International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) sendo dada pela expressão:

$$g = g_0 (1 + 0.005278895 \sin^2 \varphi + 0.000023462 \sin^4 \varphi) \quad (1)$$

onde $g_0 = 978031.85$ mGal, e φ é a latitude do ponto onde se observou a gravidade.

Além disso, deve-se levar em conta o efeito gravimétrico das massas topográficas existentes entre o geóide e a estação de medida. Tais correções, assim como o efeito da latitude são chamadas de reduções gravimétricas e estão incluídas no cálculo da anomalia Bouguer simples que é dada pela fórmula:

$$\Delta g_{bou} = g_{obs} - g + (2pGr)h - \left(\frac{\rho g_{sup}}{\rho z} \right) h = g_{obs} - g - 0.1968h \quad (2)$$

onde: h é a altitude ortométrica do ponto onde se observou a gravidade.

g_{obs} é a gravidade efetivamente medida.

g é a gravidade de referência dada pela equação (1).

$G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}^2\text{g}$ é a constante universal da gravitação.

$r = 2,68\text{g/cm}^3$ é a densidade média da porção superior da crosta continental.

$\frac{\mathcal{I}g_{\text{sup}}}{\mathcal{I}z} = 0.3018 \text{ mGal/m}$ é o gradiente vertical da gravidade de referência na superfície do geóide e é uma aproximação válida para altitudes inferiores a 1000m.

Em levantamentos de pequena escala, onde os efeitos regionais de grande comprimento de onda podem ser estimados com simplicidade ou desprezados, a anomalia Bouguer teoricamente está diretamente relacionada com as anomalias de massas em subsuperfície (Telford et al.,1976).

4.2 - Aquisição dos dados Gravimétricos

A aquisição dos dados gravimétricos foi direcionada para o detalhamento de estruturas na região, com espaçamento médio de 2 km entre cada estação de medida, diminuindo para 1 km nos afloramentos. O levantamento todo foi realizado em 21 dias de atividades de campo, tendo sido implantadas 561 novas estações gravimétricas. O levantamento gravimétrico foi efetuado utilizando-se um gravímetro diferencial Lacoste & Romberg modelo G (Lacoste & Romberg, 1991), com resolução de 0.01 mGal. Os valores de gravidade foram referidos à Rede Gravimétrica Fundamental do Brasil, implantada pelo Observatório Nacional, e à estação de gravidade absoluta implantada no Observatório Abrahão de Moraes do IAG/USP em Valinhos, SP.

O posicionamento das estações gravimétricas foi feito através do sistema Navstar GPS, utilizando-se um receptor de código C/A Trimble modelo Pathfinder Basic (Trimble,1989), com precisão nominal de 50 m.

A determinação da altitude ortométrica das estações foi feita por nivelamento barométrico apoiado em referências de nível do IBGE e de outras instituições existentes na área.

Considerando que o erro da altitude ortométrica das estações é a principal fonte de erro da anomalia Bouguer (cerca de 0.2 mGal/m), deve-se tomar cuidados especiais nos procedimentos de nivelamento barométrico, de modo a garantir a precisão requerida para a interpretação gravimétrica: (a) correção das leituras dos altímetros dos efeitos da temperatura e umidade do ar, da latitude e da altitude, (b) imposição de limites para distância e desnível relativo entre altímetros-base e altímetros-itinerantes, e (c) introdução de redundância no nivelamento para controle do erro.

Com base nos resíduos do ajustamento pode-se afirmar que o desvio padrão da componente do erro da anomalia Bouguer devido a erros de nivelamento é de 0.15 mGal.

5 - PROCESSAMENTO E INTEGRAÇÃO DOS DADOS, UTILIZANDO GIS

Para que se possa produzir um mapa de anomalia Bouguer, é necessário que os valores de anomalia sejam definidos sobre uma malha regular de coordenadas horizontais, e o procedimento usual é o de *interpolar* os valores de anomalia sobre uma malha regular. Nesta etapa do trabalho utilizou-se dois softwares cuja a importação e exportação dos dados são compatíveis, e um software foi desenvolvido para a interpolação 3D.

