

# SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTOS UTILIZANDO A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DAS ÁGUAS: um estudo realizado na Bacia Representativa de Juatuba – Alto São Francisco

*Marcos Machado Drumond<sup>1</sup> & Nilo de Oliveira Nascimento<sup>2</sup>*

**RESUMO** --- Apresenta-se neste artigo um projeto de pesquisa desenvolvido atualmente pelo CDTN/CNEN, em parceria com o EHR/UFGM e com o apoio da FINEP, que tem por objetivo estudar o processo de formação de escoamentos na Bacia Representativa de Juatuba, utilizando a técnica de traçadores e características naturais das águas, como a condutividade elétrica e os isótopos estáveis oxigênio-18, deutério e trítio. Esse projeto se insere em um programa de pesquisas que o CDTN/CNEN vem desenvolvendo, há cerca de 10 anos, para estudar o comportamento hidrológico da Bacia de Juatuba, situada no Alto São Francisco, utilizando a técnica de traçadores que, apesar de ser uma ferramenta importante em estudos hidrológicos, ainda é pouco difundida no Brasil. O estudo está sendo realizado nas nascentes do ribeirão Serra Azul, em uma área com 10,5 km<sup>2</sup>, dividida em seis sub-bacias de segunda ordem com áreas variando entre 0,8 e 2,3 km<sup>2</sup>. Em cada sub-bacia foi instalada uma estação de monitoramento equipada com um vertedor e uma sonda dotada de sensores para o registro contínuo de pressão (nível d'água), condutividade e temperatura. São apresentados neste artigo os resultados preliminares obtidos com a separação de escoamentos em hidrogramas de cheia registrados durante o período chuvoso 2006-2007.

**ABSTRACT** --- A research project developed currently by CDTN/CNEN and EHR/UFGM, supported by FINEP, is presented in this paper. The main propose of the project is to study the runoff formation process in the Representative Basin of Juatuba, using the tracer technique and water natural characteristics as the electric conductance and the stable isotopes oxygen-18, deuterium and tritium. This project is inserted into a research program that has been developed by CDTN/CNEN since 1997, to study the Juatuba Basin hydrological behavior, using the tracer technique that, despite of being an important tool in hydrological studies, is not much divulged in Brazil. The project is being carried out on the Serra Azul creek headwaters, in a catchment with 10,5 km<sup>2</sup> that was divided in six second order sub-basins with 0,8 km<sup>2</sup> to 2,3 km<sup>2</sup>. In each sub-basin it was installed a monitoring station equipped with a weir and a probe that has three sensors for continuous registering of pressure (water level), electric conductance and temperature. The preliminary results of the project, with separation of flood hydrographs registered during the 2006-2007 rainy period, are presented in this paper.

**Palavras-chave:** separação de escoamentos, condutividade elétrica, técnica de traçadores

---

1) Pesquisador do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN – Cidade Universitária – Pampulha – Caixa Postal 941 – 30123-970 – Belo Horizonte, MG – Tel. (31) 3069.3131 – E-mail: [drumond@cdtn.br](mailto:drumond@cdtn.br).

2) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFGM – EHR/UFGM – Av. do Contorno, 842 – 30110-060 – Belo Horizonte, MG – Tel. (31) 3238 1872 – E-mail: [niloon@ehr.ufmg.br](mailto:niloon@ehr.ufmg.br).

# 1 - INTRODUÇÃO

Em se tratando de estudos para a determinação de vazões de enchente, uma das principais dificuldades encontradas pelos profissionais da área de Hidrologia é quantificar as contribuições dos diferentes tipos de escoamento para a formação do hidrograma de enchente.

Ao longo dos anos, inúmeros trabalhos dessa natureza, que dependem da separação dos escoamentos originados por precipitações significativas em bacias hidrográficas, têm se fundamentado em métodos empíricos de inspiração gráfica. Esses métodos empíricos pressupõem, implicitamente, que os escoamentos observados em cursos d'água como decorrência de eventos de precipitação são, na maioria dos casos, de tipo hortoniano, ou seja, são constituídos, sobretudo, por águas originárias de escoamento superficial na bacia hidrográfica. Contudo, estudos realizados com a técnica de traçadores (Ladouche *et al.*, 2001; Talamba *et al.*, 2000; Ambroise, 1998, Laudon e Slaymaker, 1997; Cassie *et al.*, 1996; Travi *et al.*, 1994; Matsubayashi *et al.*, 1993; Eshleman *et al.*, 1993; Ogunkoya e Jenkins, 1993; Beven, 1986) indicam que essa concepção pode não ser adequada para explicar a formação de escoamentos, visto que, em muitos casos, foi constatado um predomínio dos escoamentos de origem subsuperficial em hidrogramas de enchente. Deve-se observar, ainda, que o conhecimento da gênese dos escoamentos e dos processos físicos envolvidos na sua formação desempenha papel fundamental não só nos estudos de enchentes mas, também, em estudos sobre processos erosivos, estabilidade de encostas e poluição de lençóis freáticos.

Apresenta-se neste artigo uma parte dos resultados obtidos no projeto pesquisa denominado “*Estudo da Formação de Escoamentos Utilizando a Técnica de Traçadores, na Bacia Representativa de Juatuba - Alto São Francisco*”, atualmente desenvolvido pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN/CNEN, em parceria com o Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG - EHRUFMG e com o apoio da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP.

Esse projeto se insere em uma série de outros projetos de pesquisa que vêm sendo desenvolvidos pelo CDTN/CNEN, desde 1997, com o objetivo de estudar o comportamento hidrológico da Bacia de Juatuba, situada no Alto São Francisco e representativa da região central do Estado de Minas Gerais, utilizando a técnica de traçadores que, apesar de ser uma ferramenta importante em estudos hidrológicos, ainda é pouco difundida no Brasil para essa finalidade. O projeto teve início em março de 2006 e tem o seu término previsto para março de 2008.

São apresentados aqui uma breve descrição do projeto e os resultados preliminares, obtidos com a sua execução durante o período chuvoso do ano hidrológico 2006-2007.

## 2 – O PROJETO DE PESQUISA

### 2.1 – Objetivos

Os principais objetivos do projeto de pesquisa são:

- Estudar o processo de formação de escoamentos na Bacia Representativa de Juatuba, utilizando características físico-químicas das águas como traçadores naturais;
- Avaliar a possibilidade de se utilizar a condutividade elétrica das águas como traçador natural para estabelecer a origem dos diferentes tipos de escoamento;
- Quantificar as parcelas dos hidrogramas de cheias correspondentes aos escoamentos superficial e subterrâneo, utilizando a técnica de traçadores.

