

## **REDE DE FLUXOS D'ÁGUA SUBTERRÂNEA EM CABECEIRAS DE DRENAGEM NO DOMÍNIO DE COLINAS DO MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL: BACIA DO RIO DO BANANAL (SP/RJ). (\*)**

LEAL<sup>1</sup>, P. J. V

(1) Doutorando, PPGG-UFRJ; Bolsista CNPq, [pivleal@hotmail.com](mailto:pivleal@hotmail.com)  
GEOHECO/Laboratório de Geo-Hidroecologia Depto. de Geografia, IGEO/CCMN, Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ.

COELHO NETTO<sup>2</sup>, A. L.

(2) Professora Titular e Pesquisadora 1B/CNPq, [ananetto@acd.ufrj.br](mailto:ananetto@acd.ufrj.br)  
GEOHECO/Laboratório de Geo-Hidroecologia Depto. de Geografia, IGEO/CCMN, Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ.

(\*) Apoio financeiro: CNPq (Eds. Universal e CT-Hidro); FAPERJ (Eds. Cientista do Estado) e FAPERJ-CNPq (Eds. PADCT-Rio e PRONEX)

### **RESUMO**

Esse artigo apresenta alguns resultados do mapeamento da rede de fluxos d'água subterrânea em cabeceiras de drenagem, estando associado às pesquisas do Laboratório de Geo-Hidroecologia (GEOHECO - UFRJ) sobre a formação e crescimento de redes de canais em cabeceiras de drenagem. O estudo vem sendo conduzido em uma área laboratório no médio vale do rio Paraíba do Sul, na bacia do rio Piracema, principal afluente do rio do Bananal. Nessa região as voçorocas são muito comuns e representam a frente de expansão da rede de canais, que junto a outras formas erosivas, ressaltam a dissecação do relevo. Trabalhos sistemáticos destacam que o desenvolvimento da rede de canais, assim como das cabeceiras de drenagem possuem forte controle lito-estrutural (Avelar e Coelho Netto, 1992a e b) e que o principal processo erosivo associado à propagação dos voçorocamentos é o excesso de poro-pressão em faces de exfiltração da água subterrânea ou *seepage erosion* (Coelho Netto, 1988). As pesquisas apontam também para o aporte de água subterrânea de fora dos limites da cabeceira de drenagem monitorada. Tanto a exfiltração pontual de fluxos subterrâneos artesianos, através da rede de fraturamentos subverticais, quanto à transferência de água subterrânea entre cabeceiras de drenagem (pirataria de água subterrânea), vêm sendo investigadas. Dando continuidade aos estudos realizados na área, o monitoramento da água subterrânea vem sendo realizado, através de uma rede de poços e piezômetros, tendo em vista os fluxos que promovem o desenvolvimento de uma voçoroca localizada no fundo de uma cabeceira de drenagem. Recentemente, o nivelamento topográfico dos piezômetros e pontos de drenagem usados no mapeamento das redes de fluxos, foi refeito com maior precisão. São apresentadas algumas considerações sobre as modificações na rede de fluxo, decorrentes do novo nivelamento topográfico e a respeito do monitoramento hidrológico conduzido na área e as evidências da pirataria de água subterrânea.

Palavras-chave: rede de fluxo, águas subterrâneas, voçorocas e evolução da rede de canais.

### **INTRODUÇÃO**

As cabeceiras de drenagem do médio vale do rio Paraíba do Sul, constituem o domínio natural da expansão da rede regional de canais, pelo avanço regressivo de canais do tipo voçorocas, através de mecanismos erosivos associados à exfiltração de água subterrânea (Coelho Netto, 1988). A conexão das voçorocas com a rede de canais foi destacada por Cambra (1998), que verificou que 83% das voçorocas (n=117) estão topograficamente ajustadas à rede de drenagem regional na bacia do rio Piracema, principal tributário na bacia do rio do Bananal. Portanto, é no ambiente das cabeceiras de

drenagem que os canais de primeira ordem, formadores da rede de drenagem, evoluem e integram os processos de encostas com os processos fluviais (Coelho Netto, 2003).

