

## Condicionalamento estrutural-magnético do embasamento da Bacia Bauru no noroeste do estado do Paraná: implicações hidrogeológicas

Daniel Fabian Bettú e Francisco José Fonseca Ferreira (Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR)

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does 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

The structural framework of the Caiuá and Serra Geral aquifers in Northwest Paraná, Southern Brazil, is investigated from integration of aeromagnetic, hydrogeological data and digital elevation models (DEM). The area studied, which comprises approximately 18,500 km<sup>2</sup> and is located between 23°00' e 24°00'S and between 52°30' e 54°00'W, consists in basalts from the Serra Geral Formation (basement/fissural aquifer) and siliciclastic sediments of the Caiuá Group (granular aquifer), and also in alluvionar deposits. From processing and qualitative interpretation of horizontal gradient, phase and amplitude of analytical signal and Euler deconvolution data, a magnetic-structural framework of the area could be depicted. The framework is characterised by NW-SE and E-W, and secondarily NE-SW lineaments. Comparison of this structural framework against digital elevation models and potentiometric and outflow maps based on data from 223 wells on Caiuá sandstones reveals the structural control of the aquifer by basement features that are partly reflected on the sedimentary cover and can, therefore, be useful in groundwater exploration.

### Introdução

Na região noroeste do estado do Paraná ocorrem rochas sedimentares siliciclásticas, predominantemente arenosas, da Bacia Bauru (Cretáceo Superior). Na região estudada, localizada entre as coordenadas geodésicas 23° e 24° S e 52°30' e 54° W, abrangendo cerca de 18.500 km<sup>2</sup> (Figura 1), afloram as formações Rio Paraná e Goio Erê, Grupo Caiuá (Fernandes e Coimbra, 1996), cujo embasamento é constituído por rochas basálticas do Grupo São Bento (Formação Serra Geral, Cretáceo Inferior). Tais unidades são responsáveis por importantes sistemas aquíferos da região: granular (Grupo Caiuá) e fissural (basaltos). A Figura 2 exibe o mapa geológico simplificado da região. A seqüência de derrames basálticos mostra intenso fraturamento, sendo segmentada por diques associados ao Arco de Ponta Grossa (Ferreira, 1982). Na área de estudo as maiores espessuras da Bacia Bauru, normalmente, não ultrapassam 60 metros.

Tal condição geológica (pacote arenoso depositado sobre embasamento basáltico segmentado por diques e falhas),

possibilitou a investigação deste último através do método magnetométrico. Assim, foram processados e interpretados qualitativamente, mapas do gradiente horizontal, da amplitude e da fase do sinal analítico, a partir do mapa magnético residual micronivelado, com o objetivo de estabelecer um arcabouço estrutural-magnético e avaliar suas relações com parâmetros hidrogeológicos como potenciometria e vazões. Objetivou também identificar possíveis zonas de conectividade entre os aquíferos granular Caiuá e o fissural Serra Geral.

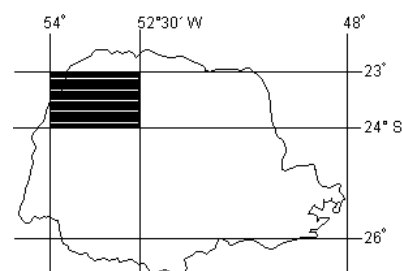


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo.

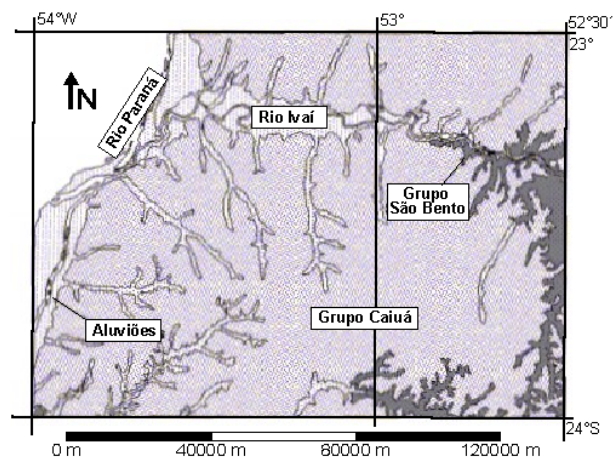


Figura 2- Mapa geológico simplificado da área de estudo (modificado de Mineropar, 1989).

