

# Deslocamento de Redes de Fluxos de Água Subterrânea: Análise Comparativa Entre a Interpolação de Cargas Hidráulicas e a Modelagem de Fluxos de Água Subterrânea

Leal<sup>1</sup>, P. J. V.; Mulato<sup>2</sup>, T. A.; Avelar<sup>3</sup>, A. S. & Coelho Netto<sup>3</sup>, A. L.

(1) Doutorando, PPGG-UFRJ, Bolsista CNPq, [pjvleal@hotmail.com](mailto:pjvleal@hotmail.com)

(2) Bolsista IC-CNPq, [thiagomulato@yahoo.com.br](mailto:thiagomulato@yahoo.com.br)

(3) Professor Adjunto, [andreavelar@acd.ufrj.br](mailto:andreavelar@acd.ufrj.br)

(4) Professora. Titular e Pesquisadora 1B-CNPq, [ananetto@acd.ufrj.br](mailto:ananetto@acd.ufrj.br)

(1, 2, 3 e 4) GEOHECO/Laboratório de Geo-Hidroecologia, Depto. de Geografia, Instituto de Geociências, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza - UFRJ.

## Abstract

The differential expansion of the regional drainage network, in the middle Paraíba do Sul river valley is investigated through systematic studies in the Bananal river basin, which is tributary to the Paraíba do Sul river. The first order channels expand mainly in the headwater valleys, through the headward progression of erosion gullies. We assume that the inflow of groundwater from outside of the headwater valleys is the cause of the differential expansion of some channels. Two hypotheses were proposed to explain the source of the groundwater flows originated from outside of the topographic divides of the headwater valleys. One of these hypotheses, the groundwater piracy, is the object of the present investigation. The study site includes a group of neighboring headwater valleys. The hydraulic heads and water levels are being monitored in the study site. The groundwater flow routes in the area was done following two distinct methodologies: the interpolation of the hydraulic heads measured in the field and the groundwater tridimensional modeling. The results show significant differences between the two methods and demonstrate that both are important instruments in the groundwater flow analysis.

Keywords: drainage network expansion; gullies; groundwater piracy; groundwater flownet.

## Resumo

O crescimento diferencial da rede regional de canais, no médio vale do rio Paraíba do Sul vem sendo investigada a partir de estudos sistemáticos numa bacia tributária do rio do Bananal. Os canais de primeira ordem expandem principalmente nas cabeceiras de drenagem, através do avanço regressivo de voçorocamentos. O aporte de água subterrânea de fora dos limites topográficos das cabeceiras de drenagem vem sendo apontado como fator de causa do crescimento diferencial de alguns canais. Duas hipóteses foram levantadas para explicar a fonte dos fluxos de água subterrânea, vindos de fora dos limites topográficos das cabeceiras de drenagem. Uma dessas hipóteses, a pirataria de água subterrânea, é o objeto de investigação do presente estudo. A área de estudo compreende um grupo de cabeceiras de drenagem vizinhas. O monitoramento das cargas hidráulicas e do nível freático vem sendo realizado. A determinação das rotas dos fluxos de água subterrânea na área de estudo foi feita seguindo duas metodologias diferentes. Através da interpolação das cargas hidráulicas mensuradas em campo e através da modelagem tridimensional da água subterrânea. Os resultados mostram diferenças significativas entre os métodos e mostra que ambos são instrumentos importantes na determinação de rotas de fluxo.

Palavras chave: expansão da rede de canais; voçorocamentos; pirataria de água subterrânea; rede de fluxos de água subterrânea.

## 1 - Introdução

Algumas bacias que drenam a vertente direita (serra da Bocaina) do médio vale do rio Paraíba do Sul vem expandindo suas respectivas redes de canais, especialmente nos vales de cabeceiras de drenagem. Isto decorre do crescimento regressivo de canais incisivos por

ativação de mecanismos erosivos associados a descargas críticas de água subterrânea em faces de exfiltração (Coelho Netto et al., 1988). Este tipo de canal erosivo, resultante da ação de água subterrânea, foi denominado por Pichler (1953) de *voçoroca*. Na bacia do rio Piracema, principal tributário do rio do Bananal, afluente à direita do rio Paraíba do Sul, Cambra (1995) verificou que 83% das voçorocas (n=117) estão topograficamente ajustadas à rede regional de canais. Significa, portanto, que é no domínio das cabeceiras de drenagem, aonde crescem estes canais de ordem hierárquica inferior, que ocorre a principal integração dos processos de encostas com os processos fluviais (Coelho Netto, 2003).