Oliveira (1985), ao mapear as concavidades em diferentes localidades no médio vale do rio Paraíba do Sul, verificou que elas somam apenas 29% da área da bacia, no entanto concentram 66% dos voçorocamentos, demonstrando a forte correlação entre as feições côncavas e a dissecação do relevo. Em mapeamento mais recente das concavidades na bacia do rio do Bananal, Lafayette et al. (1998), aponta que no compartimento montanhoso as concavidades são pouco freqüentes; esta freqüência aumenta em direção ao baixo vale do rio do Bananal, particularmente os casos associados às estruturas geológicas subjacentes marcadas por fraturas sub-verticais denominadas concavidades estruturais (Avelar e Coelho Netto, 1992a). Segundo Coelho Netto (1999), o aumento da densidade das concavidades estruturais à jusante do vale do rio do Bananal seria reflexo do elevado gradiente hidráulico da bacia, o que propicia maiores descargas de exfiltração por artesianismo através das fraturas e, portanto, maior eficácia erosiva para formação e evolução de vales de cabeceiras.

Coelho Netto (op. cit.), mostra ainda que o avanço regressivo da rede de canais não é espacialmente nem temporalmente uniforme. Embora os canais de drenagem sejam orientados pela rede de fraturas presentes nas unidades geológicas, existem caminhos preferenciais, influenciados tanto pela densidade de fraturas (Avelar e Coelho Netto, 1992a) como pelo tipo de fraturas.

Avelar e Coelho Netto (1992b), sugerem a exfiltração pontual de fluxos subterrâneos regionais, através da rede de fraturamentos, para explicar a ocorrência de artesianismo em pontos localizados em eixos de concavidades. Fonseca (2006) e Leal (2004) também observaram esse tipo de fluxo em cabeceiras de drenagem na bacia do rio do Bananal. Esses autores destacam a ausência de correlação entre, o comportamento das cargas de pressão observadas nos piezômetros com artesianismo e o ritmo e variabilidade das chuvas.

Além do aporte de fluxos regionais, a pirataria de água subterrânea entre vales também é proposta na explicação da evolução dos canais. A expansão das voçorocas na direção dos divisores de drenagem, assim como o aprofundamento da incisão vertical das mesmas, gera um aumento do gradiente hidráulico na direção da cabeça do canal erosivo, acarretando numa convergência de fluxos subterrâneos. Os fluxos subterrâneos de vales vizinhos suspensos podem então ser capturados, originando a pirataria de água subterrânea

entre vales, potencializando ainda mais os processos erosivos na base das paredes das voçorocas (Coelho Netto, 1999).

A troca de água subterrânea entre vales adjacentes vem sendo citada na literatura, porém, poucos trabalhos identificam fluxos subterrâneos entre bacias a partir de mensurações em campo. Os trabalhos de Genereux (2004) e Genereux et al. (2002 e 2006) indicam a ocorrência de fluxos subterrâneos entre bacias, através de análises químicas da água de canais de drenagem, em vales florestados da Costa Rica.

Outros trabalhos vêm abordando esse fenômeno, Pederson (2001), faz uma revisão sobre o tema, porém não apresenta dados de campo ou de laboratório. Carrillo-Rivera (2000), descreve fluxos subterrâneos regionais, que atravessariam através de falhas e fraturas das bacias mais elevadas até as bacias menos elevadas.

Haitjema e Mitchell-Bruker (2005) e Winter et al. (2004) sugerem que em muitos casos os divisores de águas subterrâneas não coincidem com a topografia superficial da bacia de drenagem. O fato de um aquífero possuir uma área maior que uma bacia de drenagem evidencia a pirataria de água subterrânea.