Além da análise qualitativa dos mapas magnéticos, foi utilizado o procedimento denominado deconvolução de Euler, pelo qual foi possível estimar as profundidades das fontes magnéticas, a partir do modelo de dique. Os dados aeromagnetométricos pertencem ao Projeto Aerogeofísico Rio Ivai (Petrobrás, 1981), disponíveis no acervo do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA/UFPR).

### Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo principal a geração de um arcabouço estrutural-magnético do embasamento

da Bacia Bauru, no estado do Paraná, através da interpretação de diversos mapas temáticos já mencionados, gerados a partir de continuações ascendentes (2000 e 4000 m) do mapa magnético residual micronivelado, visando avaliar a persistência das estruturas em profundidade. Tal arcabouço permitirá a identificação de zonas de possível conectividade entre os dois aquíferos e a discussão das relações destas zonas com as vazões dos poços produtores da região.

**Métodos**

**Hidrogeologia**

Na região estudada existem 223 poços produtores de água, cadastrados nos bancos de dados da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e da Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e de Saneamento Ambiental (Suderhsa), da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná, cujo posicionamento é indicado na Figura 3.

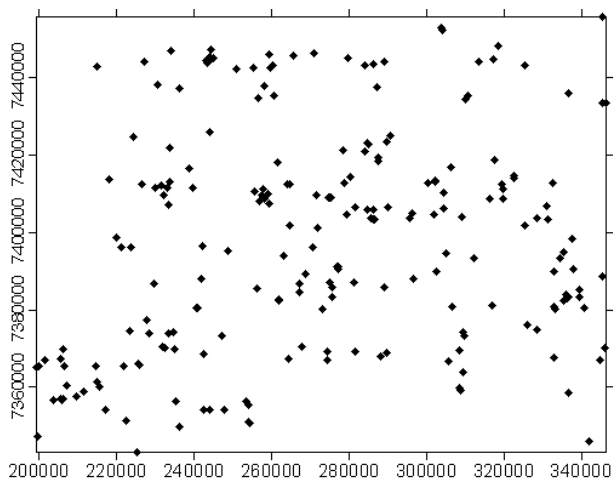


Figura 3- Mapa de localização dos poços.

Com base nos dados do nível estático dos poços, foi gerado um mapa da superfície potenciométrica (Figura 4), a partir de interpolação por krigagem com tendência externa do modelo digital de elevação, mostrado na Figura 5.

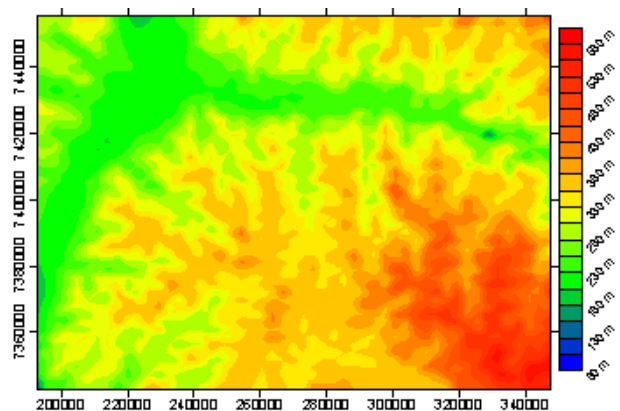


Figura 4- Superfície potenciométrica da área de estudo

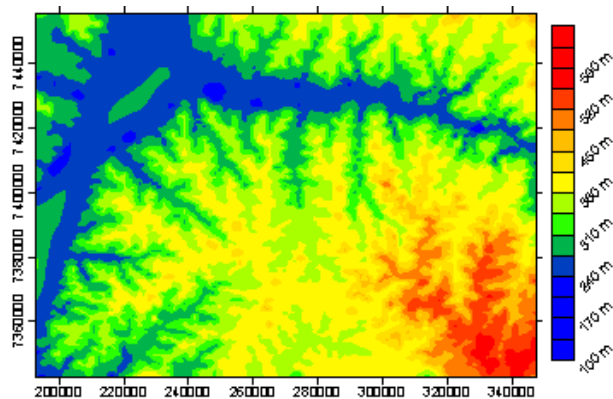


Figura 5 – Modelo digital de elevação da área de estudo.