O Spring (3.0) foi utilizado para armazenar as informações levantadas, os planos de informações, e o Surfer, da Golden Software, foi utilizado na modelagem para a representação matricial e em forma de grades dos dados gravimétricos.

5.1 - Processamento dos Dados

Considerando que o mapa de anomalia Bouguer é a síntese das informações contidas nos dados gravimétricos, e a qualidade do mesmo reflete-se diretamente na qualidade e confiabilidade da interpretação, discute-se à seguir a importância da redução gravimétrica correta e da escolha do processo de interpolação para a obtenção de mapas gravimétricos de qualidade.

Os principais efeitos topográficos são removidos pela correção de Bouguer, a qual representa a topografia na forma de uma placa plana (sem relevo). A variação da altitude topográfica residual ocorre em comprimentos de onda muito menores que a escala das estruturas geológicas de interesse, introduzindo perturbações de pequeno comprimento de onda nos valores da anomalia Bouguer simples, cujo efeito é o de produzir mapas de anomalia Bouguer onde as curvas iso-anômalas são sinuosas e irregulares. Os mapas foram produzidos utilizando-se o método de interpolação da mínima curvatura, que trata-se de um interpolador 2D, assumindo que os dados observados satisfazem à equação bi-harmônica dependente apenas das coordenadas horizontais, e é largamente empregado para interpolar dados gravimétricos (Briggs, 1974).

A introdução da correção topográfica melhora a qualidade do mapa de anomalia Bouguer: as iso-anômalas são menos perturbadas por ruído de alta frequência, que porém continua presente. Estas perturbações são devidas não mais ao efeito gravitacional da topografia, mas às variações de altitude entre as estações que compõe o levantamento gravimétrico. Este problema foi reconhecido há muito tempo, porém uma solução prática para o mesmo somente foi apresentada recentemente por Cordell (1992), o qual introduziu o chamado método da interpolação por fontes equivalentes.

5.2 - Fontes Equivalentes

As fontes equivalentes têm a sua principal aplicação na interpolação de dados potenciais que não foram medidos no mesmo *datum*. O método trata-se de um interpolador 3D que incorpora explicitamente a informação de que a grandeza observada é uma função harmônica, das três coordenadas espaciais, levando em conta desse modo a altitude variável das estações na representação da gravidade observada. O princípio do método consiste em determinar um conjunto de fontes pontuais que represente as medidas da anomalia Bouguer distribuídas em um plano horizontal. De acordo com Cordell 1992, dado um conjunto de observações $f_i(x_i, y_i, z_i)$, procura-se

determinar um conjunto de fontes equivalentes $\{c_n(\mathbf{x}_n, \mathbf{h}_n, \mathbf{z}_n)\}$ tais que:

$$\left| f_i(x_i, y_i, z_i) - \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{\sqrt{(x_i - \mathbf{x}_n)^2 + (y_i - \mathbf{h}_n)^2 + (z_i - \mathbf{z}_n)^2}} \right| < \mathbf{e}$$

onde $\{f_i\}$ representa o conjunto de observações do campo gravimétrico tomado nos pontos $\{x_i, y_i, z_i\}$, \mathbf{e} é o erro do ajuste, $\{c_n\}$ é a intensidade de fontes pontuais localizadas em $\{\mathbf{x}_n, \mathbf{h}_n, \mathbf{z}_n\}$.

Após a determinação do local e da magnitude das fontes, é possível representar os dados observados numa superfície irregular num *datum* comum, (Cordell, 1992), eliminando o efeito da altitude no valor observado da gravidade.

5.2 - Derivadas Verticais

O mapa de anomalia Bouguer não mostrava uma correlação direta entre a assinatura gravimétrica e os limites dos plutons de Morungaba mapeados em superfície. Observava-se apenas

uma intensa anomalia negativa alongada na direção NNE, aparentemente associada à justaposição dos terrenos FARG/NESG.