Em recente pesquisa nas cabeceiras de drenagem do rio Piracema, Leal (2004) destacou diferenças entre divisores de água subterrânea e os divisores topográficos e identificou comportamentos distintos entre dois grupos de piezômetros. No entanto, o nivelamento topográfico das estações e pontos de drenagem usados na elaboração das redes de fluxo ainda necessitava de maior precisão.

Um novo nivelamento de precisão foi feito através da utilização de estação total e novas redes de fluxo foram elaboradas. Os resultados preliminares dessa nova fase da pesquisa que envolve o monitoramento dos fluxos d'água subterrânea entre vales vizinhos são apresentados no presente trabalho.

A pesquisa vem sendo desenvolvida numa cabeceira de drenagem afluyente do rio Piracema, que drena a vertente norte da Serra da Bocaina, no Médio Vale do Paraíba do Sul.

## **ÁREA DE ESTUDO**

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, gondito, mármores e de sillimanita-muscovita-biotita xisto) descritas por Almeida et al. (1991 e 1993).

A rede de drenagem regional tem forte controle estrutural, os canais principais se orientam paralelamente ao *strike* da foliação principal e das zonas de cisalhamento na direção NE-SW. Os canais tributários orientam-se, perpendicularmente aos primeiros e se encaixam em juntas com atitude regional NW-SE. Esse comportamento é notado tanto nas bacias dos rios do Bananal e Piracema, quanto no Anfiteatro da Bela Vista. Nota-se, pela direção dos sets de fraturamentos e do eixo da voçoroca.

A cabeceira de drenagem em estudo é formada por uma concavidade principal em forma de anfiteatro, a qual é alimentada por concavidades menores e é denominada Anfiteatro da Bela Vista (0,25 km<sup>2</sup>). 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 em alguns pontos. A localização regional da área de estudo pode ser vista na figura 1.