**Magnetometria**

**Pré-processamento**

Os dados originais foram tomados a uma altura média de 450 metros, intervalos de amostragem de aproximadamente 66 m, espaçamento entre as linhas de voo de 2000 metros, segundo a direção N-S, e linhas de controle na direção E-W, separadas de 20000 m. Tais dados foram subtraídos do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), resultando no mapa magnético residual da Figura 6, gerado a partir de interpolação de células quadradas de 500 x 500 m, pelo método da mínima curvatura. Nota-se na Figura 6 a presença de artefatos, ao longo das linhas de voo, com pequenos comprimentos de onda, decorrentes de erros de nivelamento.

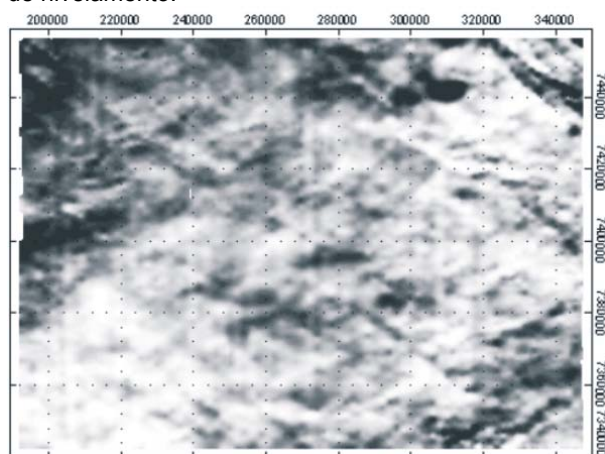


Figura 6 - Mapa magnético residual mostrando erros de nivelamento na direção das linhas de voo (N-S).

Para remover os artefatos foram utilizados dois procedimentos de micronivelamento: gridagem bi-direcional e decorrugação FFT, sendo o último selecionado por apresentar maior aderência estatística aos dados originais e eliminar com mais eficácia as falsas anomalias. A Figura 7 mostra o mapa magnético residual decorrente deste processo de micronivelamento.



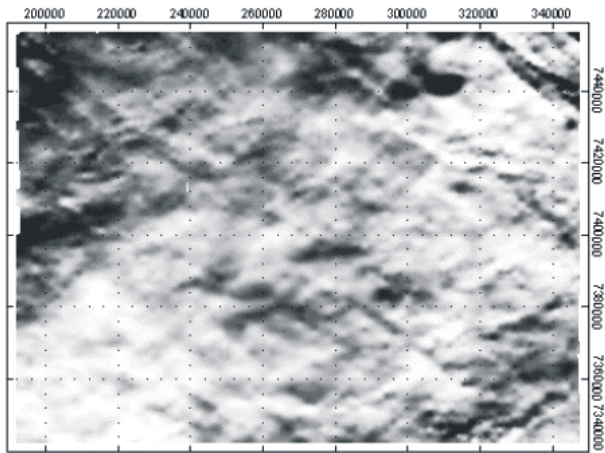


Figura 7 - Mapa magnético residual micronivelado.

### Processamento

A partir do mapa magnético residual micronivelado da Figura 7, foram realizadas duas continuações ascendentes, para as alturas de 2000 e 4000 m, cujos mapas são indicados nas figuras 8 e 9.

Desde o início dos anos 70 foram desenvolvidos métodos baseados nos gradientes (derivadas) horizontais e vertical, os quais constituem ferramentas importantes para a determinação de parâmetros geométricos como a localização (mapeamento), limites e profundidades dos corpos causadores de anomalias de campos potenciais (magnético e gravimétrico). Desta forma, sobre os dois níveis de continuação para cima, foram aplicadas as técnicas do gradiente horizontal, da fase e da amplitude do sinal analítico, com o objetivo de extrair informações estruturais. Foi também utilizado o método da deconvolução de Euler, modelo de dique, que permitiu estimar as profundidades de fontes das anomalias magnéticas residuais a partir das Figuras 8 e 9.

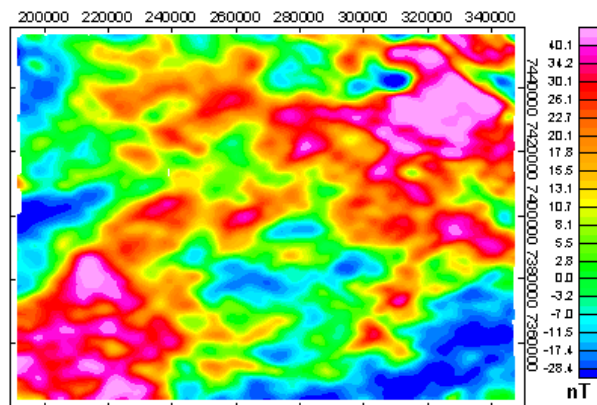


Figura 8 - Mapa magnético continuado à 2000 metros.