O fraco sinal gravimétrico dos granitóides de Morungaba pode ser devido a um pequeno contraste de densidade relativo às rochas encaixantes. A densidade das rochas encaixantes não foi determinada em razão da diversidade das mesmas, o que demandaria o processamento de um elevado número de amostras, o que verificou-se ser impraticável face ao prazo do projeto e às outras atividades previstas no mesmo, porém os plútons apresentam densidades bastante homogêneas. Para realçar a anomalia devida aos granitóides, tentou-se remover a tendência regional representando-a por um polinômio, porém sem sucesso: um polinômio de grau suficientemente elevado para representar a anomalia regional NNE também se amolda em parte à anomalia dos granitóides.

A derivada vertical segunda da anomalia Bouguer é muito sensível a contatos verticais ou sub-verticais entre blocos com contraste de densidade (Garland, 1965) e delinea muito bem os limites de corpos tabulares (Cavallaro, 1991). A técnica da derivada segunda foi utilizada para remover o forte gradiente da anomalia gravimétrica produzida pela Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé sobre a Faixa Alto Rio Grande, que mascara os granitóides de Morungaba. A derivada segunda funciona como um filtro passa-altas, removendo anomalias regionais causadas por fontes mais profundas (Figura 2). A derivada segunda foi calculada à partir dos dados gerados pelo método de fontes equivalentes, que devido à não unicidade da representação do campo, pode-se aplicar derivadas verticais e horizontais da função potencial, que também são funções harmônicas (Cordell, 1992).

O mapa de derivada vertical segunda integrado com o mapeamento geológico de superfície, pode ser visto na Figura 2. Nota-se que toda a área de afloramento dos granitóides é associada a valores positivos elevados da derivada vertical segunda, o que indica que os granitóides produzem uma anomalia negativa de gravidade. Além disso, observa-se que há uma diferenciação gravimétrica entre os plutons Areia Branca e Ouro Verde, Areia Branca e Jaguarí, Jaguarí e Oriental, e Oriental e Meridional.

O pluton Meridional apresenta-se gravimetricamente dividido em dois corpos: um corpo principal a Oeste e um corpo secundário a Leste. O corpo a Oeste aparenta prolongar-se para SSW em subsuperfície.

5.3 - Sistema Geográfico de Informação – SGI

A principal função do SIG, neste trabalho, foi reunir informações geográficas, geológicas e geofísicas, num mesmo banco de dados, onde novas informações podem ser atribuídas posteriormente, capaz de integrar e manipular as informações, de acordo com as necessidades de cada etapa, verificando as possíveis formas de gerenciamento sobre as etapas a serem realizadas, além de avaliar a potencialidade da utilização de dados geofísicos conjuntamente com informações de mapeamento geológico de superfície para a elaboração de modelos interpretativos. Para isto, criou-se um projeto, delimitado pelas coordenadas geográficas s 23 03' 00" o 47 00' 00" e s 22 42' 00" o 46 40' 00", que engloba quatro folhas do IBGE, na escala 1:50.000, contendo os seguintes planos de informações: (a) Mapeamento geológico de superfície; (b) Geologia Estrutural da área; (c) Principais Cidades; (d) Principais Estradas; (e) Principais Drenagens; (f) Localização das referências de níveis; (g) Localização das referências de gravidades; (h) Anomalia Bouguer sem correção topográfica; (i) Anomalia Bouguer com correção topográfica; (j) Anomalia Bouguer interpolada por Fontes Equivalentes; (k) Derivada Segunda.

Uma boa forma de organização dos dados permite determinar os locais mais adequados para a locação das novas linhas gravimétricas, além de gerenciar a operacionalidade de cada novo perfil gravimétrico com o grau de interesse nas informações associadas. A criação de um banco de dados, em um ambiente SIG, contendo informações gerais sobre a região, permite avaliar corretamente: (a) a distribuição e condições das principais estradas disponíveis na região, para que a equipe de campo se desloque; (b) a localização e cotas das referências de Nível (RNs) e das referências de gravidade (RGs) existentes na área, apoiando o trabalho de nivelamento barométrico e gravimétrico; (c) os possíveis locais para implantação das bases altimétricas, identificando lugares estratégicos; (d) a direção e posição da nova linha gravimétrica pretendida; (e) a possibilidade de interligação das linhas gravimétricas e de nivelamento; (f) a localização de afloramentos rochosos, quando possível através de imagens de satélites; (g) a integração dos dados geofísicos e do mapeamento geológico de superfície; etc... Nesta etapa do trabalho, observou-se que imagens de satélites podem ser utilizadas para a atualização das estradas existentes, já que as cartas topográficas não estão atualizadas. As figuras contendo o mapeamento geológico e os dados geológicos e geofísicos, são possíveis formas de integração entre os planos de informações e suas saídas como produtos, representativos e cartográficos. Esta possibilidade de integração foi importante na comparação do melhor método de interpolação na elaboração dos mapas de anomalias Bouguer. Através da associação entre mapeamento geológico de superfície e modelagem dos dados verificou-se o método que mais se aproxima da realidade observada no mapeamento geológico de superfície.