A evolução da rede de canais, no entanto, não apresenta um comportamento espacialmente uniforme, especialmente no domínio de colinas rebaixadas. Ou seja, os canais crescem e bifurcam irregularmente no espaço e no tempo, de tal modo que hoje se observa uma paisagem aonde as cabeceiras de drenagem apresentam-se em diferentes estágios evolutivos. Enquanto muitas cabeceiras ainda estocam espessos pacotes de sedimentos, acumulados no ciclo de instabilidade erosivo-deposicional entre 10.000 e 8.000 anos atrás (Dietrich et al., 1991; Coelho Netto et al., 1994), outras já foram erodidas pelo avanço das voçorocas. Uma parte destas voçorocas está em processo ativo de crescimento vertical e regressivo, outra parte já se encontra estabilizada por ajuste de declive com o canal coletor adjacente (Gilbert, 1877) e/ou rebaixamento do nível d'água subterrâneo e/ou redução da descarga do fluxo d'água subterrânea no fundo do canal (Rocha-Leão, 2005).

Avelar e Coelho Netto (1992a e 1992b) verificaram o paralelismo entre a orientação dos eixos de vales de cabeceiras e a orientação das fraturas locais e, através de uma extensa rede de piezômetros e poços, observaram a ocorrência de fluxos d'água artesianos ao longo do eixo de um vale de cabeceira suspenso que acompanha o fraturamento subjacente. Os autores associaram a exfiltração destes fluxos artesianos à iniciação de canais e origem dos vales de cabeceiras de drenagem. Mais recentemente, Fonseca et al. (2006) confirmaram a ocorrência de artesianismo no fundo de um vale de cabeceira ajustado topograficamente ao rio Bananal, e sob voçorocamento ativo. Todos estes autores detectaram um atraso da ordem de 2 a 4 meses nas resposta das cargas de pressão em relação às chuvas precipitadas sobre a bacia do rio Bananal, confirmando que estes fluxos artesianos em fraturas não são regulados por aquífero local e sim regional.

Alguns trabalhos relevantes discutem a relação entre o crescimento de canais e suas respectivas áreas de contribuição e gradiente topográfico. Os trabalhos clássicos de

Horton (1945) e Dunne (1980) apontam que os canais crescem regressivamente até uma distância crítica do divisor, a partir de onde a concentração dos fluxos d'água da área de contribuição não atingiria uma descarga crítica, limitando trabalho erosivo. Montgomery e Dietrich (1990) ponderam que o tamanho da área de contribuição varia inversamente com o gradiente topográfico. No entanto, no ambiente de colinas da bacia do rio Piracema, o desenvolvimento de alguns canais nem sempre é controlado pelo tamanho e/ou gradiente topográfico das suas respectivas áreas de contribuição.

Pesquisas recentes na Estação Experimental da Bela Vista, onde é realizado o presente trabalho, vem indicando um possível deslocamento entre a rede de fluxos de água subterrânea e os divisores de águas entre vales de cabeceiras adjacentes (Leal et al., 2006). Este fato poderia ser responsável, pelo menos em parte, pelo crescimento diferencial de canais de drenagem do tipo voçoroca como visto por Rocha-Leão et al. (2005). Por ora questiona-se quais seriam as principais fontes dos fluxos d'água que governam a expansão da rede de canais? Duas hipóteses vêm sendo levantadas: 1) o aquífero regional, que exfiltraria por artesianismo através das fraturas subverticais, e cuja eficiência aumentaria do compartimento montanhoso para o compartimento de colinas da bacia, como proposto por Coelho Netto (1999); 2) transferência de água subterrânea, ou "pirataria", entre vales adjacentes com desnivelamento topográfico, mecanismo proposto por Coelho Netto & Fernandes (1990).

O presente trabalho mostra os dados preliminares da pesquisa que vem investigando essa segunda hipótese através da análise da rede de fluxos da água subterrânea por meio da interpolação direta das cargas hidráulicas mensuradas em campo e através da modelagem tridimensional das redes de fluxos subterrâneos.

## **2 - Área de Estudo**

A área de estudo (~4 km<sup>2</sup>) está localizada na fazenda Bela Vista, a 12km da cidade de Bananal (SP),e, é formada pelo anfiteatro da Bela Vista (0,25 km<sup>2</sup>) e pelas sub-bacias com relação de vizinhança direta. Toda a drenagem da área converge para o rio Piracema, que possui 132 km<sup>2</sup> de área de bacia, e é o principal afluente do rio do Bananal (518km<sup>2</sup> de área de bacia).