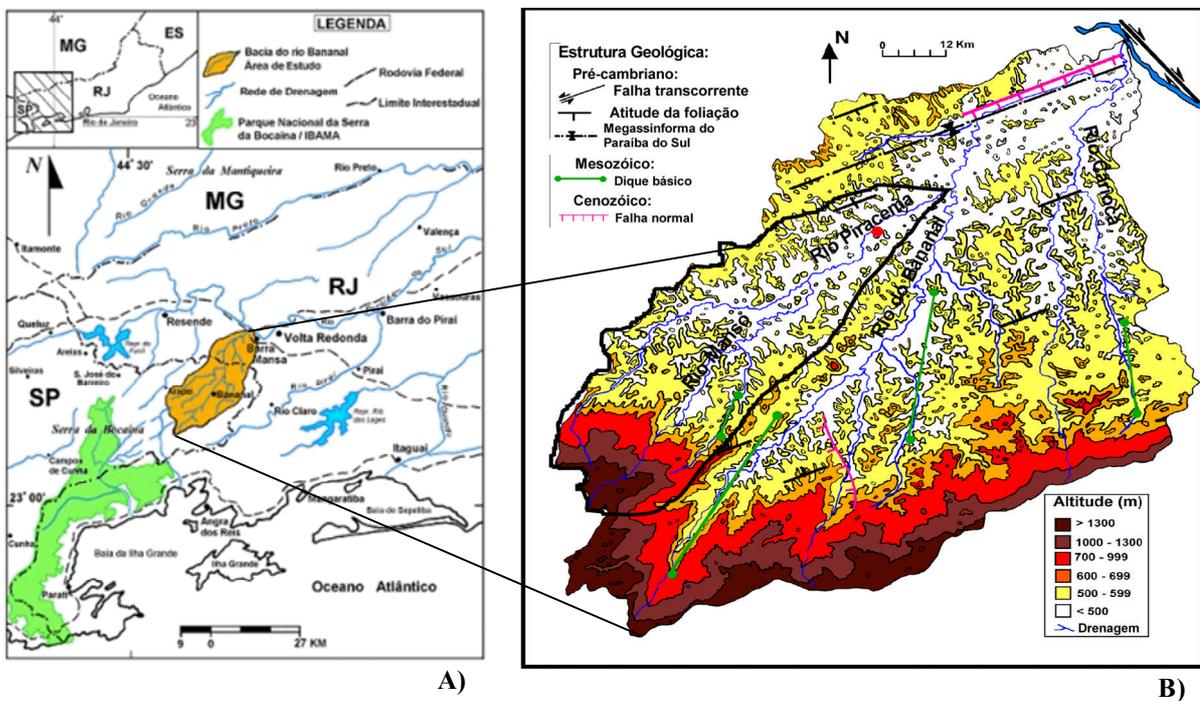


Figura 1 – A) Localização regional da bacia do rio do Bananal (em laranja) e B) detalhe da bacia, mostrando a bacia do rio Piracema (em preto) e a localização da EEBV (Ponto vermelho).

Além do Anfiteatro da Bela Vista, a área de estudo (EEBV), de aproximadamente 4 km<sup>2</sup> (figura 2), abrange também outras cabeceiras com relação de vizinhança direta (vales com divisores em comum). Toda a drenagem da área converge para o rio Piracema, que possui 132 km<sup>2</sup> de área de bacia.