### 2.2 – Aspectos metodológicos

#### 2.2.1 A área do estudo

Para a realização do estudo escolheu-se um trecho da Bacia Representativa de Juatuba situado nas nascentes do ribeirão Serra Azul. A bacia deste ribeirão e a bacia do ribeirão Mateus Leme compõem a Bacia de Juatuba (ver Figura 1). O trecho escolhido tem área de drenagem de cerca de 10,5 km<sup>2</sup> e dispõe de uma estação pluviográfica e uma estação linigráfica (situada no exutório deste trecho), ambas operadas pela CPRM/ANA. Estas estações estão em funcionamento desde a década de 70 e os dados ali registrados estão sendo utilizados nesta pesquisa.

#### 2.2.2 Fundamentos da metodologia

O uso da técnica de traçadores para fazer a separação de escoamentos baseia-se no fato de que a descarga líquida total do curso d'água, durante uma cheia, é constituída por uma parcela da chuva que escoar mais rapidamente, geralmente sobre a superfície do terreno, e por uma parcela que, tendo infiltrado, escoar mais lentamente. A parcela correspondente ao escoamento mais rápido, geralmente é identificada por "*escoamento superficial*", por "*água nova*" ou "*água do evento*", pelo fato de ter origem no próprio evento de chuva ocorrido por ocasião da cheia ou, ainda, por "*escoamento rápido*". A parcela da chuva que se infiltra no solo e escoar mais lentamente pode alcançar o curso d'água com velocidades maiores ou menores, em função do trajeto percorrido. Esta parcela tem sido identificada pelos termos "*escoamento subterrâneo*", "*água pré-evento*" ou "*água velha*".

Por terem características físico-químicas distintas, essas duas parcelas podem ser identificadas na natureza. A parcela da chuva que escoar superficialmente, além de evaporar mais, tem um pequeno tempo de contacto com o solo, incorporando menores quantidades de substâncias ali existentes. Já a parcela que se infiltra, evapora menos e, por escoar-se mais lentamente, incorpora mais os sais disponíveis no solo. Assim sendo, as águas superficiais têm, geralmente, uma concentração maior de isótopos estáveis, como o Oxigênio-18 e o Deutério, e concentrações

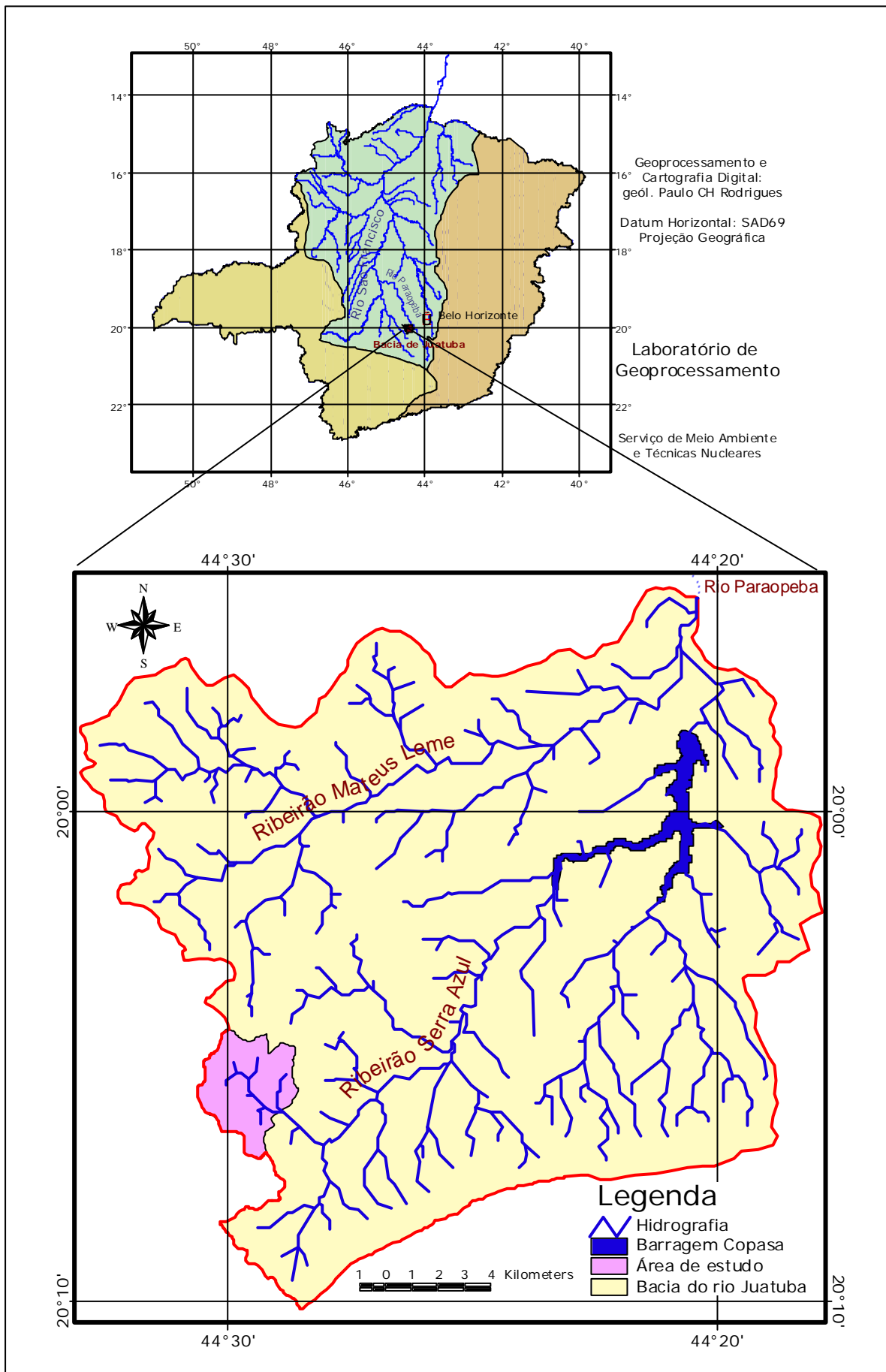


Figura 1 – Bacia Representativa de Juatuba.

menores de sais dissolvidos, ao passo que com as águas infiltradas ocorre o inverso. As diferenças de concentração destas substâncias presentes nas águas podem, teoricamente, ser utilizadas para quantificar as duas parcelas de escoamento que compõem o hidrograma de cheia. A quantificação é feita através da solução simultânea das equações da continuidade e do balanço de massas:

$$Q_T(t) = Q_{Sup}(t) + Q_{Sub}(t) \quad (1)$$

$$Q_T(t) \cdot C_T(t) = Q_{Sup}(t) \cdot C_{Sup}(t) + Q_{Sub}(t) \cdot C_{Sub}(t) \quad (2)$$

onde  $Q$  e  $C$  são a vazão e a concentração do traçador presente nas águas; e os índices  $T$ ,  $Sup$  e  $Sub$  indicam, respectivamente, Total, Superficial e Subterrâneo.