O Anfiteatro da Bela Vista é formado por uma concavidade principal, a qual é alimentada por concavidades menores. O fundo da concavidade principal está preenchido por um pacote aluvio-coluvionar espesso, que vem sendo dissecado pelo avanço remontante da

voçoroca da Bela Vista, que tem aproximadamente 450 metros de comprimento, 40 metros de largura média e profundidades superiores a 15 metros. A localização regional da área de estudo pode ser vista na figura 1A.

Na figura 2 estão destacados quatro vales de cabeceira de drenagem, vizinhos ao Anfiteatro da Bela Vista (V1). A cabeceira V2 está topograficamente suspensa em relação ao Anfiteatro da Bela Vista, possui fundo plano e não é canalizada. As cabeceiras V3, V4 e V5 estão rebaixadas em relação ao Anfiteatro da Bela Vista, sendo que a cabeceira V3 possui fundo aplainado e divisor topográfico comum à cabeceira V4 muito rebaixado.

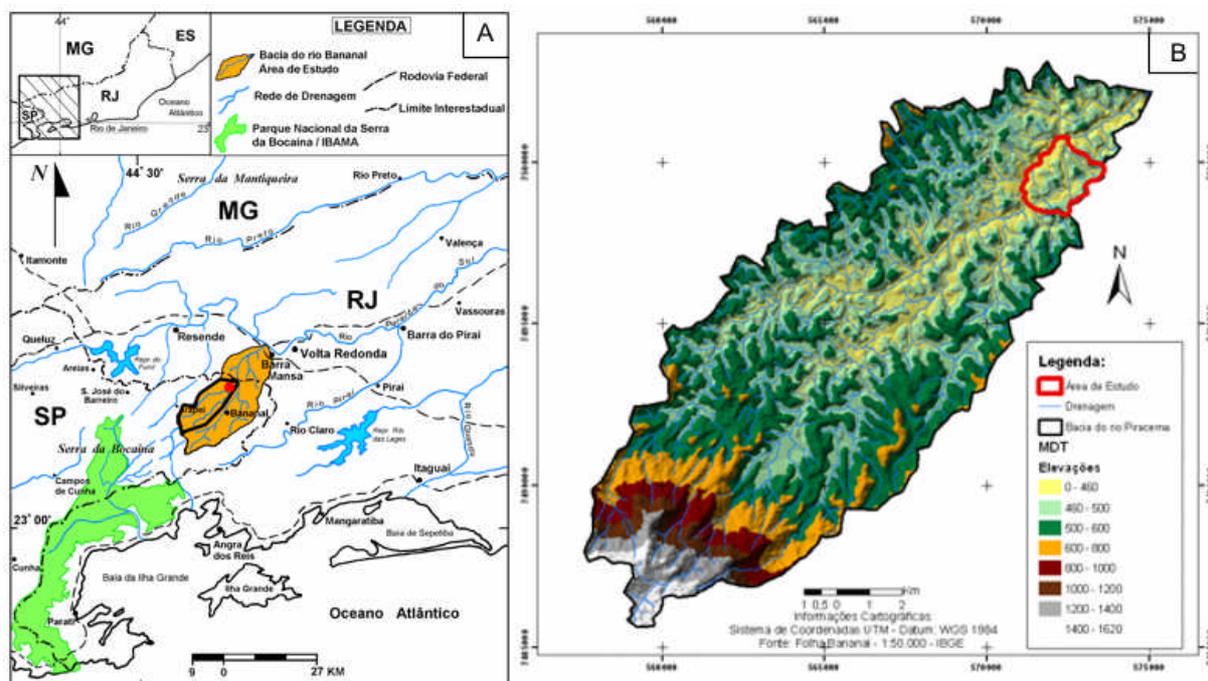


Figura 1 – A- Localização regional da bacia do rio do Bananal (em laranja) e do rio Piracema (contorno preto); B - localização da área de estudo na bacia do rio piracema;

A bacia do rio do Bananal apresenta duas unidades fisiográficas distintas, que podem ser observadas também na bacia do rio Piracema (figura 1B): uma, o compartimento montanhoso da Serra da Bocaina, com desnivelamentos topográficos acima dos 600 metros, encostas íngremes e fundos de vale estreitos; outra, o compartimento de colinas, com fundos de vales largos e ligeiramente inclinados com desnivelamentos abaixo dos 500 metros (Fernandes, 1990). A área de estudo (figura 2) está localizada no compartimento colinoso.

A área de estudo drena um substrato geológico de rochas gnáissicas da unidade metassedimentar São João (Sillimanita-granada-muscovita-biotita gnaisse com intercalações

de níveis ou lentes de rochas calciossilicáticas, gndito, mármore e de sillimanita-muscovita-biotita xisto) descritas por Almeida et al. (1991 e 1993).