### Gradiente Horizontal

O gradiente horizontal de ordem zero ajuda a delimitar mudanças abruptas no declive do campo magnético residual, uma vez que utiliza as primeiras derivadas horizontais. A equação abaixo representa o gradiente horizontal de ordem zero:

$$h_{(x,y)} = [(M_x)^2 + (M_y)^2]^{1/2}$$

onde  $M_x = dM/dx$ ,  $M_y = dM/dy$  (derivadas horizontais da anomalia  $M$  do campo magnético).

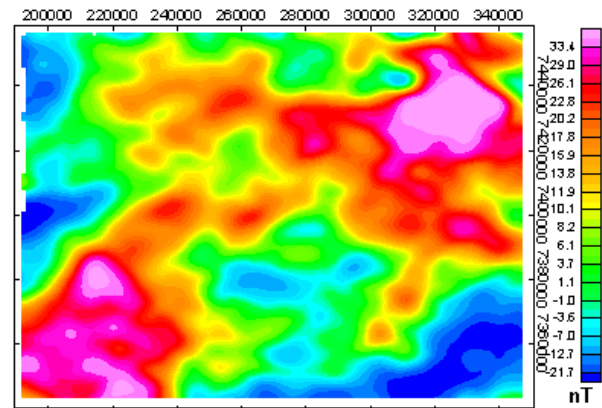


Figura 9 - Mapa magnético continuado à 4000 metros.

Uma vez que o gradiente horizontal delimita as variações do campo residual, através do cálculo das primeiras derivadas horizontais, ele é geralmente utilizado para marcar os limites de corpos e estruturas magnéticas. As Figuras 10 e 11 mostram os mapas e as interpretações do gradiente horizontal de ordem zero, para as continuações à 2000 e 4000 m, respectivamente.

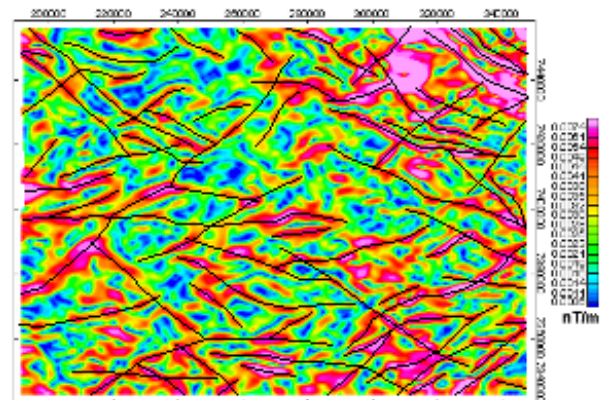


Figura 10 - Mapa do gradiente horizontal de ordem zero, gerado a partir da continuação à 2000 m, com o traçado dos eixos de máximo das anomalias.

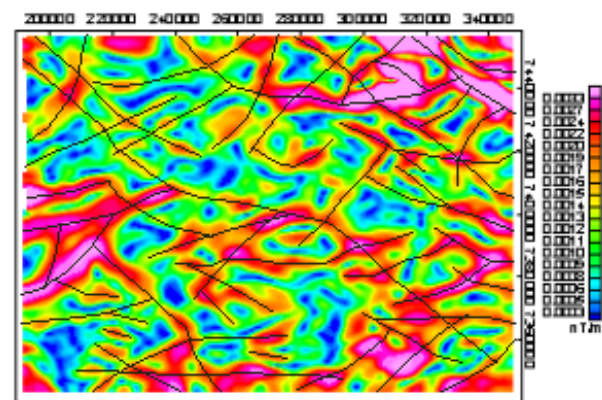


Figura 11 - Mapa do gradiente horizontal de ordem zero, gerado a partir da continuação à 4000 m, com o traçado dos eixos de máximo das anomalias.

**Amplitude do Sinal Analítico**

O sinal analítico é uma função complexa, também muito empregado no mapeamento magnético. Uma das principais vantagens deste método, além de demarcar os limites do corpo, é que os resultados independem da direção de magnetização.