6 - RESULTADOS OBTIDOS

- * O levantamento gravimétrico mostrou que a principal fonte causadora da anomalia Bouguer é a justaposição dos terrenos NESG/FARG, sendo que os granitóides apresentam um sinal gravimétrico muito fraco.
- * A aplicação da derivada vertical segunda à anomalia Bouguer mostrou ser particularmente eficiente para realçar o efeito gravimétrico dos granitóides, e apesar de ser um levantamento de semi-detalhe, obteve um bom resultado na identificação dos contatos verticais entre os plútons.
- * A análise do mapa de derivada vertical segunda da anomalia Bouguer permitiu diferenciar gravimetricamente os diferentes plútons de Morungaba, considerando diferentes mecanismos de colocação dos plútons.
- * O uso das técnicas de Sistemas de Informação Geográfica possibilitou integrar com facilidade as diferentes informações relevantes ao projeto, permitindo ainda uma grande flexibilidade de visualização e apresentação gráfica dos resultados, e pode servir ainda como uma ferramenta de planejamento e gerenciamento do trabalho.
- * A integração dos dados geológicos de superfície e gravimétricos, reforçou à importância da redução gravimétrica correta e da escolha do processo de interpolação para a obtenção de mapas gravimétricos de qualidade.
- * O uso de imagens de satélites para a atualização das estradas, e localização de afloramentos, é uma boa forma para melhorar a etapa do planejamento do trabalho de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Briggs, I.C., 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1):39-48.

- Cavallaro, F.A. de 1991: Transformações lineares do potencial e sua aplicabilidade a análise e interpretação de anomalias gravimétricas e magnéticas em corpos com geometria 2D, Trabalho de graduação IAG-Universidade de São Paulo.
- Cordell, L. de 1992: A scattered equivalent-source method for interpolation and gridding of potential-field data in three dimensions, *Geophysics*. Vol 54 no 4 pag (629-636)
- Garland, G.D. 1965. *The Earth's Shape and Gravity*. Pergamon Press, 183 pp.
- Lacoste & Romberg, 1991: *Instruction manual model G and D gravity meters*.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E.; Keys, D.A. 1976. *Applied geophysics*. Cambridge University Press.
- Trimble, 1989: *GPS Pathfinder Users Manual*.
- Vlach, S.R.F. -1993- Geologia e petrologia dos granitóides de Morungaba, SP. Tese de Doutorado. IG-USP. Inédita. 414 p.
- Vlach, S.R.F. -1989- Granitóides da região de Morungaba (Leste do Estado de São Paulo): complexos, plutons e "stocks". *In: SIMP. REG. GEOL.*, 1. Rio de Janeiro, 1989. SBG. Bol. Resumos. p. 163-164.
- Vlach, S.R.F. -1985- Geologia, petrografia e geocronologia das regiões meridional e oriental do Complexo de Morungaba, SP. Dissertação de Mestrado. IG-USP. Inédita. 253 pp.

AGRADECIMENTOS

FAPESP – BOLSA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

PROF. WLADIMIR SHUKOWSKY – IAG - USP

PROF. SILVIO VLACK – IG - USP



Figura 1 Mapa Geológico

- TATBA - 1
- MERIDIONAL - 2
- ORIENTAL - 3
- OCORR.MERIDIONAIS - 4
- JAGUARI - 5
- OURO VERDE - 6
- AREIA BRANCA - 7
- SEDIMENTOS - 8

Figura 2 Mapa Geológico e Derivada Segunda