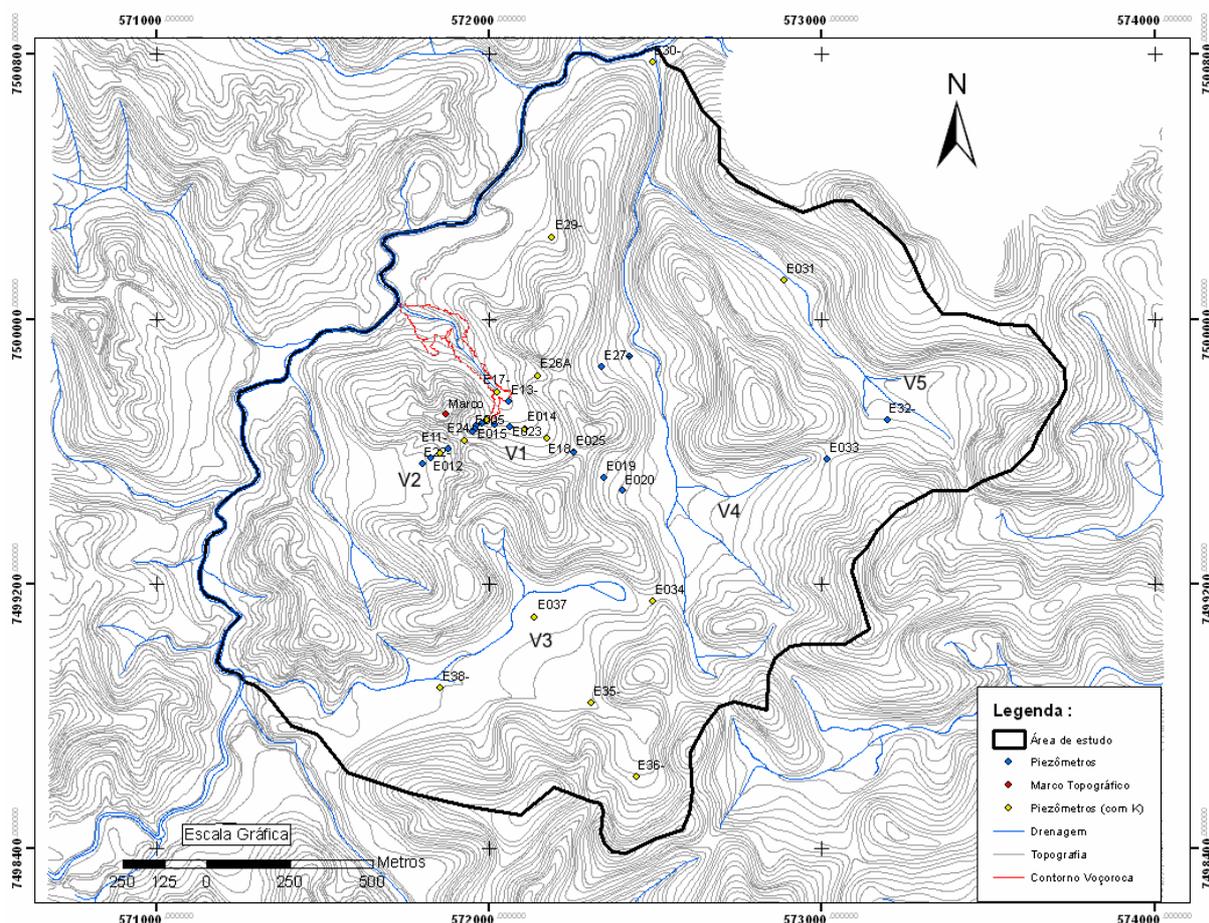


Figura 2 - Mapa da área de estudo, mostrando a localização dos piezômetros (os destacados em amarelo são os que foram usados nos testes de condutividade hidráulica).

### 3 – Metodologia

Para a interpolação das cargas hidráulicas, os dados do dia em que se quer analisar são organizados em uma planilha que é importada pelo programa Surfer, que interpola os valores de x, y (coordenadas de cada ponto) e z (carga total de cada piezômetro).

O programa gera então isolinhas, que representam, neste caso, as linhas equipotenciais. O Surfer projeta ainda, a partir das isolinhas, os vetores que representam a direção e a magnitude dos fluxos. As redes de fluxo são então exportadas para o programa ArcGis, com o objetivo de serem integradas à base cartográfica, e, por último, os divisores de água subterrânea são traçados. Esse procedimento foi seguido para as redes de fluxo em planta e em perfil.