A função amplitude do sinal analítico, cuja equação é:

$$|A_{(x,y)}| = [(Mx)^2 + (My)^2 + (Mz)^2]^{1/2}$$

onde  $Mz = dM/dz$  é a primeira derivada vertical da da anomalia  $M$  do campo magnético e  $Mx$  e  $My$  já foram definidos, é expressa por um vetor adição das componentes reais (direções  $x$  e  $y$ ) e imaginária (direção  $z$ ).

As Figuras 12 e 13 mostram os mapas de amplitude do sinal analítico para as continuações à 2000 e 4000 m respectivamente, além de suas interpretações.

Nos mapas da amplitude do sinal analítico (ordem zero) as anomalias demarcam exatamente a posição das estruturas, sendo a largura das anomalias proporcional a sua profundidade.

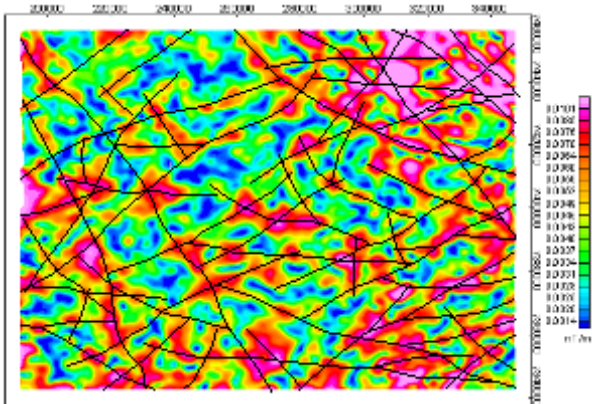


Figura 12- Mapa da amplitude do sinal analítico, gerado a partir da continuação à 2000 m, com o traçado dos eixos de máximo das anomalias.

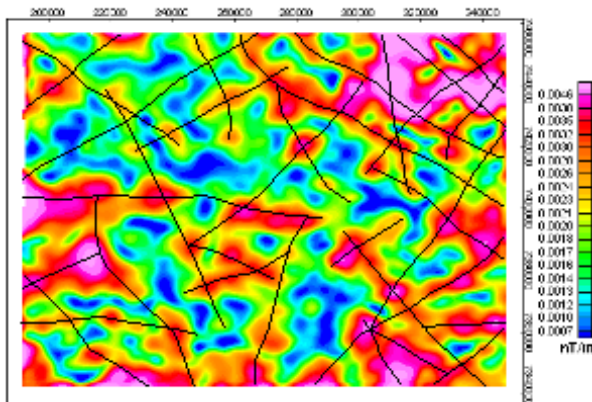


Figura 13- Mapa da amplitude do sinal analítico, gerado a partir da continuação à 4000 m, com o traçado dos eixos de máximo das anomalias.

**Fase do Sinal Analítico**

A fase do sinal analítico de ordem zero representa o ângulo formado entre os vetores imaginário e real do sinal analítico (quociente resultante da 1ª derivada vertical pelo gradiente horizontal) e melhor delimita as fontes anômalas rasas, que possuem alta frequência espacial, sendo expresso por:

$$\Phi_{(x,y)} = \text{arctg} (Mz)/[(Mx)^2 + (My)^2]^{1/2}$$

A fase do sinal analítico fornece uma estimativa do mergulho e do contraste de susceptibilidade das fontes das anomalias (Thurston e Smith, 1997), e é utilizada para complementar a interpretação da amplitude do sinal analítico, uma vez que, apesar de ocorrer variações na amplitude do sinal analítico, sua fase permanece constante.

As Figuras 14 e 15 mostram os mapas da fase do sinal analítico correspondentes as continuações à 2000 e 4000, respectivamente, além de suas interpretações.

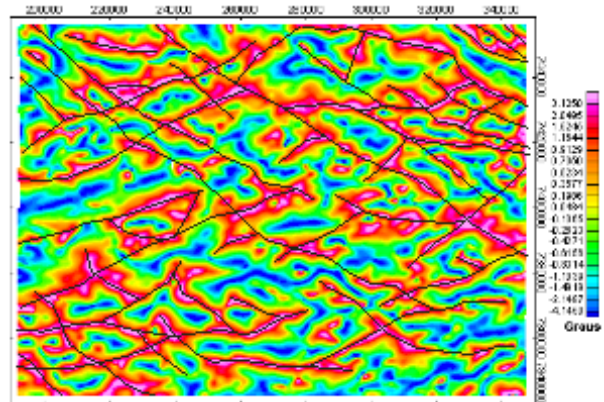


Figura 14- Mapa da fase do sinal analítico, gerado a partir da continuação à 2000 m, com o traçado dos eixos de máximo das anomalias.