Considerando-se como válidas as hipóteses de que as concentrações do traçador, previamente definido, nas duas parcelas do escoamento são significativamente diferentes e de que podem ser consideradas como constantes ao longo do tempo, então, a partir das equações (1) e (2), tem-se:

$$Q_{Sub}(t) = Q_T(t) \cdot [C_T(t) - C_{Sup}(t)] / [C_{Sub}(t) - C_{Sup}(t)] \quad (3)$$

$$Q_{Sup}(t) = Q_T(t) - Q_{Sub}(t) \quad (4)$$

Os traçadores utilizados, geralmente, nesse tipo de estudo podem ser alguns dos isótopos estáveis (e.g. Oxigênio 18, Deutério e Trítio), solutos naturais estáveis, como o íon cloreto, ou a própria condutividade elétrica das águas.

### 2.2.3 Traçadores utilizados na pesquisa

Considerando-se que as análises para a determinação das concentrações de isótopos estáveis têm um custo elevado e que as concentrações do íon cloreto nas águas da bacia em estudo são muito baixas, a condutividade elétrica das águas está sendo utilizada como traçador. Deve-se observar que, além de ser de fácil determinação, testes preliminares já realizados na bacia em estudo mostraram que esse parâmetro tem um bom potencial para ser utilizado como traçador. Além disso, serão realizados testes utilizando simultaneamente dois isótopos estáveis (Oxigênio-18 e Deutério) como traçadores, em algumas amostras, para verificar a validade dos resultados a serem obtidos com a condutividade elétrica.

## 3 – IMPLANTAÇÃO DO PROJETO

Uma das providências iniciais para a implantação do projeto foi o levantamento das informações cartográficas disponíveis para a definição dos locais onde seriam instaladas as estações de monitoramento previstas no projeto. Dispunha-se, então, de mapas altimétricos nas escalas 1:50.000 (IBGE) e 1:25.000 (IGA/MG), além dos recursos de geoprocessamento disponíveis no

CDTN, que incluíam bases georreferenciadas de altimetria (IBGE 1:50.000) e hidrografia (IGAM 1:50.000) da região da Bacia de Juatuba e que foram utilizados em estudos anteriores.

Inicialmente, utilizou-se o mapa do IGA/MG 1:25.000 e mapas elaborados com as bases georreferenciadas disponíveis para identificar os principais cursos d'água existentes na bacia a ser estudada, cuja área de drenagem é de 10,5 km<sup>2</sup>. Considerando-se a necessidade de avaliar a influência das diferentes características fisiográficas e dos diferentes usos do solo no processo de formação das cheias, fez-se, com base nesses mapas, uma divisão da bacia de acordo com as suas seis principais sub-bacias (áreas de drenagem variando entre 0,8 e 2,3 km<sup>2</sup>), onde seriam instaladas as sondas para monitorar as variações de vazão, condutividade e temperatura das águas.

Posteriormente, foram realizadas diversas viagens ao campo, durante os meses de maio e junho de 2006, quando, além de identificar-se os possíveis locais para a instalação das estações de monitoramento, foram obtidas informações acerca dos cursos d'água, das estradas vicinais existentes, dos proprietários dos terrenos e outras. Com base nessas informações, na vetorização do mapa do IGA 1:25.000 e nos recursos de geoprocessamento disponíveis no CDTN, foram elaborados os mapas que vêm sendo utilizados neste estudo.

### **3.1 – Escolha dos locais das estações de monitoramento**

Os locais definitivos das estações para monitorar as variações de vazão, condutividade e temperatura das águas, em cada uma das seis sub-bacias, foram escolhidos considerando-se, dentre outros fatores, a proximidade do exutório de cada sub-bacia, a conformação da seção transversal do curso d'água para facilitar a construção dos vertedores e a facilidade de acesso (ver Figura 2).

No caso de uma das sub-bacias (sub-bacia 6), optou-se por instalar a estação em uma seção situada no seu trecho médio, de forma a caracterizar o comportamento hidrológico da área localizada a montante, que se encontra ainda preservada e coberta por mata nativa, e possibilitar, posteriormente, uma comparação com o comportamento das outras sub-bacias, cuja cobertura vegetal se encontra completamente alterada.

Para fazer a separação de escoamentos com o método descrito no item 2.2.2, era necessário conhecer-se a condutividade elétrica não só nos cursos d'água ( $C_T$ ) mas, também, nas parcelas correspondentes aos escoamentos superficial ( $C_{Sup}$ ) e subterrâneo ( $C_{Sub}$ ). A condutividade do escoamento subterrâneo poderia ser obtida, nas próprias estações mencionadas acima, pelos registros feitos antes do início da cheia. Contudo, para obter-se a condutividade do escoamento superficial, seria necessário instalar-se estações em locais onde ocorressem enxurradas durante os eventos chuvosos. Assim, foram selecionados três locais, situados nas sub-bacias 3 e 5 e na área entre as sub-bacias 5 e 6, onde foram implantadas estações especificamente para esse fim (pontos identificados por *Enx. 1, 2 e 3*, na Figura 2).