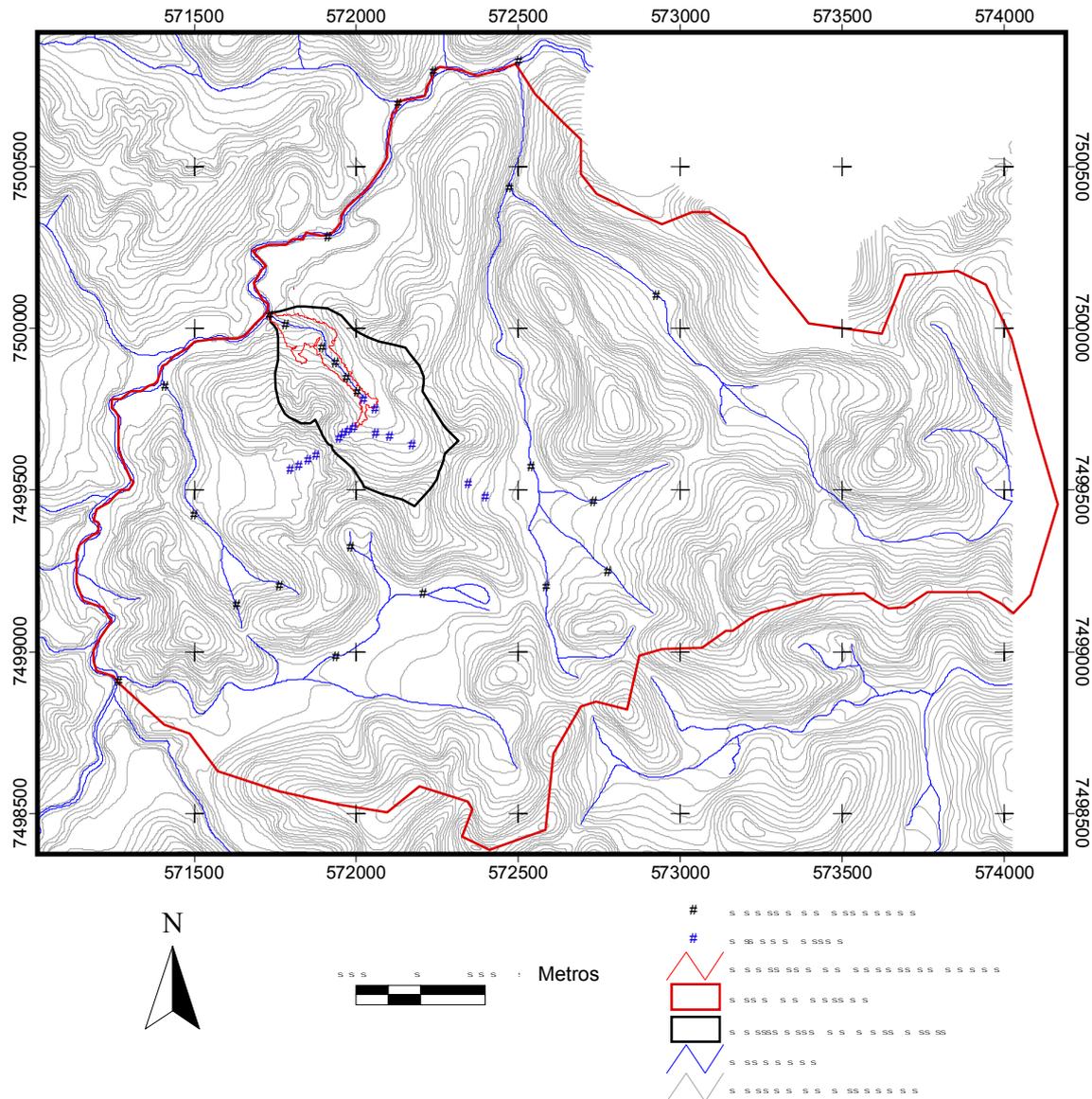


Figura 2 – Mapa da área de estudo com a localização dos piezômetros e pontos de drenagem utilizados na elaboração das redes de fluxo.

As curvas de nível do mapa da área de estudo (figura 2) foram extraídas do mapeamento 1:10.000 feito pelo estado de São Paulo, por esse motivo a área contida no estado do Rio de Janeiro não pode ser mapeada.

Na figura 2 estão destacadas três cabeceiras vizinhas do Anfiteatro da Bela Vista, delimitado em preto. A cabeceira “A” está topograficamente suspensa em relação ao Anfiteatro da Bela Vista, possui fundo plano e não é canalizada. As cabeceiras “B” e “C”

estão rebaixadas em relação ao Anfiteatro da Bela Vista, possuem fundos aplainados drenados por canais tributários do rio Piracema.

O regime tropical de chuvas domina essa região, que se encontra engloba na faixa entre 1250-1500 mm precipitação média anual; em alguns meses pode exceder 500 mm e, em alguns dias, superar o registro de 80-100 mm.

As precipitações no compartimento de colinas (onde a área de estudo está localizada) possuem ritmo e variabilidade semelhantes às precipitações observadas no compartimento montanhoso da bacia, no entanto, nesse último, as precipitações possuem índices totais mais altos, como mostra Rocha Leão (2005).

Segundo Rocha Leão et al. (2002), as cargas de pressão observadas em piezômetros não respondem imediatamente as chuvas locais, apresentando um tempo de resposta de em média dois meses frente o início da estação chuvosa.

## **METODOLOGIA**

A leitura dos aparelhos de campo é feita diariamente por um operador de campo e os dados são levados ao laboratório para digitalização e análise. Nesse trabalho o período analisado foi de março de 2004 a fevereiro de 2006.

A primeira etapa no desenvolvimento das redes de fluxo em planta foi estabelecer os pontos onde seriam inseridos os dados de carga total na rede. Para efeito de representação gráfica, como a rede piezométrica não abrange toda a área de estudo, além dos piezômetros, foram utilizados pontos onde a elevação da drenagem era conhecida.

No mapa da área de estudo, alguns pontos da drenagem foram escolhidos, de modo que a rede de fluxo cobrisse uma porção maior da área de estudo. Em campo foram obtidas as cotas desses pontos, assim como a dos aparelhos de campo, através de um levantamento topográfico com estação total. Nesses pontos da drenagem, a carga total é igual à cota da superfície do terreno, já que a água está aflorando. Segundo Cleary (1989), quando uma linha equipotencial cruza um rio, o valor do potencial iguala-se à altitude do rio naquele ponto. O mapa da área de estudo, com os pontos de drenagem utilizados para elaborar as redes de fluxo, assim como os piezômetros, é mostrado na figura 2.