A modelagem tridimensional das redes de fluxos da água subterrânea vem sendo feita no programa Visual Modflow e alguns resultados preliminares são mostrados. O desenvolvimento de um modelo matemático hidrológico é um processo que pode ser melhorado constantemente com a aquisição de dados mais precisos.

O modelo conceitual é traduzido ao programa através da inserção dos dados disponíveis, quanto maior o número de parâmetros e quanto mais precisos os dados de entrada mais realista o modelo se torna. Os dados de topografia, limite da área de estudo, profundidade da rocha sã, carga hidráulica dos canais de drenagem, localização e profundidade dos piezômetros, precipitação e condutividade hidráulica dos solos foram inseridos no programa.

O Visual Modflow é um programa de modelagem por diferenças finitas, onde o domínio do fluxo é discretizado por uma grade tridimensional, onde as células têm um ponto central (nó), no qual o potencial hidráulico é calculado através da equação fundamental de fluxo de água subterrânea.

Após a inserção dos dados de entrada, a malha deve ser definida de modo que o tamanho da célula atenda aos propósitos da modelagem. O tamanho das células utilizadas foi de 5x5x5m. A dimensão das células foi definida de modo que a grade pudesse ter um espaçamento regular em todas as direções, facilitando dessa forma a resolução do problema. A altura da célula define a profundidade das camadas do modelo, portanto foram definidas seis camadas de 5 metros cada uma, totalizando 30 metros de regolito.

A partir dos resultados apresentados pela modelagem, a calibração do modelo pode ser feita através da comparação entre as cargas calculadas e as cargas mensuradas em campo. Os parâmetros podem ser ajustados até que o modelo esteja calibrado, ou seja, até que as diferenças entre as cargas hidráulicas calculadas e as observadas sejam aceitáveis.

A modelagem se encontra ainda na fase de calibração e ainda serão inseridos dados de condutividade hidráulica mensurados em campo através de testes do tipo “slug test” de injeção. O modelo apresentado, no presente trabalho, foi rodado com a carga hidráulica média para a área toda.

#### **4 – Resultados e Discussão**

Os resultados da interpolação das cargas hidráulicas em planta (figura 3) mostram que os divisores de água subterrânea não correspondem aos divisores topográficos, como já

tinha sido demonstrado por Leal (2004), para esta mesma área. A rede de fluxos mostra que a cabeceira V4 recebe fluxos provenientes das cabeceiras V1 e V3.

A modelagem tridimensional (figura 5) também mostra a não correspondência entre divisores topográficos e divisores de águas subterrâneas, no entanto a relação de transferência de fluxos entre as cabeceiras de drenagem apresenta-se diferente. O modelo não indica transferência de fluxos subterrâneos provenientes do anfiteatro da Bela Vista (cabeceira V1) e nem na direção do mesmo. No entanto, as linhas de fluxos mostram uma convergência de fluxos provenientes da cabeceira V3 na direção da cabeceira V4.

A comparação entre as técnicas utilizadas mostra diferenças significativas entre os domínios de fluxo resultantes. A modelagem por levar em conta um número muito maior de variáveis define melhor o problema, enquanto a interpolação de cargas hidráulicas simplifica o problema. Apesar da simplificação, a rede de fluxos em duas dimensões desenhada a partir da interpolação de cargas hidráulicas é um instrumento importante porque se pode analisar o comportamento do aquífero no momento desejado, com os dados reais de campo. No entanto, a análise dos resultados requer cuidados, justamente porque o método não leva em conta outros parâmetros, além das cargas hidráulicas. A quantidade e a localização dos pontos de monitoramento podem determinar a precisão dos resultados.

A pirataria de água subterrânea da cabeceira V3 na direção da cabeceira V4 é comprovada por ambos os métodos, inclusive quando se observa a rede de fluxo elaborada em perfil a partir da interpolação de cargas hidráulicas (figura 4).

O monitoramento de campo confirma também a convergência de fluxos para a cabeceira V4, citada anteriormente. Pois os piezômetros localizados nos divisores entre as cabeceiras V3 e V4 (E34) e V5 e V4 (E32) vêm apresentando carga hidráulica durante todo o período de mensuração (desde dezembro de 2006).

Ambos os métodos de determinação de rotas de fluxo de água subterrânea apresentam vantagens e desvantagens. A interpolação de cargas hidráulicas é um método eficiente quando se conhece os materiais onde se faz o monitoramento e quando se tem pontos de monitoramento suficientes e bem localizados

A modelagem permite a representação da realidade com a inserção de diversos parâmetros. Uma das vantagens da modelagem hidrológica é que o modelo permite a previsão de cenários possíveis, alterando determinado parâmetro e observando as mudanças no comportamento dos fluxos. No entanto, para saber se o modelo está respondendo de maneira

adequada, ele deve ser calibrado com os dados reais. Por isso o monitoramento de campo é fundamental nesse processo.