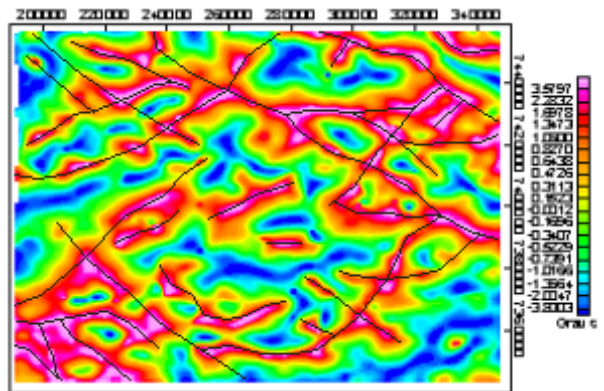


Figura 15- Mapa da fase do sinal analítico gerado a partir da continuação à 4000 m, com o traçado dos eixos de máximo das anomalias.

**Deconvolução de Euler**

O método da deconvolução de Euler é baseado na equação de homogeneidade de Euler, que relaciona o campo magnético e suas derivadas horizontais e vertical com a localização da fonte, através do grau de



homogeneidade, que pode ser interpretado como um índice estrutural (Thompson, 1982). O índice estrutural é uma medida da taxa de mudança da distância entre a fonte e o detetor e depende do modelo selecionado. Por exemplo, o campo magnético de um dique 2-D tem índice estrutural  $N = 1$ , enquanto um *pipe* vertical tem  $N = 2$ .

O sistema usa o método dos mínimos quadrados para resolver a equação de Euler de cada ponto do *grid*, dentro de uma janela pré-estabelecida. Uma janela quadrada de 10 por 10 vezes o tamanho da célula de interpolação, por exemplo, move-se através de cada coluna do *grid*. Cada ponto da malha envolve 100 equações (10 x 10), as quais encerram quatro variáveis desconhecidas (localização de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e o valor do *background* -  $B$ ), além dos erros (desvio-padrão). Estas soluções são obtidas para um determinado índice estrutural. A solução é considerada válida se a profundidade calculada for menor que a tolerância especificada e se a localização da fonte estiver a uma distância limite do centro da janela, também especificada. Ao fim do processo o sistema gera um arquivo com as soluções. Para dados de campos potenciais, a equação de Euler pode ser assim formulada:

$$(x - x_0) \delta T / \delta x + (y - y_0) \delta T / \delta y + (z - z_0) \delta T / \delta z = N(B - T)$$

onde  $(x_0, y_0, z_0)$  é a posição da fonte magnética e  $T$  é o campo medido no ponto  $(x, y, z)$ . O valor  $B$  representa o regional do campo ou o nível de base. Esta equação é facilmente resolvida para corpos magnéticos de forma simples (Thompson, 1982), como aqueles presentes na região estudada.

As Figuras 16 e 18 mostram, respectivamente, os mapas de soluções de Euler das continuações à 2000 e 4000 m, para o modelo de dique ( $N = 1$ ) e contato geológico ( $N=0$ ) respectivamente, enquanto as Figuras 17 e 19 exibem os histogramas de soluções das profundidades das fontes para os referidos mapas.

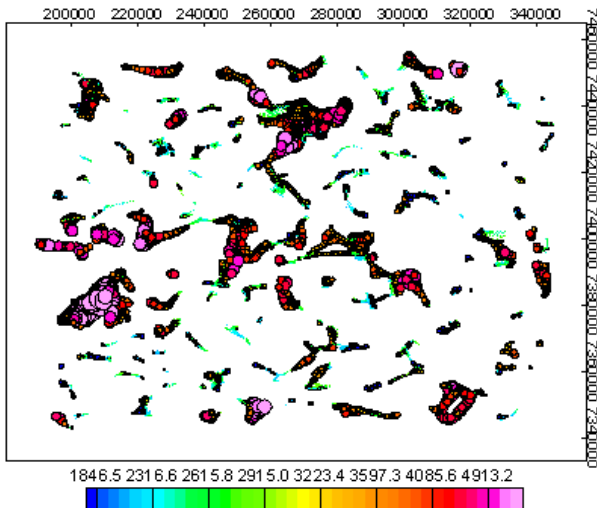


Figura 16- Mapa de soluções de Euler derivado da continuação à 2000 m, janela de busca de 20 vezes o tamanho da célula,  $N = 1$  (dique) e tolerâncias dos erros de posicionamento e profundidade de 10%.