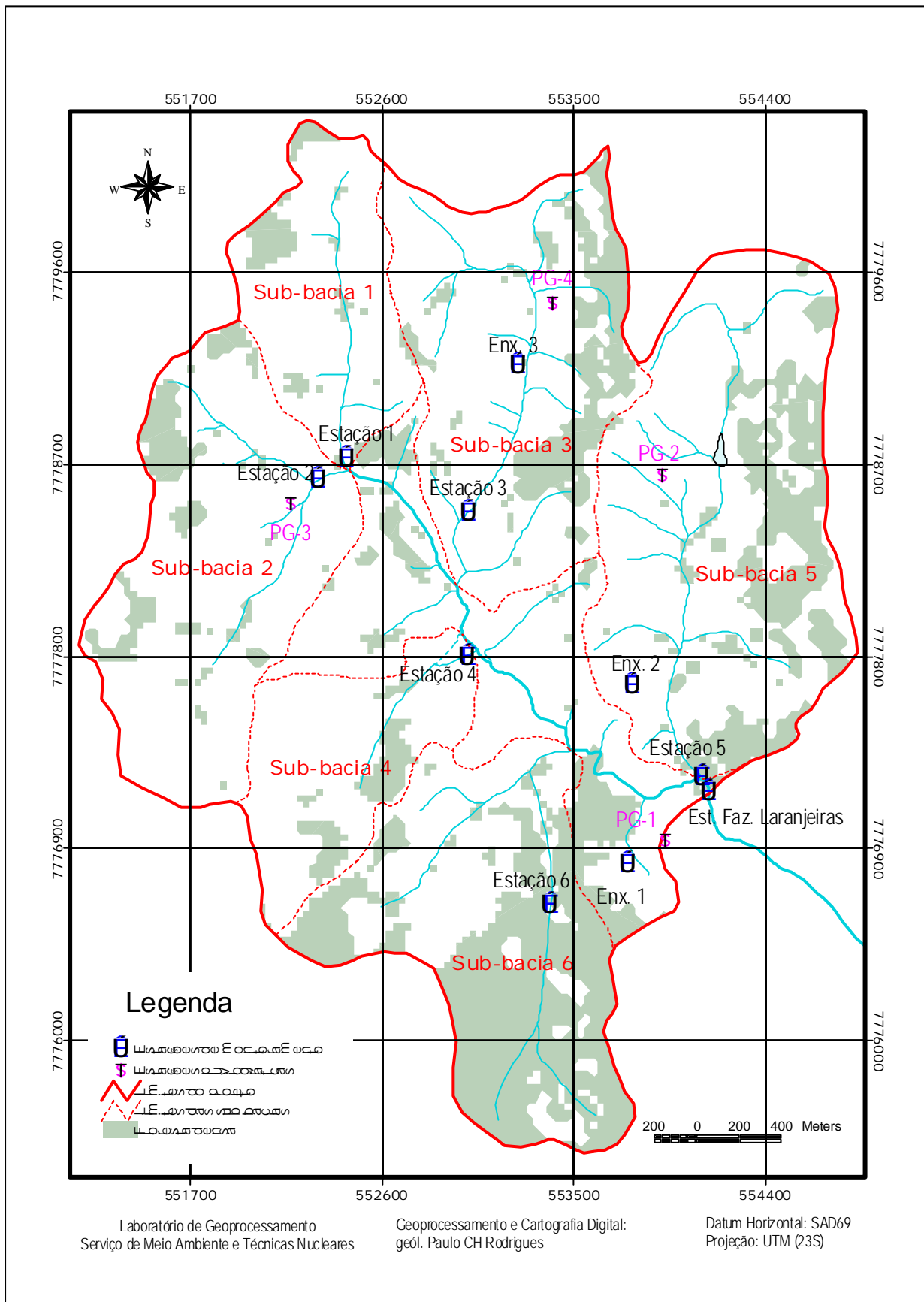


Figura 2 – Localização das estações de monitoramento

A décima estação de monitoramento de vazão, condutividade e temperatura das águas foi instalada no exutório da bacia em estudo, junto à Estação Linigráfica de Fazenda Laranjeiras, que era operada pela CPRM/ANA e se encontrava desativada.

Para avaliar a variação espacial dos eventos chuvosos, foram escolhidos três locais, distribuídos na área em estudo, para a instalação de três pluviógrafos disponibilizados para o projeto pelo CDTN/CNEN. Desta forma, contando com a estação pluviográfica já existente e que é operada pela CPRM/ANA (Estação de Fazenda Laranjeiras), dispor-se-ia de quatro estações para determinar as variações das chuvas no tempo e no espaço. Na Figura 2, estão indicados também os pontos onde encontram-se as estações pluviográficas (*PG-1, 2, 3 e 4*).

### **3.2 – Implantação das estações de monitoramento**

Tendo em vista que o período de chuvas na bacia em estudo tem início em outubro, procurou-se implantar as estações de monitoramento de forma a obter-se o maior número possível de informações sobre os eventos de cheias. Assim, a instalação dos vertedores nas seis estações de monitoramento foi feita no período entre 12 e 22 de setembro de 2006.

Os tipos de vertedores foram escolhidos de acordo com as características de cada local. Nas estações das sub-bacias 1 e 3, foram construídos vertedores retangulares de madeira, de parede fina, com duas contrações laterais. Nas estações das sub-bacias 4 e 5, foram construídos canais de madeira com três metros de comprimento, nas saídas dos quais foram instalados vertedores retangulares, de parede fina, sem contrações laterais. Na estação da sub-bacia 2, construiu-se um vertedor retangular, em concreto, na saída do bueiro da estrada de terra que liga a área em estudo à cidade de Itaúna. Na estação da sub-bacia 6, foi instalada uma calha Parshall de seis polegadas em uma seção situada no trecho médio da sub-bacia (ver Figura 3).

A calibração dos vertedores está sendo feita medindo-se a vazão nos cursos d'água onde estão instalados, periodicamente, com molinetes e com um traçador fluorescente (Rodamina WT).

Para registrar as variações de vazão, condutividade e temperatura, instalou-se em cada uma das seis estações, no período entre 9 e 12 de outubro de 2006, uma sonda modelo Dipper-TEC de marca SEBA, equipada com: três sensores (pressão/nível d'água, condutividade e temperatura), um *datalogger* com grande capacidade de armazenamento e uma bateria interna de longa duração (ver Figura 4). Inicialmente, as sondas foram instaladas na posição vertical, fixadas em tubos de PVC rígido perfurados para permitir a circulação das águas. Posteriormente, fez-se necessário mudar as sondas para a posição horizontal. As sondas foram programadas para armazenar os dados registrados pelos três sensores a cada dez minutos. Os dados são descarregados, mensalmente, por meio de um computador portátil. Nas Figuras 3 e 4, mostradas a seguir, podem ser observados mais detalhes das estações de monitoramento.





Estação da Sub-bacia 1



Estação da Sub-bacia 2



Estação da Sub-bacia 3



Estação da Sub-bacia 4



Estação da Sub-bacia 5



Estação da Sub-bacia 6

Figura 3 – Estações de monitoramento com vertedores





Sonda Dipper-TEC



Estação de Enxurrada 1



Estação de Enxurrada 2



Estação de Enxurrada 3



Estação Pluviográfica PG-2



Estação Pluviográfica PG-3

Figura 4 – A sonda Dipper-TEC e as estações de monitoramento de enxurrada e chuva

### 3.3 – Caracterização das águas da bacia em estudo

Durante o período de estiagem, em agosto de 2006, foram coletadas amostras de água em 24 pontos distribuídos na bacia, incluindo nascentes, minas, poços, córregos e os locais das estações monitoramento, para fazer a caracterização das águas da bacia em estudo.