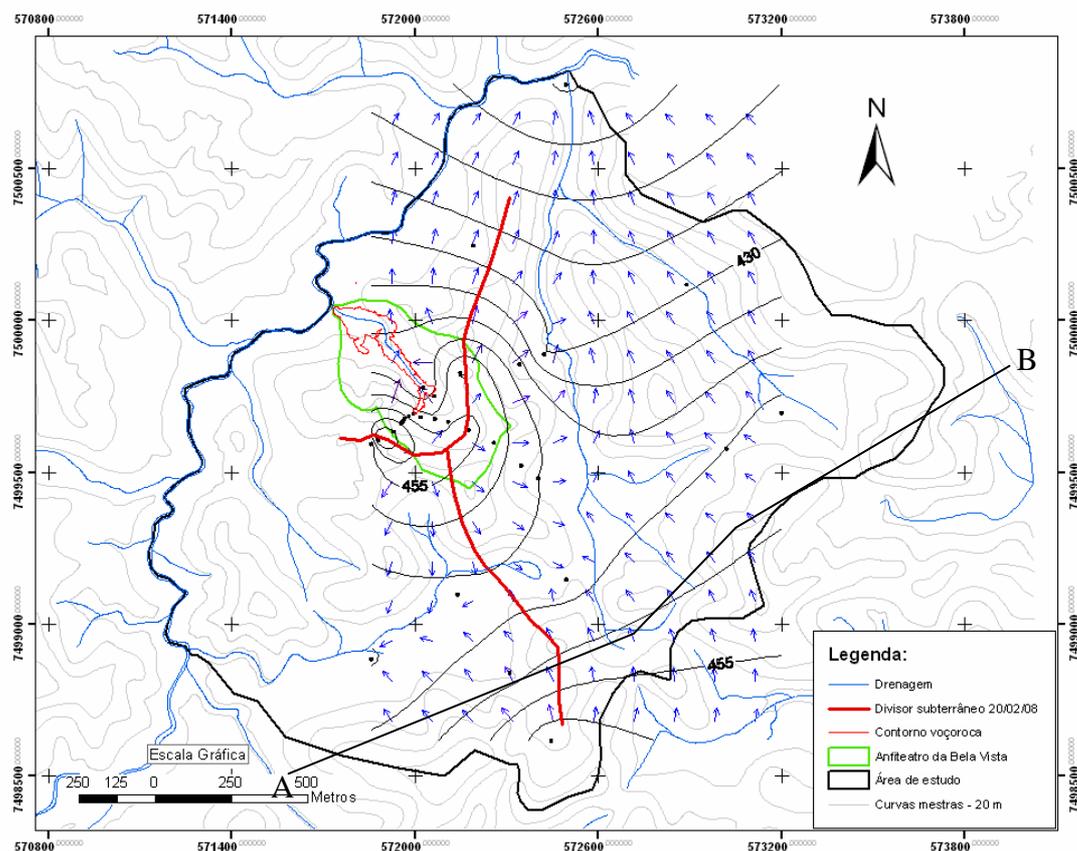


Figura 3 – Rede de fluxo em planta, elaborada a partir da interpolação das cargas hidráulicas mensuradas em campo. E localização do transect A-B, onde foi elaborada a rede de fluxo em perfil (figura 4).

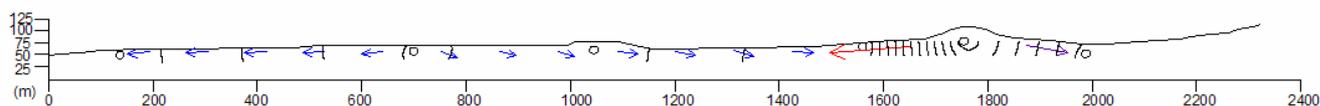


Figura 4 – Rede de fluxo em perfil do transect A-B mostrado na figura 3, referente ao dia 20/02/2008.

Uma das vantagens da modelagem hidrológica é que o modelo permite a previsão de cenários possíveis, alterando determinado parâmetro e observando as mudanças nas respostas. No entanto, para saber se o modelo está respondendo de maneira adequada, ele deve ser calibrado com os dados reais. Por isso o monitoramento de campo é fundamental nesse processo.

Os resultados preliminares da modelagem 3D da água subterrânea mostram que a pirataria vem ocorrendo nos vales vizinhos ao anfiteatro da Bela Vista. Espera-se que o

aprimoramento da modelagem subsidie o entendimento da influência da rede de fluxos subterrâneos no desenvolvimento da rede de canais.