As linhas equipotenciais foram traçadas pelo programa Surfer, que emprega uma planilha eletrônica com valores de x, y e z para interpolar os valores dos diferentes pontos, gerando isolinhas de carga total (ou linhas equipotenciais). Utilizando-se o programa AutoCad, foram obtidos os valores de x e y para cada um dos pontos da rede de fluxo. O valor de z é exatamente igual à carga total calculada para cada dia em cada piezômetro. Os

valores de x, y e z foram então digitados em planilhas do programa Excel. O Surfer utiliza essas planilhas e interpola os seus valores, criando uma malha, que é um arquivo onde os valores de z têm arrumação espacial retangular e regular.

A partir da malha são desenhadas as isolinhas, que representam, neste caso, a linhas de fluxo. O Surfer projeta ainda, a partir das isolinhas, os vetores que representam a direção e a magnitude (gradiente topográfico) dos fluxos. Todas as redes de fluxo geradas foram exportadas para o AutoCad para serem georeferenciadas e editadas. Após a edição, foram exportadas para o ArcView, com o objetivo de serem integradas ao mapa topográfico, e, por último, os divisores de água subterrânea foram traçados.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Durante a primeira etapa da pesquisa, assim como na fase atual, foram elaboradas várias redes de fluxo para dias representativos de subida ou descida do aquífero. No entanto, no presente artigo, apenas o exemplo do dia 07/01/2004 será mostrado para duas situações, com o primeiro nivelamento e com o novo nivelamento (figura 3).

Através da comparação entre as redes de fluxo antigas e as novas pode-se perceber que as direções das linhas de fluxo, na maioria dos casos se mantiveram. No entanto, no segundo caso, o gradiente hidráulico aumentou em grande parte da área analisada, principalmente no trecho próximo aos dígito superiores da voçoroca. As equipotenciais, como esperado, sofreram mudanças, já que os pontos de inserção de dados sofreram deslocamentos consideráveis principalmente nos pontos de elevação obtidos nos canais de drenagem. Os divisores de águas subterrâneas traçados também não sofreram alterações significativas.

Através da análise das redes de fluxo elaboradas pode-se constatar que, durante o período analisado as linhas equipotenciais pouco mudaram. E que em todos os casos, os fluxos d'água subterrânea não respeitaram os limites impostos pelos divisores topográficos.

Ao analisarmos a relação entre os divisores topográficos e de águas subterrâneas, percebemos que, enquanto uma área da cabeceira "A" da figura 2 perde água subterrânea para o Anfiteatro da Bela Vista as cabeceiras "B" e "C" pirateiam água de uma área considerável do Anfiteatro.

Essa condição atual onde o anfiteatro da Bela Vista estaria perdendo água subterrânea para as bacias vizinhas "B" e "C", poderia responder pela recente fase de estabilização do voçorocamento.