Em cada um dos pontos foram coletadas seis amostras, tendo em vista a determinação de parâmetros físico-químicos (pH, Condutividade, Alcalinidade à fenolftaleína, Alcalinidade à indicador misto, Dureza total, SiO<sub>2</sub> e Sólidos dissolvidos), de íons (Fe, Mn, Mg, Ca, K, Na, Al, Cl, NO<sub>3</sub>, e SO<sub>4</sub>) e de isótopos (<sup>18</sup>O e Trítio).

A determinação dos parâmetros físico-químicos e dos diferentes íons foi feita com o objetivo de identificar-se a origem da condutividade elétrica nas águas da bacia, uma vez que esse é o principal parâmetro a ser utilizado na separação de escoamentos. As análises isotópicas foram feitas para avaliar a possibilidade de empregar-se o <sup>18</sup>O como traçador na separação de escoamentos e para fazer-se a datação das águas, com base nas concentrações de trítio existentes, visando identificar a sua origem.

### 3.4 – Testes de infiltração

Embora não estivessem previstos no projeto original, decidiu-se realizar, simultaneamente à pesquisa, testes de infiltração em cada uma das seis sub-bacias, de forma a possibilitar a realização de balanços hídricos. Esses testes estão sendo realizados com a técnica que emprega o trítio artificial como traçador para estimar as parcelas da chuva que se infiltram no solo e recarregam os aquíferos. Essa técnica vem sendo utilizada, com bons resultados, pelo CDTN já algum tempo, inclusive na Bacia Representativa de Juatuba (Drumond, 2004).

O teste consiste em lançar-se sobre uma parcela representativa do terreno um determinado volume de água marcada com o traçador (trítio) e, posteriormente, acompanhar-se o seu deslocamento na camada não saturada do solo. A água marcada com trítio (HTO) se comporta fisicamente da mesma maneira que a água comum (H<sub>2</sub>O). Assumindo o comportamento de um fluxo do tipo pistão, a camada marcada funciona como uma “fronteira” entre a água pré-existente no solo e a água infiltrada após o lançamento do traçador. Dessa forma, a água que se encontra acima dessa “fronteira” corresponde, aproximadamente, ao volume infiltrado que vai recarregar os aquíferos. Para determinar esse volume, são coletadas amostras de solo a cada 15cm, em furos de sondagem feitos no interior da parcela. Essas amostras são processadas em laboratório para medir-se as concentrações de trítio e a umidade existente em cada camada de solo com 15cm de altura.

Neste estudo, o lançamento do traçador foi feito no início do período chuvoso (novembro de 2006) e, para acompanhar o deslocamento da nuvem de traçador no interior solo, foram programadas quatro amostragens de solo ao longo do ano hidrológico 2006-2007. A primeira foi

feita dois dias após o lançamento do traçador; a segunda, durante o período chuvoso (fevereiro de 2007); a terceira, ao final do período chuvoso (maio de 2007); e a quarta, será realizada ao final do primeiro ano (novembro de 2007).

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

No período chuvoso 2006-2007, as chuvas se distribuíram de forma irregular na bacia em estudo. Os totais precipitados nos meses de outubro, novembro e janeiro ficaram cerca de 30% acima da média para esses meses, enquanto os totais precipitados nos meses de dezembro, fevereiro e março foram bem menores que as respectivas médias normais, notadamente as alturas precipitadas nestes dois últimos meses, que foram 65% e 70% menores, respectivamente.

Com base nos registros feitos nas estações pluviográficas foram selecionados os doze eventos chuvosos mais relevantes nesse período (ver Figura 5), sendo que a chuva mais intensa ocorreu na tarde do dia 25 de dezembro de 2007, quando foram precipitados, cerca de 70mm em um intervalo de apenas 50 minutos. Deve-se observar que a estação PG-2 só entrou em operação no dia 18 de dezembro e que as estações PG-3 e PG-4 não funcionaram a contento nos meses de janeiro e fevereiro.

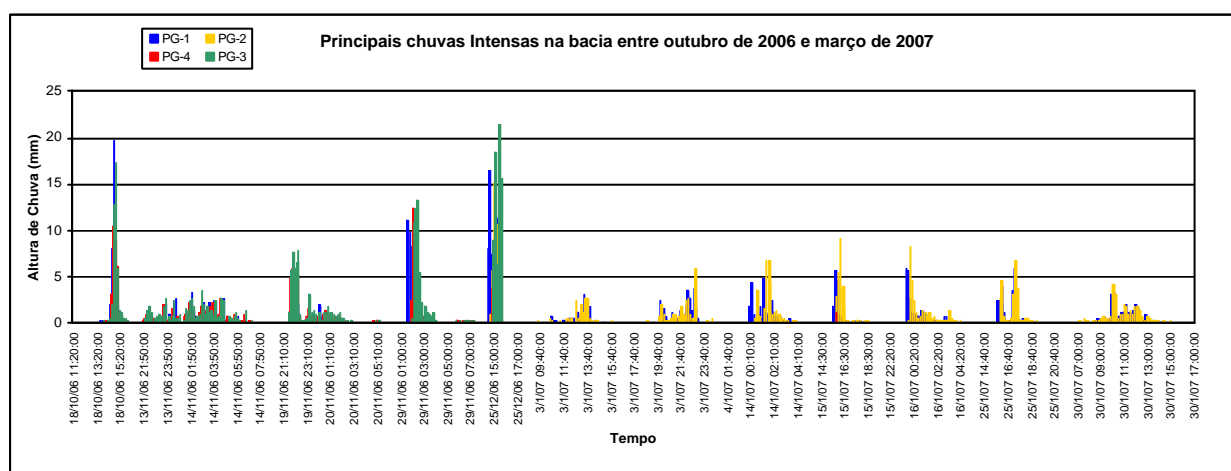


Figura 5 – Principais eventos chuvosos no período 2006-2007

Os hidrogramas de cheia correspondentes a esses eventos chuvosos foram registrados de forma satisfatória pelas sondas instaladas nas sete estações de monitoramento. Quanto aos registros de condutividade, entretanto, ocorreram problemas, principalmente nas estações 3, 6 e 7, em decorrência de assoreamento no interior dos tubos de PVC de proteção das sondas, que haviam sido instalados, inicialmente, na posição vertical. Não obstante esse fato, os registros feitos permitiram efetuar-se a separação de escoamentos em boa parte dos eventos de cheia registrados no período.