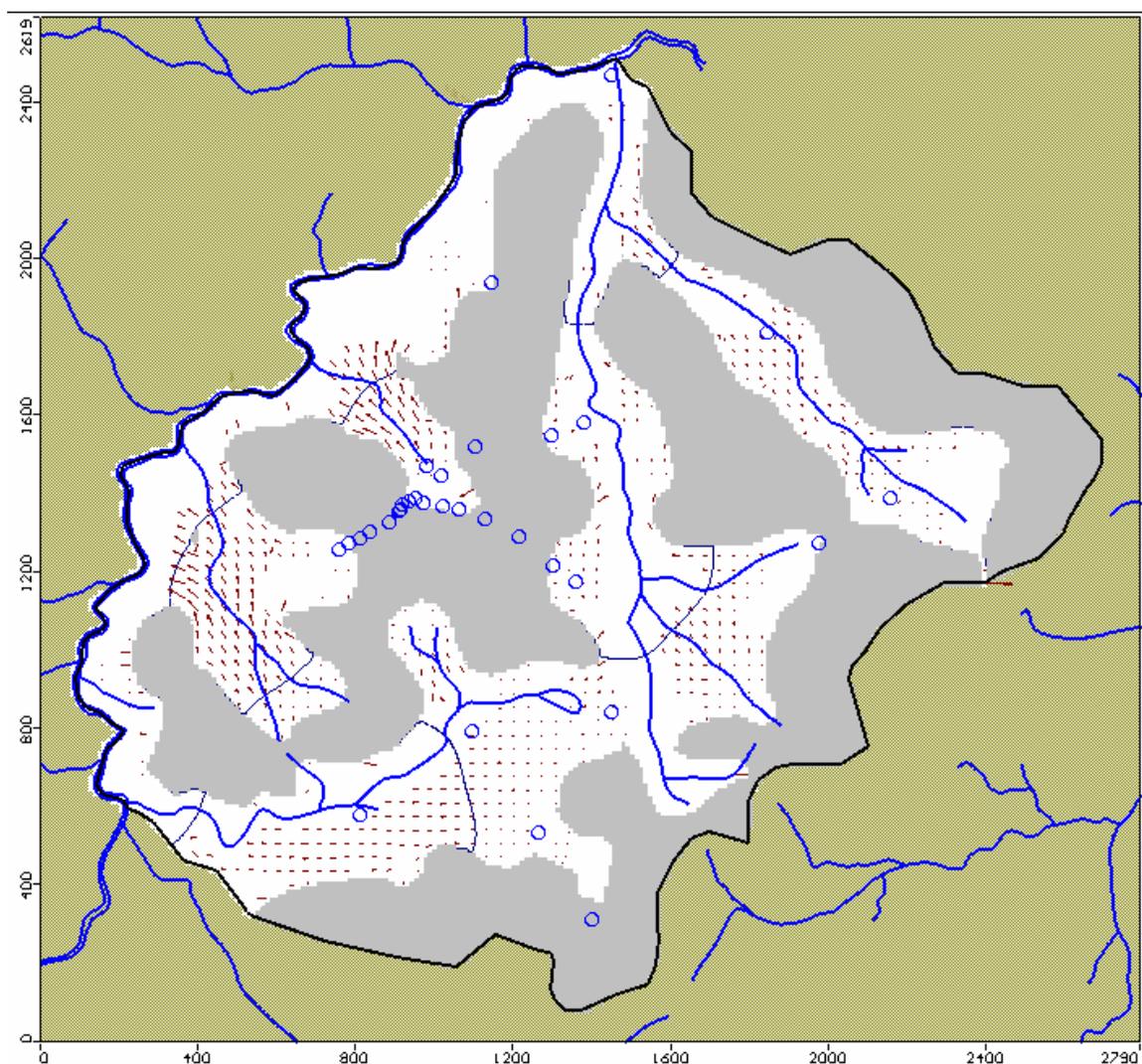


Figura 5 – Resultado dado pela modelagem feita pelo programa Visual Modflow. Referente a profundidade de 25 a 30 metros. A parte cinza representa a área seca, a branca a zona de fluxo e a marrom é a área inativa, que está fora da área de estudo. As setas representam a direção do fluxo e as linhas azuis são as equipotenciais.

## 5 – Bibliografia

Almeida, J.C.H.; Eirado Silva, L.G.A. & Avelar, A.S. (1991). Coluna tectono-estratigráfica de parte do Complexo Paraíba do Sul na Região de Bananal - S.P. Atas do 2o Simp. Geol. Sudeste, São Paulo. SBG. p.509-513.