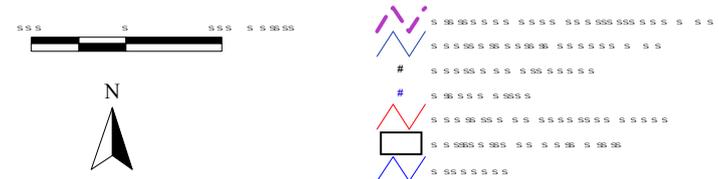
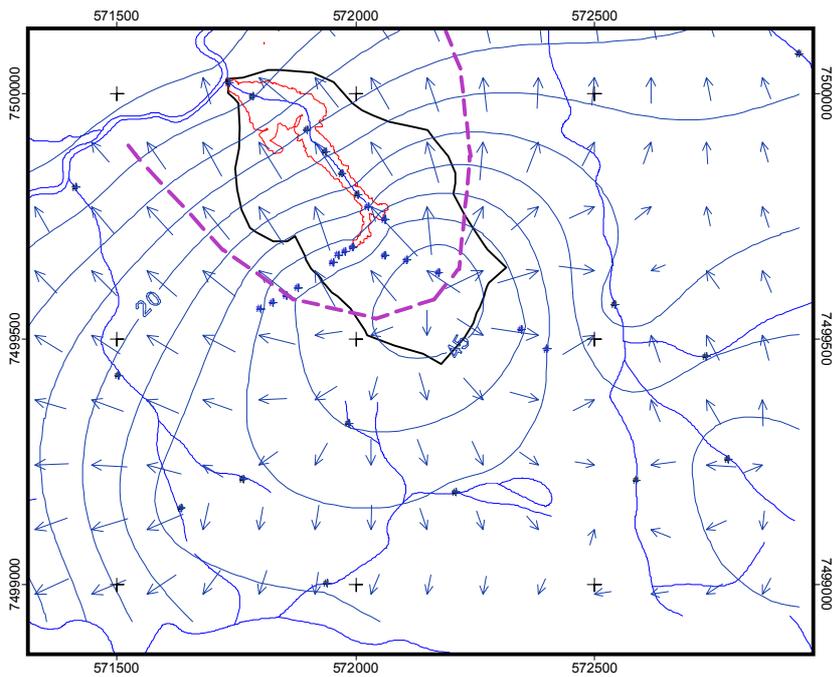
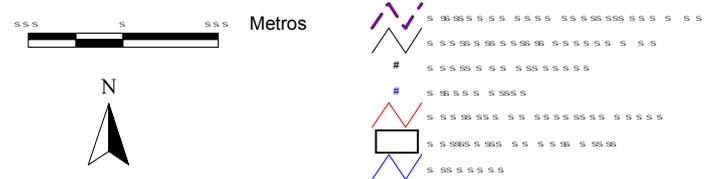
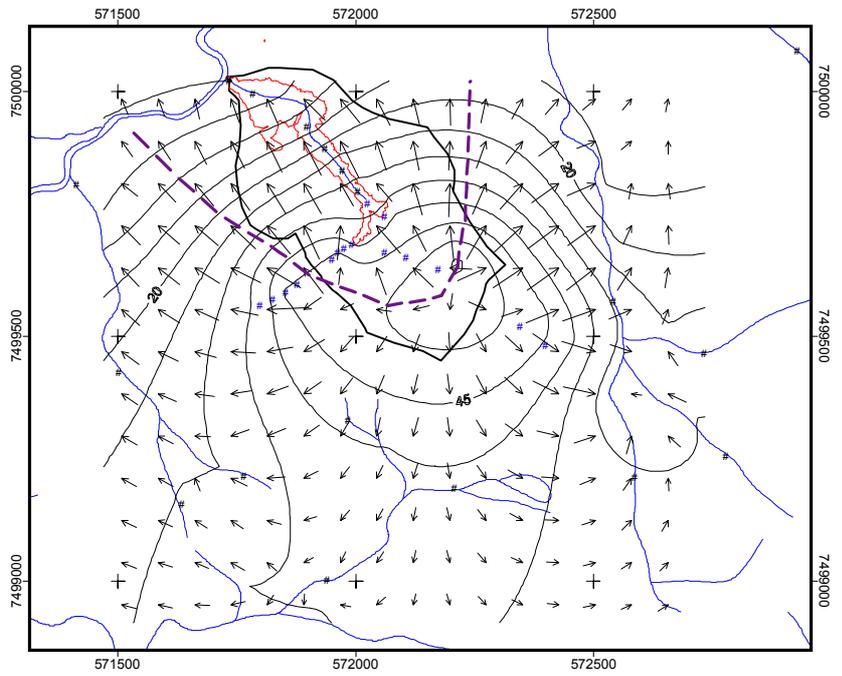


Figura 3 – Exemplo de redes de fluxo elaboradas a) Com antigo nivelamento e b) Com o novo nivelamento.