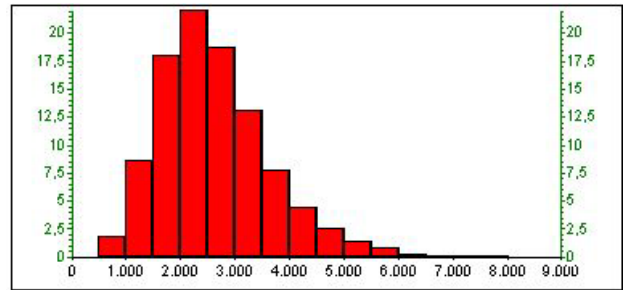


Figura 17- Histograma das soluções de profundidades de Euler correspondente ao mapa da Figura 16.

**Discussões**

A interpretação dos dados magnéticos mostrou um padrão estrutural semelhante nos dois níveis de investigação, com feições contínuas e bem delineadas, por vezes, segmentando toda a área. As principais direções são NW-SE, interpretadas como reflexo dos diques associados aos basaltos da Formação Serra Geral, E-W e NE-SW e, secundariamente, N-S. Estas últimas são melhor evidenciadas nos mapas de amplitude do sinal analítico.

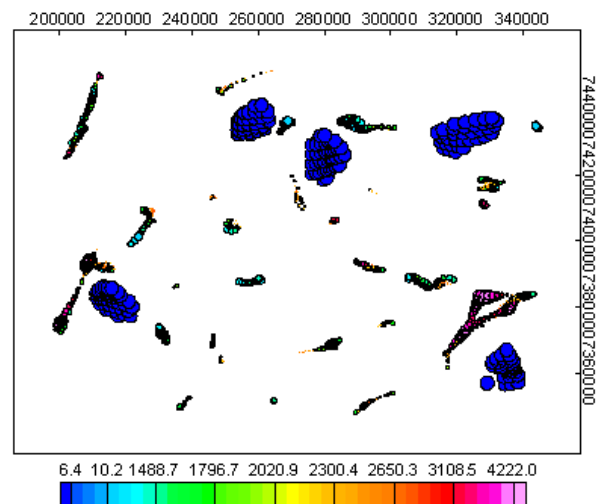


Figura 18- Mapa de soluções de Euler derivado da continuação à 4000 m, janela de busca de 20 vezes o tamanho da célula  $N = 0$  (contato geológico) e tolerâncias dos erros de posicionamento e profundidade de 20%.

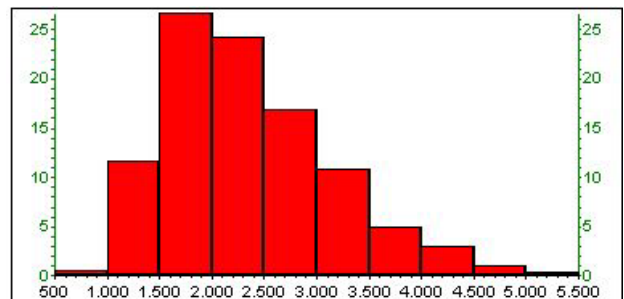


Figura 19- Histograma das soluções de profundidades de Euler correspondente ao mapa da Figura 17.

Decorrente da porosidade fissural dos basaltos, espera-se que no aquífero Serra Geral as maiores vazões estejam vinculadas às zonas de maior fraturamento, representadas pelas direções NW-SE, assim como no cruzamento com estruturas de outras direções, constituindo, pois, guia prospectivo para a exploração de água subterrânea na região.

A Figura 20 exibe o mapa de vazões da área estudada, interpolado pelo método da curvatura mínima, preliminarmente sobreposto ao arcabouço estrutural extraído do mapa da amplitude do sinal analítico da Figura 12. Nota-se que as áreas de maior vazão estão controladas ou confinadas por estruturas interpretadas a partir do mapa magnético. Dentre elas, destacam-se as que ultrapassam 45 m<sup>3</sup>/h, situadas na porção ENE da área e relacionadas a dois importantes cruzamentos de estruturas, justamente na borda da Bacia Bauru, onde as espessuras dos sedimentos é menor. Deve-se salientar que os dados utilizados na interpolação dos dados de vazão são independentes da interpretação estrutural.