Almeida, J.C.H.; Eirado Silva, L.G.A. & Valladares, C.S. (1993). O Grupo Paraíba do Sul e as rochas granitóides na região de Bananal (SP) e Rio Claro (RJ): uma proposta de formalização litoestratigráfica. Atas do 3o Simp. Geol. Sudeste, São Paulo. SBG.

Avelar, A.S. & Coelho Netto, A.L. (1992a). Fraturas e desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio vale do rio Paraíba do Sul. *Rev. Bras. de Geociências*.

Avelar, A.S. & Coelho Netto, A.L. (1992b). Fluxos d'água subsuperficiais associados a origem das formas côncavas do relevo; *Anais da 1a Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas / COBRAE, ABMS e SBGE, Rio de Janeiro; vol. 2:709-719p.*

Cambra, M.F.E.S. (1998). Movimentos de água na porção superior de solos sob pastagem: o papel do sistema radicular. Tese de Mestrado, IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro, 144p.

Coelho Netto, A. L. (2003). Evolução de Cabeceiras de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a Formação e o Crescimento da Rede de Canais sob Controle Estrutural. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Ano 4, Nº 2, p. 118-167.

Coelho Netto, A.L, Fernandes, N.F. & Deus, C.E. (1988). Gullying in the Southeastern Brazilian Plateau: Bananal, SP. *Sediment Budgets (Proceedings of the Porto Alegre Symposium, December 1988)*. IAHS Publ. nº 174, p.35-42.

Coelho Netto, A.L. & Fernandes, N.F. (1990). Hillslope erosion-sedimentation and relief inversions in SE Brazil: Bananal,SP. *IAHS Publ. 192: 174-182. Proc. of the Intern. Symp. on "Research Needs and Applications to Reduce Erosion & Sedimentation in Tropical Steeplands"*, Suva, Fiji.

Coelho Netto, A. L., Fernandes, N. F., Dantas, M. E., Dietrich, W. E., Montgomery, D. R., Davis, J.C., Proctor, I., Vogel, J. & Southin, J. (1994). 14C MAS Evidences of two Holocene erosion-sedimentation cycles in SE Brazil: stratigraphy and stratigraphy inversion. In: *Abstracts of the 14th International Sedimentological Congress, Recife*, p.29-30.

Dietrich, W.E.; Montgomery, D.; Coelho Netto, A.L. & Moura, J.R.S. (1991). Evidence for regional aggradation starting in the Early Holocene in southeastern Brazil and for degradation due to deforestation. *Am. Geoph.Union, Fall Meet.,San Francisco,USA/EOS*,vol.70(43):1124.

Dunne, T. (1980). Formation and controls of channel networks. *Prog. Phis. Geogr.*4:221-239.

Fernandes, N.F. (1990). Hidrologia subsuperficial e propriedades físico-mecânicas dos Complexos de Rampa - Bananal (S.P.). Tese de Mestrado, IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro 151p.

Gilbert, K.G. (1877). Report on the geology of the Henry Mountains (Utah). *U.S.Geogr. Geol. Survey Rocky Mtn. Region (Powell)*: 18-98.

Fonseca, A.P.; Coelho Netto, A.L.; Lacerda, W.A. (2006). Evolução de Voçoroca e Escorregamentos de Terra em Cabeceiras de Drenagem na Concavidade Três Barras, Bananal

- SP: um estudo na interface geomorfológica-geotécnica. Anais do VI SINAGEO 2006, Goiânia - GO.

Horton, R.E.(1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geol. Soc. Am. Bull.v.56, 144-152, 1945.

Leal, P.J.V. (2004). Relação entre fluxos subterrâneos de vales vizinhos e a expansão da rede de drenagem via voçorocamentos na bacia do rio Piracema, Bananal,SP. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/PPGG.

Leal, P.J.V. & Coelho Netto, A.L.C. (2006). Rede de Fluxos De Água Subterrânea em Cabeceiras de Drenagem no Domínio de Colinas do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul: bacia do rio Bananal (SP/RJ). Anais do VI SINAGEO- Goiânia- GO.

Montgomery, D.R. & Dietrich, W.E. (1989). Source areas, drainage density and channel initiation. Water Resources Research, 26:1907-1918.

Pichler, E. (1953). Boçoroca. Boletim de Soc. Brasileira de Geologia, V.2, n.1, pp. 3- 16.

Rocha Leão, O.M. (2005). Evolução regressiva da rede de canais por fluxos de água subterrânea em cabeceiras de drenagem: bases geo-hidroecológicas para recuperação de áreas degradadas com controle de erosão. Tese de doutorado – Rio de Janeiro: UFRJ. 247 p.