Para ilustrar aqui os resultados já obtidos com a aplicação do método de separação de escoamentos com a condutividade elétrica das águas, foram selecionadas duas das maiores cheias observadas no período. A primeira, ocorrida no dia 29/11/2006, foi provocada por uma chuva de 45mm com duração de uma hora e a segunda, a maior dentre todas as cheias registradas, ocorreu no dia 25/12/2006 e foi provocada por uma chuva de 70mm com duração de 50min. Em ambos os casos, a bacia encontrava-se em condições de umidade relativamente alta, em razão das precipitações ocorridas nas semanas anteriores aos dois eventos. Nas três semanas que antecederam a cheia do dia 29/11/06 foram registrados na bacia os totais de 130mm, 65mm e 34mm, consecutivamente, e nas três semanas que antecederam a cheia do dia 25/12/06, os totais de 112mm, 126mm e 14mm, consecutivamente.

Nas Figuras 6 e 7, são apresentados os hidrogramas, os registros de condutividade e a separação de escoamentos, com a indicação dos hidrogramas correspondentes aos escoamentos superficial (em verde) e subterrâneo (em marrom), para essas duas cheias, nas sub-bacias 1, 2 e 5.

Como se pode observar nesses gráficos, foi registrado um aumento de condutividade logo no início das cheias nas estações das sub-bacias 1 e 5. Acredita-se que esse aumento seja devido à lixiviação dos sais disponíveis na superfície do solo pelas primeiras águas precipitadas na bacia, logo no início da chuva. O mesmo não se verificou na sub-bacia 2, provavelmente, pelo fato de ter havido uma diluição desse pequeno volume de escoamento inicial na represa que se encontra a montante da estação.

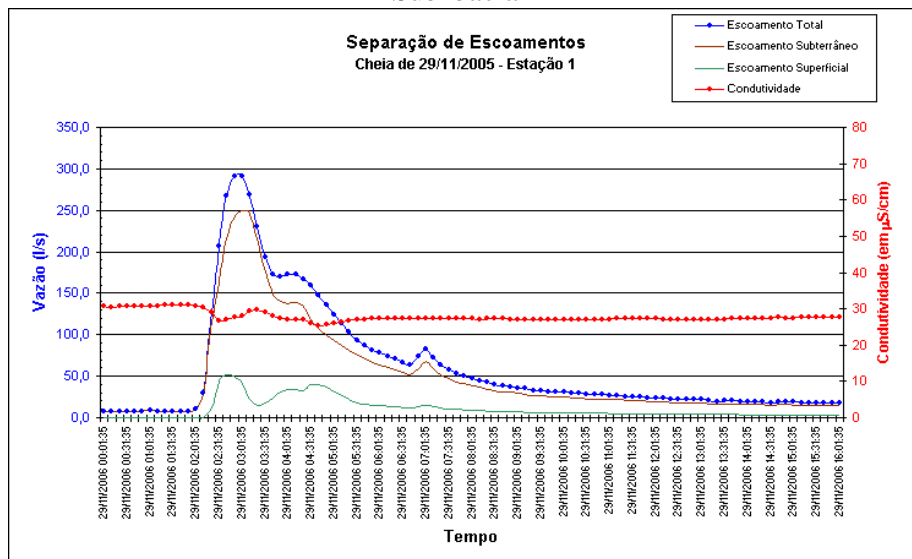
Deve-se observar também que, de uma maneira geral, as porcentagens do escoamento superficial, em relação ao escoamento total, foram menores que as do escoamento subterrâneo. Na Tabela 1 que se segue, são apresentados os valores dessas porcentagens que foram obtidos para os casos das duas cheias.

Tabela 1 – Porcentagens dos escoamentos superficial e subterrâneo nas cheias de 29/11 e 25/12/06

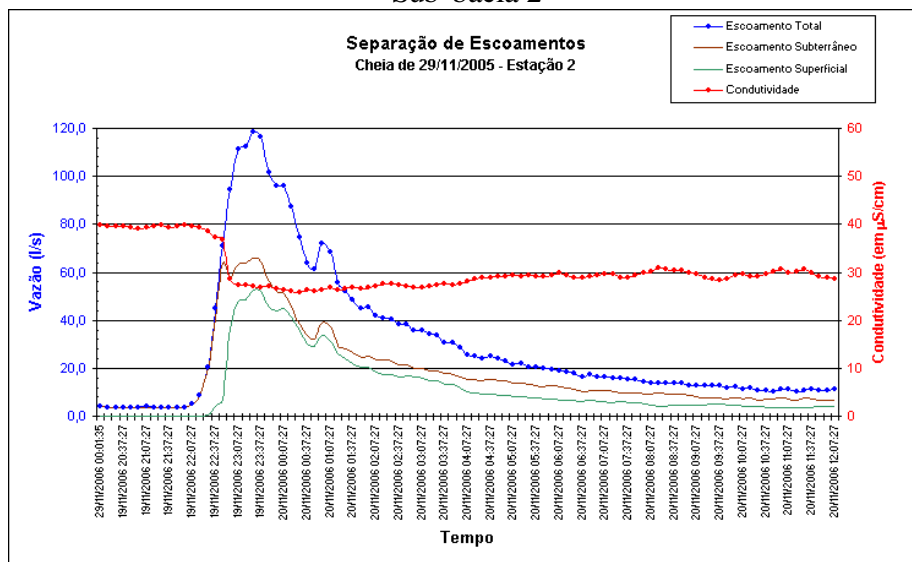
Cheia	Sub-bacia 1		Sub-bacia 2		Sub-bacia 5	
	Esc. Sup.	Esc. Sub.	Esc. Sup.	Esc. Sub.	Esc. Sup.	Esc. Sub.
29/11/2006	17%	83%	40%	60%	30%	70%
25/12/2006	29%	71%	42%	58%	50%	50%

À primeira vista, esses valores parecem discrepantes dos usuais, considerando-se a hipótese de escoamento hortoniano, principalmente por se tratar de bacias com pequena área de drenagem (cerca de 1 km<sup>2</sup>), com terrenos de declividade elevada, onde, normalmente, a contribuição do escoamento superficial é maior. Contudo, estes valores coincidem em ordem de grandeza com os obtidos por outros autores que utilizaram técnicas semelhantes, com o emprego de traçadores (e.g.: Matsubayashi *et al.*, 1993 e Eshleman *et al.*, 1993).