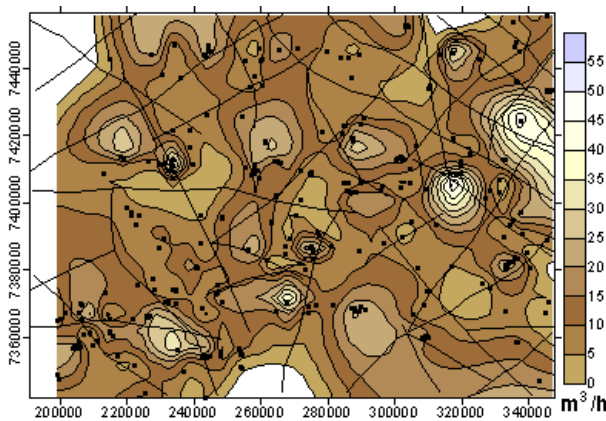


Figura 20- Mapa de contorno das vazões dos poços completados no aquífero Caiuá, com sobreposição do arcabouço estrutural da Figura 12. Pontos pretos representam os poços estudados.

**Conclusões**

A região estudada é caracterizada por uma cobertura sedimentar (arenitos) pouco espessa e não magnética, o que permitiu interpretar um arcabouço estrutural do embasamento sotoposto, representado pelos basaltos da Formação Serra Geral. O pacote basáltico mostra intensa deformação dútil, sobretudo na direção NW-SE, ocupada por cerrado enxame de diques de diabásio da região central do Arco de Ponta Grossa.

Já é de muito conhecida a importância das feições estruturais na formação do relevo, corroborando a proposta de Ferreira *et al.* (1999), da existência de um alto estrutural do embasamento, responsável pelo padrão radial de drenagem observado na área (Figuras 2, 4 e 5), denominado Domo de Umuarama. O caráter aproximadamente circular do alto estrutural ficou bem evidenciado nos vários mapas magnéticos apresentados. Também notou-se uma nítida relação entre a superfície potenciométrica e o relevo (compare figuras 4 e 5).

As principais estruturas identificadas através dos mapas magnéticos possuem direção NW-SE (predominante), E-W e NE-SW e, subordinadamente, N-S, sendo as primeiras associadas ao enxame de diques máficos do Arco de Ponta Grossa.

O mapa de vazões, interpolado por curvatura mínima, evidenciou áreas com índices de até 45 m<sup>3</sup>/h, alinhadas ou confinadas, localizadas próximas ou sobre feições estruturais identificadas nos mapas magnéticos, principalmente no cruzamento de lineamentos, o que constitui guia para a exploração de água subterrânea no Grupo Caiuá. Esta condição ficou bem evidenciada na porção ENE da área, justamente onde a Bacia Bauru mostra a menor espessura sedimentar da área.

**Agradecimentos**

Os autores agradecem à Sanepar e Suderhsa pela cessão dos dados hidrogeológicos, à Petrobrás pelos dados aeromagnéticos e ao CNPq, fundo setorial CT-HIDRO, pelo apoio através de bolsa de Mestrado.

**Referências Bibliográficas**

**Fernandes, L.A., e Coimbra, A.M.,** 1996, A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil): Anais da Academia Brasileira de Ciências, **68**, Vol 2.

**Ferreira, F.J.F.,** 1982, Integração de dados aeromagnetométricos e geológicos: configuração e evolução tectônica do arco de Ponta Grossa. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

**Ferreira, F. J. F., Forlin, M., Stellfeld, M. C., Campos, A. F.** 1999. Assinaturas magnética e geomórfica do Domo de Umuarama – PR. *Sixth International Congress of the Brazilian Geophysical Society* (CD-ROM).

**Mineropar, Minerais do Paraná,** 1989, Mapa Geológico do Estado do Paraná. 1:650.000.

**Petrobrás,** 1981, Projeto aerogeofísico Rio Ivaí: Consórcio CESP-IPT, Paulipetro (arquivo digital).

**Sanepar, Companhia de Saneamento do Paraná.** Banco de dados dos poços construídos na Folha Umuarama (arquivo digital).

**Suderhsa, Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e de Saneamento Ambiental.** Banco de dados dos poços construídos na Folha Umuarama (arquivo digital).

**Thompson, D. T.,** 1982, EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, **47**: 31-37.

**Thurston, J. B. e Smith, R. S.,** 1997. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics* **57**: 116-125