Hipotetiza-se que durante as fases de maior atividade do voçorocamento correspondem a condições do aquífero diferentes das observadas atualmente na área de estudo. Ou seja, de acordo com a recarga do aquífero, este poderia ganhar mais água de um vale vizinho suspenso, mesmo perdendo água para o vale rebaixado, como acontece na atualidade. A continuidade e expansão do monitoramento torna-se importante na detecção dessas mudanças de comportamento do aquífero.

## BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, J.C.H., EIRADO SILVA, L.G. & AVELAR, A. S. (1991) “Coluna tectono-estratigráfica da parte do Complexo Paraíba do Sul na região de Bananal, SP.” Anais do II Simp. Geol. Do Sudeste/ SBG, São Paulo.
- 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.
- 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, 22(2).
- 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.
- CARRILLO-RIVERA, J. J. (2000). Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico. Hydrogeology Journal, 8: 503 – 520.
- CLEARY, R. W. (1989). Hidrologia de águas subterrâneas. In: Ramos, F., Occhipinti, A. G., Villa Nova, N. A., Reichardt, K., Magalhães, P. C. & Cleary, R. W. Engenharia hidrológica 2. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. ABRH. Ed. UFRJ.
- 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. n° 174, p.35-42.
- COELHO NETTO, A. L. (1999). Catastrophic landscape evolution in a humid region (SE Brasil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes. Fourth International Conference on Geomorphology - Italy.
- 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, N° 2, p. 118-167.
- FONSECA, A. P. (2006). Análise de mecanismos de voçorocamento associados a escorregamentos na bacia do rio Bananal (SP/RJ). Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ.
- GENEREUX, D.P., WOOD, S., PRINGLE, C.M. (2002). Chemical tracing of interbasin groundwater transfer in the lowland rainforest of Costa Rica. Journal of Hydrology 258, 163–178.

- GENEREUX, D.P. (2004). Comparison of naturally-occurring chloride and oxygen-18 as tracers of interbasin groundwater transfer in lowland rainforest, Costa Rica. *Journal of Hydrology* 295, 17–27.
- GENEREUX, D.P., JORDAN M. (2006). Interbasin groundwater flow and groundwater interaction with surface water in a lowland rainforest, Costa Rica: A review. *Journal of Hydrology* 320, 385–399.
- HAITJEMA, H.M., MITCHELL-BRUKER, S. (2005). Are water tables a subdued replica of the topography? *GROUND WATER* 43, no. 6: 781–786.
- LAFAYETE, R.P., BARRETO, A.A.L.M., BRONZ, D. & COELHO NETTO, A.L. (1998). Mapeamento de concavidades nas encostas da bacia do rio Bananal, médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). *GEOSUL, Florianópolis*, vol. 14 (27): 633-636.
- 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.
- OLIVEIRA, M. A. T. (1985). Relações entre geometria do relevo e formas de erosão linear acelerada (Bananal, SP). Monografia de conclusão de curso de graduação, IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro 38p.
- PEDERSON, D. T. (2001). Stream piracy revisited: a groundwater - sapping solution. *GSA Today*. P.4 –10.
- 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.
- ROCHA LEÃO, O.M., LEAL, P. J. V., BENEVENTO, A. & COELHO NETTO, A.N. (2002). Relação entre regime de chuvas e propagação de voçorocamentos em cabeceiras de drenagem, bacia do Rio Bananal, SP. *Anais do 10o CBGE – Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia - OURO PRETO, MG*.
- WINTER, T.C., ROSENBERRY, D. O., LABAUGH, J. W. (2004). Where Does the Ground Water in Small Watersheds Come From? *GROUND WATER* 41, no. 7: 989–1000.