### Sub-bacia 1



### Sub-bacia 2



### Sub-bacia 5

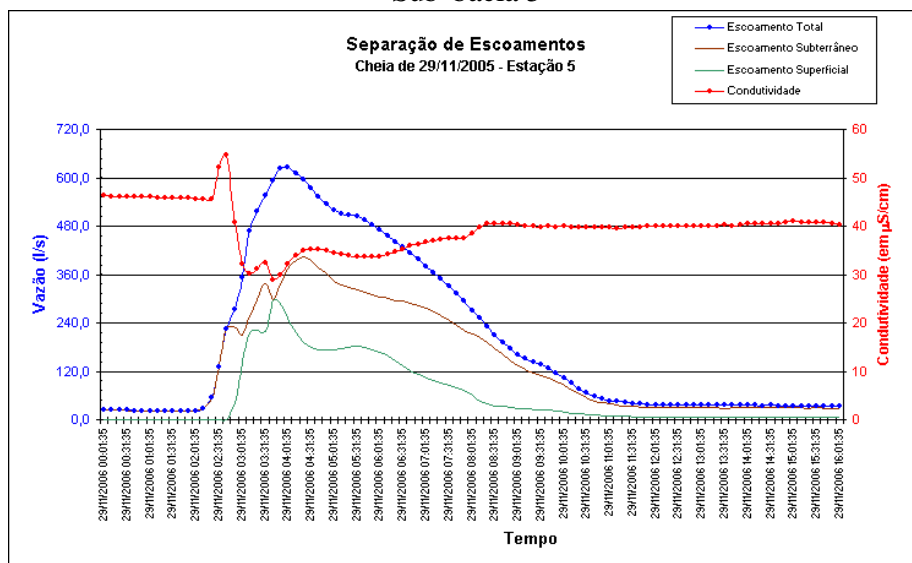
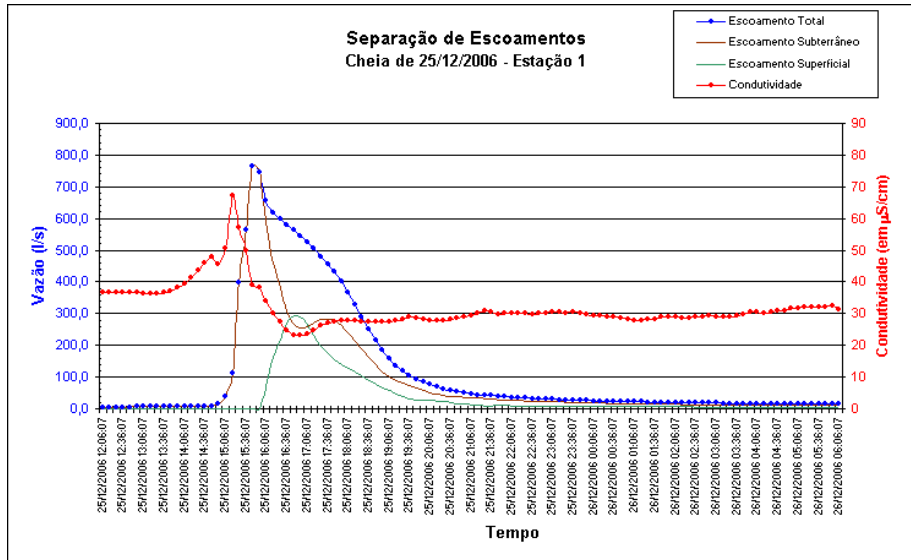


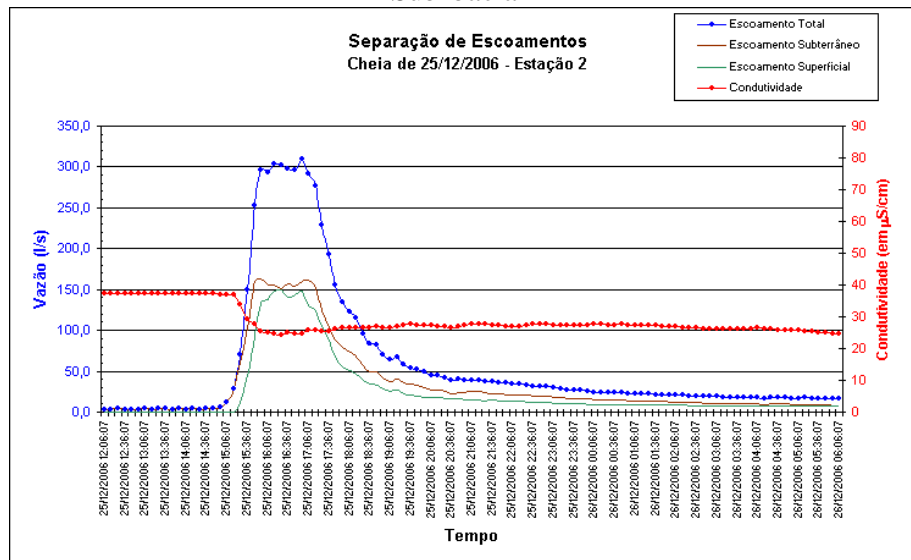
Figura 6 – Separação de escoamento na cheia do dia 29/11/2006



### Sub-bacia 1



### Sub-bacia 2



### Sub-bacia 5

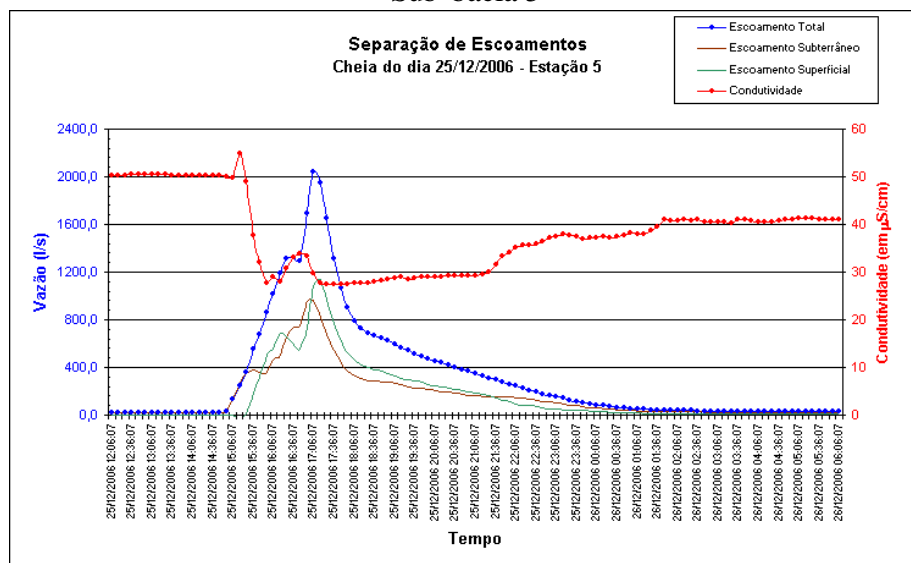


Figura 7 – Separação de escoamento na cheia do dia 25/12/2006

## **5 – CONCLUSÕES**

Ao final do primeiro ano do projeto, não só foram alcançadas as metas inicialmente previstas para o período, como houve um avanço em relação a elas, na medida em que foram desenvolvidas atividades, como os testes de infiltração, que fornecerão subsídios para a realização de estudos adicionais e complementares aos previstos originalmente no projeto.

Com o funcionamento das estações de monitoramento durante o período chuvoso 2006-2007 foi possível avaliar-se o desempenho das sondas ali instaladas e solucionar problemas inerentes à sua operação no campo, como as dificuldades encontradas com os registros de condutividade, de forma a aumentar a confiabilidade do estudo.

Não obstante essas dificuldades, os resultados preliminares do primeiro ano do projeto já permitiram conclusões importantes. Um exemplo é o fato da condutividade elétrica ter mostrado um bom potencial para ser utilizada, na bacia, como traçador no estudo sobre a origem dos escoamentos.

Embora tenham ainda um caráter preliminar, os resultados obtidos indicam que o escoamento subterrâneo pode ter, no caso da bacia em estudo, uma contribuição bem mais significativa que a normalmente considerada na formação de cheias, em consequência de uma provável resposta rápida desse tipo de escoamento a eventos de precipitação.

Na verdade, essa possibilidade já foi constatada por diversos autores, além dos já citados neste trabalho, demonstrando que os processos físicos envolvidos na formação dos escoamentos podem ser bem mais complexos que os considerados na concepção da origem de escoamentos formulada por Horton.

Considera-se, portanto, que os resultados já alcançados tenham revelado a importância da realização de experimentos e de pesquisas sobre o tema em questão, em seus aspectos teóricos e experimentais, para permitir uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na formação dos hidrogramas de cheias.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores expressam a sua gratidão à valorosa equipe executora do projeto de pesquisa, especialmente, aos Engenheiros Antônio Fioravante Neto, Cláudio Costa Camargos, Elenísio Santana Fonseca e Paulo Sérgio Pelógia Minardi, ao Geólogo Paulo César Horta Rodrigues, aos Técnicos Duarte Augusto Costa e Namir de Souza Vieira e aos Motoristas Augusto Francisco Lúcio e Geraldo Moreira Braga, do CDTNCNEN; aos Professores Márcio Benedito Baptista e Mônica Maria Diniz Leão, do EHR/UFMG; aos Bolsistas João Paulo Batista Garofilo e Rafaella Barbosa Teixeira; e aos Leituristas Otávio Custódio Borges e Ana Maria Queiroz Borges; cuja contribuição foi, e continua sendo, imprescindível para a realização do trabalho.



Manifestam, também, os seus sinceros agradecimentos à FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, pelo apoio dado ao projeto de pesquisa, e à equipe executora do projeto “*Estudo dos Processos Hidrológicos em Bacias Representativas do Cerrado e do Semi-Árido Mineiro*”, especialmente ao Professor Luiz Rafael Palmier, do EHR/UFMG, e aos Engenheiros Eber Andrade Pinto, Márcio de Oliveira Cândido, Elizabeth Guelman Davis, ao Geólogo José do Espírito Santo e ao Hidrometrista Júlio, da CPRM-MG, pela contribuição dada no desenvolvimento do trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

AMBROISE, B. (1998). “*Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 1-Processus et facteurs*”. Revue des Sciences de L’Eau, n. 4, pp. 471- 495.

BEVEN, K. (1986). “*Runoff production and flood frequency in catchment of order n: an alternative approach*”. In: Gupta, V.K., Rodriguez-Iturbe e Wood, E.F. *Scale Problems in Hydrology*, Water Sciences and Technology Library, pp.107-132.

CASSIE, D.; POLLOCK, T. L. e CUNJAK, R. A. (1996). “*Variation in stream chemistry an hydrograph separation in a small drainage basin*”. Journal of Hydrology 178, pp. 137-157.

DRUMOND, M. M. (2004). “*A Técnica de traçadores e o seu potencial para ampliar o conhecimento hidrológico sobre as bacias brasileiras: um estudo aplicado à Bacia Representativa de Juatuba-MG*”. Tese de doutorado, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 304 p.

ESHLEMAN, K. N.; POLLARD, J. S. e O’BIEN. A. K. (1993) “*Determination of contributing areas for saturation overland flow from chemical hydrograph separations*”. Water Resources Research, v. 29, n. 10, pp. 3577-3587.

LADOUCHE, B.; PROBST, A.; VIVILLE, D.; IDIR, S.; BAQUÉ, D.; LOUBET, M.; PROBST, J.-L. e BARIAC, T (2001). “*Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France)*”. Journal of Hydrology, 242, pp. 255-274.

LAUDON, H. e SLAYMAKER, O. (1997). “*Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electric conductivity: an alpine example*”. Journal of Hydrology, 201, pp. 82-101.

OGUNKOYA, O.O. e JENKINS, A. (1993) “*Analysis of storm hydrograph an flow pathways using a three-component hydrograph separation model*”. Journal of Hydrology, 142, pp. 71-88.

MATSUBAYASHI, U.; VELASQUEZ, G., T. e TAKAGI, F. (1993). “*Hydrograph separation and flow analysis by specific electrical contuctance of water*”. Journal of Hydrology, 152 pp. 179-199.

TALAMBA, D. et al (2000). “*Study of subsurface flow using environmental and artificial tracers: the Haute-Mentue case, Switzerland*”. In: AIHS proceeding TraM’2000, session 7. pp. 559-564.

TRAVI, Y.; LAVABRE, J.; BLAVOUX, B. e MARTÍN, C. (1994) “*Traçage chimique et isotopique (Cl, <sup>18</sup>O) d’une crue d’automne sur un petit bassin versant Méditerranéen incendié*”. Hydrologic Sciences Journal, 39, 6, pp. 605-619.